

République Algérienne Démocratique et Populaire
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 : Réseaux électriques

Réf:.....

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

MASTER

Thème

**Amélioration de la stabilité des
réseaux électriques en utilisant
les systèmes PID et PSS réglés
avec l'algorithme PSO**

Présenté par :

Harkat Said

Soutenu le :31 Janvier 2018

Devant le jury composé de:

Mme. Torki Amel

MCA

Président

Mr. Salhi Ahmed

MCB

Encadreur

Mr. Naimi Djemai

MCA

Examineur

Année universitaire : 2017 / 2018

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



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : *Réseaux électriques*

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

MASTER

Thème

Amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant les systèmes PID et PSS réglés avec l'algorithme PSO

Présenté par :

Harkat Said

Avis favorable de l'encadreur :

Dr: Salhi Ahmed

Avis favorable du Président du Jury

Mme. Torki Amel

Cachet et signature

حزن يشويه الفراق بعد التجمع
وفرح ليزوغ فجر جديد من حياتي هو يوم تخرجي

هو بالنسبة لي يوم ميلادي لي

أطلع فيه لما هو آت من همسات هذه الدنيا المليئة بالتفائل والأمل المشرق

إهداني هنا ليس لتخرجي فقط

بل للتحليق نحن والرفقة في سماء مملوثة بغمام يصحبه المزن هي فرص تقتنص

وثمرات تقطف عندما تكون يانعة وها أنا أقف لأقطف إحدى هذه الثمرات التي ينعت لي

وهي تخرجي في انتظار قطف المزيد بإذن الله

لعلني في هذه الكلمات البسيطة الحروف التي تتمايل بتمايل انامل العاجزة عن تكملة هذا الإهداء بسبب الفراق

لصرح ضمنى بين أحضانه فترات كالأم

هنا سوف اضع كلمات لكل من ترك بصمة في حياتي وغير من مجراها وعمق في توسيع مداركي العلمية
والعقلية

لكل من أشعرتني بأنني لست وحيد و لكل من لملم احزاني بين فترة وأخرى

إهداني إليك أيتها الأم التي كنت عوناً ودفء بين أضلعي

إليك ايها الأب الذي علمني بأن عندما تطفأ الأنوار لابد من إضاءة الشمعة ولا نقوم بلعن الظلام

إلى إخوتي و أخواتي خديجة مسعود سفيان عبد السلام و آدم سهيلة أميرة و لكل عائلة حركات
إلى الأصدقاء اسماعيل أمين مكي مانو يوسف نجم الدين زكريا طارق كريمو عبد المالك و لكل رفاقي
و لكل ملاك أنار طريقي
نتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى كل من ساعدنا من قريب أو من بعيد على انجاز هذا العمل وفي تذليل ما
وجهناه من صعوبات

وأخص بالذكر الأستاذ المشرف الدكتور أحمد صالحى الذي لم يبخل عني بتوجيهاته ونصائحه القيمة التي
كانت عوناً لي في إتمام هذا البحث

إليك كل طلبة ثانية ماستر ل م د تخصص شبكات كهربائية دفعة 2016-2017

وأسرة فريق كرة الطائرة لطولقة و أبناء حي 400 مسكن

أبعث أرق تحية وأعذب سمفونية سمعتها واردها لكم بأنني احببتكم من كل قلب

سيقف قلبي هنا برهة ليستقر بين أنظاركم ما كتبت لعلها هذه المفردات تكون خير و معينة حتى تتذكروني

يوما ما

Remerciement

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.

Je tiens à remercier Dr. SALHI AHMED d'avoir accepté la direction de ces travaux de recherche, je lui exprime par la présente toute ma gratitude, pour son expérience, sa compétence, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines.

Bien sûr, j'ai une pensée pour ma famille...

Pour finir tout ceci n'aurait pas été possible sans l'amour et le soutien de ma famille. Mon père, Ma mère, mes chers frères et sœur, merci de tout cœur pour les petites ou grandes choses que vous avez faites pour moi.

Les remerciements ne seraient rien sans une mention particulière à l'ensemble de mes professeurs et mes collègues à l'Université de Mohamed Khider Biskra et je ne peux pas oublier mes amis de toujours, avec lesquels j'ai partagée des bons moments.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1: Les différents niveaux d'un système de puissance	17
Figure I.2: Structure générale d'un système de puissance.....	18
Figure I.3: Circuit équivalent de la machine synchrone connectée a un jeu de barre infini	19
Figure I.4: Modèle classique de générateur.	20
Figure I.5: Modélisation de la machine synchrone idéalisée	21
Figure I.6: Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park	21
Figure I.7: Phasors relatifs à la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système multi machines.....	23
Figure I.8: Couples mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.....	25
Figure I.9: Structure générale d'un système de force motrice - générateur	27
Figure I.10: Modèle de la turbine et du gouverneur	28
Figure I.11: Structure générale d'un système d'excitation statique avec son AVR ..	29
Figure I.12: Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1A	30
Figure I.13: Modèle simplifié de transformateur	31
Figure I.14: Modèle en π d'une ligne de transmission.	32
Figure I.15: Modélisation d'une charge par son admittance équivalente.....	32
Figure I.16: Digramme de l'ensemble des blocs du système de puissance.....	34

CHAPITRE II

Figure II.1: Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation du générateur synchrone puissant.....	36
Figure II.2: Classification des différents types de la stabilité de système électro-énergétique.....	38
Figure II.3: Variation d'angle de rotor.....	39

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE III

Figure III.1: Démarches de résolution d'un problème d'optimisation.....	44
Figure III.2: Groupe de : (a) poissons, (b) oiseaux.....	45
Figure III.3: Exemple de voisinage géographique.	45
Figure III.4: Deux cas de voisinage social.....	46
Figure III.5: Déplacement d'une particule	48
Figure III.6: Principe de déplacement d'un point de recherche par PSO.....	49
Figure III.7: Organigramme général de la méthode PSO	50

CHAPITRE IV

Figure IV.1: Schéma de principe d'une boucle de régulation.	52
Figure IV.2: Représentation de (T_m , T_r , D)	53
Figure IV.3: Régulateur PID.	54
Figure IV.4 : Action proportionnelle P.	55
Figure IV.5: Action intégrale I.	55
Figure IV.6: Action dérivée D.	56
Figure IV.7: Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système	57
Figure IV.8: Modèle d'un PSS avance/retard	57

CHAPITRE V

Figure V.1: Schéma fonctionnel d'un Système d'excitation avec l'AVR.....	62
Figure V.2 : déviation de position angulaire (rad)	63
Figure V.3 : déviation de vitesse angulaire (rad/s)	63
Figure V.4 : Erreur (p.u)	64
Figure V.5 : déviation de couple électromagnétique (p.u)	64
Figure V.6 : Schéma bloc fonctionnel avec l'AVR et le PID	66

LISTE DES FIGURES

Figure V.7 : déviation de position angulaire de système avec PID (rad)	67
Figure V.8 : déviation de vitesse angulaire de système avec PID (rad/s)	67
Figure V.9 : Erreur de système avec PID (p.u)	68
Figure V.10 : déviation de couple électromagnétique de système avec PID (p.u)	68
Figure V.11 : L'évolution de la fonction objectif (Fobj) de système avec PID	69
Figure V.12 : Schéma bloc fonctionnel avec l'AVR et le PSS	70
Figure V.13 : déviation de position angulaire de système avec PSS (rad)	71
Figure V.14 : déviation de vitesse angulaire de système avec PSS (rad/s)	72
Figure V.15 : Erreur de système avec PSS (p.u)	72
Figure V.16 : déviation de couple électromagnétique de système avec PSS (p.u)	73
Figure V.17 : L'évolution de la fonction objectif (Fobj) de système avec PSS	73
Figure V.18 : Figure V.18 déviation de position angulaire système sans PID et PSS et système avec PID, système avec PSS (rad)	74
Figure V.19 : déviation de vitesse angulaire système sans PID et PSS et système avec PID, système avec PSS (rad/s)	75
Figure V.20 : Erreur système sans PID et PSS et système avec PID, système avec PSS (p.u)	75
Figure V.21 : déviation de couple électromagnétique (p.u) système sans PID et PSS et système avec PID, système avec PSS	76

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

CHAPITRE II

Tableau II.1: Incidents suivis d'un effondrement	37
Tableau II.2: Incidents non suivis d'un effondrement	37

CHAPITRE IV

Tableau IV.1: Caractéristiques du régulateur PID	56
---	-----------

CHAPITRE V

Tableau V.1 : les dépassements des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ et ΔT_e pour le système sans PID ou PSS	65
Tableau V.2: Plages de variations des gains du PID	66
Tableau V.3 : les valeurs optimales des paramètres de PID.....	66
Tableau V.4 les dépassements des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ et ΔT_e pour le système avec PID.....	69
Tableau V.5: Plages de variations des gains du PSS	70
Tableau V.6: les valeurs optimales des paramètres de PSS.....	71
Tableau V.7 : les dépassements des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ et ΔT_e pour le système avec PSS	74

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

Liste des abréviations et des Symboles

Abréviation

SMIB Single Machine Infinity Bus

PSS Power System Stabilizers

PID proportionnel intégrateur dérivateur

PSO Particule Swarm Optimisation

OEP Optimisation d'Essaime de Particule

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

Fobj fonction objectif de système

Err Erreur

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 courant alternatif en Hz

p : nombre de paires de pôles

E : f.é.m. induit (V)

K :Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

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

Φ : flux maximum à travers un enroulement (Wb)

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

p : nombre de paire de pôles

K' : KN_p : constante globale (caractéristique du moteur)

$E'd$: f.é.m. du générateur induite suivant l'axe d , en p.u.

$X'q$: réactance transitoire d'axe q , en p.u.

Xq : réactance synchrone d'axe q , en p.u.

$X'd$: réactance transitoire d'axe d , en p.u.

Xd : réactance synchrone d'axe d , en p.u.

$E'q$: f.é.m. du générateur induite suivant l'axe q , en p.u.

I_d : Courant du générateur axe direct (pu)

I_q : Courant du générateur axe quadratique (pu)

X : Réactance synchrone (p.u)

S : puissance apparent (p.u)

P : puissance active (p.u)

Q : puissance réactive (p.u)

ω : vitesse angulaire du rotor, en p.u.

δ : angle de rotor, en rad.

$\Delta\delta$: déviation de position angulaire

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

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

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

T_{mi} : couple mécanique fourni par la turbine, en p.u.

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

T_{ei} : couple électromagnétique associée à la puissance électrique P_{ei} produite du générateur, ($T_{ei} = \frac{P_{ei}}{\omega_i}$) en p.u.

D_i : coefficient d'amortissement du générateur i .

V_{ik} : Vitesse de l'agent i à l'itération k

w : Fonction de pondération

C_j : Facteurs de pondération,

rand : Nombre aléatoire entre 0 et 1.

S_{ik} : Position actuelle d'agent i à l'itération k .

P_{besti} : Meilleure position trouvée par la particule i jusqu'ici.

P_{gbesti} : Meilleure position trouvée par l'essaim jusqu'ici.

w_{max} : Poids initial,

w_{min} : Poids final,

$iter_{max}$: Nombre d'itérations maximum.

iter : Itération courante.

U : la variable de command

e : le signal d'erreur

T_i, T_d : constant de temps

K : le gain de la partie proportionnelle

Y_{out} : signale de sortie

Y_{ref} : signale de référence

R_a : Résistance par phase statorique (pu)

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

RÉSUMÉ

RESUME :

La stabilité du réseau électrique est une préoccupation très importante pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques. Pour cette raison, nous essayons dans ce travail d'améliorer de la stabilité du réseau électrique en utilisant deux types de système de réglage, le régulateur PID et le contrôleur PSS. A cause de la complexité du réglage des paramètres des deux systèmes (PID ou PSS), nous avons choisi une méthode métaheuristique appelée Optimisation par Essaim de Particule (OEP) pour optimiser les paramètres des PID et PSS. Une analyse des résultats de simulation a été accomplit pour juger les performances des PID et PSS dans le but d'amélioration de la stabilité. Une étude comparative a été dégagée pour déduire lequel des deux systèmes est le plus efficace. 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, méthode OEP, régulateur PID, contrôleur PSS, Machine synchrone, Jeu de barres infini.

ABSTRACT:

The power system stability is a very important concern for the planning and operation of electrical network. For this reason, we try in this work to improve the power system stability by using two types of control system, the PID regulator and the PSS controller. Because of the parameter adjustment complexity related to the two systems (PID or PSS), we chose a meta-heuristic method called Particle Swarm Optimization (PSO) to optimize the PID and PSS parameters. An analysis of simulation results has been performed to judge the performance of PID and PSS in order to improve stability. A comparative study has been made to deduce which of the two systems is most effective. The study model consists of a synchronous machine connected to an infinite bus bar across a transmission line.

KEYWORDS:

Power system, Stability, PSO method, PID regulator, PSS controller, Synchronous machine, Infinite bus.

RÉSUMÉ

يعد استقرار الشبكة الكهربائية انشغالا بالغ الأهمية لتخطيط و لتشغيل الشبكات الكهربائية. لهذا السبب، نحن نحاول في هذا العمل تحسين استقرار الشبكة الكهربائية باستخدام نوعين من نظام التحكم، نظام التحكم PID و نظام التحكم PSS. و بسبب صعوبة حساب معاملات كل من النظامين (PID, PSS), اخترنا طريقة الأمثلة المستوحاة من قبل أسراب الطيور أو الأسماك (OEP) من أجل إيجاد قيم مثلى لمعاملات نظامي التحكم. و قد تم إجراء تحليل لنتائج المحاكاة للحكم على أداء PID و PSS من أجل تحسين استقرار الشبكة الكهربائية. وأجريت مقارنة لاستنتاج أي النظامين أحسن كفاءة. النموذج الدراسي يتكون من ماكينة متزامنة موصولة بقضيب تجميعي ما لا نهائي عبر خط نقل كهربائي.

