



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseau électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
YAGOUB Maroua

Le : dimanche 7 juillet 2019

Amélioration de la stabilité dynamique d'un réseau électrique utilisant les méthodes d'intelligence artificielle

Jury :

Dr	AMRANI Ishaq	MAA	Université d'appartenance	Président
Dr	CHERIET Ahmed	Pr	Université d'appartenance	Examineur
Dr	SALHI Ahmed	MCA	Université d'appartenance	Rapporteur

Année universitaire : 2018 - 2019

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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

**Amélioration de la stabilité dynamique d'un
réseau électrique utilisant les méthodes
d'intelligence artificielle**

Présenté par :

YAGOUB Maroua

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. SALHI Ahmed

Avis favorable du Président du Jury

Mr. AMRANI Ishaq

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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 :

Amélioration de la stabilité dynamique d'un réseau électrique utilisant les méthodes d'intelligence artificielle

Proposé et Dirigé par : Dr. SALHI Ahmed

RESUMES (Français)

Résumé :

La stabilité du réseau électrique occupe une grande importance dans la planification et l'exploitation des. Pour cela, nous essayons d'étudier et d'analyser le système énergétique sous différentes régimes de charge et assurer la stabilité globale du réseau lors de l'apparition de différente perturbation. En utilisant le contrôleur PSS (Power System Stabilizer). Pour la complexité de la détermination des paramétrés, nous avons choisi la méthode des algorithmes génétiques AG pour optimiser les paramètres du PSS. Une analyse des résultats de simulation a été accomplit pour juger les performances des PSS dans le but d'amélioration de la stabilité de réseaux électrique. 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 :

Système de puissance, Stabilité, contrôleur PSS, Machine synchrone, Jeu de barres infini, méthode des algorithmes génétiques.

Dédicace

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Et Je remercie mes sœurs surtout **KELTHOUM** et **DOUNIA** pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis **SABRINA**, **BOUTHAINA**, **LILIA** et **IKRAME** qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.



Remerciement

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directeur de mémoire, **Dr. SALHI AHMED**. Pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs Surtout **Dr. NAIMI DJEMAI**, Mes vifs remerciements au **Dr. AMRANI ISHAQ** et **Dr. CHERIET Ahmed** l'honneur qu'ils m'ont fait pour avoir accepté d'évaluer mon travail, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.*



Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Modèle classique de générateur	17
Figure I.2 : Représentation simplifié d'une machine synchrone	17
Figure I.3 : Principe de la transformation de Park	18
Figure I.4 : diagramme de phase pour la $i^{ème}$ machine d'un système multi machines.....	20
Figure I.5 : Couples mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.....	22
Figure I.6 : Structure générale d'un système de force motrice – générateur.....	23
Figure I.7 : Modèle de la turbine et du gouverneur.....	24
Figure I.8 : système d'excitation statique ST-1A avec AVR	25
Figure I.9 : Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1A.....	25
Figure I.10 : Modèle simplifié de transformateur.....	27
Figure I.11 : Modèle en π d'une ligne de transmission	28
Figure I.12 : Modélisation d'une charge par son admittance équivalente.....	28
Figure I.13 Digramme de l'ensemble des blocs du système de puissance	31

Chapitre II

Figure II.1 : Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation du générateur Synchrone puissant	34
Figure II.2 : Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.....	36
Figure II.3 : Variation d'angle de rotor	37
Figure II.4 : synchrone connectée à un jeu de barre infini	38
Figure II.5 : Relation puissance- angle de rotor	38

Liste des figures

Figure II.6 : Représentation de (T_m, T_r, D)	43
Figure II.7 : Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système	44
Figure II.8 : Modèle d'un PSS avance/retard	44

Chapitre III

Figure III.1 : Démarches de résolution d'un problème d'optimisation	48
Figure III.2 : Concepts de base d'un algorithme génétique.....	49
Figure III.3 : Exemple de sélection en roulette	50
Figure III.4 : Exemple de croisement en multi point	51
Figure III.5 : Exemple de mutation	51
Figure III.6 : Organigramme général de l'algorithme génétique	53

Chapitre IV

Figure IV.1 : Schéma fonctionnel d'un Système d'excitation avec l'AVR	55
Figure IV.2 : Structure générale d'un système de puissance.....	56
Figure IV.3 : Déviation de couple électromagnétique (pu) sans PSS	59
Figure IV.4 : Erreur (pu) sans PSS	59
Figure IV.5 : Déviation de vitesse angulaire (rad/sec) sans PSS	60
Figure IV.6 : Déviation de position angulaire (rad) sans PSS	60
Figure IV.7 : Schéma bloc fonctionnel avec l'AVR et le PSS	62
Figure IV.8 : Déviation de couple électromagnétique (pu) avec PSS	64
Figure IV.9 : Erreur (pu) avec PSS	64
Figure IV.10 : Déviation de vitesse angulaire (rad/s) avec PSS	65
Figure IV.11 : Déviation de position angulaire (rad) avec PSS	65
Figure IV.12 : L'évolution de l'algorithme génétique de système avec PSS	66

Liste des figures

Figure IV.13 : Déviation de couple électromagnétique (pu) avec et sans PSS	67
Figure IV.14 : Erreur (pu) avec et sans PSS	67
Figure IV.15 : Déviation de vitesse angulaire (rad/s) avec et sans PSS.....	68
Figure IV.16 : Déviation de position angulaire (rad) avec et sans PSS.....	68
Figure IV.17 : L'évolution de l'algorithme génétique de système avec PSS.....	69

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

Tableau II.1 : Incidents suivis d'un effondrement	41
Tableau II.2 : Incidents non suivis d'un effondrement.....	41

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Analyse du système avec faibles charges	57
Tableau IV.2 : Analyse du système avec moyenne charges	58
Tableau IV.3 : Analyse du système avec grandes charges	58
Tableau IV.4 : Analyse du système avec l'augmentation de la puissance réactive.....	62
Tableau IV.5 : Plages de variation des paramètres du PSS	62
Tableau IV.6 : Parametre de l'algorithme génitique	63
Tableau IV.7 : Les paramètres de PSS après l'optimisation sur les cas instables	63
Tableau IV.8 : Paramètre de PSS avant l'optimisation	64
Tableau IV.9 : Paramètre de PSS après l'optimisation	67

Liste des abréviations et des Symboles

Liste des abréviations et des Symboles

Abréviations:

SMIB: Single Machine Infinity Bus

PSS: Power System Stabilizers

PID: proportionnel intégrateur dérivateur

AVR: Automatique Voltage Régulateur

FACTS: Flexible alternatif curant transmission systèmes

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

JB : jeu de barre

Err : Erreur

AG : Algorithmes Génétique

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)

Liste des abréviations et des Symboles

ϕ : Flux maximum à travers un enroulement (Wb)

X : Réactance synchrone (pu)

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)

Liste des abréviations et des Symboles

T_{e_i} : Couple électromagnétique associée à la puissance électrique P_{e_i} produite du générateur,

($T_{e_i} = P_{e_i} \omega_i$) en (pu)

D_i : Coefficient d'amortissement du générateur i

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

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 régimes de charge et assurer la stabilité globale du réseau lors de l'apparition de différente perturbation. En utilisant le contrôleur PSS (Power system stabilizer). Pour la complexité de la détermination des paramètres, nous avons choisi la méthode des algorithmes génétiques AG pour optimiser les paramètres du PSS. Une analyse des résultats de simulation a été accompli pour juger les performances des PSS dans le but d'amélioration de la stabilité de réseaux électrique. 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 :

Système de puissance, Stabilité, contrôleur PSS, Machine synchrone, Jeu de barres infini, méthode des algorithmes génétiques.

ملخص:

إن استقرار الشبكة الكهربائية له أهمية كبيرة في التخطيط وتشغيل. 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 معاملاتنا اخترنا طريقة الخوارزميات الجينية AG من أجل إيجاد قيم مثلى لمعاملات النظام وقد تم إجراء تحليل نتائج المحاكاة على أداء PSS من أجل تحسين استقرار الشبكة الكهربائية. نموذج الدراسة يتكون من آلة متزامنة موصولة بقضيب تجميعي مالا نهائي عبر خط نقل كهربائي.

كلمات المفتاحية :

نظام الطاقة، الاستقرار، نظام التحكم PSS، ماكينة متزامنة، قضيب تجميعي مالا نهائي، الخوارزميات الجينية.

Sommaire

Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iv
Liste des abréviations et des symboles.....	v
Résumé.....	viii
Introduction générale.....	xv

Chapitre I : Modélisation des éléments du réseau électrique

I.1 Introduction :.....	16
I.2 Le modèle général des éléments :.....	16
I.2.1 Le champ tournante de machine synchrone :.....	16
I.2.2 f.é.m. induite :.....	16
I.2.3.1 Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park:.....	17
I.2.3.2 Les hypothèses du modèle :.....	18
I.2.3.3 Equations électriques :.....	19
I.2.3.4 Equation mécanique :.....	21
I.2.3.5 Régulation de la machine :.....	23
I.2.3.6 Régulateur de fréquence et modèle de la turbine :.....	23
I.2.3.7 Régulateur de tension et modèle du système d'excitation :.....	24
I.2.4 Modèle du réseau de transport :.....	26
I.2.4.1 Modélisation de transformateurs :.....	26
I.2.4.2 Modèle des lignes de transport :.....	27
I.2.4.3 Modèle des charges :.....	28
I.3 Les équations d'état généralisé du modèle :.....	29
I.4 Conclusion :.....	32

Sommaire

Chapitre II : Stabilité de réseau électrique

II.1 Introduction :	33
II.2 Définition :	33
II.2.1 Réseau infini:	33
II.2.2 Synchronisme:	33
II.2.3 Système électro-énergétique :	33
II.3 La stabilité de réseau électrique :	33
II.3.1 Définition :	33
II.3.2 Stabilité d'un système électro-énergétique :	34
II.3.3 Description générale du système électro-énergétique étudié :	34
II.3.4 La classification de la stabilité de réseau électrique :	35
II.3.4.1 La stabilité angulaire :	36
II.3.4.2 Stabilité de tension:	39
II.3.4.3 La stabilité de fréquence :	40
II.3.5 Stabilité statique :	40
II.3.6 Les cause d'instabilité :	41
II.3.7 Incidents liées à l'instabilité dans le monde :	41
II.3.8 Amélioration de la stabilité transitoire :	41
II.4 Généralité sur les systèmes asservis :	41
II.4.1 Définition :	41
II.4.1.1 Régulation :	41
II.4.1.2 Grandeur réglée :	42
II.4.1.3 Grandeur réglant :	42
II.4.1.4 Grandeurs perturbatrices :	42
II.4.1.5 L'organe de réglage :	42
II.4.2 Objectif de la régulation automatique :	42

Sommaire

II.4.3 Caractéristiques dynamiques d'un procédé :.....	42
II.4.3.1 Temps de réponse (T_r) :.....	42
II.4.3.2 Temps de montée (T_m) :.....	42
II.4.3.3 Dépassement (D) :.....	43
II.5 Stabilisateur PSS :.....	43
II.5.1 Fonctionnement et modèle de PSS :.....	43
II.5.2 Définition bloc de PSS :.....	44
II.5.2.1 L'amplificateur :.....	44
II.5.2.2 Filtre passe-haut "filtre washout" :.....	45
II.5.2.3 Filtre compensation de phase :.....	45
II.5.2.4 Limiteur :.....	45
II.5.3 Emplacement optimal des PSS :.....	46
II.6 Conclusion :.....	46

Chapitre III : Optimisation par algorithmes génétiques

III.1 Introduction :.....	47
III.2 Définition de l'optimisation :.....	47
III.3 Méthodologie de conception :.....	47
III.4 Formulation du problème d'optimisation :.....	48
III.5 Algorithme génétique :.....	48
III.5.1 Historique:.....	48
III.5.2 Définition de l'algorithme génétique :.....	49
III.5.3 Les opérateurs d'un AG :.....	50
III.5.3.1 Nombre de population :.....	50
III.5.3.2 Sélection :.....	50
III.5.3.3 Croisement :.....	51
III.5.3.4 Mutation :.....	51

Sommaire

III.5.4 Les paramètres de réglage de l'algorithme génétique :.....	52
III.5.4.1 Taille de la population N_{ind} :.....	52
III.5.4.2 Probabilité de croisement P_c :.....	52
III.5.4.3 Probabilité de mutation P_m :.....	52
III.5.5 L'organigramme de l'algorithme génétique :.....	53
III.6 Conclusion :.....	54

Chapitre IV : Application à l'analyse de la stabilité dynamique

IV.1 introduction :.....	55
IV.2 Modèle d'étude dans le MATLAB/SIMULINK :.....	55
IV.3 Analyse du système sans PSS :.....	57
IV.3.1 Analyse du système pour différents régimes :.....	57
IV.3.1.1 Analyse avec les faibles charges (faible puissance) :.....	57
IV.3.1.2 Analyse avec les moyennes charges (moyenne puissance) :.....	57
IV.3.1.3 Analyse avec les grandes charges (grandes puissance) :.....	58
IV.3.2 Les courbes de $\Delta\delta, \Delta\omega, Err, \Delta Te$ de système sans PSS :.....	58
IV.3.3 Les Effets de la puissance réactive sur la stabilité du système énergétique :.....	61
IV.4 Analyse du système avec Le contrôleur PSS :.....	61
IV.4.1 Optimisation les paramètres de PSS avec les algorithmes génétiques :.....	62
IV.4.2 Réglage les paramètres de PSS par les algorithmes génétiques pour les cas instable du modèle :.....	63
IV.4.3 Les courbes de $\Delta\delta, \Delta\omega, Err, \Delta Te$ de système avec le régulateur PSS :.....	63
IV.5 Amélioration la stabilité dynamique avec le contrôleur PSS :.....	66
IV.6 Conclusion :.....	69
Conclusion générale	xi
Annexe A	xiii
Bibliographie	xix

Introduction générale

L'une des formes d'énergie les plus utilisées à l'heure actuelle par l'homme est l'énergie électrique. Parce qu'elle joue un rôle clé dans le développement humain et économique ainsi que dans le bien-être de la société. Néanmoins, elle présente deux particularités: elle n'est pratiquement pas disponible dans la nature et elle ne peut être stockée.

En conséquence, toute l'énergie produite doit être transférée pour livraison automatique aux consommateurs, c'est-à-dire qu'il faut veiller à établir un équilibre durable entre production et consommation. Avec le développement du monde industriel, la demande pour cette énergie est importante et en augmentation constante, nous devons donc fournir de grandes entreprises et des installations pour la production, le transport et la distribution répondant à tous ces besoins en quantité et en qualité.

Dans ces conditions, la stabilité des systèmes de puissance devient une des préoccupations majeures pour les fournisseurs d'électricité. Ces systèmes doivent rester stables pour toutes les petites variations au voisinage des points de fonctionnement ainsi que pour des conditions sévères. Les nouvelles méthodes et les nouvelles technologies permettant d'améliorer la stabilité des systèmes font par conséquent l'objet de travaux de recherche extrêmement importants. En raison de la diversité des conditions de fonctionnement et de la gravité des accidents, les équipements de contrôle actuellement installés sur les réseaux peuvent être trop limités ou insuffisants pour répondre efficacement à diverses perturbations. En conséquence, les opérateurs de réseau cherchent à améliorer leur fonctionnement tout en maintenant un niveau de sécurité satisfaisant.

Pour garder un système énergétique en état stable pour différents régimes de fonctionnement, on peut exploiter les systèmes de contrôle au niveau des centrales électriques plus particulièrement Le Régulateur Automatique de Tension (AVR) et le Régulateur de Vitesse ou Gouverneur qui sont caractérisées par un échange faiblement amorti de puissance électrique entre deux ou plusieurs zones du réseau. L'AVR et le Gouverneur ne peuvent donc pas garantir à eux seuls le bon fonctionnement des réseaux électriques sans l'aide d'un système de réglage supplémentaire. De nombreux systèmes ont été développés pour diminuer ces risques depuis de nombreuses années tels que les systèmes de réglage qui s'imposent comme des solutions pour amortir ces oscillations (comme PID, PSS et les systèmes FACTS) et rendre les réseaux électriques plus stables.

Introduction générale

C'est dans cet objectif que s'inscrit notre thème qui propose un système de réglage qui est le PSS pour améliorer la stabilité des réseaux électriques, plus particulièrement la stabilité dynamique et aussi analysé le système énergétiques aux des différentes régimes (petite, moyenne et grande). D'où la nécessité de faire recours aux méthodes d'optimisation globale pour le choix des paramètres des systèmes de réglage.

Pour cela notre mémoire propose une optimisation des paramètres du PSS en utilisant la méthode des algorithmes génétiques. C'est dans cet objectif que s'articule notre travail qui sera organisé de la façon suivante :

- Le premier chapitre donne, au début, les différentes définitions de base puis 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 de générateur jusqu'à les charges.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différents types de stabilité du système de puissance. avec une petite introduction de systèmes pour l'amélioration de la stabilité électrique et aussi consacré à la présentation des types, caractéristiques, réglage des paramètres et l'emplacement de PSS (power system stabilizer).
- Le troisième chapitre sera consacré à l'optimisation par les algorithmes génétiques (AG) qui est inspiré vocabulaire similaire à celui de la génétique naturelle et cela pour l'appliquer sur les systèmes d'amélioration de la stabilité du système électro-énergétique.
- Le quatrième chapitre fera l'objet d'implantation de la technique d'AG, 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. La simulation des modèles étudiés est faites sur le logiciel MATLAB/ /SIMULINK.

Dans ce travail, l'optimisation par les algorithmes génétiques (AG) est appliquée pour déterminer les paramètres optimaux du contrôleur PSS qui sont destinés pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. Le modèle d'étude est celui d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini à travers une ligne de transmission (SMIB). Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale.



CHAPITRE. I :

Modalisation des éléments du réseau électrique

I.1 Introduction :

Le système énergétique est l'ensemble des équipements électriques qui assurent la livraison de l'énergie à tous les consommateurs. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. L'ensemble des systèmes électriques comporte en gros trois sous-systèmes:

- Production (génératrice)
- Transport, et distribution (lignes)
- Les Consommateurs (Les charges)

L'importance d'analyser et de contrôler le système électrique est de créer un bon modèle mathématique. Un modèle d'analyse de système est généralement un ensemble d'équations ou de relations décrivant de manière appropriée les interactions entre les différentes variables étudiées.

Dans ce chapitre, nous présentons de façon plus détaillée la modélisation des éléments constituant le réseau électrique (les générateurs, les charges, ainsi que les lignes et les transformateurs) et sera discuté le modèle d'état du système électrique pour améliorer les comportements dynamiques du système.

I.2 Le modèle général des éléments :

I.2.1 Le champ tournante de machine synchrone :

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

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

I.2.2 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]

$$E = K \cdot N \cdot \Phi \cdot f = K \cdot N \cdot \Phi \cdot P \cdot n_s = K' \cdot \Phi \cdot n_s \quad (\text{I.2})$$

$$\text{Finalement : } E = K' \cdot \Phi \cdot n_s \quad (\text{I.3})$$

I.2.3 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 [YAH 14].

Où en même temps les générateurs synchrones participent de façon extrêmement importante aux phénomènes dynamiques. Il est donc nécessaire de développer des modèles pratiques et réalistes des machines synchrones. La figure I.1 représente le modèle classique de générateur.

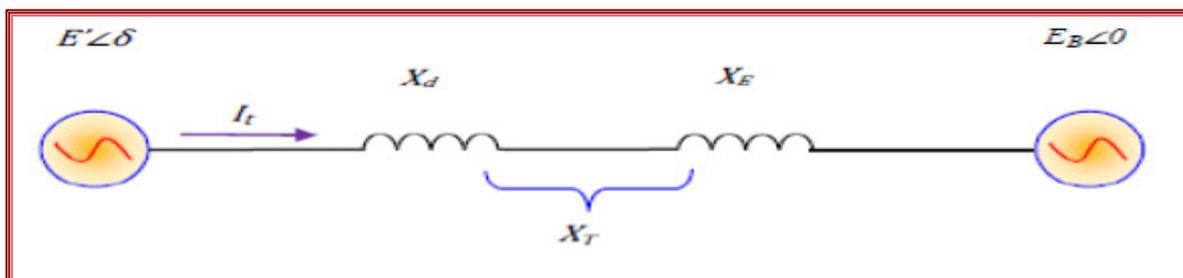


Figure I.1 Modèle classique de générateur.

La représentation de la machine synchrone utilisée pour la solution du réseau et le diagramme de phase sont schématisés dans la [BOU09] figure I.2 suivante :

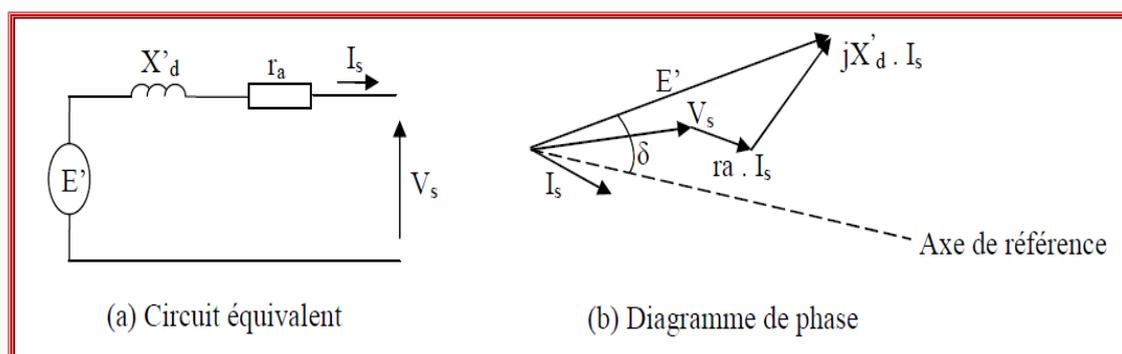


Figure I.2 Représentation simplifiée d'une machine synchrone

I.2.3.1 Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park :

Dans la machine idéale, le stator est muni de trois enroulements repérés a, b et c, décalés de 120 degrés. Le rotor comporte un certain nombre d'enroulements, répartis sur deux axes: l'axe-d, (axe direct) qui coïncide avec celui de l'enroulement d'excitation et l'axe-q (axe quadratique) situé en quadrature avance par rapport à l'axe direct [CUS 02]. Pour supprimer la non-linéarité entre les grandeurs du stator et celles du rotor, les enroulements de la machine doivent être ordonnés selon deux axes perpendiculaires, chaque machine est modélisée dans sa référence locale (d - q) tournant avec son rotor [AND 06]. Pour formaliser le couplage entre les équations du

système et établir les équations décrivant le comportement du système global, tous les tensions et tous les courants doivent être représentés dans une seule référence commune à tous les machines généralement, une référence tournant à la vitesse synchrone sert de référence commune. Une telle approche peut être réalisée par la transformation de Park.

Les différents enroulements dans les deux représentations sont les suivants :

- Les trois enroulements statoriques notés a , b et c , et leurs enroulements équivalents notés d_s et q_s .
- L'axe direct comporte l'enroulement d'excitation noté f , et un enroulement amortisseur noté d_a .
- L'axe en quadrature comporte un enroulement amortisseur noté q_a . Notons enfin que l'enroulement d'excitation est soumis à une tension V_f tandis que les circuits d_a , q_a sont court-circuités en permanence [HAS08].

La figure (I.3) représenté la transformation de Park sur la machine synchrone

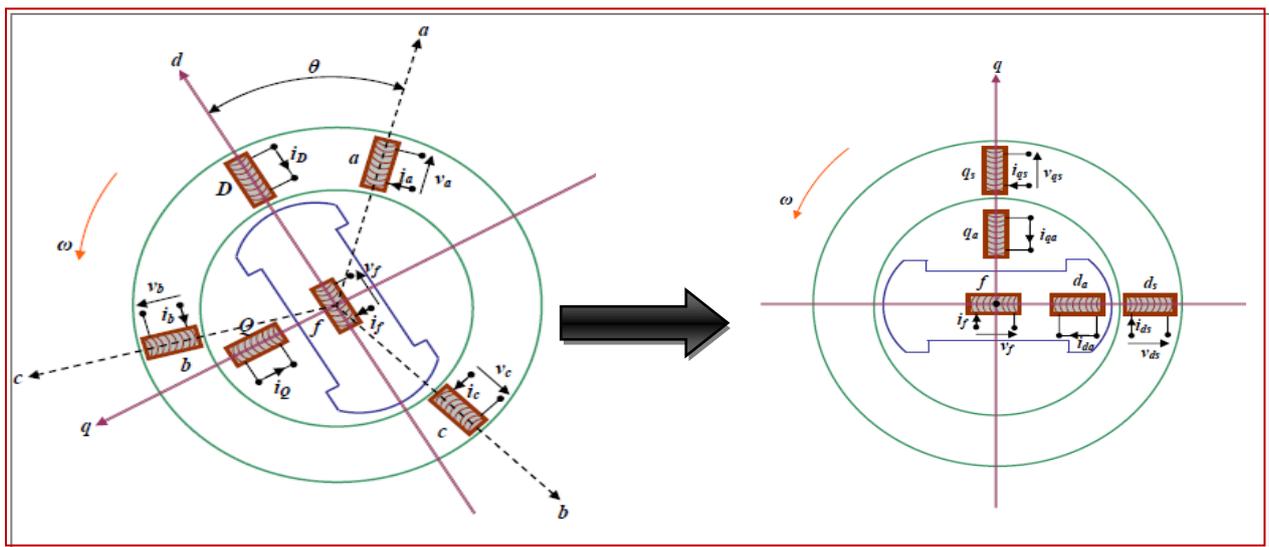


Figure I.3 Principe de la transformation de Park

I.2.3.2 Les hypothèses du modèle :

Le modèle du générateur et de ses contrôles se limite habituellement aux équations différentielles ordinaires couplées entre elles via les équations algébriques du réseau de transport. Chaque équation différentielle exprime la dérivée d'une variable d'état en fonction d'autres

variables d'état et variables algébriques. Il existe plusieurs modèles, allant du plus simple, le modèle classique représentant seulement les caractéristiques électromécaniques du générateur, au plus complexe. Les hypothèses considérées pour établir ce modèle sont basées en négligeant l'influence :

- des résistances rotoriques et statoriques.
- des enroulements amortisseurs.
- du champ de saturation.
- des phénomènes transitoires dans le stator.
- de la variation de vitesse dans les équations de tensions du stator (ainsi, $\omega_r = \omega_0 = 1$ pu cette supposition est faite pour compenser l'effet de l'annulation des phénomènes transitoires dans le stator).

Ce modèle néglige également l'amortissement produit par les courants de foucault dans le corps du rotor (on suppose que la *f.é.m.* transitoire suivant l'axe d , à savoir E'_d , est constante). Ainsi, comme il n'y a aucun enroulement sur l'axe en quadrature pour représenter le corps du rotor, nous aurons:

$$E'_d = 0 \quad ; \quad X'_q = X_q$$

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

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

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

Enfin, nous supposons que l'angle de rotor δ (position angulaire du rotor par rapport à la référence tournante au synchronisme) coïncide avec l'angle de la tension interne du générateur. Le modèle résultant est le modèle du troisième ordre. Il est décrit par les variables d'état suivants [AND 03]:

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

ω : vitesse angulaire du rotor, en (pu).

δ : Angle de rotor, en (rad).

Ce modèle, bien adapté à l'étude de la stabilité dynamique, est le plus simple. Il est largement utilisé dans l'analyse des valeurs propres et le réglage des paramètres des stabilisateurs de puissance [SAU 98].

I.2.3.3 Equations électriques :

Le diagramme de phase d'un réseau multi machines peut être décrit dans la figure I.4 Les variables de la $i^{ème}$ machine définies par rapport aux axes d_i et q_i peuvent être exprimés pour tous machines suivant un système unique d'axes D et Q [FRG14].

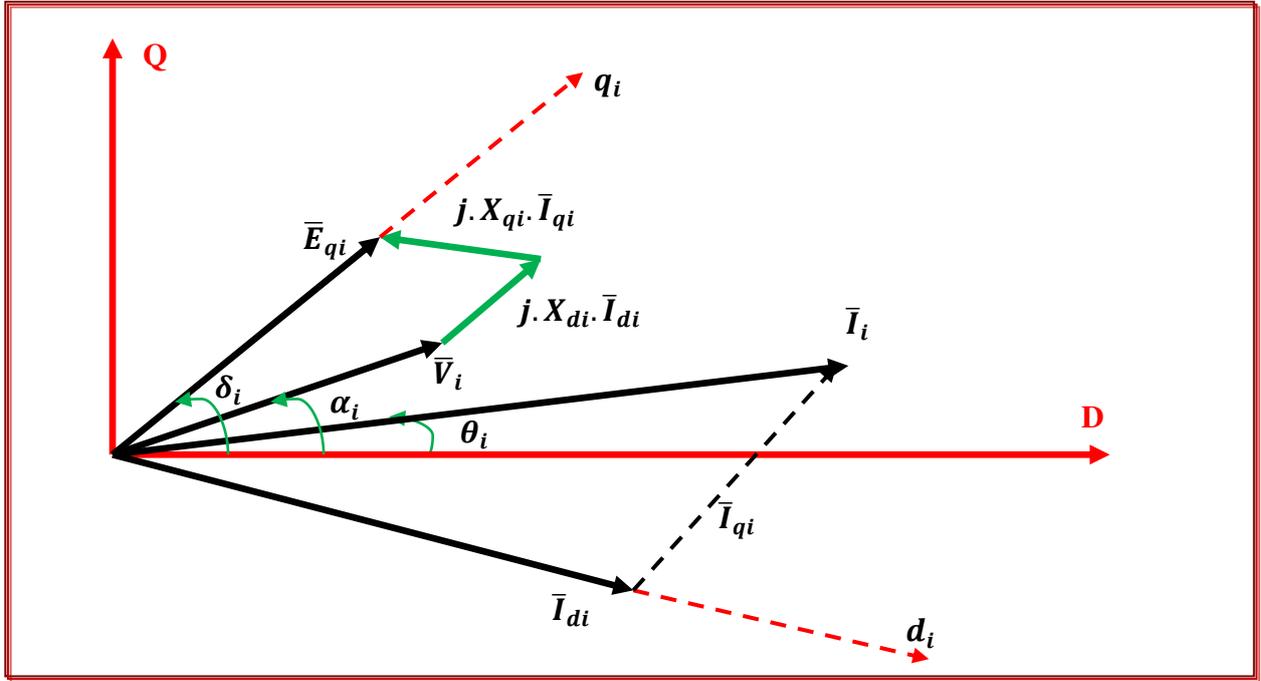


Figure I.4 Diagramme de phase pour la $i^{ème}$ machine d'un système multi machines

D'après la figure I.4, la tension terminale V_i de la $i^{ème}$ machine du système peut se déterminer par l'équation suivante :

$$\bar{V}_i = \bar{E}'_{qi} - j \cdot X'_{di} \times \bar{I}_{di} - j \cdot X_{qi} \times \bar{I}_{qi} \quad (I.4)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{E}'_{qi} &= E'_{qi} \times e^{j\delta_i} \\ \bar{I}_{qi} &= I_{qi} \times e^{j\delta_i} \quad , \quad \bar{I}_{di} = I_{di} \times e^{j(\delta_i-90)} \\ \bar{V}_i &= V_i \times e^{j\alpha_i} \end{aligned} \quad (I.5)$$

En introduisant les relations (I.4) dans la relation (I.5), nous obtenons :

$$V_i = E'_{qi} \times e^{j\delta_2} - X_{di} \times I_{di} \times e^{j\delta_2} - jX_{qi} \times I_{qi} \times e^{j(\delta_2+90)} \quad (I.6)$$

Qui devient après arrangement:

$$V_i \times e^{-j(\delta_2-\alpha_2)} = E'_{qi} - X_{di} \times I_{di} - jX_{qi} \times I_{qi} \quad (I.7)$$

$$V_i \times \cos(\delta_i + \alpha_i) - jV_i \sin(\delta_i - \alpha_i) = E'_{qi} - X_{di} \times I_{di} - jX_{qi} \times I_{qi} \quad (I.8)$$

En séparant partie réelle et partie imaginaire, nous obtenons les expressions de V_{di} et V_{qi} suivantes

$$\begin{cases} V_{di} = X_{qi} \times I_{qi} \\ V_{qi} = E_{qi} - X'_{di} \times I_{di} \end{cases} \quad (I.9)$$

En considérant les relations (I.5) et la relation suivante : $I_i = I_{di} + I_{qi}$ L'équation (I.4) peut être donc réécrite comme suit :

$$\bar{V}_i = E'_{qi} \times e^{-j\delta_1} - jX'_{di} \times \bar{I}_i + jX'_{di} \times e^{-j\delta_1} - jX_{qi} \times I_{qi} e^{-j\delta_1} \quad (I.10)$$

Pour n machines d'un système multi-machines, l'équation (I.10) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[\bar{V}] = [E'_q][e^{-j\delta_1}] - j[X'_d][\bar{I}] + j[X'_d][e^{-j\delta_1}] - j[X_q][I_q][e^{-j\delta_1}] \quad (I.11)$$

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 $i^{ème}$ machine sont données par

$$\begin{aligned} \bar{S}_i = P_{ei} + jQ_{ei} &= \bar{V}_i \bar{I}_i^* = (V_{di} + jV_{qi})(I_{di} - jI_{qi}) = \bar{S}_i \\ &= (V_{di} I_{di} + V_{qi} I_{qi}) + j(V_{qi} I_{di} - V_{di} I_{qi}) \end{aligned} \quad (I.12)$$

$$\begin{cases} P_{ei} = V_{di} \cdot I_{di} + V_{qi} \cdot I_{qi} \\ Q_{ei} = V_{qi} \cdot I_{di} - V_{di} \cdot I_{qi} \end{cases} \quad (I.13)$$

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.2.3.4 Equation mécanique :

Usuellement la puissance fournie par l'ensemble des machines compense exactement la totalité des puissances demandées et les pertes dans le réseau. Tant qu'aucune perturbation n'affecte le système, les écarts entre les angles internes des différents alternateurs demeurent constants.

L'apparition d'un défaut provoque une rupture entre la production et la consommation. Deux cas se présentent :

- ✓ La perturbation est de faible amplitude et lente. Les organes de régulation se chargent de rétablir l'équilibre.
- ✓ La perturbation est de grande amplitude. Le déséquilibre entre la production et la consommation est responsable de l'évolution des angles internes. Les automates de protection interviennent alors en éliminant l'organe affecté. Un régime transitoire va s'instaurer conduisant à un nouveau régime d'équilibre ou à une désynchronisation des machines. [GHO 03]

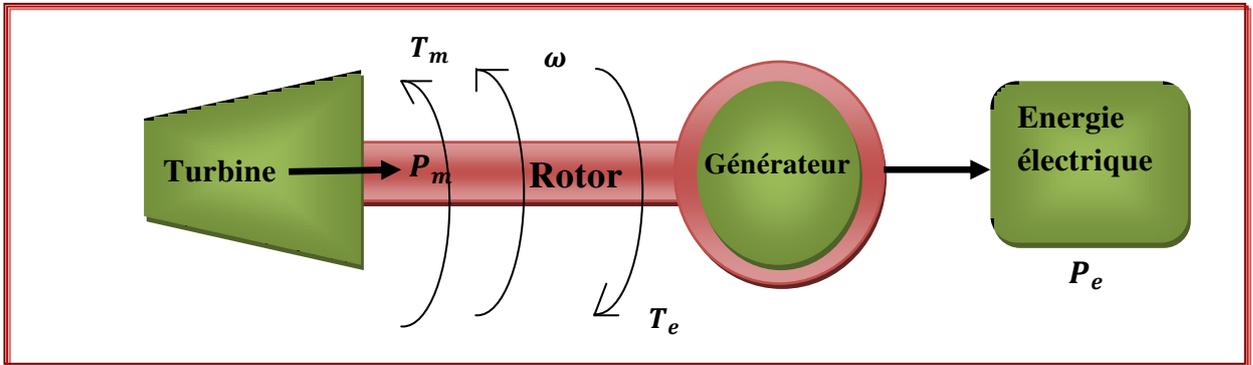


Figure I.5 Couples mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.

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

$$\begin{cases} \frac{H}{\pi f} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \\ \Delta\dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (T_{mi} - T_{ei}) \end{cases} \quad (I.14)$$

$$\Delta\dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (T_{mi} - T_{ei} - D(\Delta\omega_i - 1)) \quad (I.15)$$

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

$$\Delta\dot{\delta}_i = \omega_0 (\Delta\omega_i - 1) = \omega_0 \times \Delta\omega \quad (I.16)$$

$$\Delta\omega_r = (\Delta\omega_i - 1)$$

Avec :

T_{ei} : Couple électromagnétique associée à la puissance électrique P_{ei} produite par l' $i^{ème}$ 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).

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

δ : Angle de rotor, en (rad).

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

$i= 1, \dots, n$ [FRE 14].

I.2.3.5 Régulation de la machine:

Les machines synchrones du système doivent être capable de maintenir l'équilibre des puissances actives et des puissances réactives dans des conditions de fonctionnement diverses. Ainsi, des tensions sinusoïdales équilibrées sont garanties avec des amplitudes et des fréquences constantes. Si l'équilibre des puissances actives n'est plus assuré, la fréquence de synchronisme dans le système sera changée, alors qu'un déséquilibre des puissances réactives entraînera une variation des tensions du système par rapport à leurs valeurs de référence [AND 06].

Pour assurer une génération satisfaisante d'énergie électrique pour un grand nombre de points de fonctionnement, le couple mécanique T_m appliqué au rotor et la tension d'excitation E_{af} doit être réglés systématiquement pour s'accommoder de toute variation du système [AND 03].

Nous présentons par la suite successivement les principes généraux :

- Génération de puissance mécanique avec la régulation de fréquence.
- Du système d'excitation avec la régulation de tension et leurs modèles mathématiques.

I.2.3.6 Régulateur de fréquence et modèle de la turbine :

Un système de force motrice, figure (I.6) se compose de la source d'énergie primaire, de la turbine (équipé d'un servomoteur) et du régulateur de fréquence (gouverneur) [FAR 06].

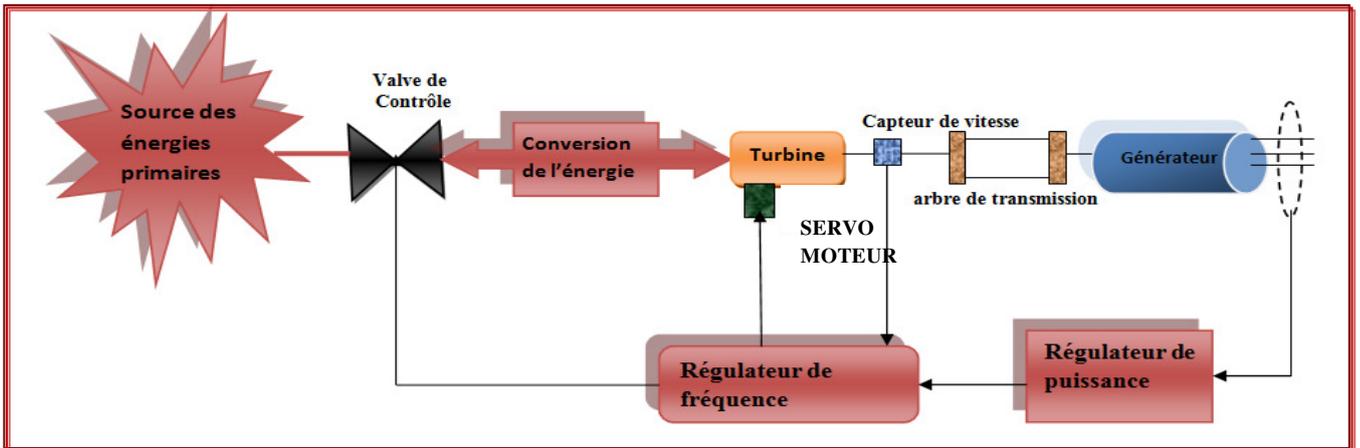


Figure I.6 Structure générale d'un système de force motrice - générateur.

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

Le modèle de l'ensemble turbine à vapeur/gouverneur utilisé en simulation dynamique du modèle non-linéaire est représenté par la [HAS 08] figure I.7

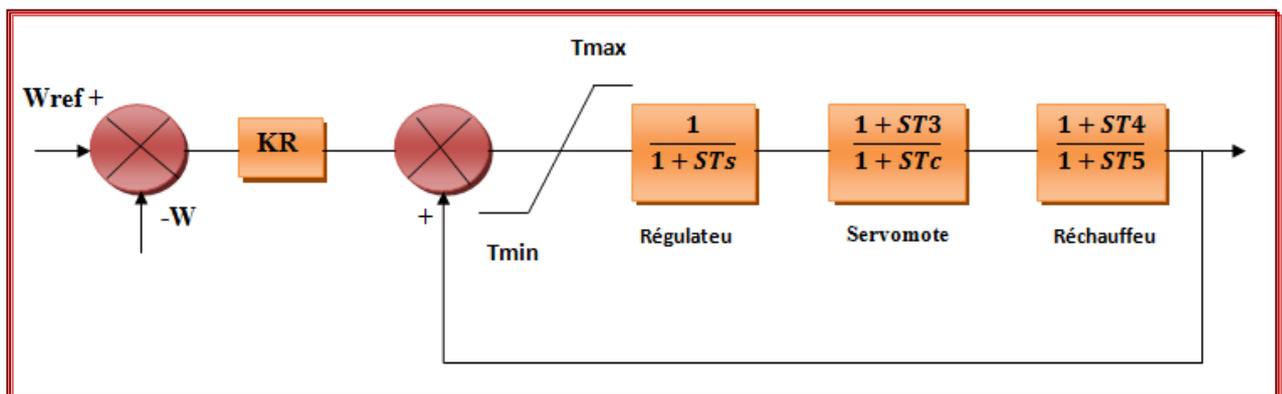


Figure I.7 Modèle de la turbine et du gouverneur.

I.2.3.7 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. Il existe plusieurs types de système d'excitation pour les réseaux électriques :

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

Pour l'excitatrice à courant continu, la tension d'excitation provient d'un générateur auxiliaire à courant continu avec collecteur comme source de puissance du système d'excitation.

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

L'excitatrice à courant alternatif est composée d'une génératrice à courant alternatif dont la sortie est redressée par un convertisseur CA-CC.

c)- Les systèmes d'excitation statiques (systèmes ST) :

Il y a l'excitatrice statique dans laquelle la tension aux bornes du générateur est directement redressée puis utilisée comme tension d'excitation [CUS 02]. Nous avons choisi dans cette étude d'utiliser le modèle du système IEEE-ST1A, modèle le plus utilisé dans la littérature [TAR 10], [NES 08]. La figure I.8 représenté système d'excitation statique ST-1A avec AVR

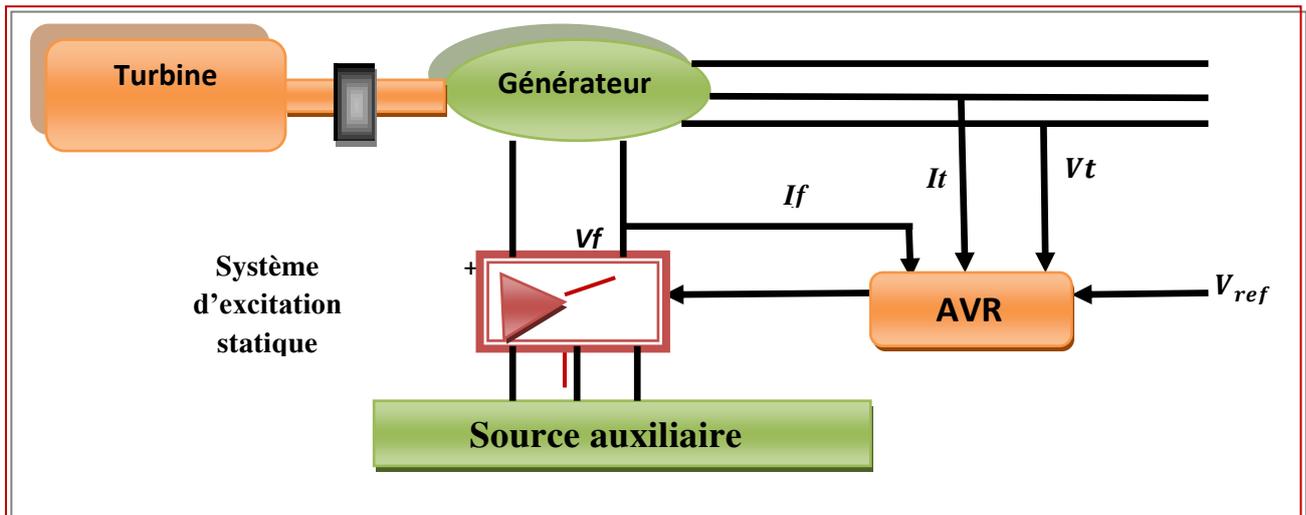


Figure I.8 système d'excitation statique ST-1A avec AVR

Le groupe IEEE tâche forces présente périodiquement des recommandations pour la modélisation des éléments d'un système de puissance dont les systèmes d'excitation. Plusieurs modèles sont suggérés pour chaque type de système d'excitation [IEE 05]. Ce type de système d'excitation se caractérise par sa rapidité et sa sensibilité [IEE 03] :

- Sa constante de temps T_a est faible, normalement de l'ordre de quelques millisecondes.
- Son gain K_a est élevé, généralement entre 200 et 400 (pu).