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة، الاستقرار، طريقة OEP ، المنظم للاستقرار PID, PSS ماكينة متزامنة, قضيب تجميعي ما لا نهائي.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Liste des figures	i
Liste des tableaux.....	iv
Liste des abréviations et des symboles.....	v
Résumé	viii
INTRODUCTION GENERALE.....	xv

Chapitre I : MODÉLISATION DES ÉLÉMENTS DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

I.1 Introduction.....	17
I.2 Le modèle général des éléments.....	18
I.2.1 Champ tournant.....	19
I.2.2 f.e.m. induite.....	19
I.2.3 Modèle du générateur	19
I.2.3.1 Modélisation de la machine synchrone dans le repère de Park.....	20
I.2.3.2 Les hypothèses du modèle	21
I.2.3.3 Equations électriques	23
I.2.3.4 Equations mécaniques.....	25
I.2.3.5 Régulation du générateur	26
I.2.3.6 Régulateur de fréquence et modèle de la turbine	27
I.2.4 Réseau de transport	30
I.2.5 Modèle de transformateur	31
I.2.6 Modèle des lignes de transport	31

SOMMAIRE

I.2.7	Modèle des charges.....	32
I.3	Les équations d'état généralisé du modèle	33
I.4	Conclusion	34
 Chapitre II : STABILITÉ DES RÉSEAUX ELECTRIQUES		
II.1	Introduction	35
II.2	Définitions	35
II.2.1	Système électro-énergétique	35
II.2.2	Réseau infini.....	35
II.2.3	Synchronisme	35
II.3	Stabilité d'un système électro-énergétique	35
II.4	Description générale du système électro-énergétique étudié	36
II.5	Les causes d'instabilité	36
II.6	Incidents liées à l'instabilité dans le monde	37
II.7	Les différents types de stabilité	37
II.7.1	Stabilité angulaire	39
II.7.1.1	Stabilité angulaire de grande perturbation (stabilité transitoire)	39
II.7.1.2	Stabilité angulaire de petites perturbations (stabilité dynamique)	40
II.7.2	La stabilité de tension	40
II.7.2.1	Stabilité de tension en grandes perturbations	41
II.7.2.2	Stabilité de tension en petites perturbations.....	41
II.7.3	La stabilité de fréquence	41

SOMMAIRE

II.8 Amélioration de la stabilité transitoire	42
---	----

II.9 Conclusion	42
-----------------------	----

Chapitre III : OPTIMISATION PAR L'ALGORITHME

ESSAIS DE PARTICULES PSO

III.1 Introduction	43
--------------------------	----

III.2 Définition de l'optimisation	43
--	----

III.3 Méthodologie de conception	43
--	----

III.4 Formulation du problème d'optimisation	44
--	----

III.5 Définition de notion de métaheuristiques	44
--	----

III.6 Optimisation d'Essaim de Particules	44
---	----

III.6.1 Notion de voisinage.....	45
----------------------------------	----

III.6.2 Principe de l'Algorithme PSO	46
--	----

III.6.3 Formulation Mathématique du PSO	47
---	----

III.6.4 Mécanisme de Confinement	48
--	----

III.6.5 L'organigramme de l'algorithme PSO	50
--	----

III.7 Conclusion	50
------------------------	----

Chapitre IV : ANALYSE DU RÉGULATEUR PID

ET LE CONTRÔLEUR PSS

IV.1 Introduction	51
-------------------------	----

IV.2 Généralité sur les systèmes asservis	51
---	----

IV.2.1 Définitions.....	51
-------------------------	----

SOMMAIRE

IV.2.2 L'objectif global de la régulation	52
IV.3 Eléments constitutifs d'une boucle de régulation	52
IV.4 Caractéristiques dynamiques d'un procédé	53
IV.4.1 Temps de réponse (T_r)	53
IV.4.2 Temps de montée (T_m)	53
IV.4.3 Dépassement (D)	53
IV.5 Régulateur PID	54
IV.5.1 Définition.....	54
IV.5.2 L'algorithme de base	54
IV.5.3 Description des actions de PID.....	55
IV.5.3.a L'action proportionnelle (P)	55
IV.5.3.b L'action intégrale (I)	55
IV.5.3.c Action dérivée (D)	56
IV.6 Fonctionnement et modèle de PSS	56
IV.7 Différents blocs de PSS	58
IV.7.1 L'amplificateur.....	58
IV.7.2 Le filtre passe-haut "filtre washout"	58
IV.7.3 Le filtre compensation de phase	58
IV.7.4 Le limiteur	59
IV.8 Réglage des paramètres de PSS.....	59
IV.9 Emplacement optimal des PSSs.....	59
IV.10 Conclusion	60

SOMMAIRE

Chapitre V : APPLICATION DU PSO POUR LE RÉGLAGE DE PID & PSS

V.1 Introduction	61
V.2 Modèle d'étude dans le MATLAB/SIMULINK	61
V.3 Analyse du système sans PID et sans PSS	62
V.3.1 Les courbes de $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err, ΔT_e du système sans PID et sans PSS	62
V.4 Analyse du système avec introduction d'un PID	65
V.4.1 Les courbes de $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err, ΔT_e de système avec PID	67
V.5 Analyse du système avec introduction d'un PSS	69
V.5.1 Les courbes de $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err, ΔT_e de système avec PSS	71
V.6 Comparaison entre l'efficacité de PID et PSS sur la stabilité de système	74
V.7 Conclusion	76
Conclusion générale	lxxvii
Annexe A	lxxviii
Bibliographie	lxxx

INTRODUCTION GÉNÉRALE

A l'heure actuelle, une des formes d'énergie la plus utilisée par l'homme est l'énergie électrique. 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 transportée pour être automatiquement livrée aux consommateurs, c'est à dire qu'on doit veiller à établir un équilibre permanent entre la production et la consommation. Avec le développement qu'a connu le monde industriel, la demande sur cette énergie est considérable et ne cesse d'accroître, pour cela on doit prévoir de grands ouvrages et de très grandes installations pour sa production, son transport et sa distribution ou réaliser des centres d'interconnexion afin de répondre à tous ces besoins en quantité et en qualité, tous en gardent un équilibre entre la production et la consommation.

Par ailleurs, la diversité des charges et les réseaux qui les relient aux sources possèdent souvent des inerties mécaniques et électriques qui rendent cet équilibre difficile. Par conséquent, des critères rigoureux de développement et de fonctionnement sont de plus en plus exigés. Dans ces conditions, la stabilité des systèmes électro-énergétiques devient une des préoccupations majeures pour les fournisseurs d'électricité. Ces systèmes doivent rester stables pour toutes les petites variations au voisinage des points de fonctionnement ainsi que pour des conditions sévères. Les nouvelles méthodes et les nouvelles technologies permettant d'améliorer la stabilité des systèmes font par conséquent l'objet de travaux de recherche extrêmement important.

Le Régulateur Automatique de Tension (AVR) et le Régulateur de Vitesse ou Gouverneur sont caractérisées par un échange faiblement amorti de puissance électrique entre deux ou plusieurs zones du réseau. 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. Les différentes perturbations sur les systèmes électro-énergétiques engendrent des oscillations importantes influentes sur la stabilité des réseaux électriques. Les systèmes de réglage s'imposent comme des solutions pour amortir ces oscillations (comme PID, PSS et les systèmes FACTS) et rendre les réseaux électriques plus stables.

C'est dans cet objectif que s'inscrit notre thème qui propose deux systèmes de réglage qui sont PID et le PSS pour améliorer la stabilité des réseaux électriques, tout en comparant les effets de ces deux systèmes sur l'amortissement des oscillations. La

INTRODUCTION GÉNÉRALE

synthèse des systèmes de réglage et lié à la complexité et l'interaction des différents variables du modèle à étudier. D'où la nécessité 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 PID et du PSS en utilisant une méthode métaheuristique qui est la méthode des Essaims de Particule (PSO). C'est dans cet objectif que s'articule notre travail qui sera organisé de la façon suivants :

- ✚ 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'aux 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.
- ✚ Le troisième chapitre sera consacré à l'optimisation par l'essaim de particules PSO (Particle Swarm Optimization) qui est inspiré du comportement social des oiseaux qui s'assemblent ou le banc de poissons pour communiquer ou se déplacer et cela pour l'appliquer sur les systèmes d'amélioration de la stabilité du système électro-énergétique.
- ✚ Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des types, caractéristiques, réglage des paramètres et l'emplacement de PSS et PID.
- ✚ Le cinquième chapitre fera l'objet d'implantation de la technique de PSO, dans le but d'optimiser les paramètres du régulateur PID et le PSS. On a mis en évidence l'efficacité du PSS et PID dans l'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique. La simulation des modèles étudiés est faite sur le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Dans ce travail, l'optimisation par essaim particulaire (PSO) est appliquée pour déterminer les paramètres optimaux du régulateur PID et 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 :

Modélisation des

éléments du

réseau électrique

I.1 Introduction

Un réseau d'énergie électrique appelé aussi système de puissance comprend des génératrices, des transformateurs et des appareils de protection, des lignes de transport et distribution, et un ensemble de consommateurs, qui constituent la charge de réseau, plus ou moins nombreux selon la taille du réseau, interconnectés, formant un système complexe capable de générer, de transmettre et de distribuer l'énergie électrique à travers de vastes étendues géographiques en outre le réseau comporte également L'ensemble des systèmes électriques comporte en gros trois sous-systèmes comme la figure I.1:

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

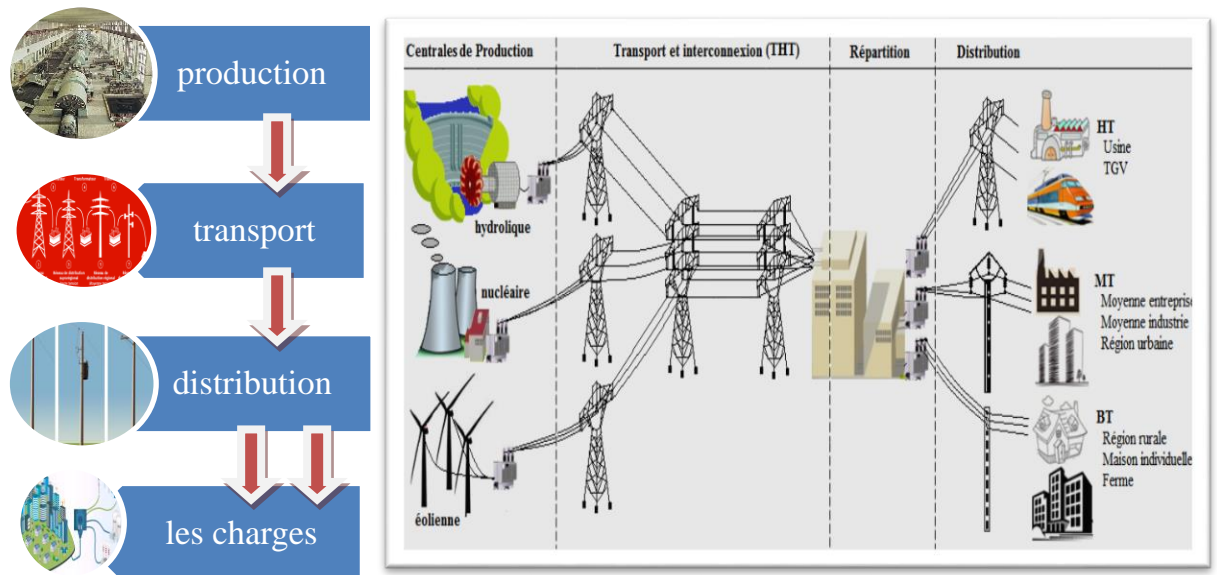


Figure I.1 Les différents niveaux d'un système de puissance

Ainsi, les systèmes de puissance modernes qui représente dans la figure I.2 sont caractérisés par leur taille et leur complexité croissantes. Plus la dimension d'un système de puissance augmente, plus les processus dynamiques et l'analyse des phénomènes physiques sous-jacents sont complexes. Outre, les systèmes de puissance présentent un comportement non-linéaire et variant dans le temps. Les non-linéarités peuvent être introduites par des éléments à fonctionnement discontinu tels que les relais, les thyristors, ainsi d'autres, comportant des phénomènes d'hystérésis ou saturation. De nos jours, cette complexité structurelle présente un impact de plus en plus compliqué vis-à-vis des problèmes de stabilité et des phénomènes dynamiques dans les systèmes de puissance interconnectés.

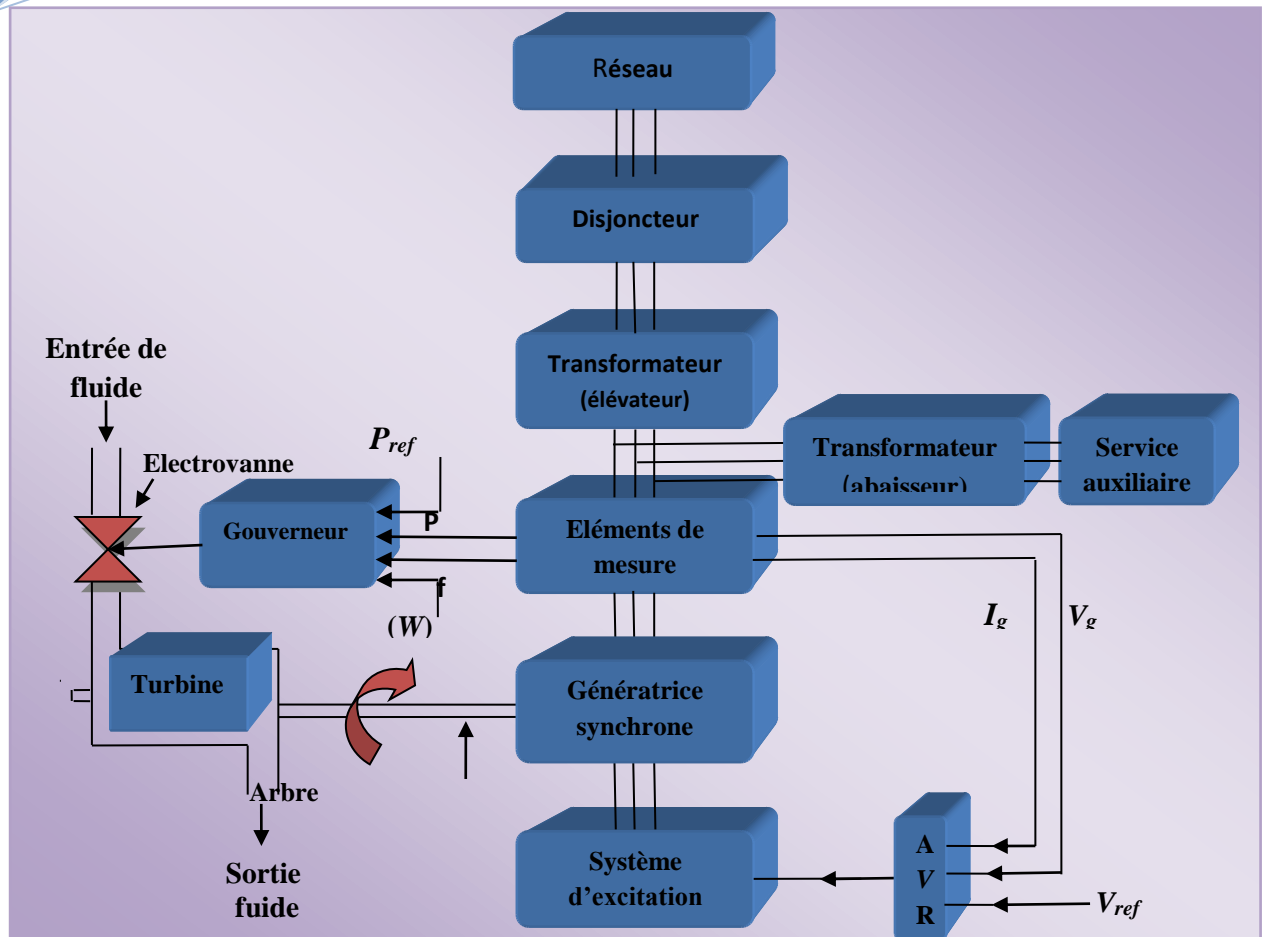


Figure I.2 Structure générale d'un système de puissance.

I.2 Le modèle général des éléments

La première étape, lorsqu'on veut analyser et commander un système électrique de puissance, consiste à trouver un "bon" modèle mathématique. Généralement, un modèle, dans l'analyse des systèmes, est un ensemble d'équations ou de relations, qui décrit convenablement les interactions entre les différentes variables étudiées, dans la gamme de temps considérée et avec la précision désirée, pour un élément ou un système. Par conséquent selon le but de l'analyse, un élément ou un même système physique, peut donner lieu à des modèles différents [HAS08].

Dans de nombreux cas, le choix du modèle correct est souvent la partie la plus difficile de l'étude. Le point essentiel est de trouver le "bon modèle" qui réalise un compromis entre la fidélité du comportement qualitatif et quantitatif et la simplicité de mise en œuvre à des fins d'analyse et de synthèse. Les modèles complexes ont généralement besoin d'un nombre plus important de paramètres. En outre, l'obtention de valeurs fiables pour ces paramètres exige un travail important. Enfin si des méthodes trop complexes sont utilisées, l'analyse et les calculs sont inutilement

"volumineux" et l'interprétation du résultat exige également un travail très important [AND06].

L'énergie électrique est généralement produite par les machines synchrones. Ces dernières sont caractérisées par une vitesse de rotation de l'arbre de chaque machine égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, un couple mécanique issu d'une énergie primaire source, comme l'énergie hydraulique, l'énergie nucléaire ou l'énergie chimique, est appliqué à l'axe de la machine synchrone via un lien mécanique intermédiaire, à savoir la turbine. Le champ magnétique rotorique est généré habituellement par un circuit d'excitation alimenté par courant continu. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor : ceci impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Ainsi, les enroulements du stator sont soumis à des champs magnétiques qui varient périodiquement. Une f.é.m. de courant alternatif est donc induite dans le stator [HAS08]. La figure I.3 représente les composants d'un réseau électrique.