La figure suivante montre le modèle du système d'excitation et de son régulateur de tension utilisé.

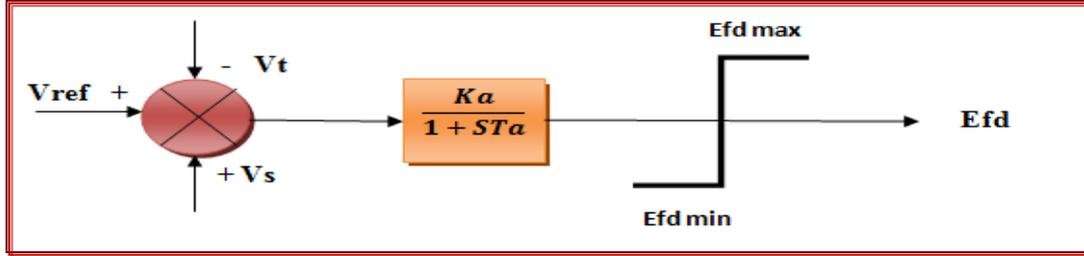


Figure I.9 Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1A.

La grandeur V_{ref} , est la consigne de tension déterminée pour satisfaire les conditions de l'état équilibré. Le régulateur de tension compare le signal V_t (un signal continu proportionnel à la valeur efficace de la tension alternative du générateur) à la tension de consigne V_{ref} . Un signal complémentaire V_s peut être ajouté au nœud de comparaison, il s'agit d'un signal issu de certains dispositifs spécifiques de commande comme les stabilisateurs de puissance (PSS).

Ensuite, le signal d'erreur est amplifié pour donner la tension d'excitation demandée E_{fd} .

La constante de temps et le gain de l'amplificateur sont respectivement T_a et K_a . Les valeurs extrémales de la tension d'excitation (E_{fd_max}, E_{fd_min}) sont fixées par un système de limitation. La relation suivante décrit, tous calculs faits, le fonctionnement du modèle :

$$E'_{fd} = \frac{1}{T_a} (K_a * (V_{ref} - V_t + V_s) - E_{fd}) \quad (I.17)$$

La relation entre la tension d'excitation E_{fd} et la tension interne du générateur E'_q est donnée comme suit :

$$E'_q = \frac{1}{T_{q0}} (E_{fd} - X_d - X'_d) * I_d - E'_q \quad (I.18)$$

I.2.4 Modèle du 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. Des éléments auxiliaires peuvent être trouvés comme les condensateurs en série, des réactances shunts et des systèmes de compensation, des systèmes de protection, etc. Pour la modélisation de

notre système de puissance, nous nous intéressons à établir le modèle de transformateurs et le modèle de lignes de transmission [HAS 08].

I.2.4.1 Modélisation de transformateurs :

Le transformateur permet d'élever l'amplitude de la tension alternative disponible à la sortie de l'unité de production pour l'amener aux niveaux requis pour le transport. A l'autre extrémité de la chaîne, côté consommateurs, les transformateurs sont utilisés pour abaisser la tension et la ramener aux valeurs utilisées dans les réseaux de distribution -BT-. Outre la transmission de l'énergie électrique avec modification des tensions, les transformateurs peuvent être utilisés pour contrôler les tensions de nœuds des réseaux [CUS02]. Cette figure I.11 représente un modèle simple de transformateurs

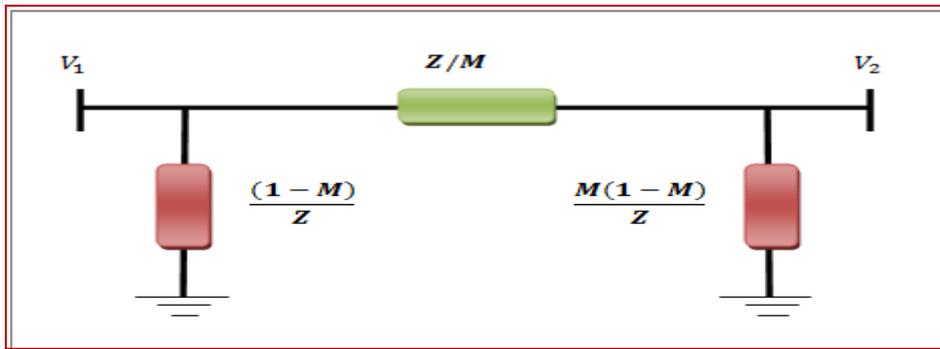


Figure I.10 Modèle simplifié de transformateur

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 :

$$M = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{I.19})$$

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

$$V_2 = \frac{V_1}{M} \quad (\text{I.20})$$

I.2.4.2 Modèle des lignes de transport :

Les réseaux de transport assurent la liaison entre les centres de production et les zones de consommation. Ils permettent aussi d'échanger de la puissance à travers les lignes

d'interconnexion, entre pays ou grandes zones relevant de gestionnaires de réseaux différents cinétique [BOR05]. 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]. Les moyennes et longues lignes sont représentées par un circuit π [YUY 83], voir la figure I.11. Il se caractérise par trois paramètres principaux :

- une résistance série R .
- une réactance X .
- une réactance capacitive $\frac{B}{2}$

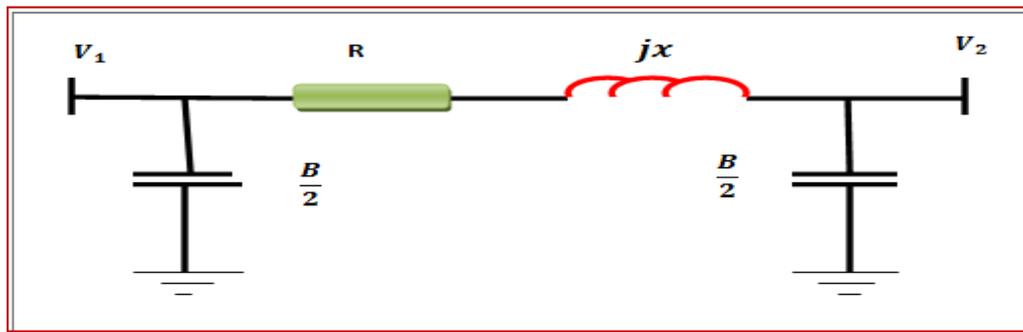


Figure I.11 Modèle en π d'une ligne de transmission.

I.2.4.3 Modèle des charges :

Les études de stabilité dans lesquelles la gamme de temps considérée est de l'ordre de 10 secondes après la perturbation, 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 [FER 14]. La charge statique dans un réseau électrique peut être linéaire ou non linéaire [KUN 94]. Cette étude nous allons considérer la charge linéaire comme illustré à la figure I.12.

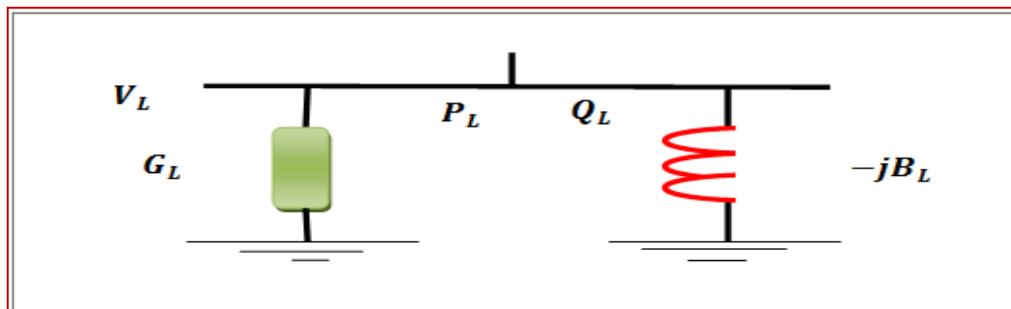


Figure I.12 Modélisation d'une charge par son admittance équivalente

Où :

$$G_L = \frac{P_L}{V_L^2} \quad B_L = \frac{Q_L}{V_L^2} \quad Y_L = G_L + jB_L \quad (\text{I.21})$$

I.3 Les équations d'état généralisé du modèle :

Comme nous l'avons présenté dans la première partie de ce chapitre, un système de puissance est un système dynamique non-linéaire, qui peut être décrit par un ensemble d'équations différentielles ordinaires non-linéaires couplées du premier ordre et un ensemble d'équations algébriques, où les formes générales de ces ensembles d'équations différentielles et algébriques peuvent être exprimées comme suit [HAS 08].

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n); i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I.22})$$

$$0 = h_j(x_1, x_2, \dots, x_m); j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{I.23})$$

Les équations différentielles correspondent aux fonctionnements dynamiques des générateurs, des systèmes d'excitation et des autres éléments du système. Les équations algébriques correspondent aux équations des réseaux de transport et des stators des générateurs. La solution de ces deux groupes d'équations détermine l'état électromécanique du système à chaque instant.

Nous rappelons ci-dessous les équations décrivant le modèle déduit du système de puissance.

$$\omega_i = \frac{1}{2H_i} - (T_{mi} - T_{ei} - D_i * (\omega_i - 1)) \quad (\text{I.24})$$

$$\delta_i = \omega_0 * (\omega_i - 1) \quad (\text{I.25})$$

$$E'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0i}} * (E_{fdi} - E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) * I_{di}) \quad (\text{I.26})$$

$$E_{fd} = \frac{1}{T_a} (K_a * (V_{réf} - V_t + U_s) - E_{fd}) \quad (\text{I.27})$$

$$T_{ei} = E'_{qi} * I_{qi} + (X_{qi} - X'_{di}) * I_{di} * I_{qi} \quad (\text{I.28})$$

$$V_{di} = X_{qi} * I_{qi} \quad (\text{I.29})$$

$$V_{qi} = E'_{qi} - X'_{di} * I_{di} \quad (\text{I.30})$$

$$V_{ti} = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \quad (\text{I.31})$$

$$I_{di} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} (-S_{ij} * E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) * C_{ij} * I_{qj}) \quad (I.32)$$

$$I_{qi} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} (C_{ij} * E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) * S_{ij} * I_{qj}) \quad (I.33)$$

La figure (I.14) représente les éléments du modèle du système de puissance avec leurs interactions. L'approche finale de la modélisation du système de puissance implique une présentation de l'ensemble des équations de ce système sous forme d'équations d'état généralisées comme suit :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (I.34)$$

$$y = g(x, u) \quad (I.35)$$

Une telle forme représente un système invariant dans le temps (système autonome). Où :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix} \quad (I.36)$$

x : Vecteur d'état du système de n variables.

\dot{x} : Vecteur dérivé du vecteur x par rapport au temps.

u : Vecteur de r signaux d'entrée du système.

f : Vecteur de n fonctions non-linéaires reliant les variables d'état x_i et les signaux d'entrée u_i aux dérivées des variables d'état \dot{x} .

y : Vecteur de m signaux de sortie du système.

g : Vecteur de m fonctions non-linéaires reliant les signaux d'entrée u_i et les variables d'état.

x_i : Aux variables de sortie y_i .

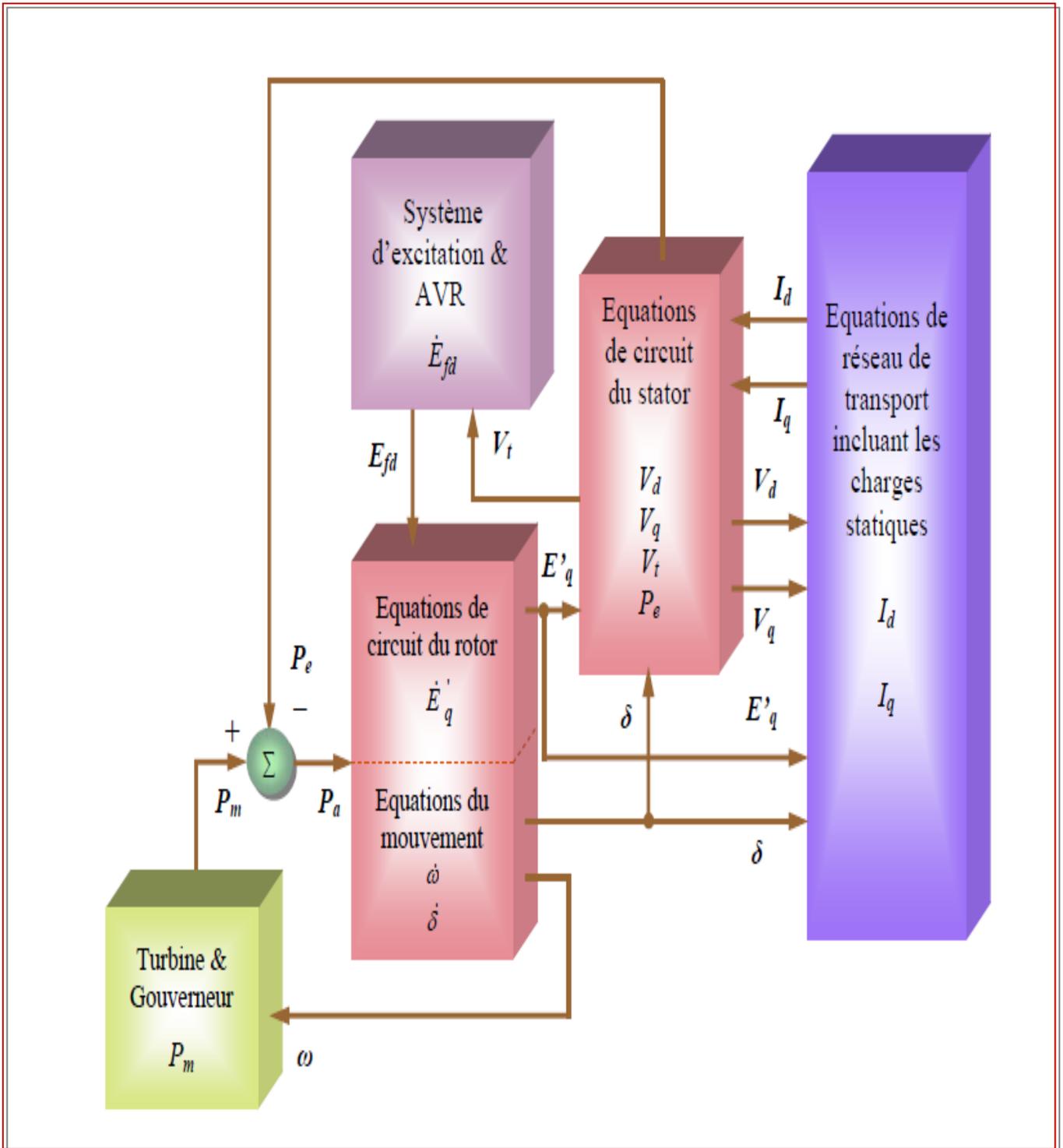


Figure I.13 Digramme de l'ensemble des blocs du système de puissance.

Les variables d'état permettent de décrire complètement l'évolution dynamique du système par n équations différentielles de premier ordre. L'état et la sortie du système peuvent ainsi être calculés, à tout instant, pour des conditions initiales quelconques.

Quand les dérivées des variables d'état x sont égales à zéro, ($dx=0$), le système est à l'équilibre. Ainsi, ce point d'équilibre est le point auquel toutes les variables d'état sont constantes et le fonctionnement du système autour de ce point est dit linéaire. La détermination de modèle linéaire fait l'objet du paragraphe suivant.

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes définitions de base puis 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 des différents composants du système électro-énergétique de générateur jusqu'à les charges pour les études de la stabilité aux petites perturbations pour l'étude ou l'analyse de la stabilité des réseaux électriques et cela dans les chapitres qui suivent.



CHAPITRE. II :

Stabilité de réseau électrique

II.1 Introduction :

L'énergie électrique ne peut pas être stockable d'une grande quantité, c'est pour cela que l'énergie produite doit être consommée en même temps, il doit y avoir en permanence un équilibre entre la production et la consommation c'est à dire qu'on doit veiller à la stabilité du réseau électrique que est une préoccupation très importante pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques.

Pour cela, on s'intéresse dans ce chapitre à la stabilité des systèmes électro-énergétique qui est un facteur essentiel 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 :

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

II.2.3 Système électro-énergétique :

On appelle un système électro-énergétique un ensemble d'installations électriques destinées à produire, transporter et à la fois distribuer l'énergie électrique aux consommateurs [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 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 [HRK 18].

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].

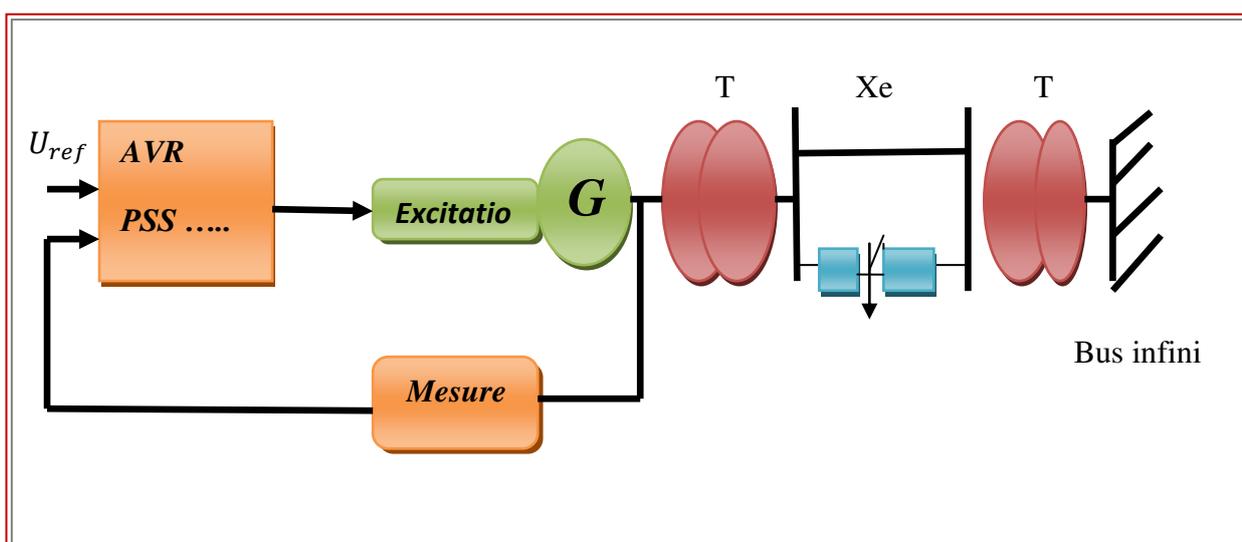


Figure II.1 Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation du générateur Synchrone puissant

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

En raison de la taille, de l'importance et de la complexité des problèmes de stabilité, il est très intéressant de faire des simplifications et des hypothèses appropriées pour représenter analytiquement le système. Pour analyser et résoudre les problèmes d'instabilité dans les systèmes de puissance, il est indispensable de regrouper les différents groupes de stabilité. Cette classification de la stabilité est basée sur les considérations suivantes [KUN 94] :

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

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

- La stabilité de l'angle de rotor.
- 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.

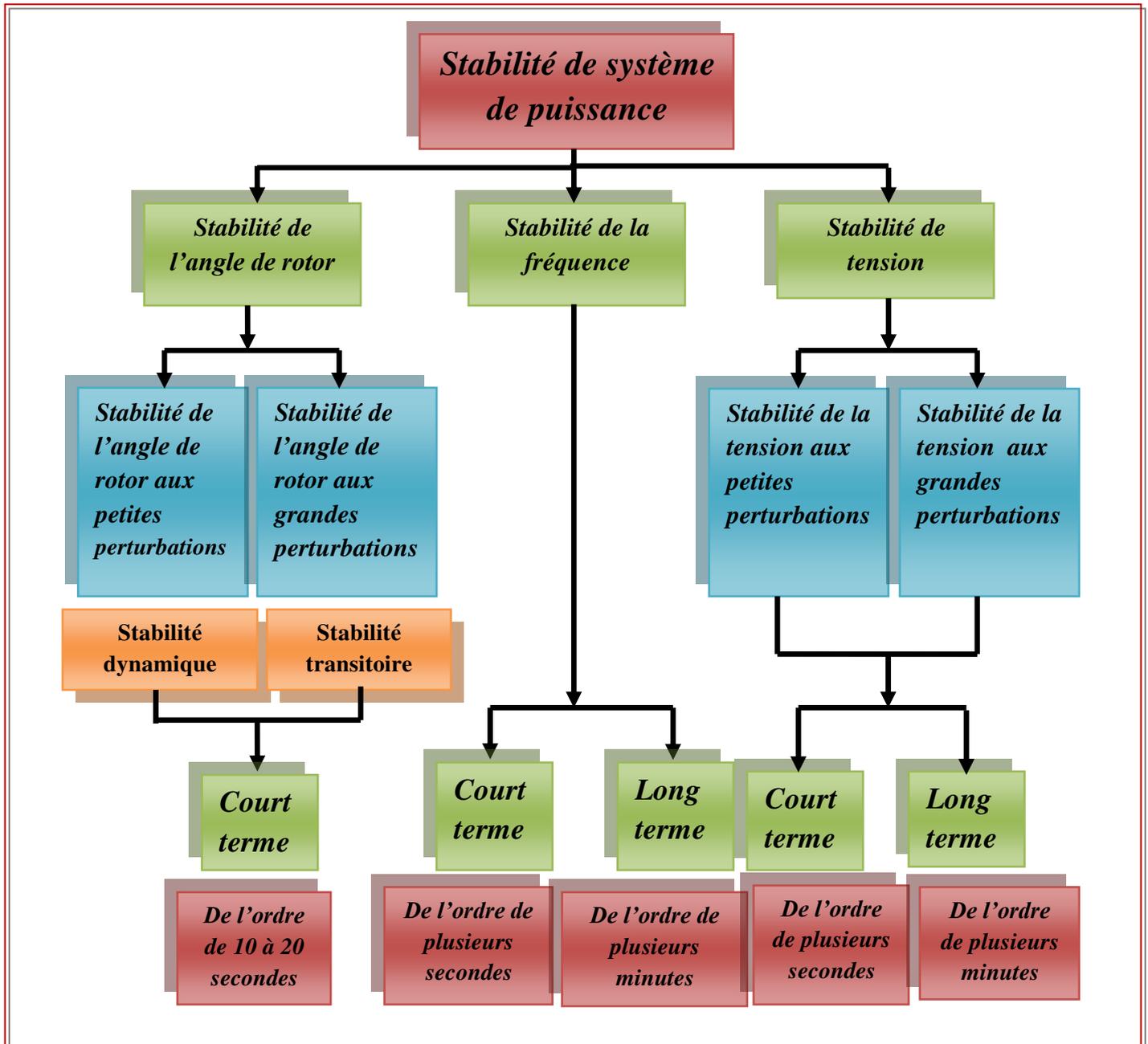


Figure II.2 Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.

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 [TOF 12], nous pouvons caractériser la stabilité de l'angle de rotor en deux sous-catégories :

a- Stabilité angulaire de grande perturbation (stabilité transitoire) :

La stabilité transitoire dépend de l'état initial du système et de la sévérité de la perturbation. L'instabilité est habituellement sous forme d'une séparation angulaire périodique en raison du couple de synchronisation insuffisant, se manifestant comme une instabilité sur la première oscillation. Cependant, dans les grands systèmes électriques, l'instabilité transitoire ne se produit pas toujours comme une instabilité sur la première oscillation qui serait liée à un seul mode. C'est parfois le résultat de la superposition d'un mode d'inter-régions d'oscillation lent et d'un mode d'oscillation local de centrale causant une grande excursion d'angle rotorique avec dépassement de la limite de stabilité à la première oscillation [KBE 01] figure II.3 représenté la variation d'angle de rotor ou Cas 1 : instabilité de première oscillation. Cas 2 : instabilité de multi-oscillations le cadre de temps de la dynamique généralement observée de la stabilité transitoire est de l'ordre de 3 à 5 secondes après la perturbation. Il peut se prolonger à 10-20 secondes.

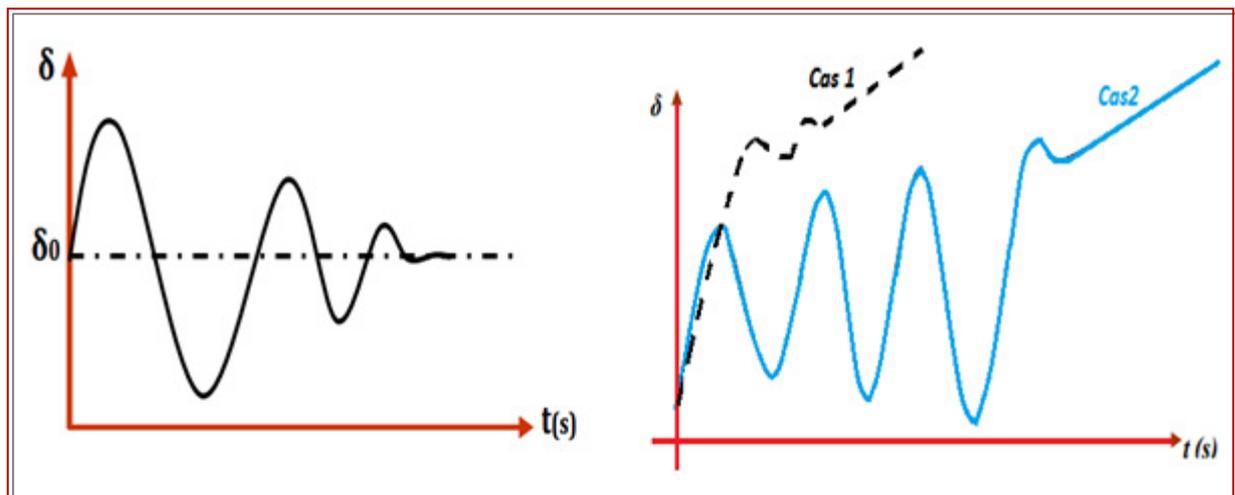


Figure II.3 Variation d'angle de rotor

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 II.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 .

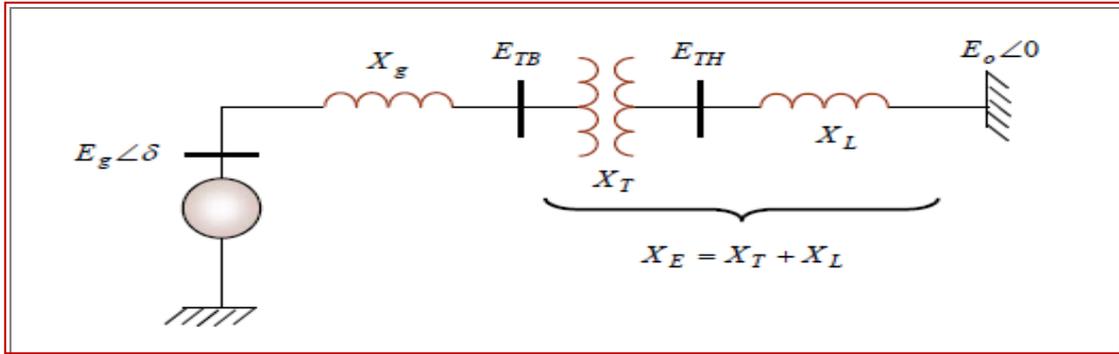


Figure II.4 synchrone connectée à un jeu de barre infini

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

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

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].

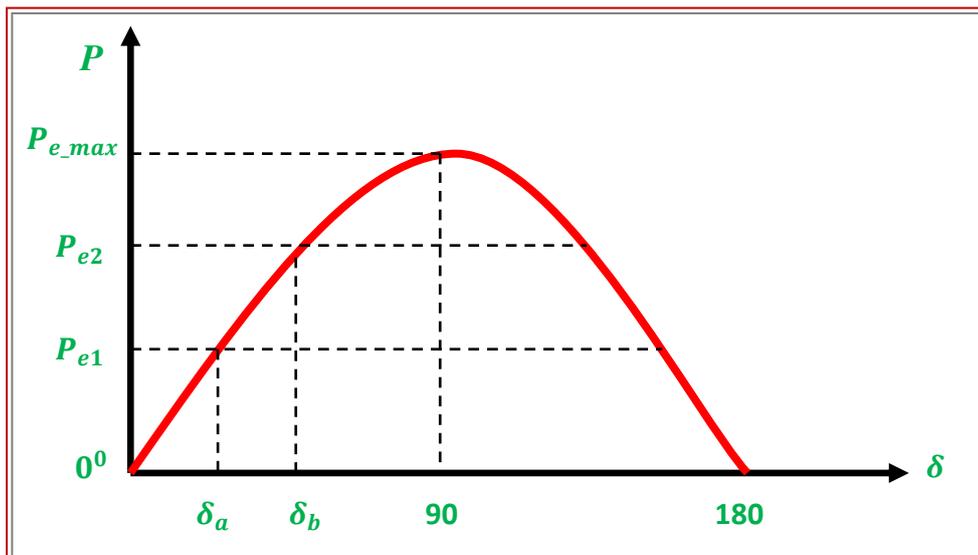


Figure II.5 Relation puissance- angle de rotor

Lors de l'équilibre, la puissance électrique $Pe1$ est égale à la puissance mécanique appliquée pour l'angle correspondant δa . Un brusque changement sur la charge du générateur entraîne une variation de la puissance mécanique, et par conséquent de la puissance électrique, par exemple de $Pe1$ à $Pe2$, figure II.5.

Le rotor va donc accélérer de sorte que l'angle de puissance augmente, de δa à δb , pour pouvoir fournir une puissance supplémentaire à la charge. Cependant, l'accélération du rotor ne peut pas s'arrêter instantanément. Ainsi, bien que la puissance développée pour l'angle δb soit suffisante pour la charge, le rotor va dépasser l'angle δb jusqu'à ce qu'un couple opposé suffisant soit développé pour arrêter cette accélération. L'énergie supplémentaire va entraîner le ralentissement du rotor et la diminution de l'angle de puissance. [HAS 08]

b- Stabilité angulaire de petite perturbation (stabilité dynamique) :

La stabilité dynamique d'un réseau de transport d'énergie électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une petite perturbation. L'instabilité résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non-oscillatoire, entre les angles de rotor. La stabilité angulaire aux petites perturbations est caractérisée par les oscillations électromécaniques des rotors, 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) [FRG14].

II.3.4.2 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 [TOU 12].

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 produite-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 [CUS02].

II.3.5 Stabilité statique :

En général, à la fin d'un régime transitoire provoqué par une perturbation, le système atteint son régime permanent. Dans ce cas, l'étude de la stabilité du système, porte sur l'évaluation de l'état statique du réseau. Le système n'est pas en état de stabilité statique si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : état instable ou état d'urgence.

Dans un réseau qui est dans un état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires.

Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, l'une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement normal [GOH 03].

II.3.6 Les cause d'instabilité :

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

- Le court-circuit : un court-circuit provoque un déséquilibre important entre le couple moteur et le couple résistant.
- La surcharge 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.3.7 Incidents liés 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
Eté 1996	Ouest USA	Plus heures
03-02-2003	Algérie	Plus de 7 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 des heures
02-03-1979	Zealand, Danemark	15 minutes
17-09-1981	Centre de l'Oregon, E-U	Quelques minutes
20-05-1986	Angleterre	5 minutes
03-02-1990	Ouest de la France	Quelques minutes

II.3.8 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 (PSS, PID).
- 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 :

Est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation par exemple : une régulation de température.

II.4.1.3 Grandeur réglant :

Est la grandeur physique qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Elle n'est pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.

II.4.1.4 Grandeurs perturbatrices :

Sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.

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 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) :

C'est l'aptitude du procédé à suivre les variations de la consigne, dans le cas d'un échelon de la consigne la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse. Dans l'exemple ci-dessous de la figure, on mesure le temps de réponse à $\pm 5\%$ qui est égal à $t_1 - t_0$.

II.4.3.2 Temps de montée (T_m) :

Le temps de montée est l'intervalle de temps séparant les instants auxquels la réponse indiciaire 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].

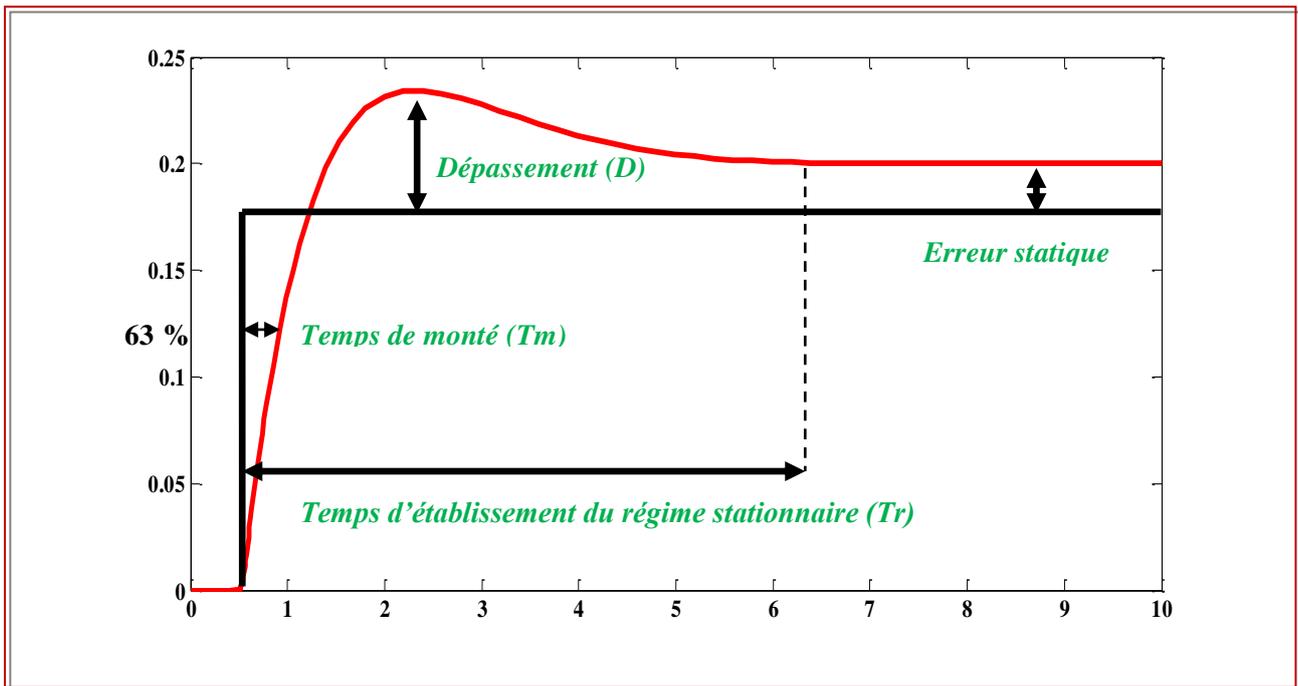


Figure II.6 Représentation de (T_m , T_r , D)

II.5 Stabilisateur PSS :

II.5.1 Fonctionnement et modèle de PSS :

Un PSS (power system stabilizer) permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la variation de vitesse de rotor dans l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur, figure (II.7). Un couple électrique en phase avec la variation de vitesse de rotor est ainsi produit dans le générateur. Par conséquent, avec un système d'excitation rapide et fort, l'avantage présenté par un couple synchronisant important est toujours assuré et le problème de la décroissance du couple d'amortissement est corrigé. Le PSS va s'opposer à toutes les faibles oscillations en forçant le système d'excitation à varier au plus juste et au bon moment.

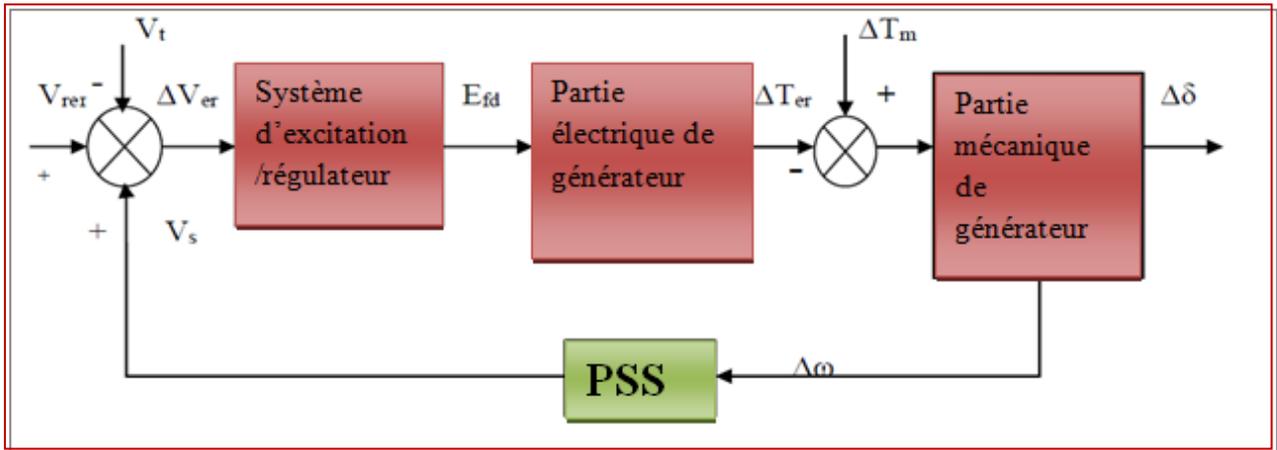


Figure II.7 Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système

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.

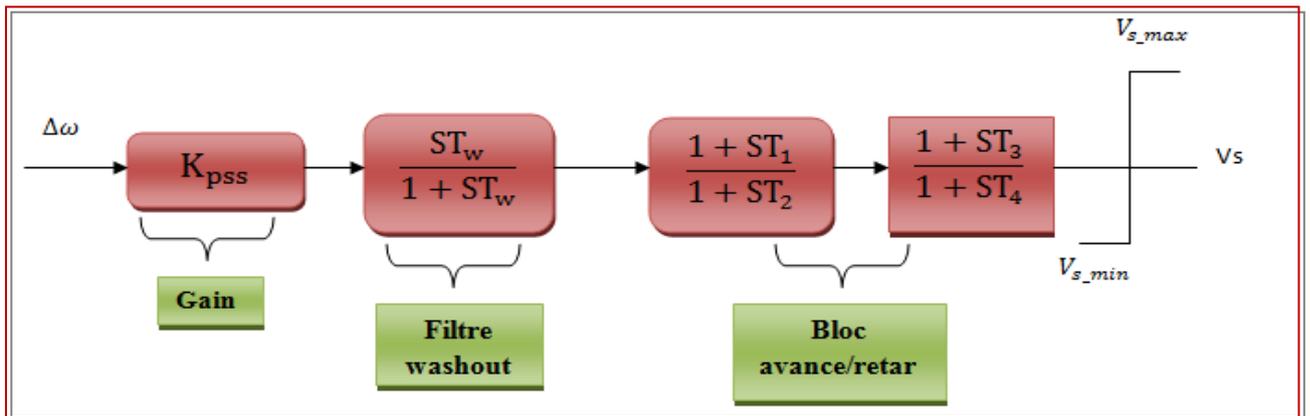


Figure II.8 Modèle d'un PSS avance/retard

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 (T_ω) doit être suffisamment grande pour permettre aux signaux, dont la fréquence est située dans la bande utile, d'être transmis sans atténuation. Mais, elle ne doit pas être trop grande pour éviter de mener à des variations indésirables de tension de générateur pendant les conditions d'îlotage. Généralement, T_ω varie de 1 à 20 secondes.

Une amélioration remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur T_ω fixée à 10 secondes [PAL 05].

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_{er}). Par conséquent, le PSS fournit l'avance de phase nécessaire pour compenser le retard de phase de la fonction de transfert GEP. Pratiquement, un bloc de phase d'avance pure ne suffit pas pour réaliser la compensation de phase nécessaire ainsi, un bloc d'avance/retard de phase est souvent utilisé. Pour mieux garantir la stabilité du système, deux étages (au moins) de compensations de phase sont nécessaires. La fonction de transfert de chaque étage est une simple combinaison de pole-zéro, les constantes de temps d'avance et de retard étant réglables. La gamme de chaque constante de temps s'étend généralement de 0.01 à 6 secondes. Mais pour des considérations de réalisation physique, les constantes de temps de retard sont considérées fixes et généralement autour de la valeur de 0.05 secondes [FLE 81].

II.5.2.4 Limiteur :

Le PSS est conçu pour améliorer l'amortissement du système en cas de petites variations autour d'un point d'équilibre. Son objectif n'est pas de restaurer la stabilité du système aux perturbations sévères (la stabilité transitoire). Le PSS a parfois tendance à perturber le bon fonctionnement du régulateur de tension en le saturant lorsque ce dernier essaye de maintenir la

tension lors des conditions transitoires. Ainsi, le PSS doit être équipé d'un limiteur afin de réduire son influence indésirable durant les phases transitoires [LAR 81]. Les valeurs minimales et maximales du limiteur s'étendent de ± 0.02 à 0.1 per-unit [YUY 83].

II.5.3 Emplacement optimal des PSS :

Tous les générateurs du système ne participent pas aux modes dominants : tous les générateurs n'ont donc pas besoin d'être équipés des PSSs. En outre, il faut tenir compte des interactions négatives entre les PSSs qui augmentent avec le nombre de ces derniers. Enfin, il faut tenir compte des critères économiques. Ainsi, la première étape de la mise en œuvre des PSSs, est de trouver les emplacements optimaux des PSSs nécessaires et de déterminer leur nombre. Ce problème a fait l'objet, depuis une dizaine d'années, d'un grand nombre de recherche [FEL 90]. Les approches les plus efficaces proposées sont basées sur l'analyse modale du système linéarité :

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

Comme nous l'avons vu, les amplitudes des résidus associés aux modes dominants de la fonction de transfert du système en boucle ouverte peuvent être utilisées pour déterminer les placements les plus efficaces pour installer les PSSs [HRK 18].

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une façon générale les différents types de la stabilité et on a présenté également une analyse fine sur la stabilité du réseau électrique à la présence des petites perturbations et des oscillations électromécaniques dans les systèmes de puissance, et les méthodes d'analyse et d'amélioration de la stabilité utilisé pour résoudre cette problématique le c'est le stabilisateur PSS. Afin d'obtenir les paramètres optimaux de PSS on a utilisé les algorithmes génétiques cela dans les chapitres qui suivent.



CHAPITRE. III :

Optimisation par l'algorithme génétique

III.1 Introduction :

La résolution de plusieurs problèmes d'optimisation en électrotechnique rencontre de nombreux problèmes et difficultés pour trouver une solution précise et fiable, où les propriétés du problème d'optimisation sont fortement non-linéaires, présentent des dérivées difficilement accessibles, des discontinuités sur des intervalles prédéfinis ...etc.