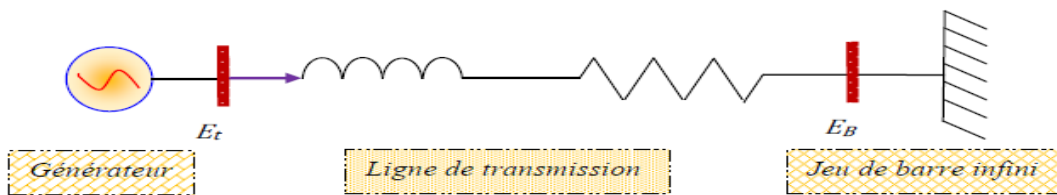


Figure I.3 Circuit équivalent de la machine synchrone connectée à un jeu de barres infini.

I.2.1 Champ tournant

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

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

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

$$E = KN\Phi f = KN\Phi p n_s = K'\Phi n_s \quad (\text{I.2})$$

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

I.2.3 Modèle du générateur :

Les générateurs, figure I.4, 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. Un générateur peut être considéré comme une source de puissance active et réactive qui peut maintenir une tension de consigne. À cause de facteurs comme la limite thermique du rotor, celle du stator et la limite de stabilité au régime permanent, le fonctionnement d'un générateur est limité en puissance active ainsi qu'en puissance réactive [YAH14].

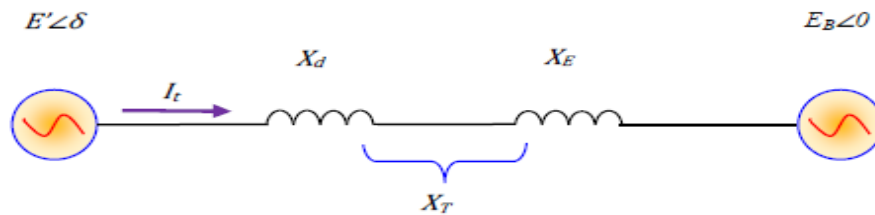


Figure I.4 Modèle classique de générateur.

I.2.3.1 Modélisation 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 [CUS02].

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 [AND06]. Pour formaliser le couplage entre les équations du système et établir les équations décrivant le comportement du système global, toutes les tensions et tous les courants doivent être représentés dans une seule référence commune à toutes 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.

La figure I.5 montre schématiquement les enroulements et les sens des courants dans une machine synchrone. La figure I.6 donne le modèle équivalent dans le repère de Park (d-q). Les différents enroulements dans les deux représentations sont les suivants :

- Les trois enroulements statoriques notés a, b et c, et leurs enroulements équivalents notés ds et qs.

Chap. I : Modélisation des éléments du réseau électrique

-L'axe direct comporte l'enroulement d'excitation noté f , et un enroulement amortisseur noté da .

- L'axe en quadrature comporte un enroulement amortisseur noté qa .

Notons enfin que l'enroulement d'excitation est soumis à une tension V_f tandis que les circuits da , qa sont court-circuités en permanence.

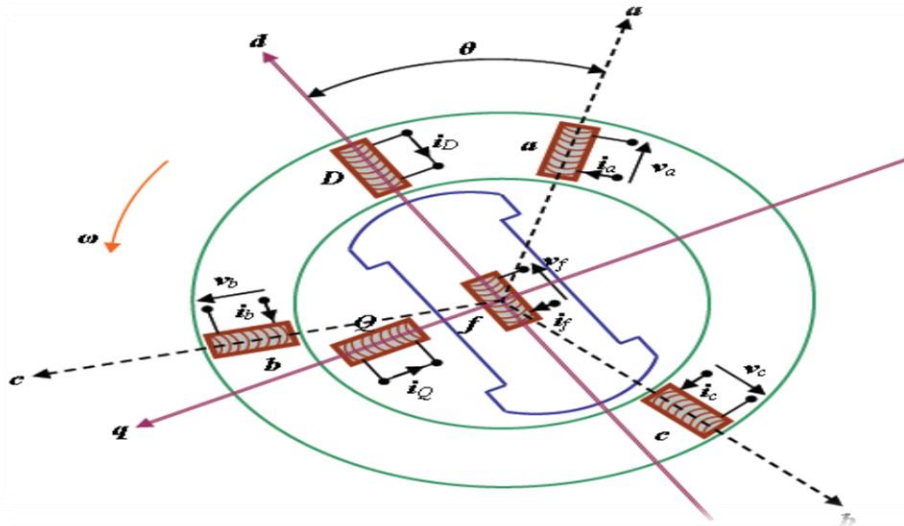


Figure I.5 Modélisation de la machine synchrone idéalisée.

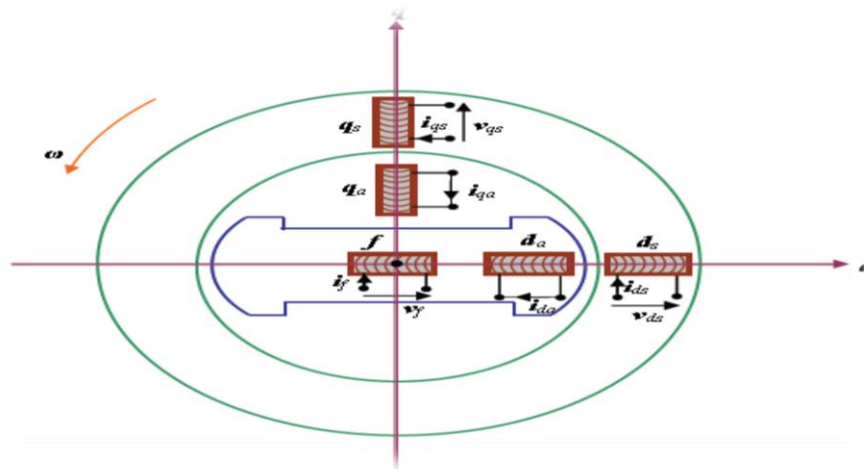


Figure I.6 Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park.

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 (tels l'angle de rotor, la tension d'excitation,...) en fonction d'autres variables d'état et variables algébriques. Le nombre d'équations différentielles

décrivant le modèle du générateur définit l'ordre du modèle. Il existe plusieurs modèles, allant du plus simple, le modèle classique représentant seulement les caractéristiques électromécaniques du générateur, au plus complexe, à savoir le modèle du huitième ordre tenant compte de tous les circuits de rotor, de stator, d'amortissement et de champ de saturation [AND03]. Dans les études des oscillations électromécaniques, le modèle du générateur doit représenter deux caractéristiques fondamentales : les caractéristiques électriques des enroulements d'excitation et les caractéristiques mécaniques de l'arbre du générateur.

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, $\omega_r = \omega_o = 1$ p.u, 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:

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

E'_d : f.é.m. du générateur induite suivant l'axe d, en p.u.

X'_q : réactance transitoire d'axe q, en p.u.

X_q : réactance synchrone d'axe q, en p.u.

Enfin, nous supposerons 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 [AND03]:

E'_q : f.é.m. du générateur induite suivant l'axe q, en p.u.

ω : vitesse angulaire du rotor, en p.u.

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 [SAU98].

I.2.3.3 Equations électriques.

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

Les grandeurs électriques de cette machine sont représentées sur la figure (I.7). Avant de débiter le calcul, nous pouvons faire les remarques suivantes :

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

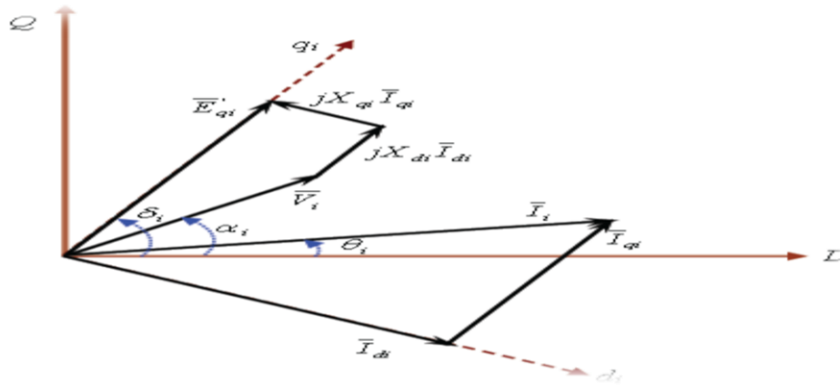


Figure I.7 Phasors relatifs à la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système multi machines

D'après la figure I.7, la tension terminale V_i de la $i^{\text{ème}}$ machine du système peut se déterminer par l'équation suivante :

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

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

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

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

$$V_i e^{j\alpha_2} = E'_{qi} e^{j\delta_2} - X_{di} I_{di} e^{j\delta_2} - jX_{qi} I_{qi} e^{j(\delta_2+90^\circ)} \quad (\text{I.6})$$

Qui devient après arrangement:

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

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

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

$$V_{di} = X_{qi} \cdot I_{qi} \quad (\text{I.9})$$

$$V_{qi} = E_{qi} - X'_{di} \cdot I_{di}$$

En considérant les relations (I.5) et la relation suivante : $\bar{I}_i = \bar{I}_{di} + j\bar{I}_{qi}$ l'équation (I.4) peut être donc réécrite comme suit :

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

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

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

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 $[e^{j\delta}]$, $[X'_d]$ et $[X'_d - X_q]$ sont des matrices diagonales. Les puissances électriques (apparente, active et réactive) de la $i^{\text{ème}}$ machine sont données par :

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

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 $T_{ei} = P_{ei}$.

I.2.3.4 Equations mécaniques

Les propriétés mécaniques des machines synchrones se modélisent généralement à l'aide de l'équation du mouvement basée sur le théorème du moment cinétique. Cette équation présente une importance fondamentale dans l'étude des oscillations électromécaniques, car ces oscillations représentent un phénomène important dans la plupart des systèmes de puissance, en particulier ceux qui contiennent de lignes de transmission longue cinétique [AND06]. Dans le fonctionnement à l'état d'équilibre, toutes les machines synchrones du système tournent à la même vitesse angulaire électrique. Le couple mécanique T_m est de même sens que le sens de la rotation de l'axe du générateur. Le couple électrique est de sens opposé à la rotation et ce couple équilibre le couple mécanique cinétique [BAS05], figure I.8. Lors d'une perturbation, un ou plusieurs générateurs peuvent être accélérés ou ralentis et il y a donc risque de perdre le synchronisme. Ceci peut avoir impact important sur la stabilité du système et les générateurs perdant le synchronisme doivent être débranchés, sinon ils pourraient être sévèrement endommagés.

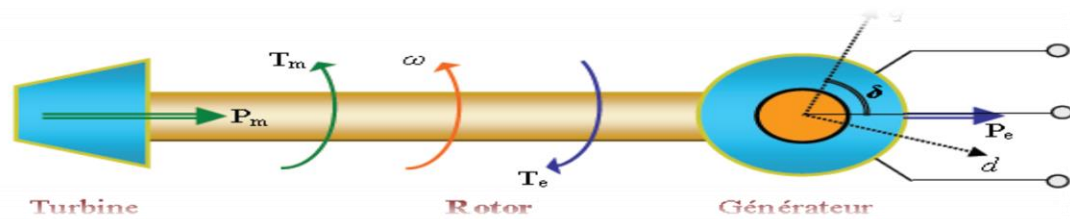


Figure I.8 Couples mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.

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

$$\begin{cases} \frac{H}{\pi f} * \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \\ \Delta\omega_i = \frac{1}{2H_i} (T_{mi} - T_{ei}) \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

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

Pour des oscillations à faibles fréquences, le courant induit dans les enroulements amortisseurs est négligeable. Par conséquent les enroulements amortisseurs peuvent être complètement négligés dans la modélisation du système. Si les enroulements

amortisseurs sont ignorés, le couple d'amortissement produit par ces enroulements amortisseurs est donc également négligeable. Pour tenir compte de la composante du couple négligée, on introduit dans l'équation du mouvement un terme de compensation D (nommé aussi coefficient d'amortissement) en p.u, cinétique [SAU98]. Ce coefficient représente l'amortissement naturel du système : il empêche l'accroissement des oscillations, à moins qu'une source d'amortissement négatif soit introduite (tel le régulateur de tension du système d'excitation).

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

$$\Delta\dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (T_{mi} - T_{ei} - D(\Delta\omega_i - 1)) \quad (\text{I.14})$$

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

$$\Delta\dot{\delta}_i = \omega_0 (\Delta\omega_i - 1) = \omega_0 * \Delta\omega \quad (\text{I.15})$$

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

Avec :

T_{ei} : couple électromagnétique associée à la puissance électrique P_{ei} produite par le $i^{\text{ème}}$ générateur, avec $(T_{ei} = \frac{P_{ei}}{\omega_i})$ en p.u.

I.2.3.5 Régulation du générateur

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 [AND06].

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_{fd} doit être réglés systématiquement pour s'accommoder de toute variation du système.

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

constante. Par ailleurs, le système d'excitation est responsable de la tension d'excitation fournie au générateur. Le régulateur de tension (ou régulateur de la puissance réactive) associé modifie les valeurs du système d'excitation pour enfin obtenir les tensions désirées aux bornes du générateur [AND03]. Nous présentons par la suite successivement les principes généraux :

- de la génération de la 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.9, se compose de la source d'énergie primaire, de la turbine (équipé d'un servomoteur) et du régulateur de fréquence (gouverneur) [FAR06].

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.

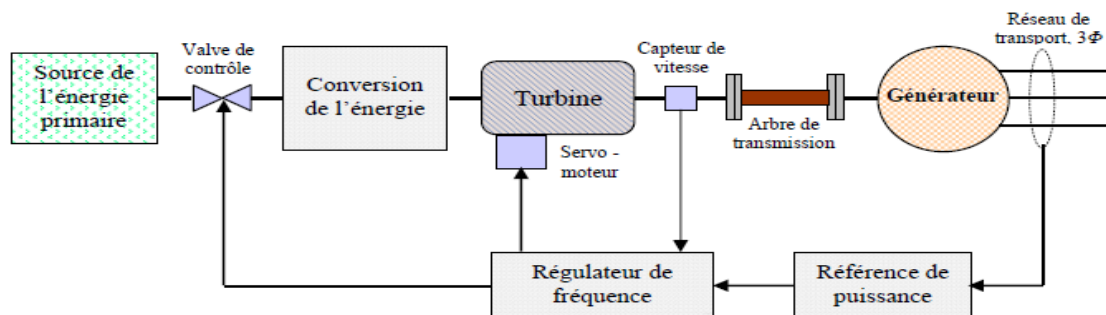


Figure I.9 Structure générale d'un système de force motrice - générateur.

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

de la turbine en étages permet de resurchauffer la vapeur entre les étages en assurant, par conséquent, un meilleur rendement au cycle thermique [CUS02].

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

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

Dans l'analyse de la stabilité transitoire ou dynamique, la réponse temporelle du système de la force motrice à une perturbation est considérée comme plus lente que la plage d'étude de la stabilité concernée (typiquement entre 10 et 20 secondes). Ainsi, le modèle du système de la force motrice peut être extrêmement simplifié. Pour une analyse de stabilité transitoire d'une durée de quelques secondes, le modèle du système de la force motrice peut être supprimé en considérant que le couple mécanique de la turbine reste constant [FAR06]. Dans quelques cas, le modèle peut être employé pour calculer les fréquences naturelles de torsion du système de rotor. Il peut être également employé dans la simulation dynamique du système de puissance pour obtenir des informations sur les couples de rotor se produisant lors d'un défaut. Le modèle de l'ensemble turbine à vapeur/gouverneur utilisé en simulation dynamique du modèle non-linéaire est représenté par la figure I.10.

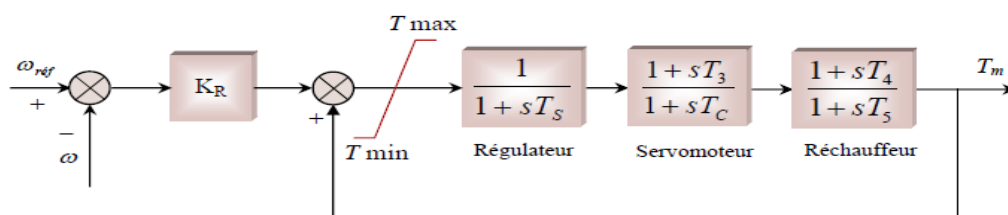


Figure I.10 Modèle de la turbine et du gouverneur.