La résolution de telles difficultés a fait l'objet de nombreux travaux en utilisant diverses méthodes d'optimisation. Les méthodes déterministes s'appuient sur le calcul d'une direction de recherche généralement liée à la dérivée (de la fonction objective et des contraintes mathématiques) par rapport aux variables du système. Elles ne sont réellement utilisables que dans le cas restreint où la solution cherchée est réputée proche d'une solution connue. C'est pour lever cette difficulté, que les chercheurs ont choisi de s'intéresser au développement des méthodes stochastiques et d'étudier leur application aux problèmes de conception rencontrés en électrotechnique.

C'est pour cela, qu'on a développé des méthodes inspirées par la nature classées sous le concept des méthodes d'intelligence artificielle. Dans ce travail, on a appliqué les algorithmes génétiques qui ont imposés leurs applications dans plusieurs domaines scientifiques et industriels en donnant une description détaillé des algorithmes génétiques dans ce chapitre.

III.2 Définition de l'optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation où les variables définissant la fonction à optimiser sont introduits dans des contraintes, dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes [RAB 07].

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].

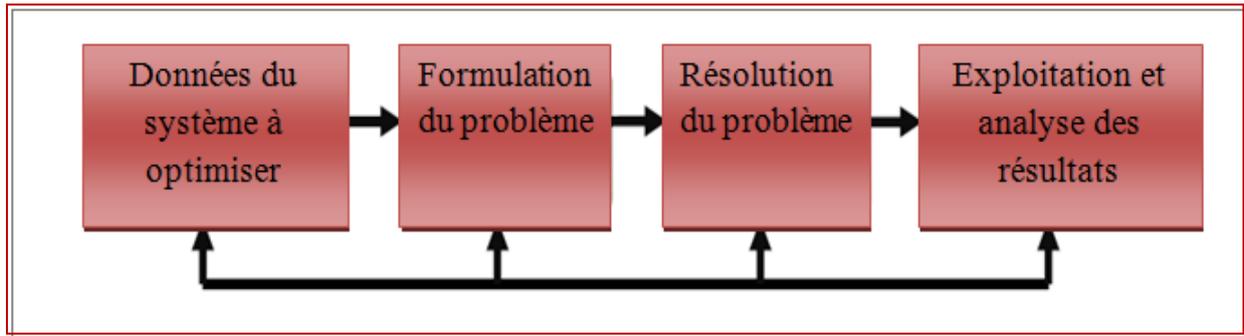


Figure III.1 Démarches de résolution d'un problème d'optimisation

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. C'est l'étape la plus délicate du processus de conception car, là aussi, la formulation d'un problème n'est jamais unique, en particulier la définition des fonctions caractérisant les performances du système.

Elle consiste à définir de façon précise [KET14] :

- La fonction objective.
- Les paramètres de conception.
- 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.5 Algorithme génétique :

III.5.1 Historique:

Les algorithmes génétiques, initiés dans les années 1970 par John Holland, sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection. Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont été initialement développés par John Holland (1975) qui a développé les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique. A cette époque, l'informatique n'avait pas encore connu de développement et ses travaux n'ont pas pu être appliqués sur des problèmes réels de grande taille. La parution en 1989

de l'ouvrage de référence écrit par D.E Goldberg , qui décrit l'utilisation de ces algorithmes dans le cadre de résolution de problèmes concrets, a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation, notamment après la parution de puissants calculateurs dans les années 90 [BOU12] .

III.5.2 Définition de l'algorithme génétique :

Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques de recherche et d'optimisation dérivées de la génétique et des mécanismes de la sélection naturelle et de l'évolution développés par John Holland (1975) [FRG 14]. La théorie des algorithmes génétiques utilise un vocabulaire similaire à celui de la génétique naturelle. Cependant, les processus naturels auxquels elle fait référence sont beaucoup plus complexes que les algorithmes génétiques. On définit ainsi un individu dans une population. L'individu est représenté par un ou plusieurs chromosomes constitués de gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. Les principes de sélection, de croisement, de mutation utilisée s'appuient sur les processus naturels du même nom [HAS 08].

Le principe des AG est présenté en figure III.2

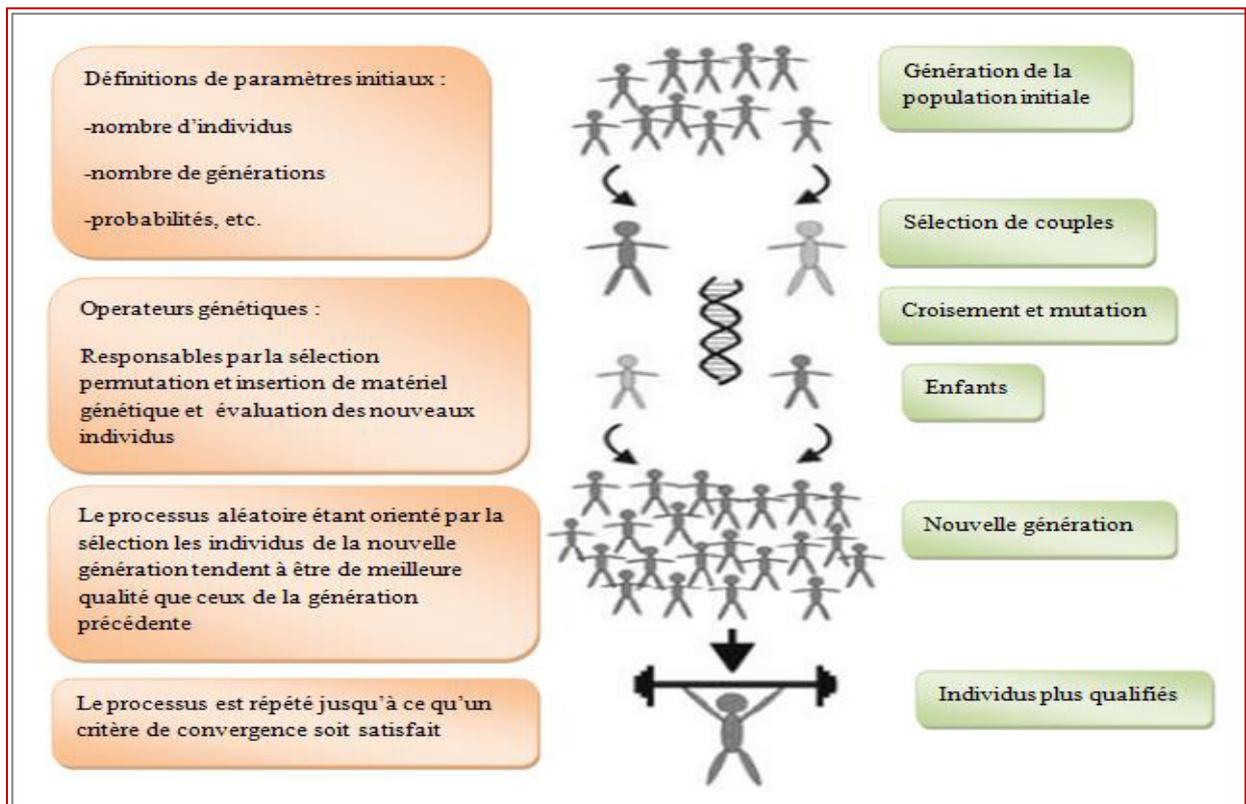


Figure III.2 Concepts de base d'un algorithme génétique.

III.5.3 Les opérateurs d'un AG :

III.5.3.1 Nombre de population :

Les AG nécessitent une population initiale pour commencer le processus de recherche. La méthode appliquée fait générer aléatoirement un ensemble de solutions dans les contraintes proposées pour la population entière.

III.5.3.2 Sélection :

Après génération de la population initiale, la performance de chaque individu est évaluée : la performance mesure la qualité de la solution probable pour comparer les différentes solutions. Nous avons pris la valeur associée à la fonction objective comme indice de performance.

Après calcul de cet indice pour chaque individu, le mécanisme de sélection est appliqué pour copier les individus sélectionnés. Les individus ayant des performances élevées ont plus de probabilité d'être reproduits dans la génération suivante, il y'a trois types de sélection :

- Elitism
- Roulette
- Tornio

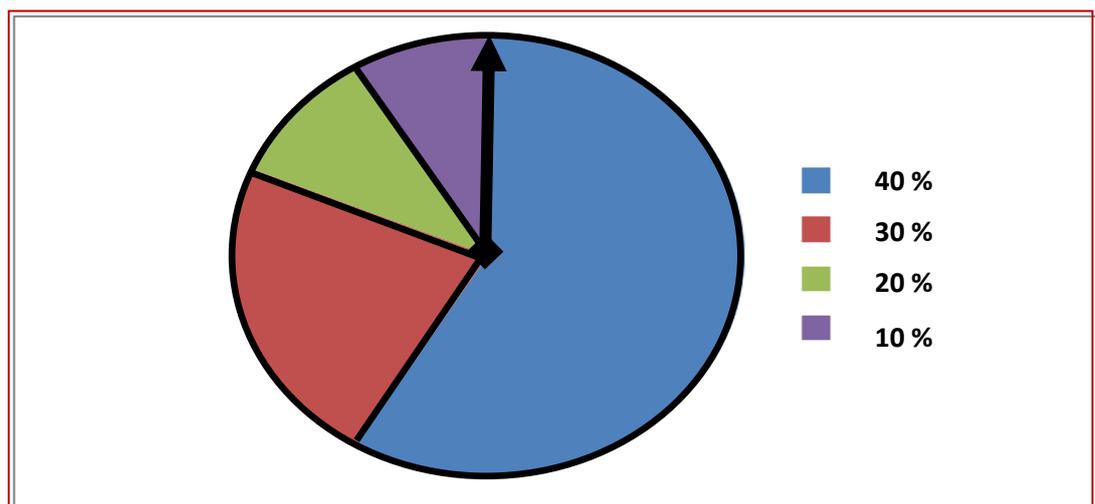


Figure III.3 Exemple de sélection en roulette

III.5.3.3 Croisement :

Après l'étape de sélection, le croisement est appliqué. Dans cette étape, les individus sont regroupés aléatoirement par paire (parents). Le croisement se fait ensuite pour créer les enfants avec une probabilité P_c , sinon les parents ne changent pas. Cet opérateur sert à explorer des nouvelles régions dans l'espace de recherche. Il y'a deux type de croisement :

- Croisement en un seul point
- Croisement en plusieurs points

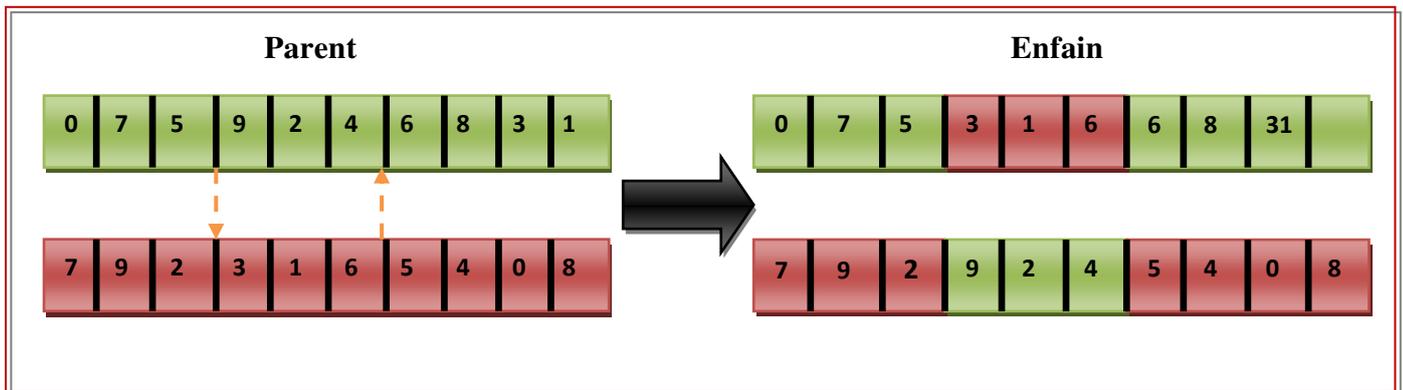


Figure III.4 Exemple de croisement en plusieurs points

III.5.3.4 Mutation :

Pour introduire une certaine diversification dans la population et éviter ainsi une convergence prématurée en un optimum local, l'opérateur de mutation est appliqué. Les bits qui subissent la mutation sont choisis aléatoirement avec une probabilité P_m [FRG 14].

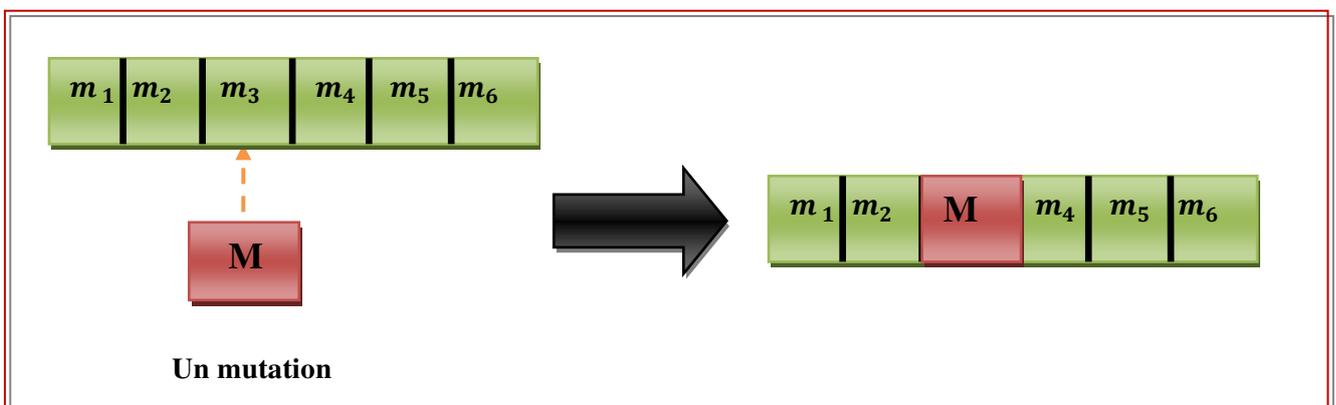


Figure III.5 exemple de mutation

III.5.4 Les paramètres de réglage de l'algorithme génétique :

Il y a principalement trois paramètres de base pour le "fonctionnement" d'un AG :

- Le nombre d'individus dans la population N_{ind} (dit la taille de la population).
- La probabilité de croisement P_c .
- La probabilité de mutation P_m .

La réussite et la rapidité d'un AG dépendent fortement des valeurs choisies pour ces paramètres. Le bon réglage de ces paramètres est un problème parfois délicat. Nous discutons ci-dessous l'influence de chaque paramètre et la gamme de valeurs qu'il peut prendre [HAS 08] :

III.5.4.1 Taille de la population N_{ind} :

Ce paramètre doit être judicieusement réglé en fonction de la taille du problème. Généralement, nous pouvons dire que si la taille de la population est :

- Trop faible, l'AG peut converger trop rapidement vers de mauvaises solutions.
- Trop grande, le temps de calcul de l'AG peut s'avérer très important.

En règle générale, plus la taille de la population est grande, plus le nombre de solutions potentielles évaluées est élevé.

III.5.4.2 Probabilité de croisement P_c :

Comme nous l'avons dit, la probabilité de croisement joue un rôle très important dans l'exploration de l'espace de recherche du problème. En générale, plus la probabilité de croisement est élevée, plus il y aura de nouvelles structures apparaissant dans la nouvelle population. Ainsi, si la probabilité de croisement est :

- trop élevée, les "bonnes" structures apportées par la sélection risquent d'être détruites trop vite.
- trop faible, la recherche de la solution optimale risque de stagner.

Le taux habituel de la probabilité de croisement est choisi entre 0.7 et 0.95.

III.5.4.3 Probabilité de mutation P_m :

La mutation, comme nous l'avons vu, est un opérateur secondaire, mais elle reste très importante pour l'AG. Elle a pour objectifs l'introduction de diversité dans la population et la meilleure exploitation de l'espace de recherche. Ainsi si la probabilité de mutation est:

- Trop élevé, la mutation rend la recherche très aléatoire.
- Trop faible, la recherche risque de stagner.

Le taux habituel de la probabilité de mutation est choisi entre 0.001 et 0.05.

III.5.5 L'organigramme de l'algorithme génétique :

Un AG standard nécessite en premier lieu le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solutions) de façon aléatoire. Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction objectif appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer. La figure. III.6 présente le principe de l'AG standard [BOU12].

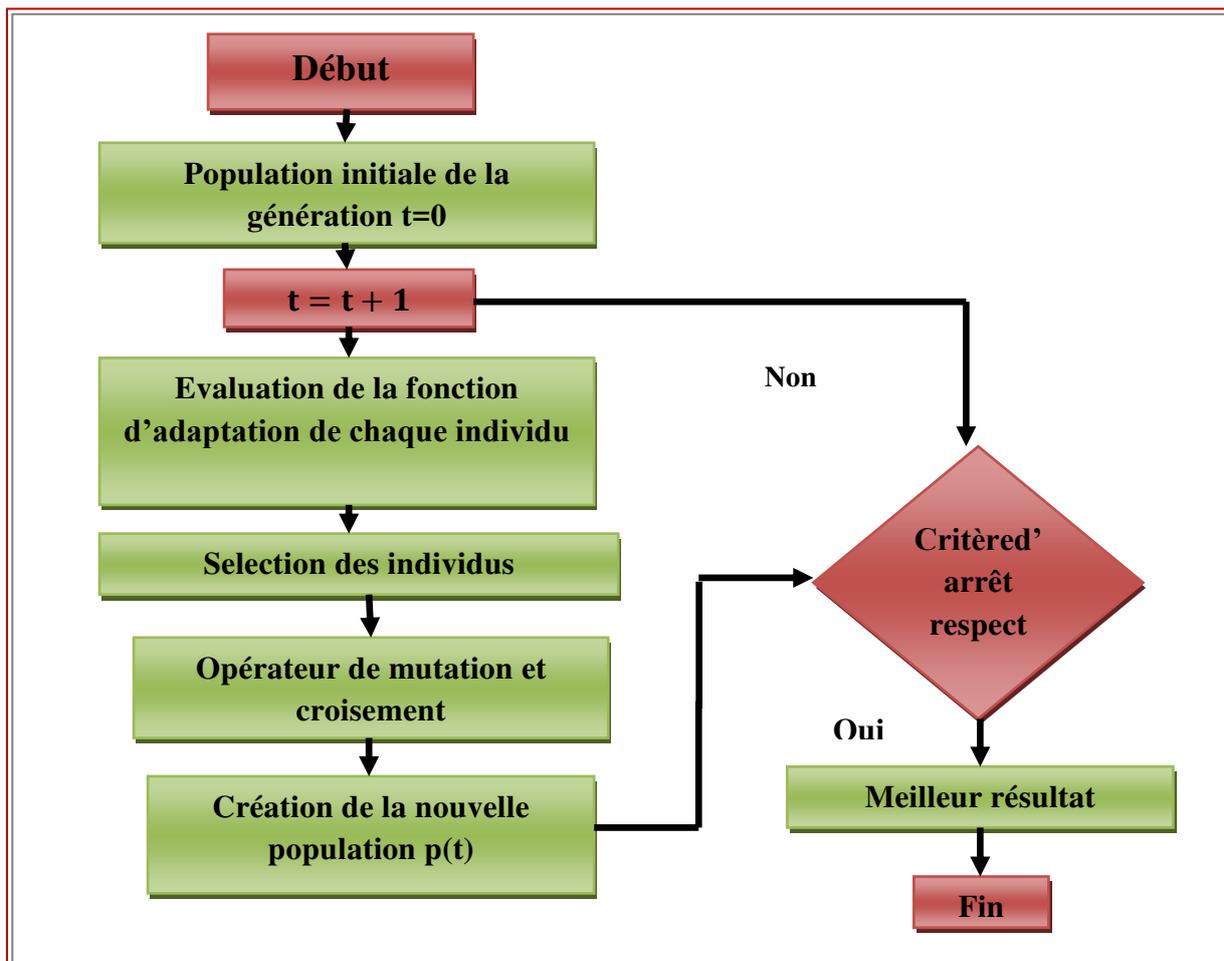


Figure III.6 Organigramme général de l'algorithme génétique

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction générale sur l'optimisation, comme nous avons abordé le concept général, les étapes et l'organigramme des algorithmes génétiques. Une description des paramètres des AGs a été présentée, en soulevant le problème de réglage de ces paramètres. Nous avons ensuite choisi et détaillé la méthode d'optimisation basée sur l'algorithme génétique. L'application des AGs à la conception des contrôleurs pour l'amélioration de la stabilité des systèmes de puissance a été l'objet de plusieurs travaux. Une application des algorithmes génétiques (AG) pour l'optimisation des paramètres de PSS_S(dans le but d'améliorer la stabilité dynamique) fait l'objet du prochain chapitre.



CHAPITRE. IV :

Application à l'analyse de la stabilité dynamique

IV.1 introduction :

Les perturbations dans les réseaux électriques constituent un grand problème affectant la stabilité de fonctionnement et la continuité de service. Pour cela, nous intéressons à l'analyse de stabilité des réseaux électriques, plus particulièrement la stabilité dynamique en utilisant les systèmes de réglage comme le contrôleur PSS (Power system stabilizer).

Dans le présent chapitre, on applique les algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres de PSS dans le but de minimiser les oscillations, stabiliser le système et étudier les effets de la puissance réactive pour un système composé d'un générateur connecté à un réseau infini (modèle SMIB).

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 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 chaque régime 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 est définit sont calculées selon le modèle décrit dans l'annexe.