Le système d'excitation est un système auxiliaire qui alimente les enroulements d'excitation de la machine synchrone afin que cette dernière puisse fournir le niveau de puissance demandé. En régime permanent, ce système fournit une tension et un courant continu mais il doit être capable également de faire varier rapidement la tension d'excitation en cas de perturbation sur le réseau [CUS02].

Actuellement, des systèmes d'excitation variés sont employés. Trois principaux types peuvent être identifiés [IEE05]:

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

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

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

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

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

Dans ce cas, le courant d'excitation est fourni par un redresseur commandé. Sa puissance est fournie soit directement par le générateur à travers un transformateur donnant le niveau approprié de tension, soit par des enroulements auxiliaires montés dans le générateur. Les systèmes d'excitation sont équipés de contrôleurs, appelés habituellement régulateurs de tension (AVR), figure I.11.

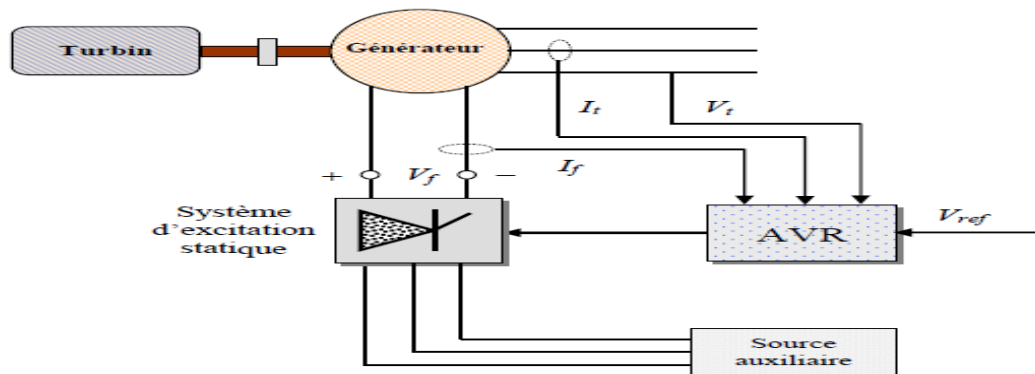


Figure I.11 Structure générale d'un système d'excitation statique avec son AVR.

Le groupe IEEE task forces présente périodiquement des recommandations pour la modélisation des éléments d'un système de puissance dont les systèmes d'excitation. Plusieurs modèles sont suggérés pour chaque type de système d'excitation [IEE05]. Les systèmes d'excitation statiques étant les plus installés actuellement, nous avons donc choisi dans notre étude d'utiliser le modèle du système IEEE-ST1A, modèle le

plus utilisé dans la littérature. Ce type de système d'excitation se caractérise par sa rapidité et sa sensibilité [IEE03] :

- 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.

La figure I. 12 montre le modèle du système d'excitation et de son régulateur de tension utilisé dans notre étude.

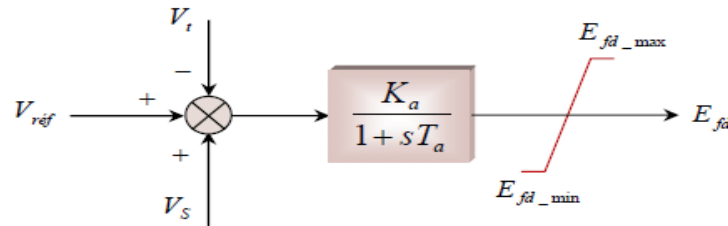


Figure I.12 Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1A.

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 :

$$E'_{fd} = \frac{1}{T_a} (K_a * (V_{ref} - V_t + V_s) - E_{fd}) \quad (\text{I.16})$$

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

$$E'_q = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - X_d - X'_d) * I_d - E'_q \quad (\text{I.17})$$

I.2.4 Réseau de transport.

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

comme les condensateurs en série, des réactances shunts et des systèmes de compensation, des systèmes de protection, etc, [MAC98].

Pour la modélisation de notre système de puissance, nous nous intéressons à établir le modèle de transformateurs et le modèle de lignes de transmission [HAS08].

I.2.4.1 Modèle du transformateur

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]. Ce contrôle de tension utilise la variation du nombre de spire des transformateurs. La figure I.13 montre le schéma équivalent du transformateur (sans circuit magnétique) : il est doté de plusieurs prises (côté haute tension) permettant de modifier le nombre de spires du primaire. L'impédance Z_T correspond à l'impédance équivalente totale vue du primaire.

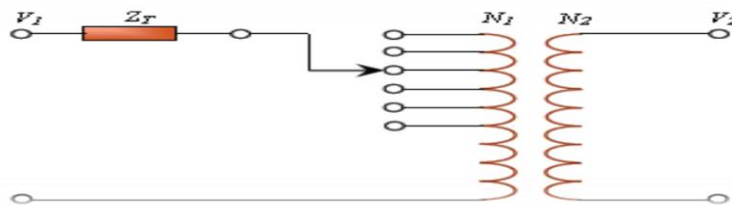


Figure I.13 Modèle simplifié de transformateur

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 :

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

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

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

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 [SAU98]. La structure la plus employée pour ce modèle est le schéma équivalent en π , figure I.14.

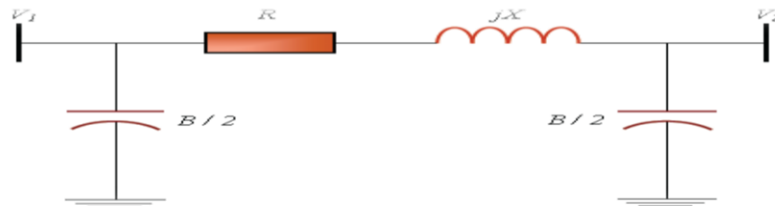


Figure I.14: Modèle en π d'une ligne de transmission.

I.2.5 Modèle des charges

En conséquence, lorsque les systèmes de puissance sont analysés, seuls les réseaux et les sous-réseaux de transport sont modélisés, tandis que les réseaux de distribution ne le sont habituellement pas : ils sont simplement remplacés par des charges équivalentes. Pour l'analyse de la stabilité, chaque charge représente habituellement une partie relativement importante du système comportant typiquement des réseaux de distribution de basse et moyenne tension, de faibles sources d'énergie fonctionnant au niveau de la distribution, les régulateurs de tension de distribution, ... Elle inclut également les différentes charges réelles tels les moteurs, les éclairages et les appareils électriques cinétiques [MAC98].

P_{Li} et Q_{Li} sont respectivement la puissance active et réactive de la puissance injectée dans le nœud i , G_L et la valeur imaginaire ou susceptance est B_L de l'admittance Y_L , V est la tension aux bornes de l'alternateur alimentant la charge. La figure I.15 représente l'admittance équivalente de la charge.

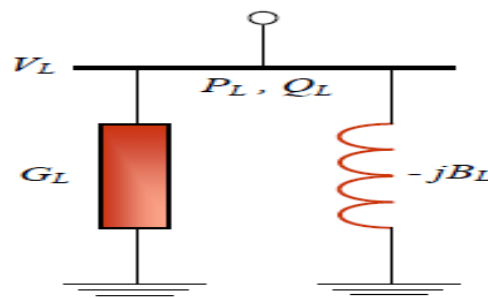


Figure I.15 Modélisation d'une charge par son admittance équivalente.

I.2.6 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

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad ; \quad i=1,2,\dots,n \quad (\text{I.20})$$

$$0 = h_j(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad ; \quad j=1,2,\dots,m \quad (\text{I.21})$$

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 [HAS08] :

$$\omega_i = \frac{1}{2H_i} - (T_{mi} - T_{ei} - D_i * (\omega_i - 1)) \quad (\text{I.22})$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_0 * (\omega_i - 1) \quad (\text{I.23})$$

$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0i}} * (E_{fdi} - E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) * I_{di}) \quad (\text{I.24})$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_a} * (K_a * (V_{réf} - V_t + U_s) - E_{fd}) \quad (\text{I.25})$$

$$T_{ei} = E'_{qi} * I_{qi} + (X_{qi} - X'_{di}) * I_{di} * I_{qi} \quad (\text{I.26})$$

$$V_{di} = X_{qi} * I_{qi} \quad (\text{I.27})$$

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

$$V_{ti} = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \quad (\text{I.29})$$

$$I_{di} = \sum_{j=1}^n Y_{ij}(-S_{ij} * E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) * C_{ij} * I_{qj}) \quad (\text{I.30})$$

$$I_{qi} = \sum_{j=1}^n Y_{ij}(C_{ij} * E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) * S_{ij} * I_{qj}) \quad (\text{I.31})$$

La figure (I.16) 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 :

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (\text{I.32})$$

$$y = g(x, u) \quad (\text{I.33})$$

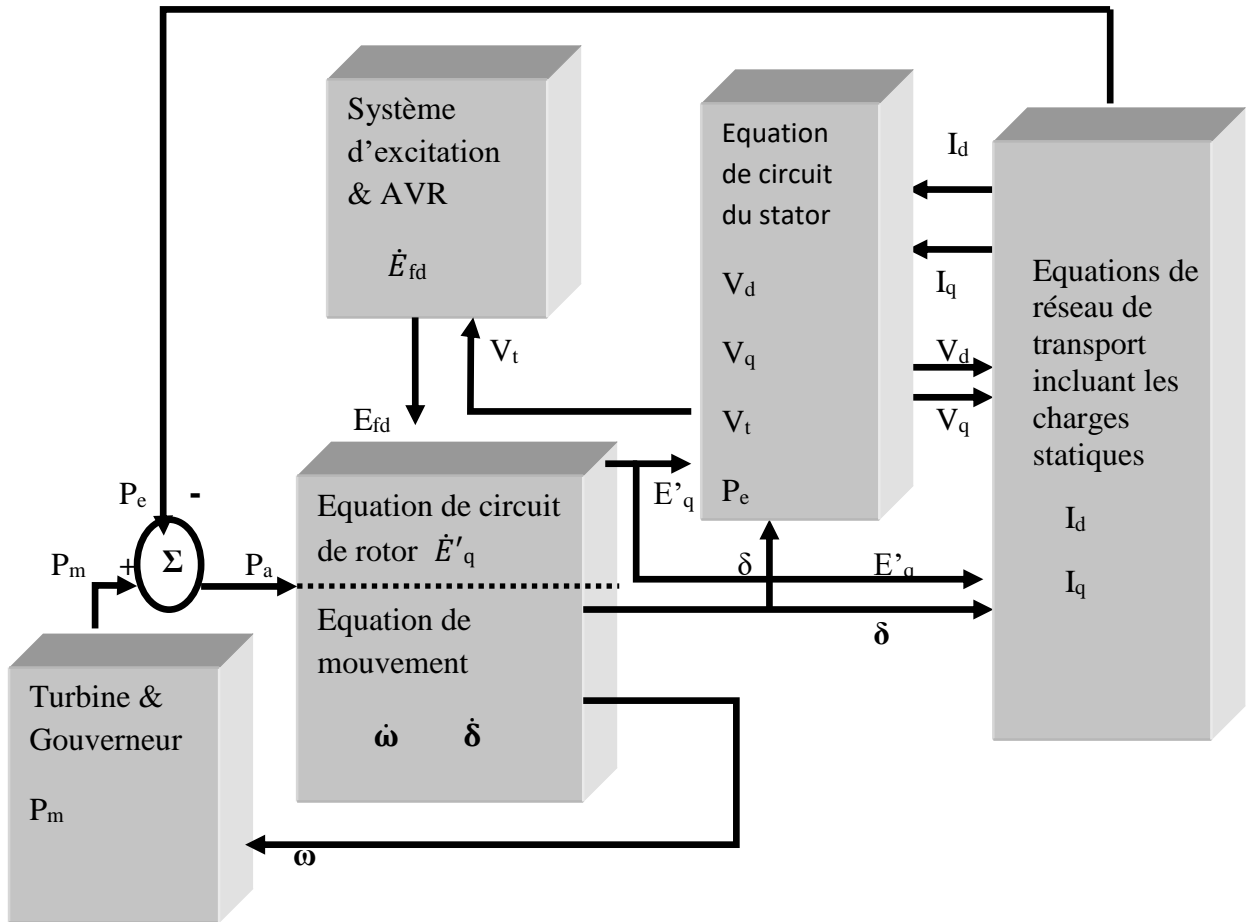


Figure I.16 Digramme de l'ensemble des blocs du système de puissance.

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, 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.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité quelques notions concernant le rôle des composants des réseaux électriques et leurs exploitations avec la modélisation de ces composants de réseaux électriques à étudier. La modélisation de chaque élément que se soit générateur, transformateur, charge ou lignes de transport est indispensable pour l'étude ou l'analyse de la stabilité des réseaux électriques et cela dans les chapitres qui suivent.

CHAPITRE II :

Stabilité des

Réseaux

Electriques

II.1 Introduction

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence un équilibre entre la production et la consommation. Les générateurs, les récepteurs et les réseaux électriques qui les relient ont des inerties mécaniques et/ou électriques qui rendent difficile le maintien d'un équilibre garantissant une fréquence et une tension relativement constantes. Face à une variation de puissance, le système électrique doit normalement retrouver un état stable. Dans certains cas, le régime oscillatoire peut diverger [TOU12]. Les perturbations sont à l'origine de l'apparition d'une différence entre la puissance mécanique (la production) et la puissance électrique (la consommation) [ESK03]. L'écart en termes de puissance va se traduire par une modification de la vitesse de rotation de l'alternateur ou en d'autres termes par des variations de sa vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Des études sont nécessaires pour pouvoir éviter ce phénomène et garantir la stabilité du réseau électrique. 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.

II.2 Définitions

II.2.1 Système électro-énergétique

On appelle un système électro-énergétique un ensemble d'installations électriques destinées à produire, transporter et à la fois distribuer l'énergie électrique aux consommateurs [ZIA94].

II.2.2 Réseau infini

Un réseau est dit infini ou de grande puissance lorsque sa tension et sa fréquence sont fixes et une perturbation sur une machine n'affecte pas le réseau [ZIA94].

II.2.3 Synchronisme

On dit qu'une machine fonctionne en synchronisme, si sa fréquence est égale à la fréquence de réseau. On dit qu'un système fonctionne en synchronisme, si toutes les machines reliées à ce réseau ont la même fréquence du réseau [ZIA94].

II.3 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 ».

II.4 Description générale du système électro-énergétique étudié

Un réseau SMIB (Single Machine Infinity Bus System) est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau électrique de puissance infinie (c'est-à-dire dont la puissance est largement supérieure à celle de la génératrice synchrone) 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) [DJA13].

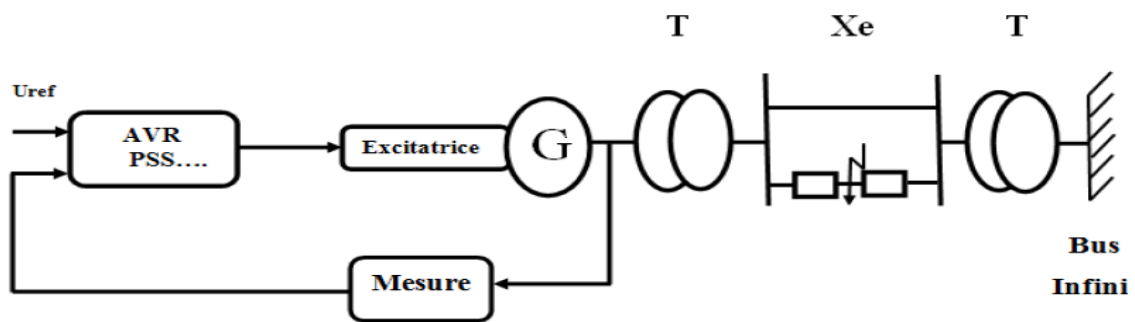


Figure II.1: Système standard IEEE type SMIB avec commande d'excitation du générateur synchrone puissant.

II.5 Les cause d'instabilité

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

- 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

II.6 Incidents liées à l'instabilité dans le monde

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

Tableau II.1 Incidents suivis d'un effondrement

date	Lieu	Durée
22-08-1970	Japon	30 minutes
19-12-1978	France	4 heures de coupure
Été 1996	Ouest USA	Plusieurs 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	État de New York, É-U	Incertitudes pendant des heures
02-03-1979	Zealand, Denmark	15 minutes
17-09-1981	Centre de l'Oregon, É-U	Quelques minutes
20-05-1986	Angleterre	5 minutes
03-02-1990	Ouest de la France	Quelques minutes

II.7 Les différents types de la stabilité des systèmes de puissance

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

- 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.

Un système électrique moderne est un processus multi-variables d'ordre élevé dont la réponse dynamique est influencée par un grand nombre de dispositifs (générateurs, charges, actionneurs divers, etc.) ayant des caractéristiques et des temps de réponse

Chap. II : Stabilité des Réseaux Electriques

différents. La stabilité est un état d'équilibre entre des forces d'opposition. Selon la topologie du réseau, les conditions d'exploitation du système et les formes de perturbation, les différentes séries de forces d'opposition peuvent mener à différentes formes d'instabilité. Comme il est présenté dans la Figure II.2

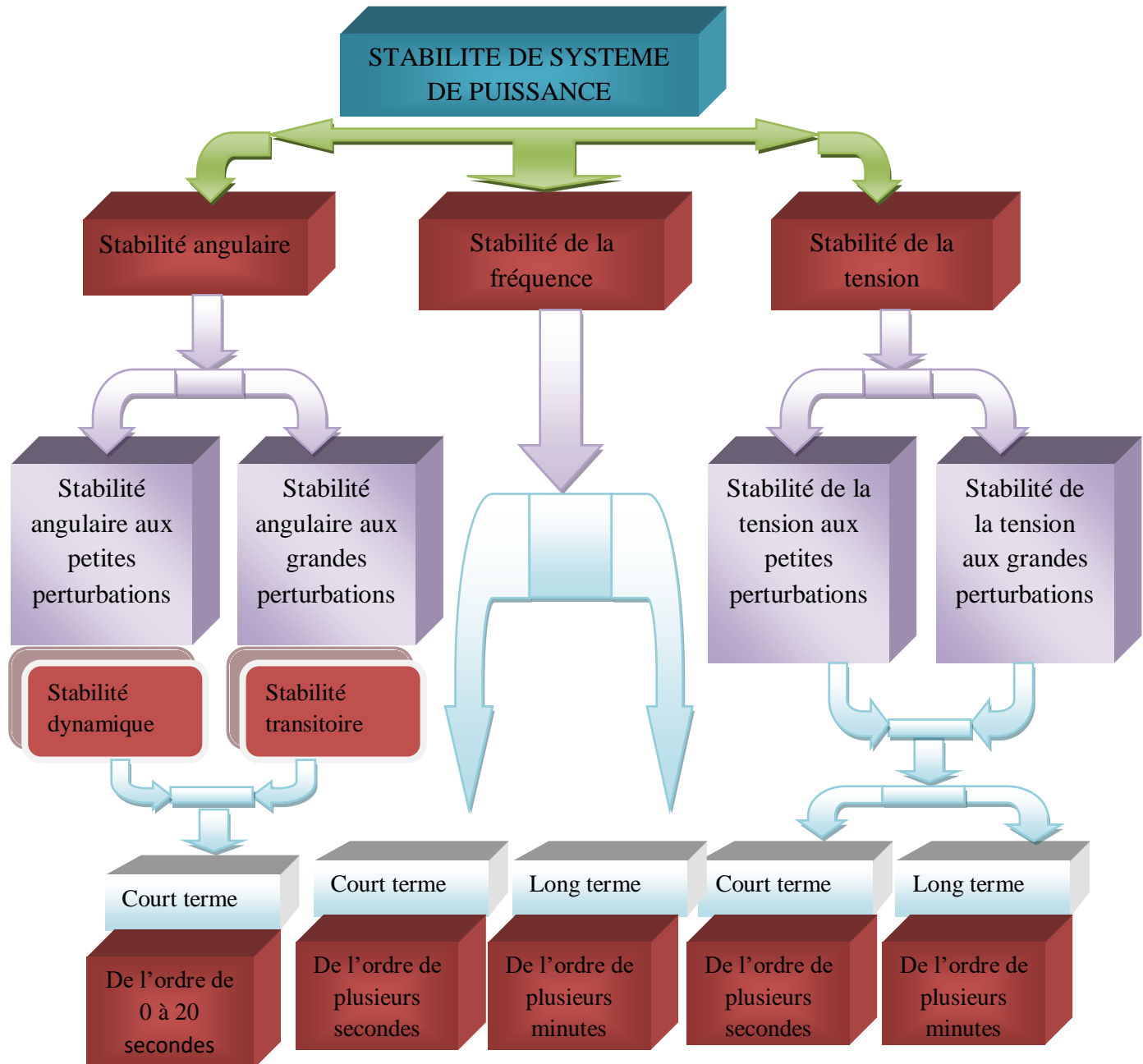


Figure II.2 Classification des différents types de la stabilité de système

II.7.1 Stabilité angulaire

La stabilité angulaire est la capacité des machines synchrones d'un système électrique interconnecté à rester au synchronisme après une perturbation [TOU12]. Elle dépend de la capacité à maintenir ou à rétablir l'équilibre entre le couple électromagnétique et le couple mécanique de chaque machine synchrone dans le système. L'instabilité angulaire se produit sous forme d'une apparition suivie d'une augmentation des oscillations angulaires de quelques générateurs menant à la perte du synchronisme de ces derniers avec d'autres générateurs.

II.7.1.1 Stabilité angulaire de grande perturbation (stabilité transitoire)

La stabilité angulaire de grande perturbation (ou la stabilité transitoire) est la capacité du système électrique à maintenir le synchronisme après une perturbation importante. Le résultat de la réaction du système implique de grandes excursions des angles des rotors des générateurs, et est influencée par la relation non-linéaire de la puissance par rapport à l'angle [HAS08].

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 [KBE01] figure II.3. 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 [HME07].

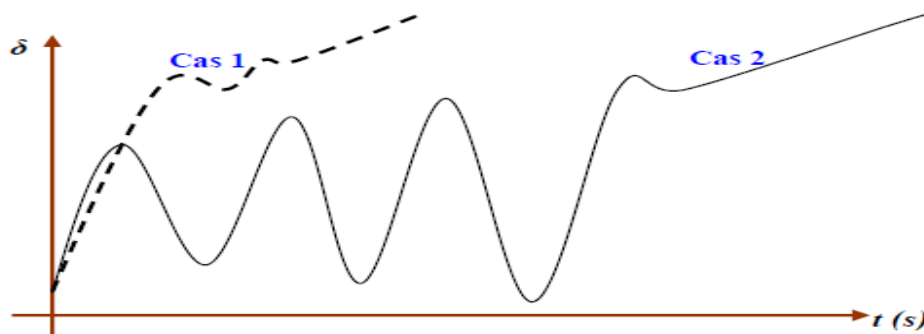


Figure II.3 Variation d'angle de rotor.

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



Chap. II : Stabilité des Réseaux Electriques

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère d'égalité des aires. Cette approche regroupe l'équation du mouvement et la courbe (P- δ) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle de rotor [BRO00].

II.7.1.2 Stabilité angulaire de petites perturbations (stabilité dynamique)

La stabilité angulaire de petite perturbation (ou en petits signaux) est la capacité du système électrique à maintenir le synchronisme sous de petites perturbations. Les perturbations sont considérées comme suffisamment petites pour que la linéarisation des équations du système soit permise aux fins de l'analyse [A.OU08]. Les problèmes de stabilité angulaire de petite perturbation peuvent être locaux ou globaux en nature.

Les problèmes locaux impliquent une petite partie du système électrique, et sont habituellement associés aux oscillations angulaires d'une centrale par rapport au reste du système électrique. Ces oscillations s'appellent les oscillations locales de mode de centrale.

Les problèmes globaux sont provoqués par des interactions entre de grands groupes de générateurs et ont des effets répandus. Ils impliquent des oscillations d'un groupe de générateurs dans une région contre un groupe de générateurs dans une autre région. Ces oscillations s'appellent les oscillations de mode d'inter-régions. Leurs caractéristiques sont très complexes et diffèrent considérablement des oscillations locales de mode de centrale.

II.7.2 La stabilité de tension

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. La stabilité de tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge.

Généralement, l'instabilité de tension se produit lorsqu'une perturbation entraîne une augmentation de puissance réactive demandée au-delà de la puissance réactive possible. La gamme de temps de l'instabilité de tension s'étend de quelques secondes à plusieurs minutes. Ainsi, l'instabilité de tension peut être considérée comme un phénomène à court terme (de l'ordre de plusieurs secondes) ou, dans l'autre cas limite, comme un phénomène à long terme (de l'ordre de plusieurs minutes) [HAS08].

II.7.2.1 Stabilité de tension en grandes perturbations

La stabilité de tension en grandes perturbations est la capacité du système à maintenir la tension stable à la suite de grandes perturbations, telles que les défauts du système ou la perte d'un générateur. Cette capacité est déterminée par la topologie du système, les caractéristiques des charges, et les interactions entre les contrôles continus de tension (réglage primaire et secondaire de tension, compensateurs statiques et tournants d'énergie réactive), les contrôles discrets (gradins de condensateurs, d'inductances et régleurs en charge) et les protections. Le cadre de temps d'étude est de quelques secondes à quelques dizaines de minutes.

II.7.2.2 Stabilité de tension en petites perturbations

La stabilité de tension en petites perturbations est la capacité du système à maintenir les tensions stables lorsqu'il est soumis à de petites perturbations telles que des changements progressifs des charges. Cette forme de stabilité est influencée par les caractéristiques des charges, des contrôles continus de tension et des contrôles discrets à un instant donné. Ce concept est utile pour déterminer, à tout instant, comment les tensions répondront aux petits changements du système. Le cadre de temps généralement observé de la dynamique de la stabilité de tension est de l'ordre de quelques secondes à quelques dizaines de minutes.

II.7.3 La stabilité de fréquence

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

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

L'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.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).

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté historique de blackout, les définitions et les caractéristiques des différents types de stabilité d'un système de puissance. Le concept général de la stabilité peut se synthétiser en trois groupes (stabilité de l'angle de rotor, de la tension et de la fréquence). Ainsi que les méthodes d'analyse et d'amélioration de la stabilité comme les systèmes FACTS, les stabilisateurs PSS et PID. Pour améliorer la stabilité des réseaux en utilise la méthode de PSO qui en a présente dans le chapitre qui de suite.

CHAPITRE III :

Optimisation Par

Essaims De

Particules PSO

III.1 Introduction

Les problèmes d'optimisation en électrotechnique présentent plusieurs difficultés liées aux besoins de l'utilisateur (recherche d'une solution globale, fiabilité et précision de la solution, diversité des problèmes traités, temps de calculs raisonnable, ...), aux caractéristiques du problème d'optimisation (non linéarité, dérivées difficilement accessibles, ...) et au temps de calculs importants. 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 des résultats par rapport aux paramètres de conception du dispositif. 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.

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation [KET14].

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 pour lesquelles les variables de la fonction à optimiser sont introduits dans les 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 [RAB07].

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 [KET14].

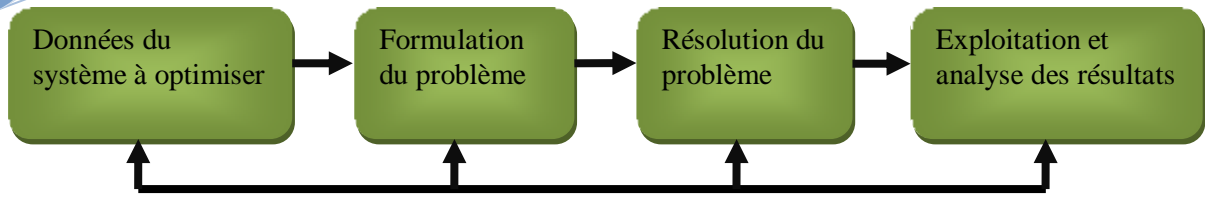


Figure III.1 Démarches de résolution d'un problème d'optimisation

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 objectif.
- 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 Définition de notion de métaheuristiques :

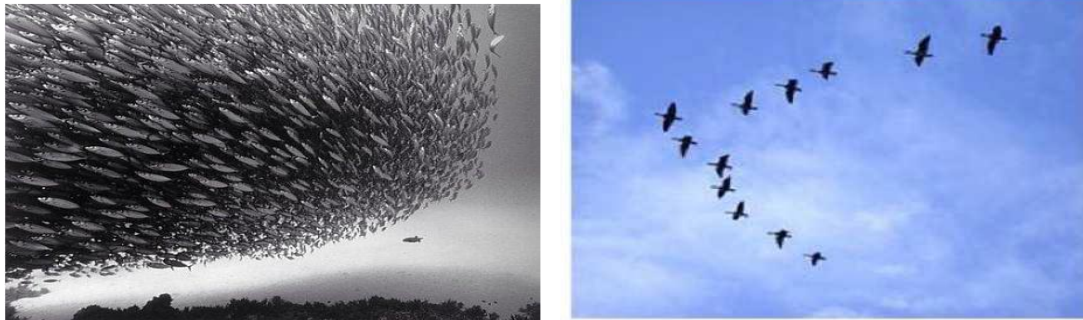
Les métaheuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes génétiques) ou encore en éthologie (cas de l'optimisation par essaims particulaires). Ces techniques peuvent être classées en deux groupes : les méthodes à population de solutions comme PSO...etc., ainsi que les méthodes à solution unique comme le recuit simulé.

Notre travail est basé sur l'optimisation par essaim de particules, cette dernière sera traitée d'une façon détaillée dans la section qui suit.

III.6 Optimisation d'Essaim de Particules

L'optimisation d'essaim de particules (PSO) est une technique stochastique basée sur la population d'optimisation développée par Dr. Eberhart et Dr. Kennedy en 1995,

inspiré par le comportement social des oiseaux s'assemblant ou le banc de poissons Figure III.4. Ses deux concepteurs, cherchaient à modéliser des interactions sociales entre des « agents » devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun, chaque agent ayant une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information. La règle de base était qu'il ne devait y avoir aucun chef d'orchestre, ni même aucune connaissance par les agents de l'ensemble des informations, seulement des connaissances locales. Un modèle simple fut alors élaboré.



(a) (b)
Figure III.2 Groupe de : (a) poissons, (b) oiseaux

III.6.1 Notion de voisinage

Le voisinage d'une particule est le sous-ensemble de particules de l'essaim avec lequel il a une communication directe. Ce réseau de rapports entre toutes les particules est connu comme la sociométrie, ou la topologie de l'essaim [MAX11].

Il existe deux principaux types de voisinage :

Les voisinages géographiques : les voisins d'une particule sont ses voisines les plus proches. Ce type de voisinage impose l'utilisation d'une distance pour recalculer à chaque itération (ou toutes les k itérations) les voisins de chaque particule. C'est donc un voisinage dynamique. Ci-dessous, Figure III.5 est un exemple où les voisins d'une particule sont les deux particules qui lui sont le plus proche.

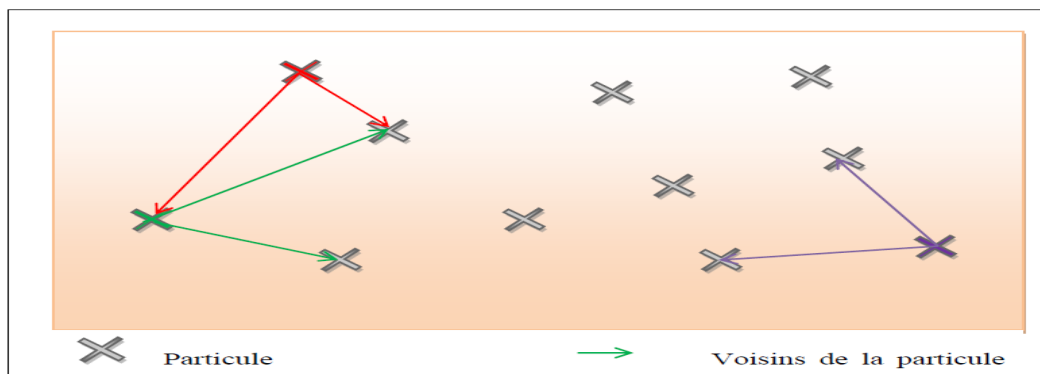


Figure III.3 Exemple de voisinage géographique.