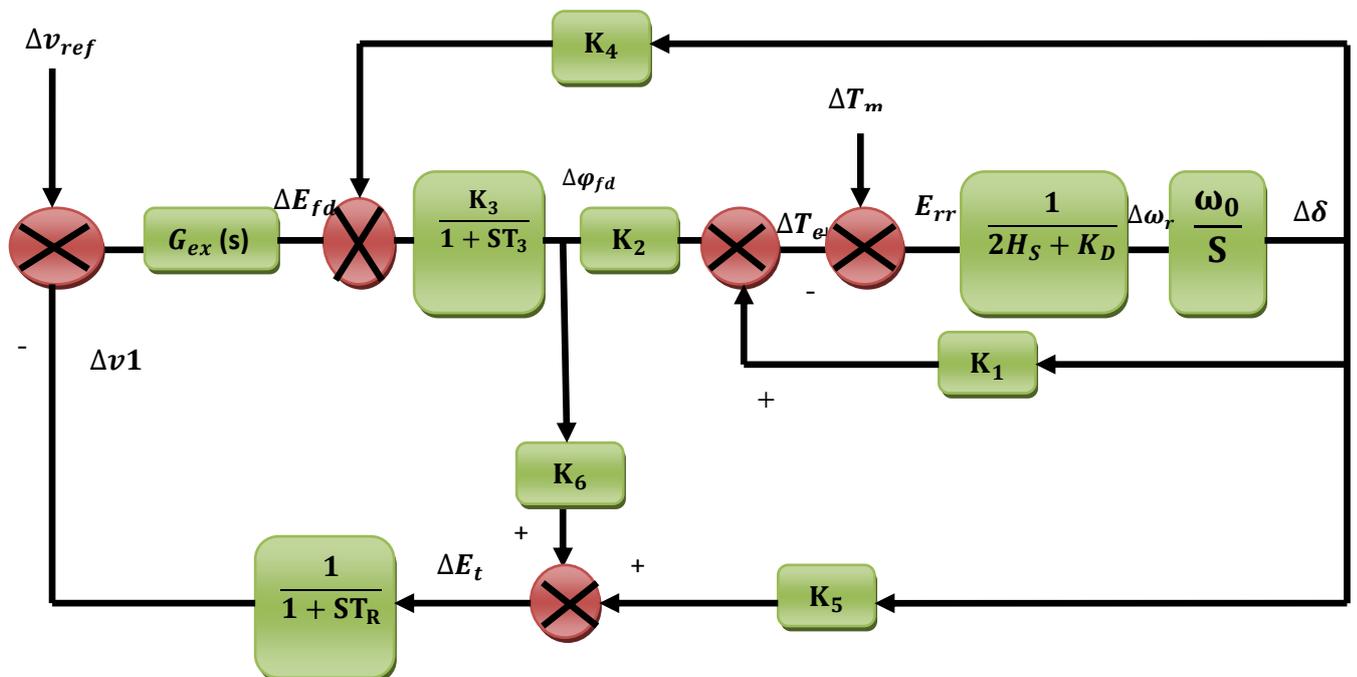


Figure IV.1 Schéma fonctionnel d'un Système d'excitation avec l'AVR

Chapitre. IV : Application à l'analyse de la stabilité dynamique

Les grandes composantes d'un système de puissance peuvent être représentées par un schéma blocs comme le montre la figure IV.2.

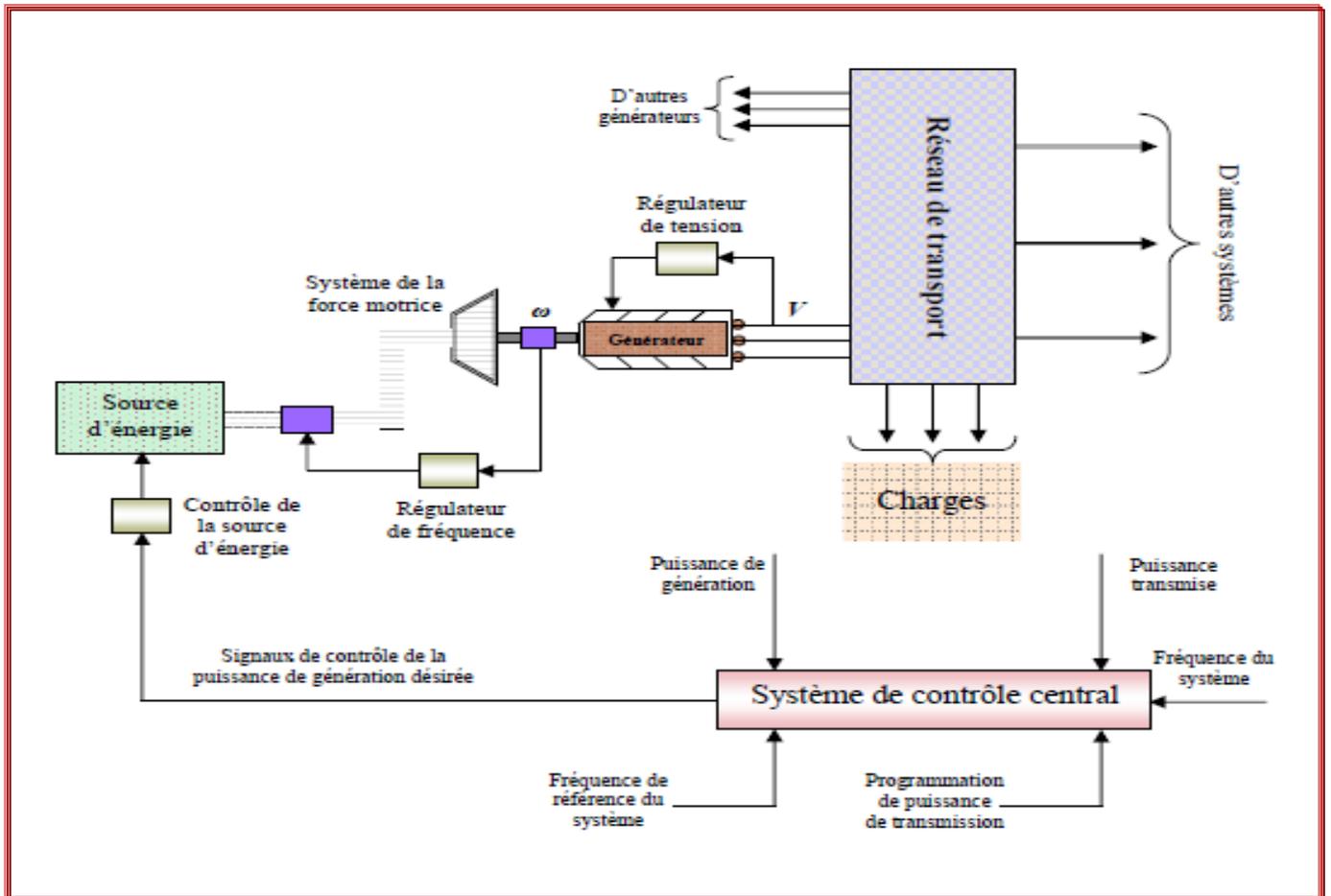


Figure IV.2 Structure générale d'un système de puissance

Cette représentation ne montre pas toutes les interactions dynamiques entre les éléments et leurs contrôles, mais elle peut servir à une description générale pour les structures dynamiques. L'étude de la performance dynamique d'un système de puissance est très importante pour les opérateurs du système (point de vue économique) et la société en général (point de vue de fiabilité). Une étape essentielle dans ce type d'étude est de comprendre physiquement et mathématiquement les phénomènes dynamiques d'intérêt. Ensuite, la modélisation et la simulation effectuées du système peuvent refléter son comportement critique [HAS 08].

IV.3 Analyse du système sans PSS :

On crée une perturbation sur la variation du couple mécanique ΔTm puis on analyse la réponse du système selon l'évolution de variation de position angulaire ($\Delta\delta$), variation de vitesse angulaire ($\Delta\omega$), erreur (Err) et variation de couple électromagnétique (ΔTe). Toutes ces grandeurs présentent des oscillations selon le régime de fonctionnement.

IV.3.1 Analyse du système pour différents régimes :

Nous avons analysé le système avec des différents régimes (faible, moyennes et grande) charge Où nous avons fixé la puissance active (P) et la puissance réactive (Q) avec une perturbation au niveau du couple mécanique de l'ordre $\Delta Tm = 0.2 p.u$ à l'instant $T=0.5$ second. Puis on fait l'analyser de la réponse du système.

IV.3.1.1 Analyse avec les faibles charges (faible puissance) :

Le tableau suivant présente les différents régimes de faible puissance avec les constantes du modèle d'étude Ki .

Tableau IV.1 Analyse du système avec faibles charges

Pt (pu)	Qt (pu)	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	$K5$	$K6$	$T3$	L'étape de système
0.2	0.1	0.6792	0.3351	0.3425	0.5504	0.5049	0.8654	2.5073	stable
0.3	0.15	0.7226	0.4524	0.3387	0.7419	0.6351	0.8409	2.4796	Stable
0.4	0.25	0.7449	0.5163	0.3311	0.8490	0.6628	0.8155	2.4240	Stable
0.45	0.30	0.7451	0.5409	0.3271	0.8857	0.6607	0.8031	2.3947	Stable
0.50	0.32	0.7495	0.5773	0.3252	0.9448	0.6783	0.7888	2.3813	Stable

Interprétation :

On remarque dans le tableau IV.1 que le système énergétique présente des états stables pour des différents régimes de faibles charges, avec une perturbation prédéfinie.

IV.3.1.2 Analyse avec les moyennes charges (moyenne puissance) :

Ce tableau présente les différents régimes de moyenne puissance avec les constantes de Ki .

Chapitre. IV : Application à l'analyse de la stabilité dynamique

Tableau IV.2 Analyse du système avec moyennes charges

$Pt(pu)$	$Qt(pu)$	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	$K5$	$K6$	$T3$	L'étape de système
0.55	0.35	0.7483	0.6049	0.3226	0.9941	0.6837	0.7751	2.3619	Stable
0.65	0.38	0.7443	0.6671	0.3194	1.0939	0.6952	0.7449	2.3388	Stable
0.75	0.40	0.7332	0.7244	0.3169	1.1857	0.6939	0.7130	2.3203	Stable
0.80	0.45	0.7051	0.7288	0.3124	1.1969	0.6668	0.7029	2.2873	Stable
0.90	0.48	0.6717	0.7689	0.3088	1.2628	0.6433	0.6735	2.2610	Instable

Interprétation :

Dans le tableau IV.2 en remarque le système énergétique est stable pour tous les régimes de machine, sauf un seul régime pour $Pt = 0.90$ et $Qt = 0.48$.

IV.3.1.3 Analyse avec les grandes charges (grandes puissance) :

Le tableau IV.3 présente les différents résultats de simulation pour les régimes de grande puissance avec la détermination des constantes Ki pour chaque régime de fonctionnement.

Tableau IV.3 Analyse du système avec grandes charges

$Pt(pu)$	$Qt(pu)$	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	$K5$	$K6$	$T3$	L'étape de système
0.95	0.50	0.6461	0.7840	0.3066	1.2823	0.6236	0.6598	2.2444	Instable
01	0.60	0.5744	0.7598	0.2975	1.2975	1.2469	0.5721	2.1784	Instable
1.1	0.65	-0.5042	0.7802	0.2918	-1.2767	-0.5311	0.6362	2.1365	Instable
1.2	0.70	-0.4246	0.7966	0.2859	-1.3009	-0.4885	0.6257	2.0932	Instable
1.3	0.80	-0.3028	0.7885	0.2754	-1.2874	-0.4313	0.6220	2.0164	Instable

Interprétation :

On remarque le système énergétique des différents régimes de grandes charges présent des états instables.

IV.3.2 Les courbes de $\Delta\delta, \Delta\omega, Err, \Delta Te$ de système sans PSS :

Nous allons choisir un cas instable pour un régime bien défini c'est-à-dire $Pt=1.2$ $Qt=0.70$ et nous décrivons les courbes de $\Delta\delta, \Delta\omega, Err, \Delta Te$ de système sans PSS.

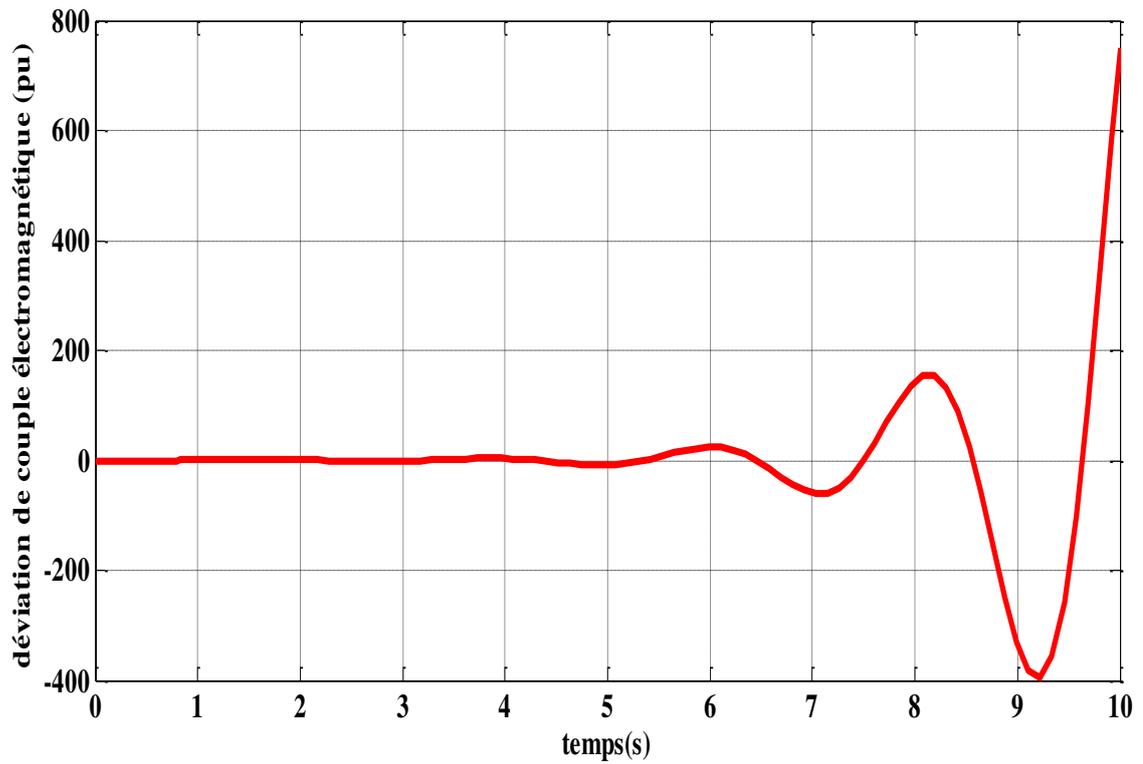


Figure IV.3 déviaton de couple électromagnétique (pu) sans PSS

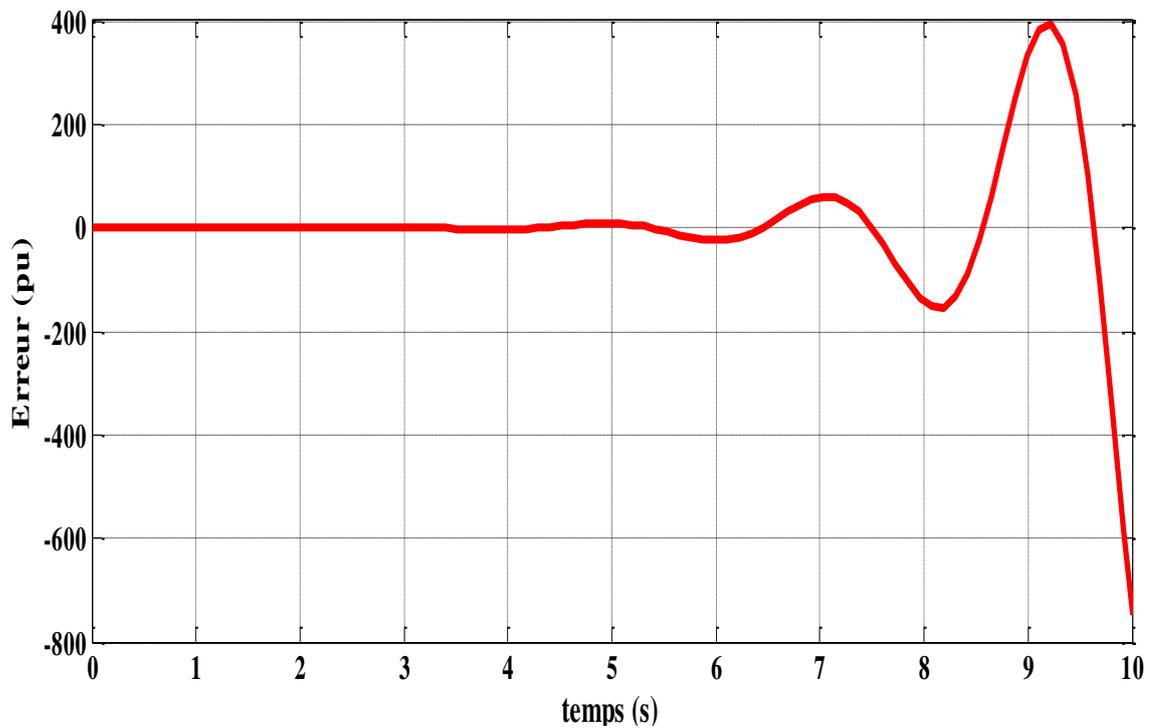


Figure IV.4 Erreur (pu) sans PSS

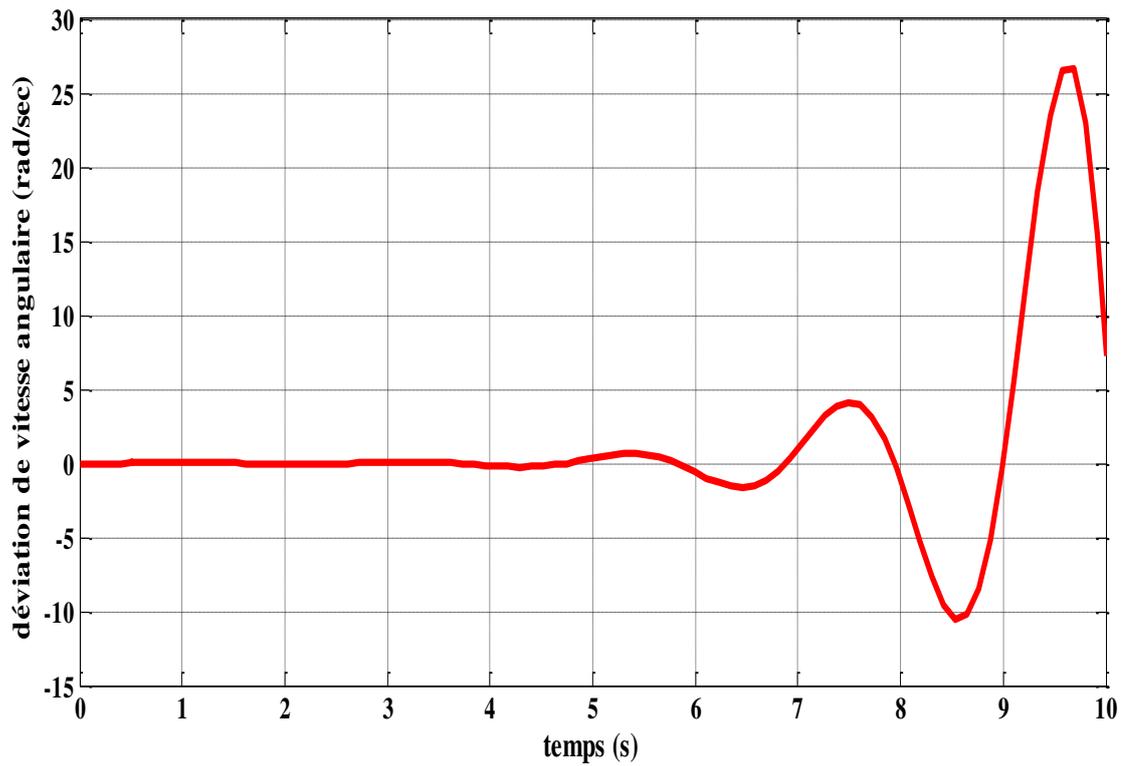


Figure IV.5 déviaton de vitesse angulaire (rad/sec) sans PSS

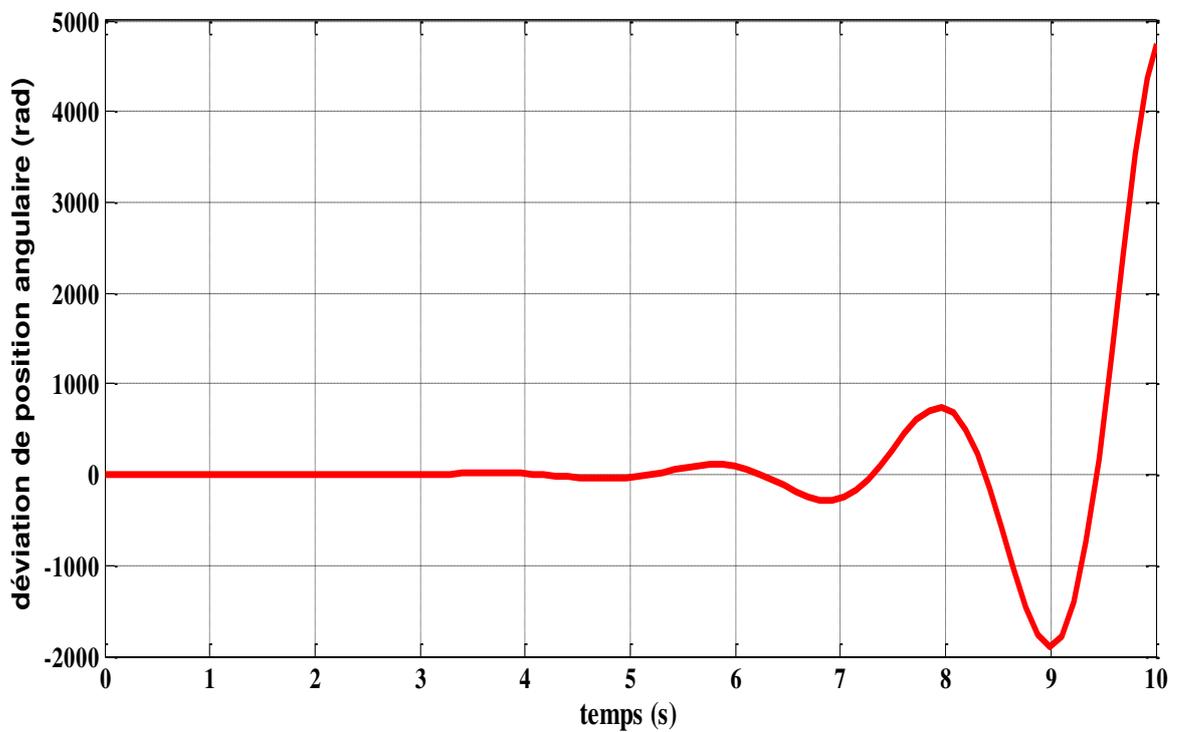


Figure IV.6 déviaton de position angulaire (rad) sans PSS

Chapitre. IV : Application à l'analyse de la stabilité dynamique

Après la simulation, les résultats relatifs au système étudié sont montrés dans les figures (IV.3, IV.4, IV.5, IV.6) au dessous, on remarque que le système est instable et malheureusement ces grandeurs augment avec des façons brusques et tend vers l'infini.

IV.3.3 Les effets de la puissance réactive sur la stabilité du système énergétique :

Dans cette partie nous avons fixé la puissance active $P_t = 0.90 pu$ et augmenter progressivement la puissance réactive pour analyser la réponse de système et observer les effets de l'augmentation de la puissance réactive. Les résultats donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 Analyse du système avec l'augmentation de la puissance réactive

P_t (pu)	Q_t (pu)	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	$K5$	$K6$	$T3$	L'étape de système
0.90	0.40	0.7146	0.8102	0.3152	1.3314	0.6817	0.6593	2.3080	instable
0.90	0.50	0.6607	0.7590	0.3072	1.2463	0.6333	0.6764	2.2490	Instable
0.90	0.55	0.6327	0.7346	0.3031	1.2060	0.6079	0.6828	2.2188	instable
0.90	0.60	0.6037	0.7112	0.2989	1.1670	0.5822	0.6879	2.1880	Stable

Interprétation :

Dans le tableau IV.4 on remarque que le système énergétique est stable pour la valeur de la puissance réactive élevée égale $Q_t = 0.60 (pu)$, mais lorsque la puissance réactive diminue sur cette valeur, le système est instable.

IV.4 Analyse du système avec Le contrôleur PSS :

Le contrôleur PSS décrit dans le chapitre 2 est introduit dans le modèle de la figure IV.1, cela aboutit au modèle de la figure IV.7. L'analyse est faite seulement pour $\Delta Tm = 0.2 pu$. Les limites de gain Kp , et les constantes de temps Tw et $T1, T2, T3, T4$, sont données sur le Tableau IV.5. Les paramètres de PSS sont optimisés en utilisant la méthode d'optimisation les algorithmes génétiques décrit dans le chapitre 3.

Chapitre. IV : Application à l'analyse de la stabilité dynamique

Tableau IV.6 Paramatres de l'algorithme génétique

Nombre de population	Np=20
Nombre de génération	Ng=50
Probabilité de croisement	Pc=0.7
Probabilité de mutation	Pm=0.061

IV.4.2 Réglage les paramètres de PSS par les algorithmes génétiques pour les cas instable du modèle :

Dans cette partie nous avons fait l'optimisation des paramètres de PSS avec les algorithmes génétiques pour rétablir l'ordre dans la stabilité et les résultats sont le tableau IV.6 suivants :

Tableau IV.7 Les paramètres de PSS après l'optimisation sur les cas instables

$P_t(pu)$	$Q_t(pu)$	T_1	T_2	T_3	T_4	T_w	K_p	L'étape de système
0.90	0.48	0.9220	0.9406	0.8157	0.7292	5.5423	39.3547	Instable
0.95	0.50	0.1228	0.2842	0.4119	0.6304	7.7228	46.9442	Instable
01	0.60	0.4156	0.5705	0.1463	0.2499	6.3068	63.9703	Instable
1.1	0.65	0.1676	0.8965	0.4467	0.3888	8.8364	52.6128	Instable
1.2	0.70	0.8333	0.6902	0.4949	0.7761	3.5814	15.5419	Stable
1.3	0.80	0.3288	0.9681	0.7852	0.6277	1.2186	55.2493	Stable

Interprétation :

Après l'analyse des six régimes de fonctionnement, on remarque qu'il quatre cas instables et deux cas stable. Il est remarquable pour les quatre premiers cas que le PSS n'a pas pu ramener la stabilité à cause de l'insuffisance de la puissance réactive.

IV.4.3 Les courbes de $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err , ΔT_e de système avec le régulateur PSS :

Nous allons choisir le même cas que précédemment $P_t=1.2$ pu $Q_t=0.70$ pu et nous décrivons les courbes de $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err , ΔT_e de système avec PSS.

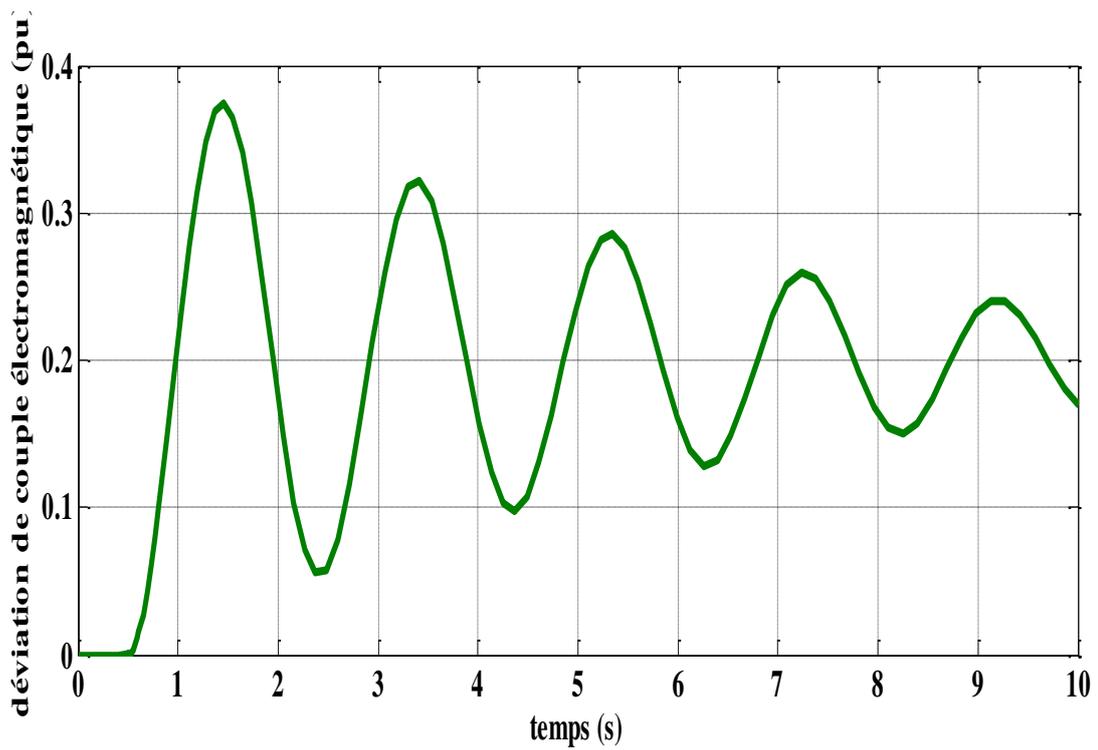


Figure IV.8 déviation de couple électromagnétique (pu) avec PSS

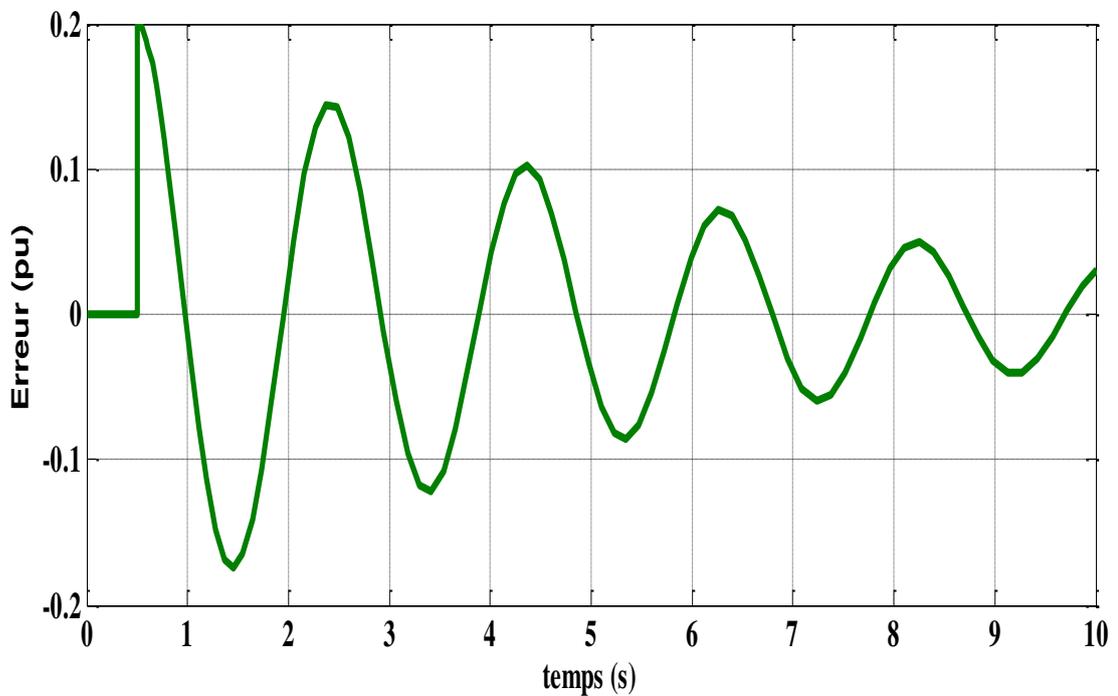


Figure IV.9 Erreur (pu) avec PSS

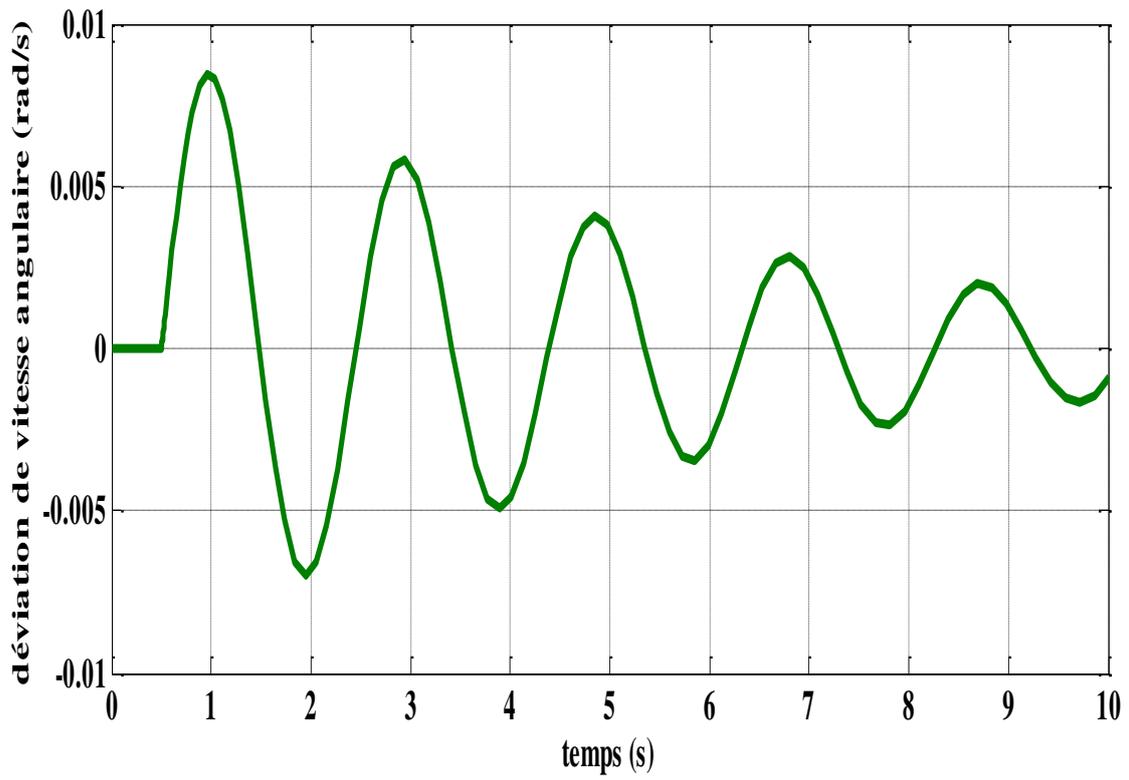


Figure IV.10 déviaton de vitesse angulaire (rad/s) avec PSS

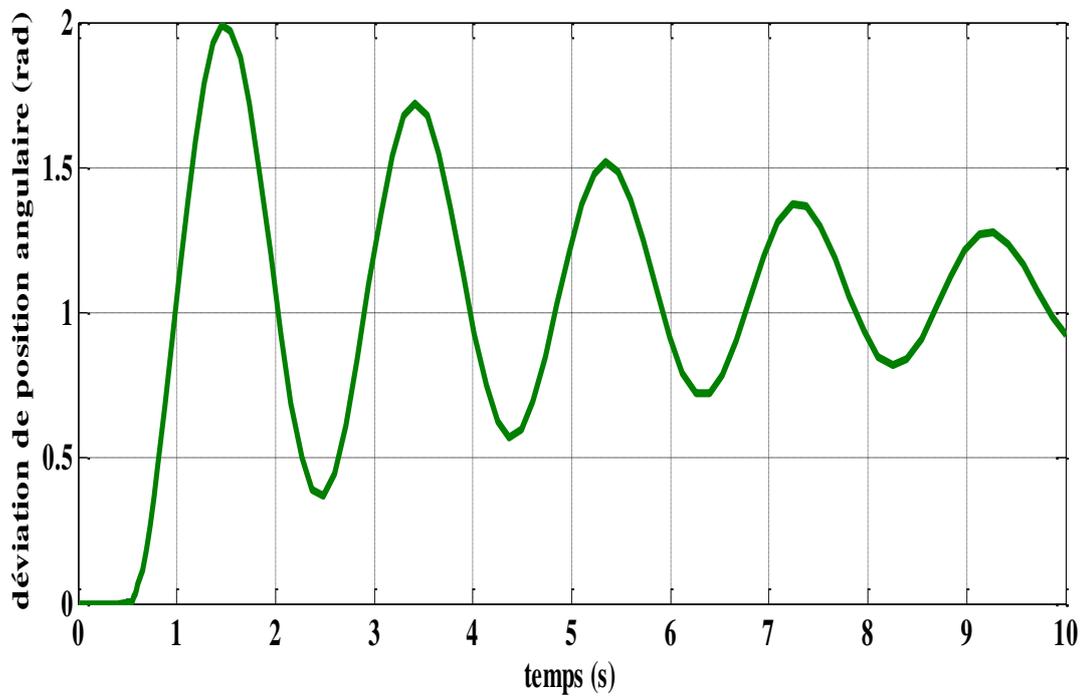


Figure IV.11 déviaton de position angulaire (rad) avec PSS

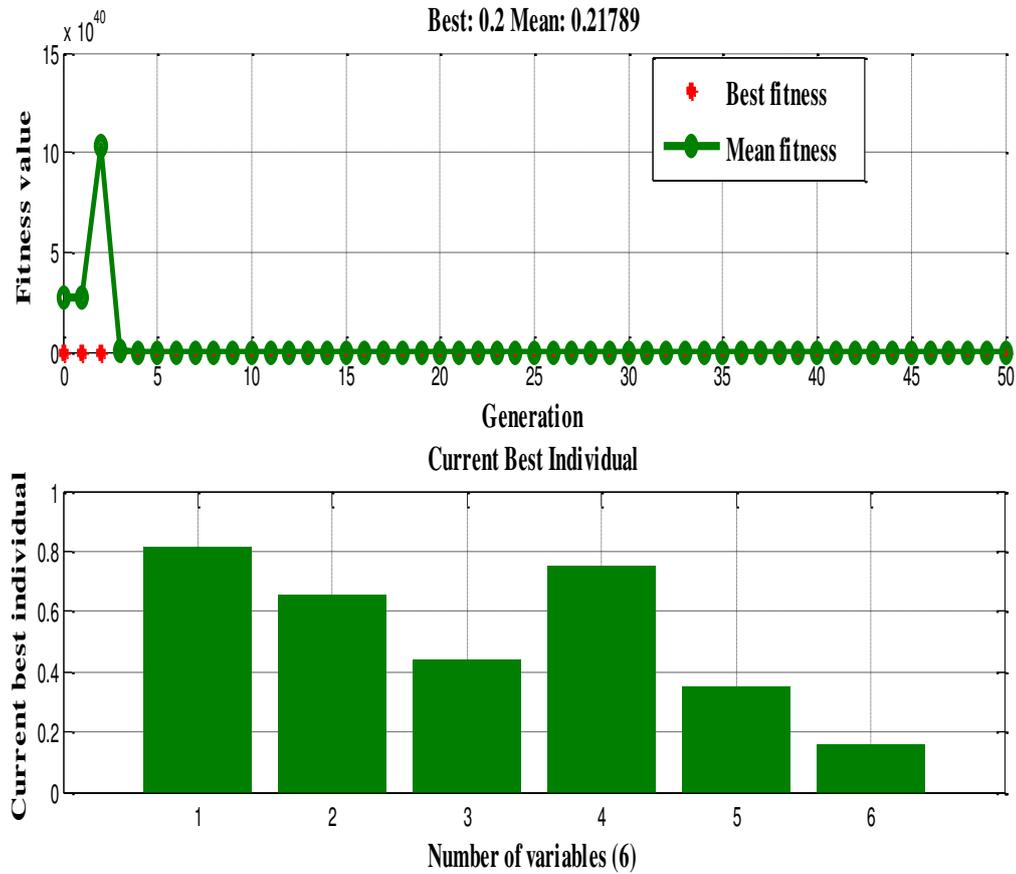


Figure IV.12 L'évolution de l'algorithme génétique de système avec PSS

Après la simulation, les résultats relatifs au système étudié sont montrés que d'après l'utilisation de PSS, dans les figures (IV.7, IV.8, IV.9, IV.10) ci-dessus, on remarque que l'évolution des courbes commence à l'instant 0,5 sec (instant d'application de la perturbation) et montrent que le système devient stable.

IV.5 Amélioration la stabilité dynamique avec le contrôleur PSS :

On choisit un cas stable $Pt = 0.2 pu$, $Qt = 0.1 pu$ pour observer la déférence dans la réponse de système avant et après le contrôleur PSS sans et avec l'optimisation et le résultat des paramètres de PSS après et avant l'optimisation est donné dans les deux tableaux suivants :

Tableau IV.8 Paramètre de PSS avant l'optimisation

$Pt(pu)$	$Qt(pu)$	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	Tw	Kp
0.2	0.1	0.2823	0.9892	0.2479	0.1010	0.1001	69.9612

Tableau IV.9 paramètre de PSS après l'optimisation

$Pt(pu)$	$Qt(pu)$	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	Tw	Kp
0.2	0.1	0.5922	0.4530	0.6817	0.2248	7.5619	47.5151

IV.5.1 Les courbes de $\Delta\delta, \Delta\omega, Err, \Delta Te$ de système avec et sans le régulateur PSS :