Les voisinages sociaux : les voisins sont définis à l'initialisation et ne sont pas modifiés ensuite. C'est le voisinage le plus utilisé, pour plusieurs raisons :

- _ Il est plus simple à programmer.
- _ Il est moins coûteux en temps de calcul.
- _ En cas de convergence, un voisinage social tend à devenir un voisinage géographique [MAX11].

Les voisinages sont établis à l'initialisation et ne sont pas modifiés ensuite. Il existe différentes structures de voisinages sociaux, comme sur la Figure III.6.

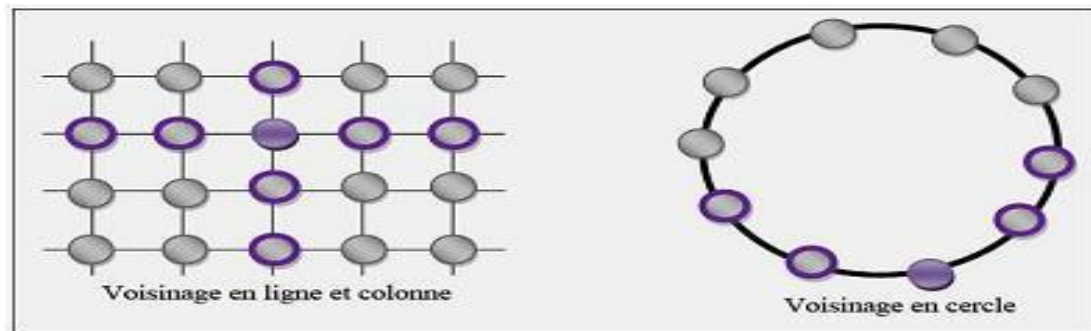


Figure III.4 Deux cas de voisinage social

III.6.2 Principe de l'Algorithme PSO

Dans l'algorithme PSO, chaque individu de la population est dit (particule), tandis que la population est connue sous le nom (swarm). Il faut noter, que la particule peut bénéficier des mouvements des autres particules dans la même population pour ajuster sa position et sa vitesse durant le processus d'optimisation. Chaque individu utilise l'information locale à laquelle il peut accéder sur le déplacement de ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles très simples comme "rester proche des autres individus", "aller dans la même direction", "aller à la même vitesse" suffisent pour maintenir la cohésion du groupe tout entier [TID16]. Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps :

- ❖ Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).
- ❖ Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune d'entre elles sa propre meilleure performance.

❖ A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle à connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse. Pour ce faire, elle combine trois informations :

- Sa vitesse actuelle.
- Sa meilleure position actuelle.
- La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisins.

La performance du système entier est supérieure à la somme des performances de ses parties. Kennedy et Eberhart se sont inspirés de ces comportements socio-psychologiques pour créer le PSO. Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, « survole » l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [MPO87]:

- ❖ Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- ❖ Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- ❖ Une composante sociale: la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et ainsi à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

III.6.3 Formulation Mathématique du PSO

Comme les algorithmes génétiques, PSO Démarre le processus d'optimisation par une population des solutions aléatoires qui se déplacent dans l'espace de recherche. La position de chaque particule est représentée par ses coordonnées suivant les deux axes XY et également par sa vitesse qui est exprimée par V_x (la vitesse suivant l'axe x) et V_y (la vitesse suivant l'axe x). Le déplacement de chaque particule dans l'espace de recherche, est basé sur sa position actuelle et la mise à jour de sa vitesse. S_i^{k+1}

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad \text{(III.1)}$$

Tel que :

- S_i^k, S_i^{k+1} : Position de la particule i à l'itération $k+1$ et k respectivement.
- V_i^{k+1} Vitesse de la particule i à l'itération $k+1$.

Chaque particule dans l'essaim, change sa vitesse suivant deux informations essentielles. Une, est liée à son expérience personnelle, qui est la meilleure position trouvée par la particule durant le processus de recherche p_{best} . La deuxième information, concernant la meilleure position trouvée par les voisins (l_{best}) (ou par tout l'essaim, dans la version globale de l'algorithme g_{best}). Cette information est obtenue à partir de la connaissance de la façon dont les autres agents ont exécuté leurs recherches.

Le principe de changement de la vitesse est défini par l'équation

$$v_i^{k+1} = w \times v_i^k + C_1 \times \text{rand}_1 \times (Pbest_i - S_i^k) + C_2 \times \text{rand}_2 \times (Pgbest_i - S_i^k) \quad (\text{III.2})$$

La fonction de pondération w est donnée par l'équation suivante [YBE14]

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (\text{III.3})$$

La fonction de pondération w joue un rôle important dans la procédure de recherche. Elle garantit un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale, un bon choix de cette fonction augmente l'efficacité de la méthode pour avoir une solution globale. L'expérience a montré que la diminution linéaire de la valeur de w de 0.9 à 0.4 au cours de la procédure de recherche donne des meilleurs résultats [YBE14].

Figure III.7 présente le principe de déplacement des particules dans l'espace de recherche à chaque itération. Chaque particule change sa position actuelle via l'intégration de trois vecteurs v_{best} , v_{gbest} et v .

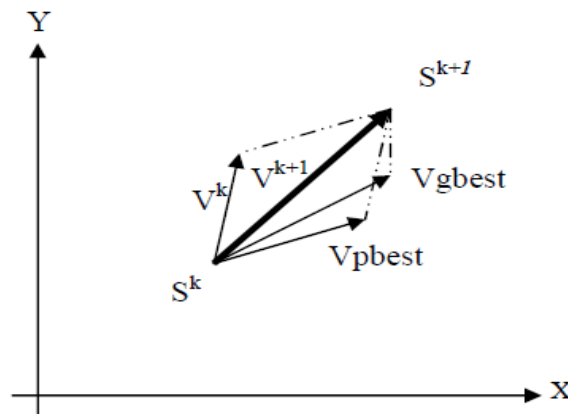


Figure III.5 Principe de déplacement d'un point de recherche par PSO

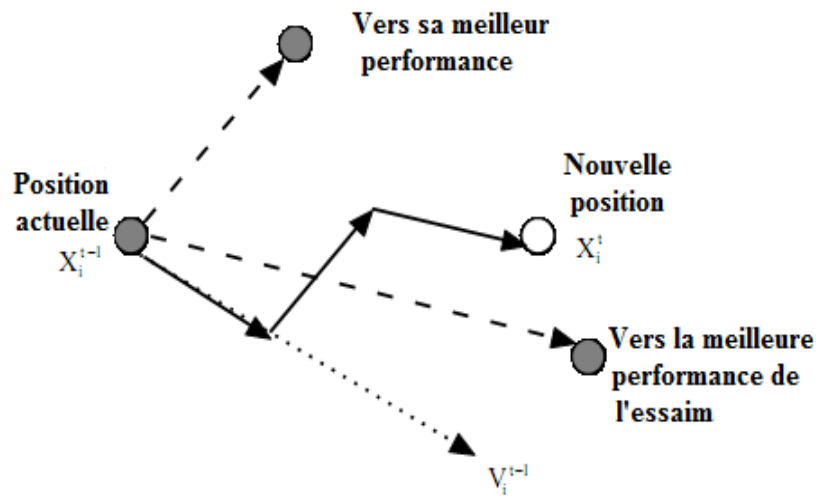


Figure III.6 Déplacement d'une particule

Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Figure III.8 illustre la stratégie de déplacement d'une particule.

III.6.4 Mécanisme de Confinement :

Il arrive parfois que compte tenu de la position courante et de la vitesse courante d'une particule, cette dernière a tendance à sortir de l'espace de recherche lors de son déplacement. Lorsque c'est le cas, l'algorithme fait intervenir un mécanisme de confinement, dit confinement d'intervalle, afin de gérer le déplacement de la particule et ce, de manière à ce que celui-ci l'amène sur un nouveau point appartenant lui aussi à l'espace de recherche. De manière générale, ce mécanisme consiste à ramener la particule dans le point admissible le plus proche [AIT11]

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{If } X_{ij} > X_{jmax} \Rightarrow X_{ij} = X_{jmax} \\ \text{If } X_{ij} < X_{jmin} \Rightarrow X_{ij} = X_{jmin} \\ V_{ij} = 0 \end{array} \right. \quad \text{(III.4)}$$

Ou: X_{jmin} et X_{jmax} sont les valeurs limites du paramètre X_{ij}

III.6.5 L'organigramme de l'algorithme PSO

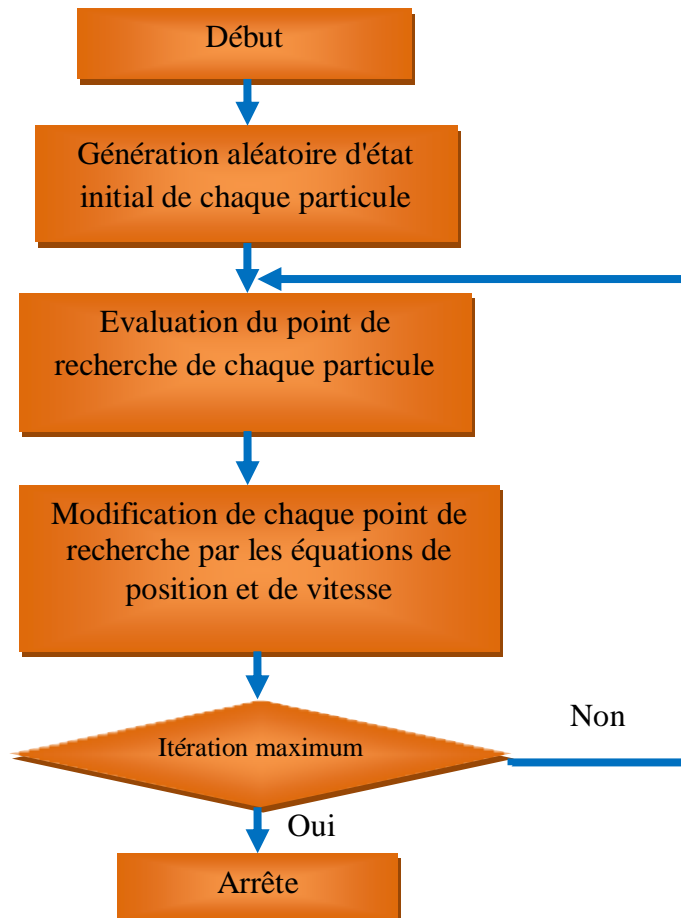


Figure III.7 Organigramme général de la méthode PSO [YBE14]

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction générale à l'optimisation. Nous avons ensuite choisi et détaillé la méthode d'optimisation basée sur l'algorithme de l'optimisation par les essaims de particules, Cet algorithme sera par la suite utilisé dans le dernier chapitre sur les stabilisateurs PID, PSS qui sont détaillée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV:

Analyse du régulateur PID et le contrôleur PSS

IV.1 Introduction

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

- L'utilisation d'un stabilisateur côté générateur (PSS, PID) : signal de contrôle supplémentaire dans le système d'excitation du générateur.
- L'utilisation d'un contrôleur coté de lignes de transmission: signal de contrôle supplémentaire dans le système FACTS (Flexible AC Transmission System). Ces systèmes restent très chers pour être installés uniquement pour une raison d'amortissement des oscillations.

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

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel intégral dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse et le dépassement) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre [OAI06].

IV.2 Généralité sur les systèmes asservis

IV.2.1 Définitions

- **La régulation** : regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Par exemples: Pression, température, débit, niveau etc...
- **La grandeur réglée** : est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Par exemple : une régulation de température.
- **La consigne** : est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.
- **La 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.
- **Les grandeurs perturbatrices** : sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.
- **L'organe de réglage** : est l'élément qui agit sur la grandeur réglant [BEN12].

IV.2.2 L'objectif global de la régulation

Peut se résumer par ces trois mots clefs : mesurer, comparer, corriger. Cependant, chaque procédé possède ses exigences propres, chaque appareil possède ses propres conditions de fonctionnement. Il est donc indispensable que la régulation soit conçue pour satisfaire aux besoins particuliers liés à la sécurité, aux impératifs de production et aux matériels.

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir [JSI05].

IV.3 Eléments constitutifs d'une boucle de régulation

Figure IV.1 Doit comporté au minimum les éléments suivants

- un capteur de mesure.
- un transmetteur souvent intégré au capteur.
- un régulateur,
- un actionneur.

Elle est souvent complétée par : un enregistreur, des convertisseurs, des sécurités.

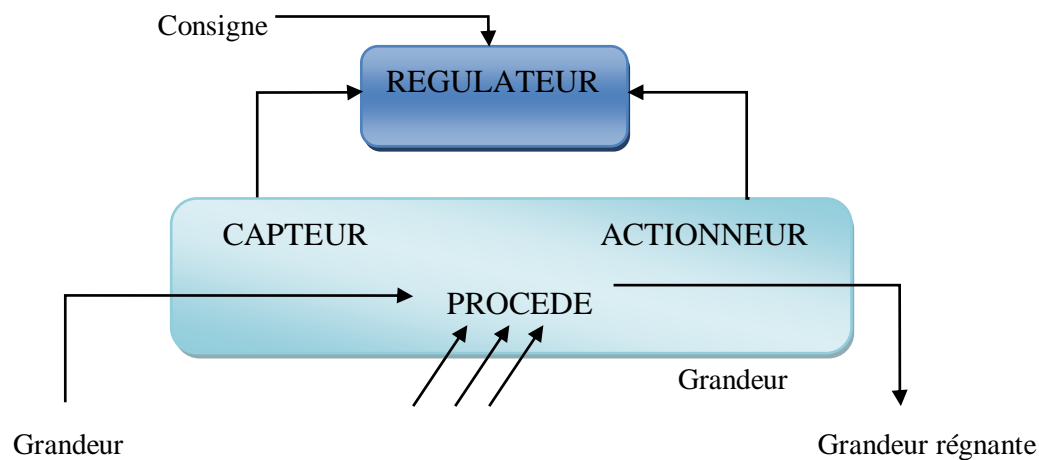


Figure IV.1 Schéma de principe d'une boucle de régulation.

Le régulateur reçoit deux informations :

- Le signal de mesure provenant du capteur,
- la consigne (qui peut être locale ou externe)

En fonction de l'écart entre ces deux valeurs et de l'algorithme de calcul pour lequel il a été configuré, il délivre un signal de sortie dirigé vers l'actionneur afin d'annuler cet écart et de ramener la mesure vers la valeur de consigne [BAR08].

IV.4 Caractéristiques dynamiques d'un procédé

IV.4.1 Temps de réponse (T_r)

C'est l'aptitude du procédé à suivre les variations de la consigne figure IV.2. 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 $t_1 - t_0$.

IV.4.2 Temps de montée (T_m)

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

IV.4.3 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 indicelle ci-dessous, le premier dépassement est de 14% [JSI05].