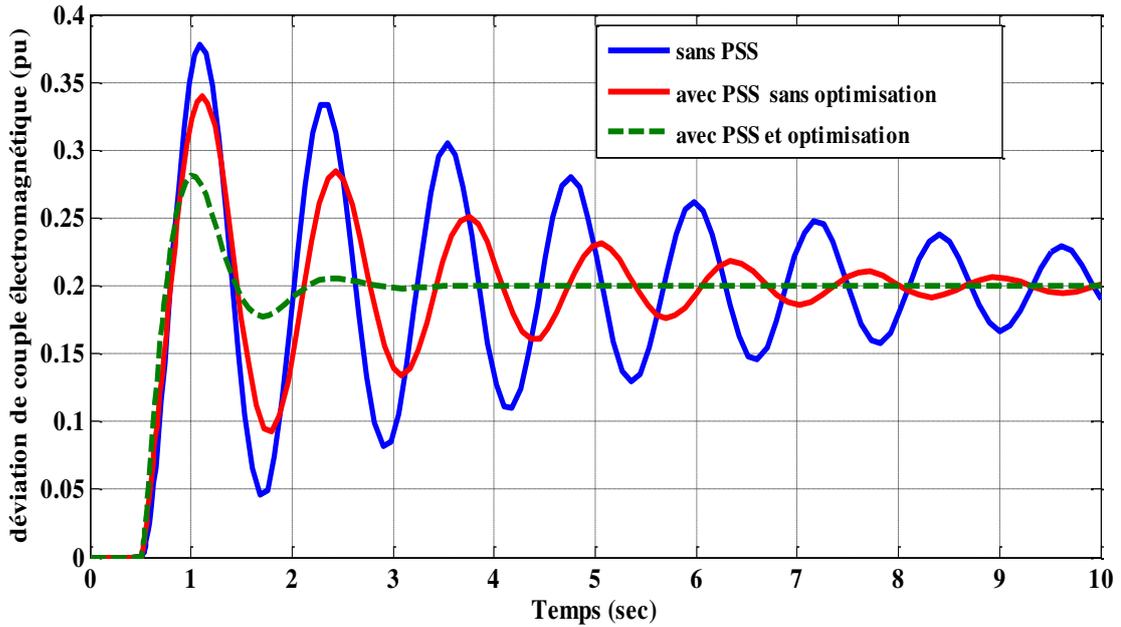


Figure IV.13 déviation de couple électromagnétique (pu) avec et sans PSS

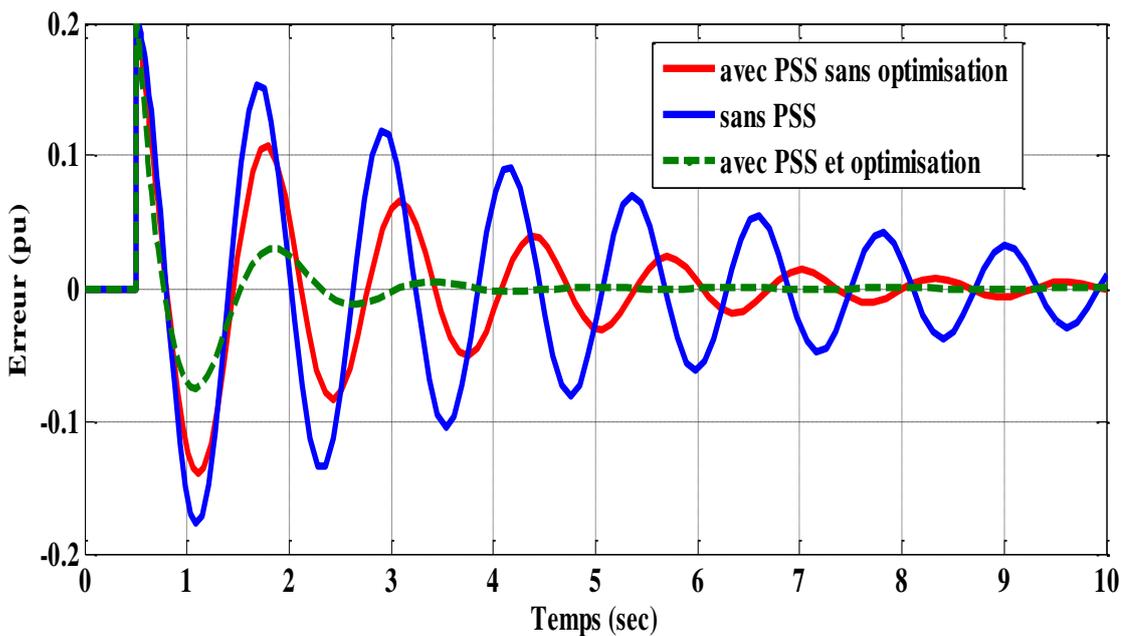


Figure IV.14 Erreur (pu) avec et sans PSS

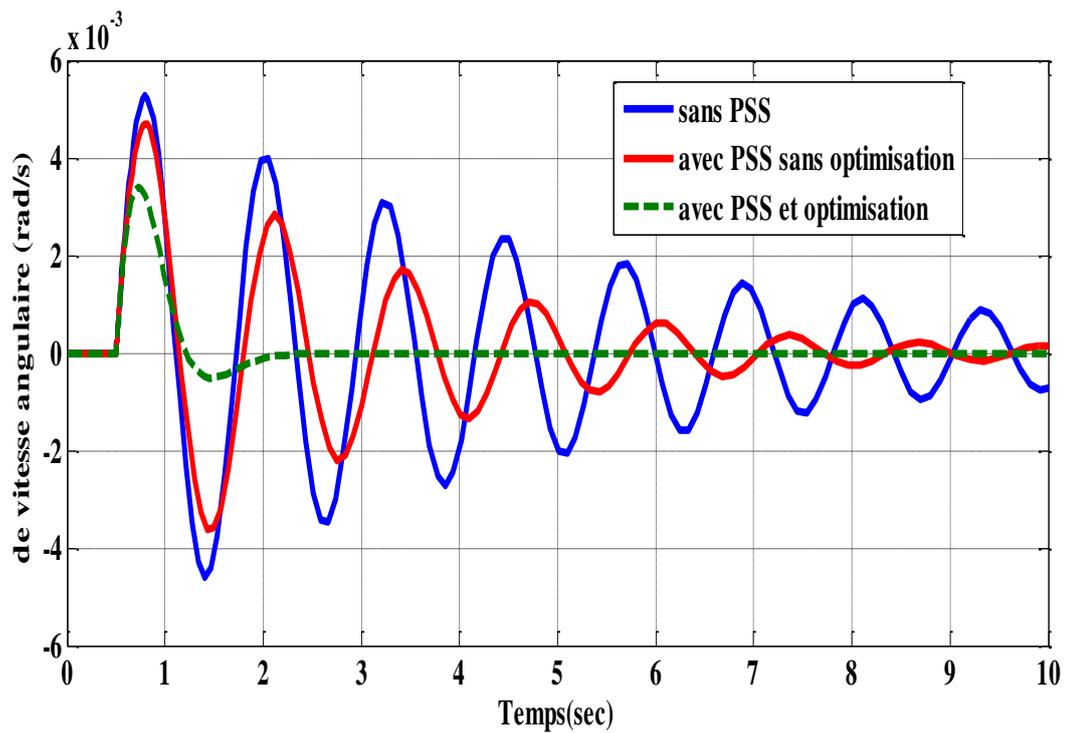


Figure IV.15 déviation de vitesse angulaire (rad/s) avec et sans PSS

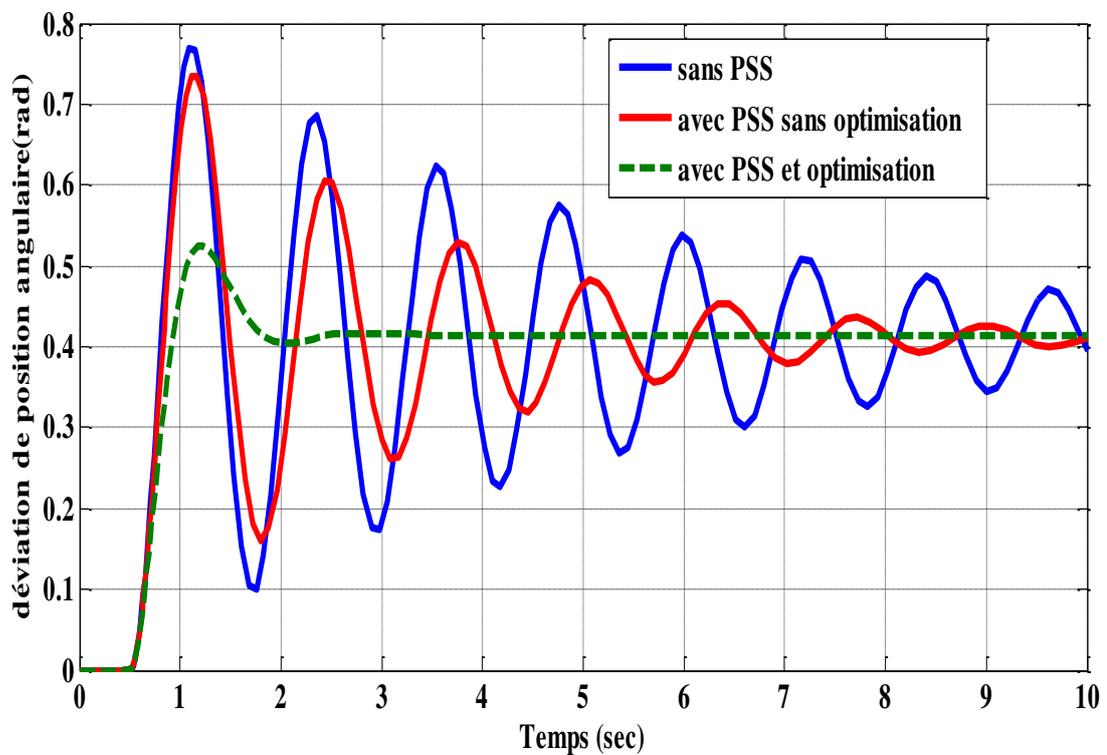


Figure IV.16 déviation de position angulaire (rad) avec et sans PSS

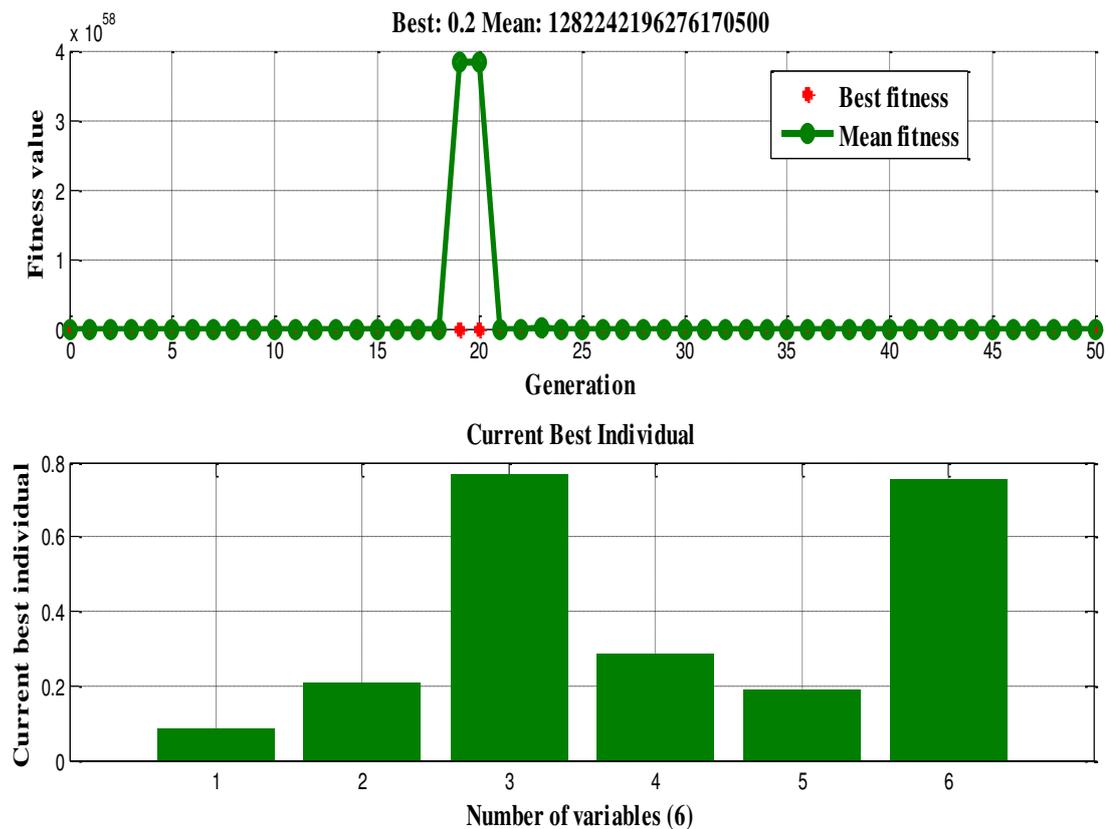


Figure IV.17 L'évolution de l'algorithme génétique de système avec PSS

Interprétation :

Les figures (IV.13, IV.14, IV.15, IV.16) montrent que la réponse de système sans et avec l'utilisateur de PSS avant et après l'optimisation. Le système incorporant un PSS avec paramètres optimisés présenter des meilleures performances (moins d'oscillation) que le système sans PSS et le système avec PSS à paramètres non optimisés le système moins stable (plus que d'oscillation).

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode d'optimisation des algorithmes génétiques pour optimiser les paramètres de PSS, pour améliorer la stabilité du réseau dans le cas du modèle SMIB (Single Machine Infinity Bus). On a analysé aussi le système pour différents régimes de fonctionnement de charges (faible, moyennes et grande) et analyser les effets de l'augmentation de la puissance réactive sur le système énergétique. Comme résulte, que remarque le PSS à une bonne influence sur la stabilité du système.

Conclusion générale

Diverses perturbations dans les systèmes électriques génèrent des oscillations importantes qui ont des effets nocifs et dangereux sur la stabilité des réseaux électriques. Par conséquent, l'amélioration de la stabilité en particulier pour assurer un bon amortissement des oscillations et restaurer la stabilité du système, représente un objectif prioritaire, en utilisant la régulation qui est stabilisateur de réseau électrique (PSS).

En traité dans ce mémoire, l'application des algorithmes génétiques (AG) pour l'optimisation des paramètres du dispositif stabilisateur du système de puissance PSS, à 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 ca nécessite des techniques qui peuvent surmonter la complexité des problèmes traités dans ce domaine.

Le modèle d'étude est formé d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini à travers une ligne de transport. Les travaux que nous avons menés dans ce mémoire s'est des points suivants :

- Analyse de système pour différents régimes (faible, moyennes et grande) charges.
- Analyse des effets de la puissance réactive sur la stabilité du système énergétique.
- Analyse de système avec Le contrôleur PSS optimisé par l'algorithme génétique pour ré ordre le système instable et minimiser les oscillations.

Dans ce mémoire, nous avons fait la simulation de système sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, en dégageant et en interprétant les courbes de déviation angulaire, déviation de la vitesse, déviation du couple électromagnétique et l'erreur sans et avec le contrôleur PSS. Après cette interprétation des courbes, nous pouvons conclure que l'évaluation des performances du contrôleur PSS avec des paramètres optimisé et non optimisé, sur un réseau mono-machine reliée à un jeu de barres infini (SMIB) peut être déterminée. Les résultats obtenus après une certaine perturbation montrent que l'action contrôleur PSS avec des paramètres optimisé utilisé dans le système d'énergie assure un bon amortissement et une efficacité en termes de temps de réponse.

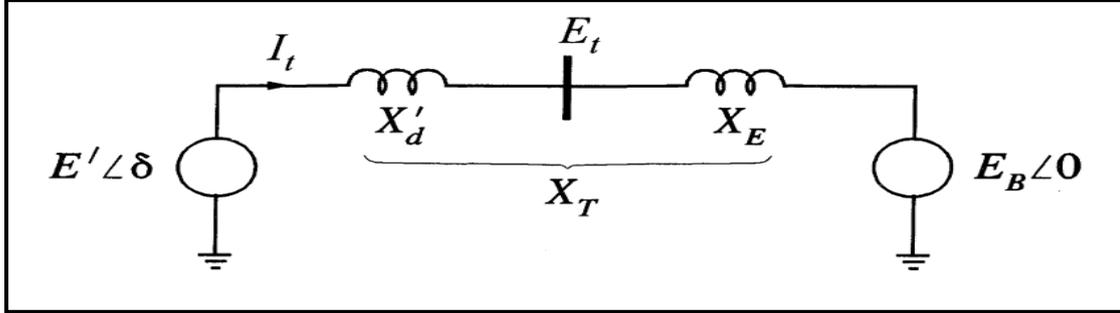
Conclusion générale

Les perspectives de ce travail sont nombreuses car les recherches dont il a fait l'objet sont encore loin d'être finalisées. Voici quelques suggestions :

- Analysé le système avec des autres régulateur ou contrôleur parce que dans cette étude nous avons trouvé des déférentes régimes instables après l'utilisation de régulateur PSS.
- Analysé le système en cas la variation de la tension à la sorti de générateur.
- Appliqué des autres méthodes d'optimisation et comparé les résulta pour affiner la recherche des solutions optimales.
- Appliquer notre approche au modèle SMIB en multi machine.

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

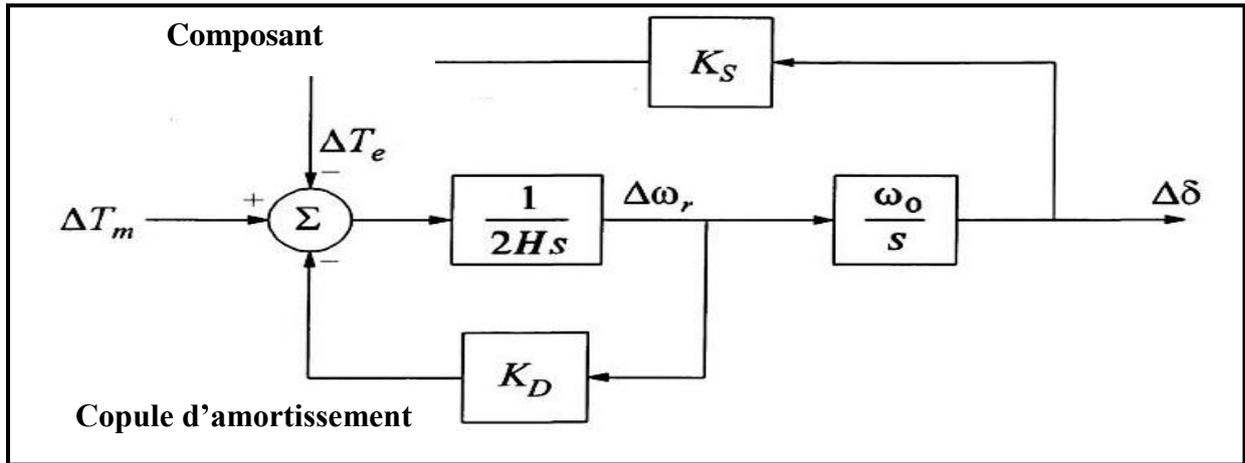


Schéma bloc fonctionnel d'une machine simple liée à un jeu de barre infini avec
Modèle classique de générateur

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

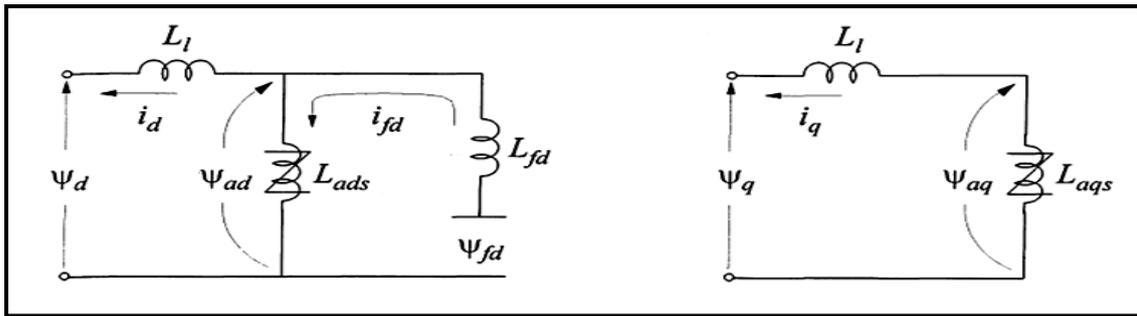
$$P\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D\Delta\omega_r)$$

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

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

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

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

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

La résolution au niveau de l'axe est donne

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

ANNEXE

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

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

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

$$\begin{cases} \Delta i_d = m_1 \Delta \delta + m_2 \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta i_q = n_1 \Delta \delta + n_2 \Delta \Psi_{fd} \end{cases} \quad (24)$$

Tel que

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

Les valeurs des paramètres de système de puissance :

ANNEXE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Bibliographie

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

[AND06] Anderson G., Modeling and analysis of Electric Power Systems, Lectures 227-526, EEH Power Systems Laboratory, ETH, Zurich, March 2006.

[AND 93] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power system control and stability", IEEE Press, New York, 1993.

[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

[BAR 08] C. Barrios, S. Niculescu, C. Morarescu, and K.Gu, «On the Fragility of PI Controllers for Time-Delay SISO Systems», 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp.529- 534, 2008.

[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.

[FAR 06] Farmer R.G., Power System Dynamics and Stability, the Electric Power Engineering Handbook, 2nd edition, CRC Press, Talyor & Francis Group, LLC, 2006.

[FER 14] Fergane Manel « les méthodes d'amélioration de la stabilité dynamique dans les réseaux électrique », mémoire de magister à université de farhat Abbas Stif, 29/12/2014

[FEL90] Feliachi A., « Optimal Siting of Power System Stabilizers », IEE Proceedings, Pt.C, vol. 137, n°.2, pp. 101-106, March 1990.

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

Bibliographie

[JSI 05] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems», Springer, 2005.

[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.

[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.

[IEE 03] IEEE Task Force on Power System Stabilizers, « Overview of Power System Stability Concepts », IEEE Trans. On Power Systems, pp. 1762-1768, 2003.

[IEE 05] 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.

[GHO 03] GHOLIPOUR SHAHRAKI ESKANDER, « Apport de l'UPFC a l'Amelioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques », These de Doctorat en Genie Electrique, Université Henri Poincare, Nancy-I, 13/09/2003.

[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 89] 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.

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

Bibliographie

[KAD 17] KADI Mohamed Amine ET OTMANI Massinissa, « Optimisation d'un régulateur PID par les essais particuliers », Mémoire Master professionnellen Genie Electrique, Universite Kasdi Merbah Ouargla, 25/05/2017

[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

[LAR 81] Larsen E.V. and Swann D.A., « Applying power system stabilizers part-I: General Concepts », IEEE Trans. Power App. Sys., vol.100, n°. 6, pp. 3017-3024, Jun. 1981.

[LEO 06] L. G. Leonard, Power System stability. Taylor &francis Group, LLC, 2006.

[MOK 12] Mokhnache Madiha, « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS », Thèse de magister, Université Ferhat Abbas Setif 1, Faculté de Technologie, 08 janvier 2012.

[NES 08] Nesmat Abu_Tabak, «stabilité dynamique des system électrique multi machines : modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de doctorat, l'école doctoral électronique, automatique de Lyon, 19/11/2008.

[PAL 05] Pal B. and Chaudhuri B., Robust Control in Power Systems, Springer Science + Business Media, Inc, 2005.

[PRA 94] Prabha Kundur scholarly article « power system stability and control» mcgraw hill Université of Toronto 1994

[PAS 98] PASSELERGUE. J.C : « Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques », thèse de Doctorat de l'INPG, 26 novembre 1998.

[RAB 07] Rabah BENABID « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques » de Magister à Université Amar Telidji, Laghouat, 04/09/2007

Bibliographie

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

[SOU 04] Souquet Amédée, Radet François-Gérard, «ALGORITHMES GENETIQUES », TE de fin d'année Tutorat de Mr Philippe AUDEBAUD, 21/06/2004.

[TAR 10] Tarik ZABAIYOU, “Coordination Des Régulateurs Conventionnels Des Machines Synchrones Et Des Compensateurs Statiques (SVCS) ”, Thèse de doctorat, école de technologie supérieure, Université Du Québec, Montréal, Le 21 Décembre 2010.

[TOU12] 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

[TSH 08] Tshina Mulumba,”Optimal Tuning Of Power System Stabilizers Based On Evolution Algorithm”, Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, 13th May 2008.

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

[ZEN 13] Zendagui Fatima Zohra, « analyse de la stabilité transitoire dans les réseaux électrique », mémoire master à université MOUHAMED KHIDER _BISKRA, 06/06 2013.

[ZIT 10] Zitouni Fares « amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par l'utilisation des systèmes FACTS », magister en électrotechnique à université de FERHAT ABBAS_ SETIF ,15/12/2010.