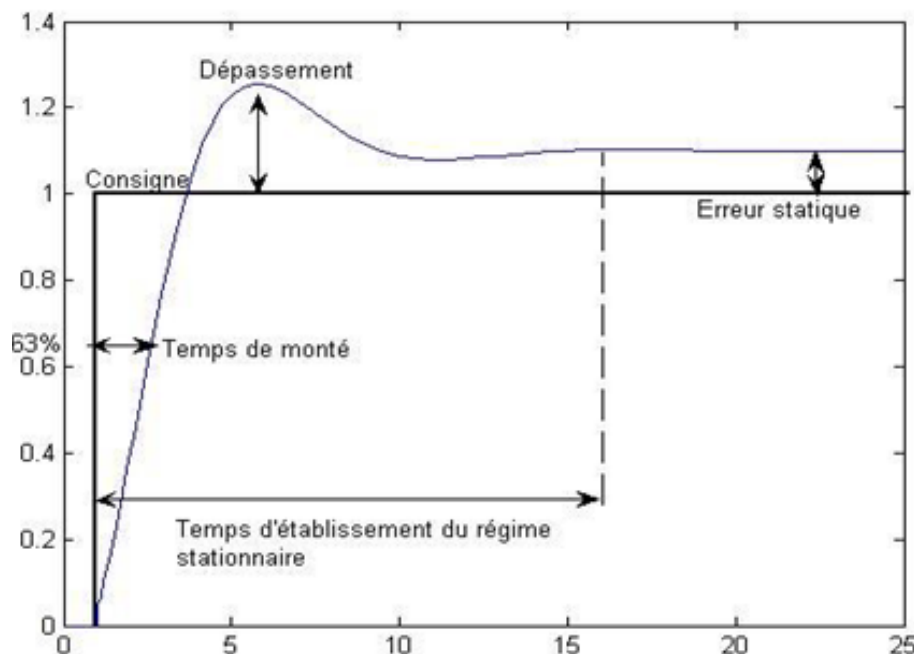


Figure IV.2 Représentation de (T_m , T_r , D)

IV.5 Régulateur PID

IV.5.1 Définition

Régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) C'est un système d'auto régulation (boucle fermée), qui cherche à réduire l'erreur entre la consigne et la mesure [JSI05].

$$e = \text{consigne} - \text{mesure}$$

Le but de la régulation est de maintenir à une valeur désirée (grandeur de référence), une grandeur physique (grandeur réglée) comme la température, l'humidité relative, la pression... soumise à des perturbations en mesurant sa valeur. Après comparaison entre grandeur réglée et grandeur de référence, il en résulte un écart de réglage. En fonction de cet écart, le régulateur forme un signal de commande (grandeur de réglage) qui va faire varier la puissance de réglage par l'intermédiaire d'un actionneur (organe de réglage).

Figure IV.3 représente les éléments d'un régulateur PID

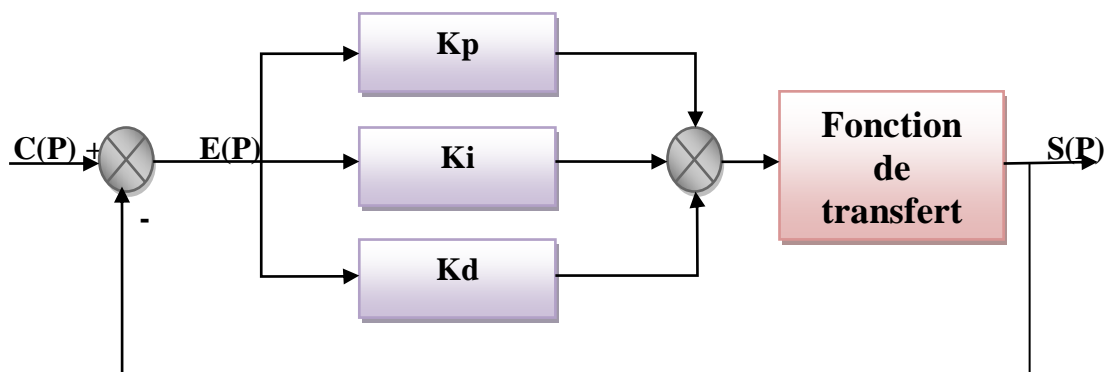


Figure IV.3 Régulateur PID.

Un régulateur PID est obtenu par l'association de ces trois actions et il remplit essentiellement les trois fonctions suivantes :

1. Il fournit un signal de commande en tenant compte de l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.
2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

IV.5.2 L'algorithme de base

L'équation du PID est donnée comme suit:

$$U(t) = K \times \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(s) ds + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (\text{IV.1})$$

IV.5.3 Description des actions de PID

IV.5.3.a L'action proportionnelle (P)

Dans le cas du command proportionnelle pur, la loi de commande sera réduite a :

$$u(t) = K e(t)$$

La commande est simplement proportionnelle au signal d'erreur, son action diminue cette erreur en statique et augmente la rapidité tant que le système n'est pas oscillatoire figure IV.4.

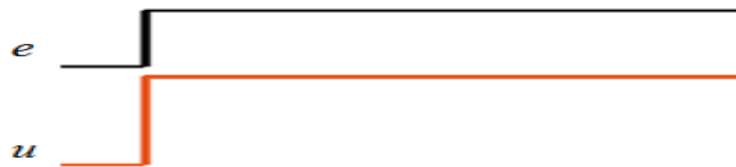


Figure IV.4 Action proportionnelle P.

IV.5.3.b L'action intégrale (I)

Le connecteur proportionnel s'avère insuffisant (sauf s'il y a déjà un intégrateur dans la chaîne à réguler) chaque fois que on souhaite régler la sortie avec une erreur nulle en régime permanent figure IV.5. D'autre part, dans le cas des processus industriels où l'on désire une marge de stabilité assez élevée, il faut s'imposer des gains faibles, ce qui a pour conséquence d'engendrer des erreurs importantes. La fonction intégrale permet d'éliminer cet écart. Cette action exige une attention particulière. En effet, lorsque le signal d'erreur est important l'actionneur qui se situe en aval se sature rapidement et la boucle de régulation est alors ouverte. Le système n'est alors commandé que par une des valeurs limites de la saturation. Il se passe un laps de temps important avant que l'erreur ne soit réduite et que la boucle de régulation ne revienne à la plage linéaire. Ce phénomène s'appelle l'emballement du terme intégral (integral wind-up), il cause des réponses chaotiques et des commandes très chahutées ce qui nuit à la durée de vie de l'ensemble ainsi régulé [ZWE04].

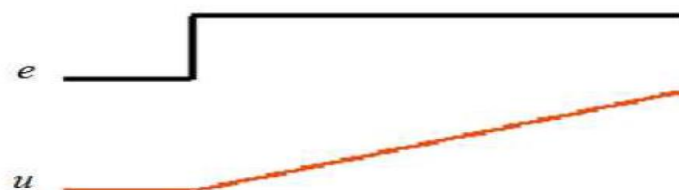


Figure IV.5 Action intégrale I.

IV.5.3.c Action dérivée (D)

L'action est dite dérivée lorsque le signal de commande est proportionnel à la dérivée du signal d'erreur. L'action dérivée, en compensant les inerties dues au temps mort, accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne figure IV.6.

L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes telles que la température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique (la pression). En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile.



Figure IV.6 Action dérivée D.

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients k , T_i , T_d afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. Les objectifs sont d'être robustes, rapide et précis.

Coefficient	Temps de montée	Temps de stabilisation	Dépassement	Erreur Statique
K_p	Diminue	Augmente	Augmente	Diminue
K_i	Diminue	Augmente	Augmente	Annule
K_d	-	Diminue	Diminue	-

Tableau IV.1 Caractéristiques du régulateur PID

IV.6 Fonctionnement et modèle de PSS

Un PSS permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la variation de vitesse de rotor dans l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur, figure (IV.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 [IEE03]. 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.

Un bon résultat peut être obtenu si l'entrée du PSS est la variation de la vitesse de rotor ($\Delta\omega$), la variation de puissance produite du générateur (ΔP_e) ou la fréquence du jeu de barre (Δf). Etant donné que le PSS est utilisé pour produire un couple électrique proportionnel à la variation de vitesse, il apparaît donc plus convenable d'utiliser la variation de vitesse ($\Delta\omega$) comme entrée du PSS. Cependant, quel que soit le signal d'entrée, la fonction de transfert du PSS doit compenser les caractéristiques de phase du système d'excitation, des parties électriques du générateur et des autres parties électriques du système. L'ensemble de ces dernières déterminent la fonction de transfert entre l'entrée du système d'excitation (ΔV_{er}) et le couple électrique du générateur (ΔT_e) [LAR81].

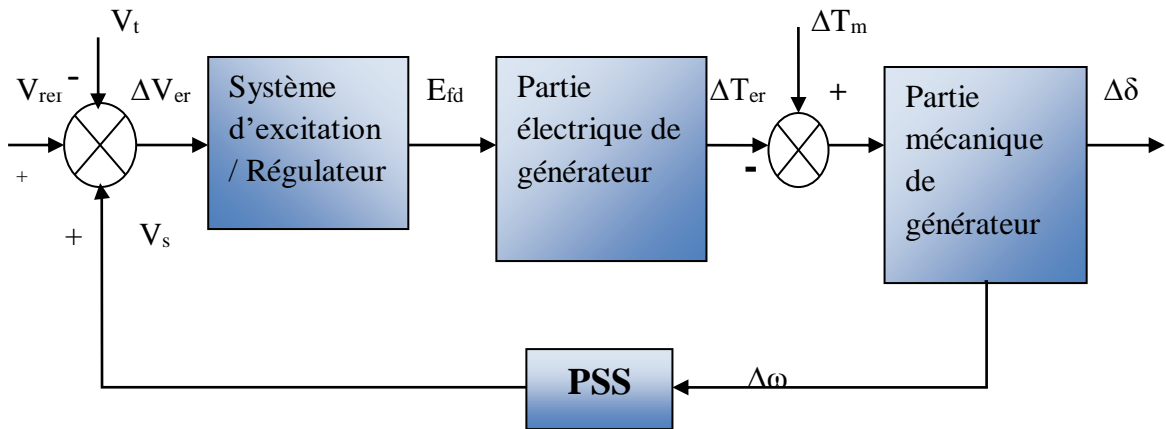


Figure IV.7 Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.

Le type de PSSs 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 (IV.8):

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

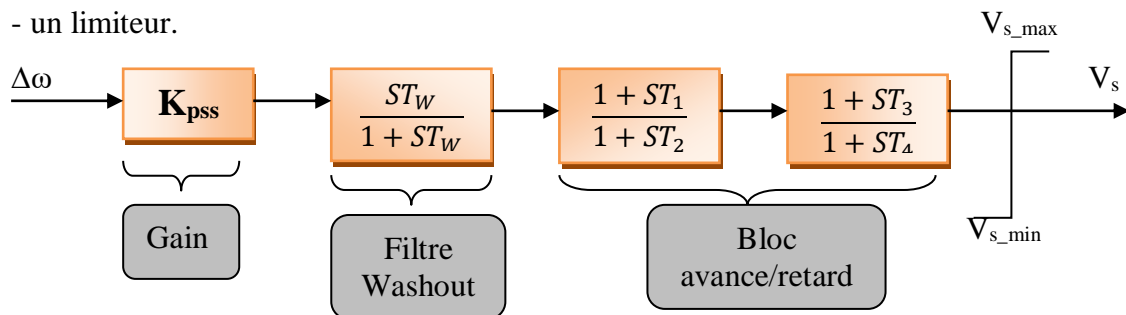


Figure IV.8 Modèle d'un PSS avance/retard.

IV.7 Différents blocs de PSS

IV.7.1 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 [KUN89]. Généralement, K_{PSS} varie généralement de 0.01 à 50 [DJA13].

IV.7.2 Le filtre passe-haut "filtre washout"

Il élimine les oscillations à très basse fréquence (inférieure à 0.2 Hz) présentées dans le signal d'entrée. Il supprime également la composante continue de la vitesse (la composante "DC" correspondant au régime statique) : le PSS ne réagit donc que lorsqu'il y a des variations de vitesse. La constante de temps de ce filtre (T_ω) doit être suffisamment grande pour permettre aux signaux, dont la fréquence est située dans la bande utile, d'être transmis sans atténuation. Mais, elle ne doit pas être trop grande pour éviter de mener à des variations indésirables de tension de générateur pendant les conditions d'ilotage. Généralement, T_ω varie de 1 à 20 secondes. Une amélioration remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur T_ω fixée à 10 secondes [PAL05].

IV.7.3 Le filtre compensation de phase

L'origine de l'amortissement négatif est, comme nous l'avons vu, associée au retard de phase introduit entre le couple électrique du générateur (ΔT_e) et l'entrée du système d'excitation (ΔV_{er}). Par conséquent, le PSS fournit l'avance de phase nécessaire pour compenser le retard de phase de la fonction de transfert GEP. Pratiquement, un bloc de phase d'avance pure ne suffit pas pour réaliser la compensation de phase nécessaire ainsi, un bloc d'avance/retard de phase est souvent utilisé. Pour mieux garantir la stabilité du système, deux étages (au moins) de compensations de phase sont nécessaires. La fonction de transfert de chaque étage est une simple combinaison de pole-zéro, les constantes de temps d'avance et de retard étant réglables. La gamme de chaque constante de temps s'étend généralement de 0.01 à 6 secondes. Mais pour des considérations de réalisation physique, les constantes de temps de retard sont considérées fixes et généralement autour de la valeur de 0.05 secondes [FLE81].

IV.7.4 Le limiteur

Le PSS est conçu pour améliorer l'amortissement du système en cas de petites variations autour d'un point d'équilibre. Son objectif n'est pas de restaurer la stabilité du système aux perturbations sévères (la stabilité transitoire). Le PSS a parfois tendance à perturber le bon fonctionnement du régulateur de tension en le saturant lorsque ce dernier essaye de maintenir la tension lors des conditions transitoires. Ainsi, le PSS doit être équipé d'un limiteur afin de réduire son influence indésirable durant les phases transitoires [LAR81]. Les valeurs minimales et maximales du limiteur s'étendent de ± 0.02 à 0.1 per-unit [YUY83].

IV.8 Réglage des paramètres de PSS

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

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

La minimisation des risques probables des interactions défavorables et des effets négatifs sur les autres modes oscillatoires du système représente aussi un point critique important qui influence le réglage de PSS. En outre, les valeurs des paramètres du PSS doivent être réglées sans entraîner d'effet négatif dans la restauration de la stabilité transitoire. De nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature pour le réglage des paramètres de PSS. Généralement, la plupart de ces méthodes sont basées sur l'analyse des valeurs propres du système.

IV.9 Emplacement optimal des PSSs

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

Ainsi, la première étape de la mise en œuvre des PSSs, est de trouver les emplacements optimaux des PSSs nécessaires et de déterminer leur nombre. Ce problème a fait l'objet, depuis une dizaine d'années, d'un grand nombre de recherche [FEL90]. Les approches les plus efficaces proposées sont basées sur l'analyse modale du système linéarisé :

- Le mode Shape.

- Les facteurs de participations.
- Les résidus.

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

Sachant que des emplacements différents des PSSs entraînent des oscillations totalement différentes, des PSSs "mal placés" peuvent donc ne pas répondre aux objectifs. Pour cela, il faut bien choisir la méthode qu'il faut appliquer pour déterminer les bons emplacements des PSSs.

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une façon générale le régulateur PID. L'action associée au régulateur PID permet une régulation optimale en associant les avantages de chaque action: la composante "P" réagit à l'apparition d'un écart entre la consigne et la sortie du système dans la boucle de régulation et diminue le temps de montée, la composante "D" diminue le dépassement et s'oppose aux variations de la grandeur réglée et stabilise la boucle de régulation, tandis que la composante "I" élimine l'erreur statique. On a présenté d'une façon générale le modèle de fonctionnement d'un stabilisateur PSS. En outre, Les différents blocs de réglage des paramètres du PSSs et leurs emplacements ont été analysés.

CHAPITRE V :

Application de l'algorithme PSO pour le réglage de PID & PSS

V.1 Introduction

Le manque des méthodes exactes pour la synthèse des régulateurs PID et les contrôleurs PSS, a guidé les chercheurs à s'orienter vers l'utilisation des algorithmes évolutionnaires à cause de caractéristique d'exploration globale dans un environnement complexe.

Ce chapitre présente l'application de la méthode de l'algorithme PSO (l'Optimisation par les Essaims de Particules (OEP), PSO en anglais) pour l'optimisation des paramètres d'un régulateur PID et les paramètres de PSS. Le but de ce chapitre est d'analyser l'effet de la présence de PSS et de PID à la minimisation des oscillations et de l'erreur pour un système composé d'un générateur connecté à un réseau infini. Enfin, nous effectuerons une comparaison entre les deux systèmes de régulation PSS et le PID.

La fonction objectif utilisée dans cette étude c'est :

$$f = ee$$

f : Fonction objectif

$$ee = \max(Y_{out}) - Y_{ref}$$

V.2 Modèle d'étude dans le MATLAB/SIMULINK

Le modèle d'étude représente la machine synchrone liée à un JB infini à travers une ligne de transmission. Le modèle de la machine synchrone est celui de Philips-Heffron du 4^{ème} ordre [EAF07], (block diagram of linearized model of the SMIB system).

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. Les facteurs $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ et G_{ex}, K_D ainsi que les constantes de temps T_3 et T_R sont calculées selon le modèle décrit dans l'annexe A selon [PRA94].

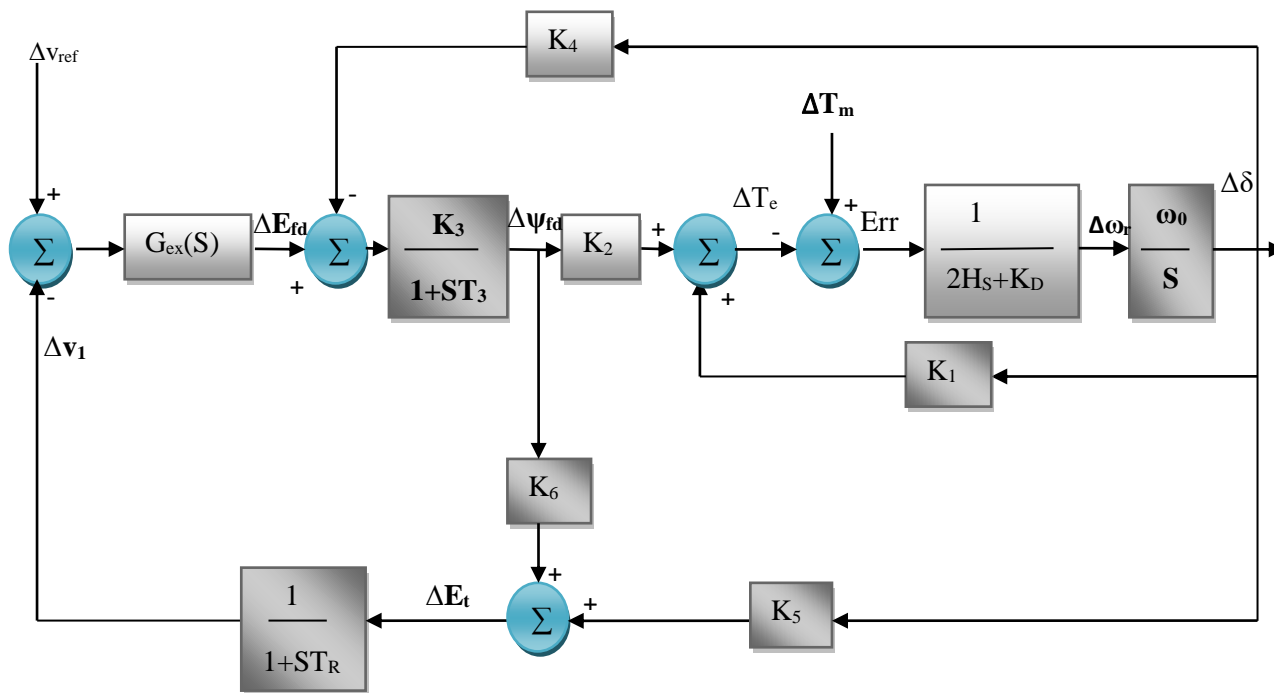


Figure V.1 Schéma fonctionnel d'un Système d'excitation avec l'AVR

V.3 Analyse du système sans PID et sans PSS

Une perturbation sur la variation du couple mécanique ΔT_m est introduite en fonction de l'ampleur de cette perturbation 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 (ΔT_e). Toutes ces grandeurs présentant des oscillations.

V.3.1 Les courbes de $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err, ΔT_e du système sans PID et sans PSS

On introduit une déviation du couple mécanique ΔT_m en (p.u) puis on analyse les déviations des grandeurs décrites ci-dessus en dégagant les courbes de la figure V.2 jusqu'à la figure V.5. Les dépassements des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ et ΔT_e pour le système sans PID ou PSS sont sur le tableau V.1.

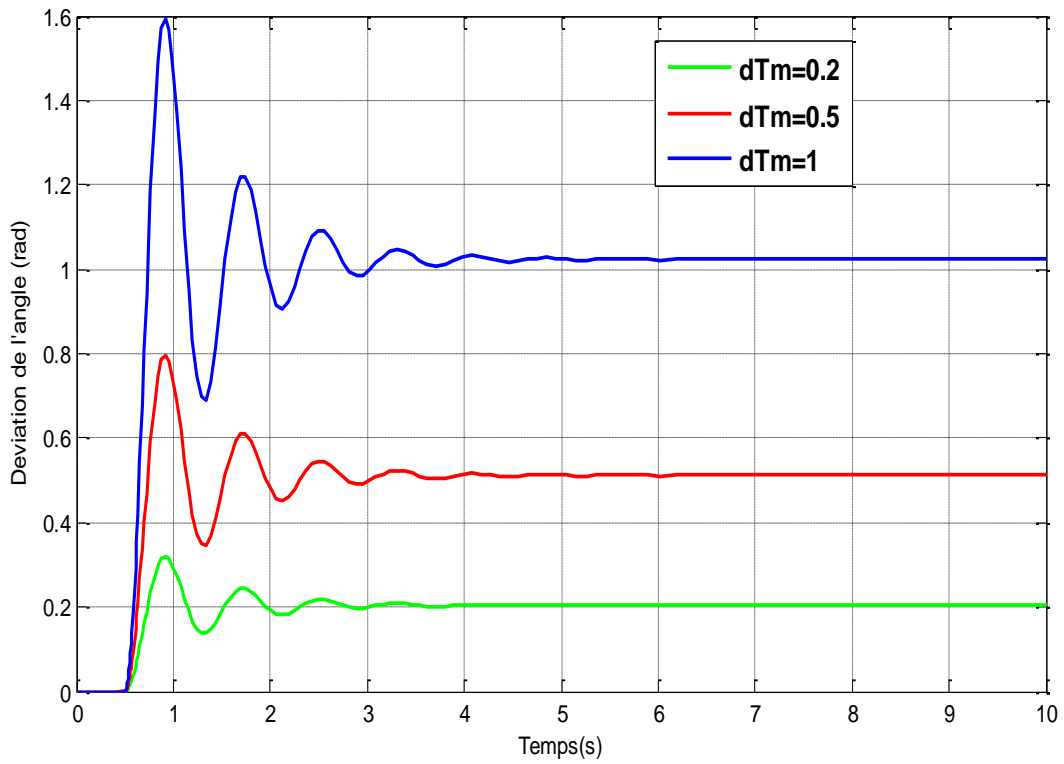


Figure V.2 déviation de position angulaire (rad)

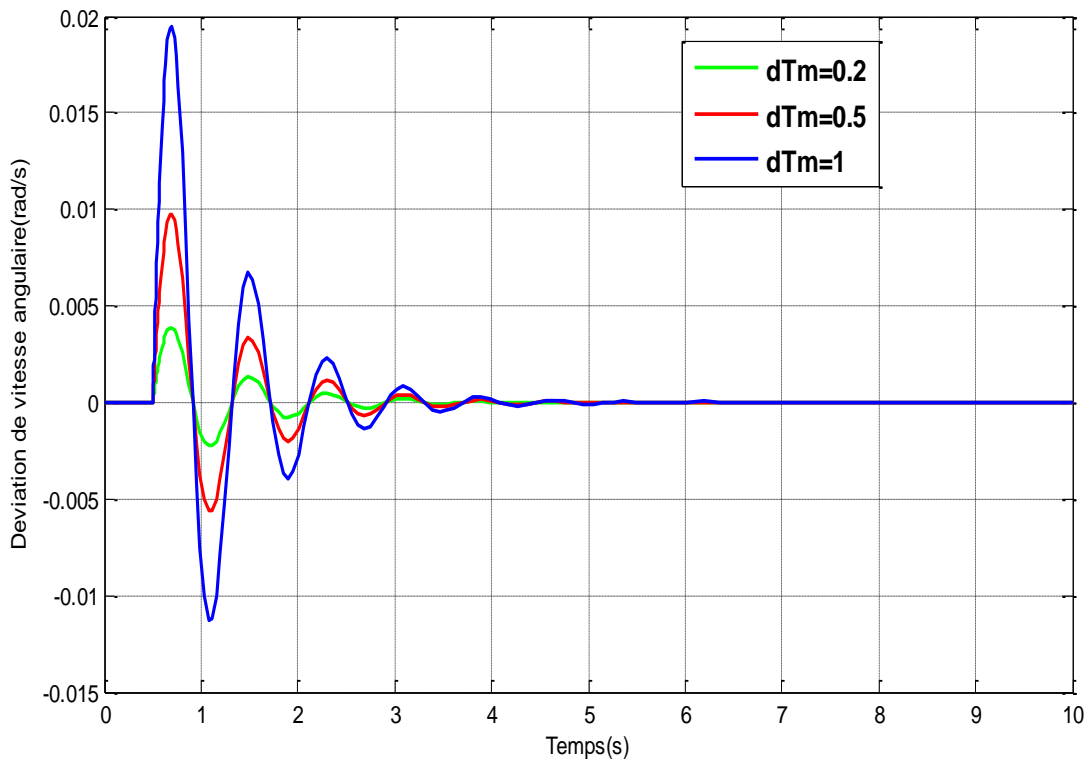


Figure V.3 déviation de vitesse angulaire (rad/sec)

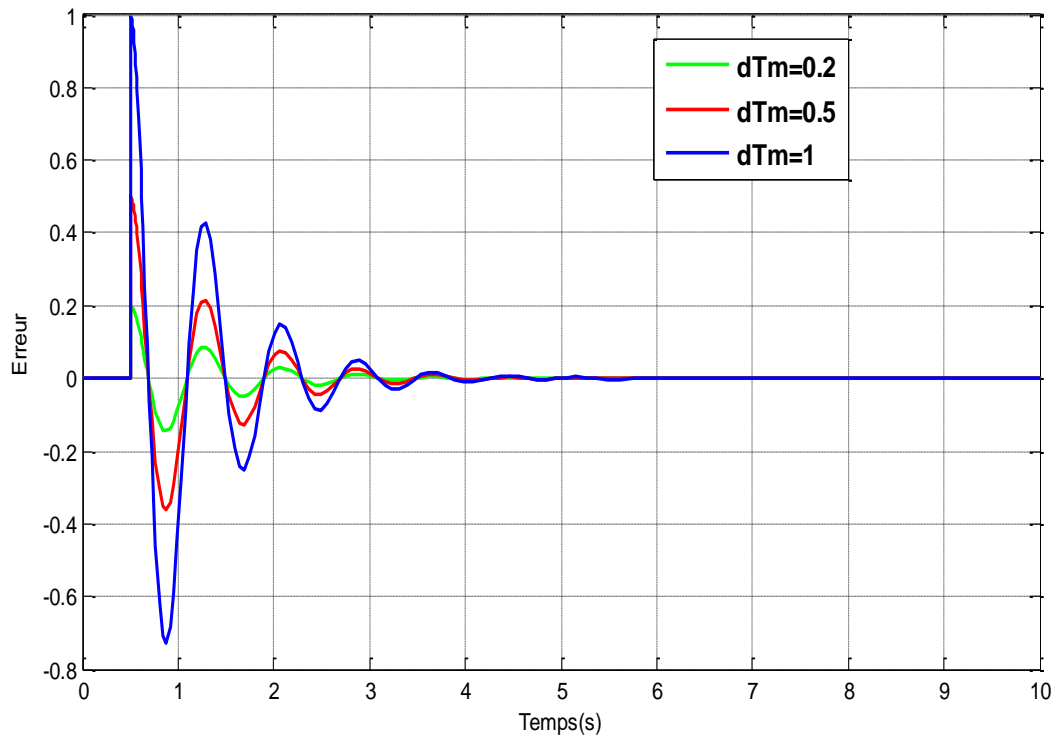


Figure V.4 Erreur (p.u)

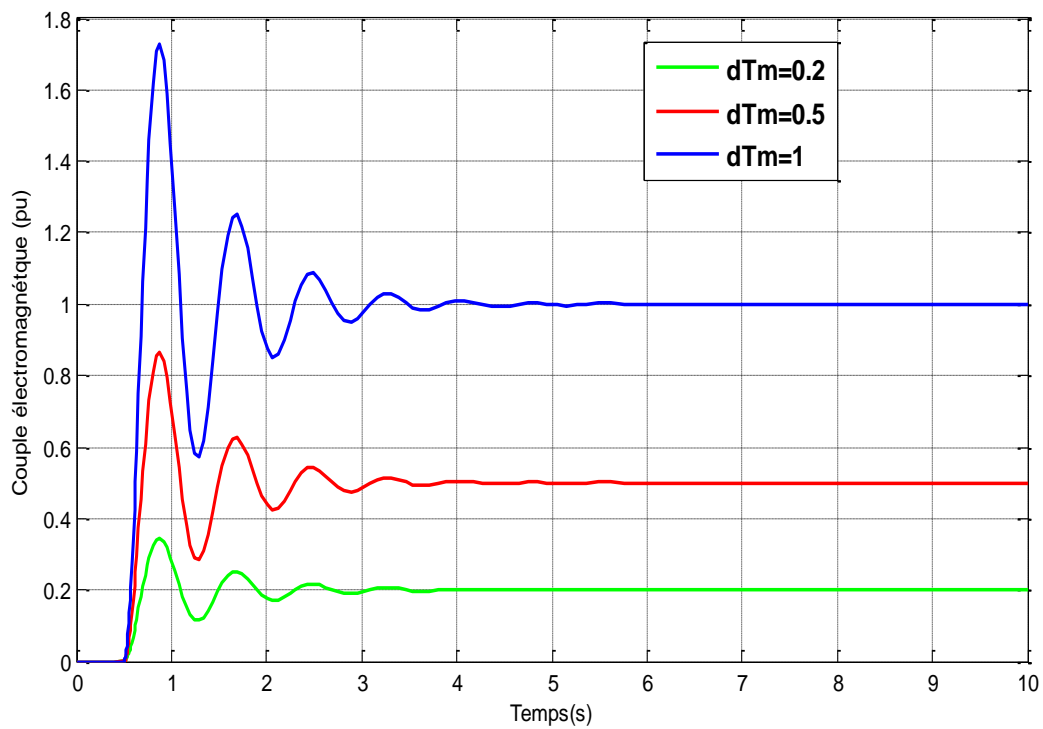


Figure V.5 déviation de couple électromagnétique (p.u)

Les grandeurs	$\Delta\delta$	$\Delta\omega$	ΔT_e
Système sans PID et PSS	59.05%	1.95%	72.85%

Tableau V.1 les dépassements des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ et ΔT_e pour le système sans PID ou PSS

Après simulation, les résultats relatifs au système étudié sont montrés dans les figures (V.2, V.3, V.4, V.5) au dessous, 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 dans un temps de réponse après 5,5 sec presque. Avec de grande valeur de dépassement selon le tableau V.1.

V.4 Analyse du système avec introduction d'un PID

Le régulateur PID décrit dans le chapitre 4 est introduit dans le modèle de la figure V.1, cela aboutit au modèle de la figure V.6. l'analyse est faite seulement pour $\Delta T_m=1$ p.u .

Les limites des gains K_i , K_p et K_d sont données sur le Tableau V.2 avec $K_i=0$.

Les paramètres de PID sont optimisés en utilisant la méthode d'optimisation métaheuristique PSO. Après implementation du modèle de SIMULINK et en coordination avec le code de calcul de l'algorithme de PSO, les résultats ont été extraite et dressés sur le Tableau V.3. L'évolution des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err et ΔT_e sont illustrés respectivement sur les figures V.7, V.8, V.9 et V.10. Les dépassements des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ et ΔT_e pour le système avec PID sont sur le tableau V.4. L'évolution de la fonction objectif durant l'optimisation et en fonction des nombres des itérations est donnée sur la figure V.11.

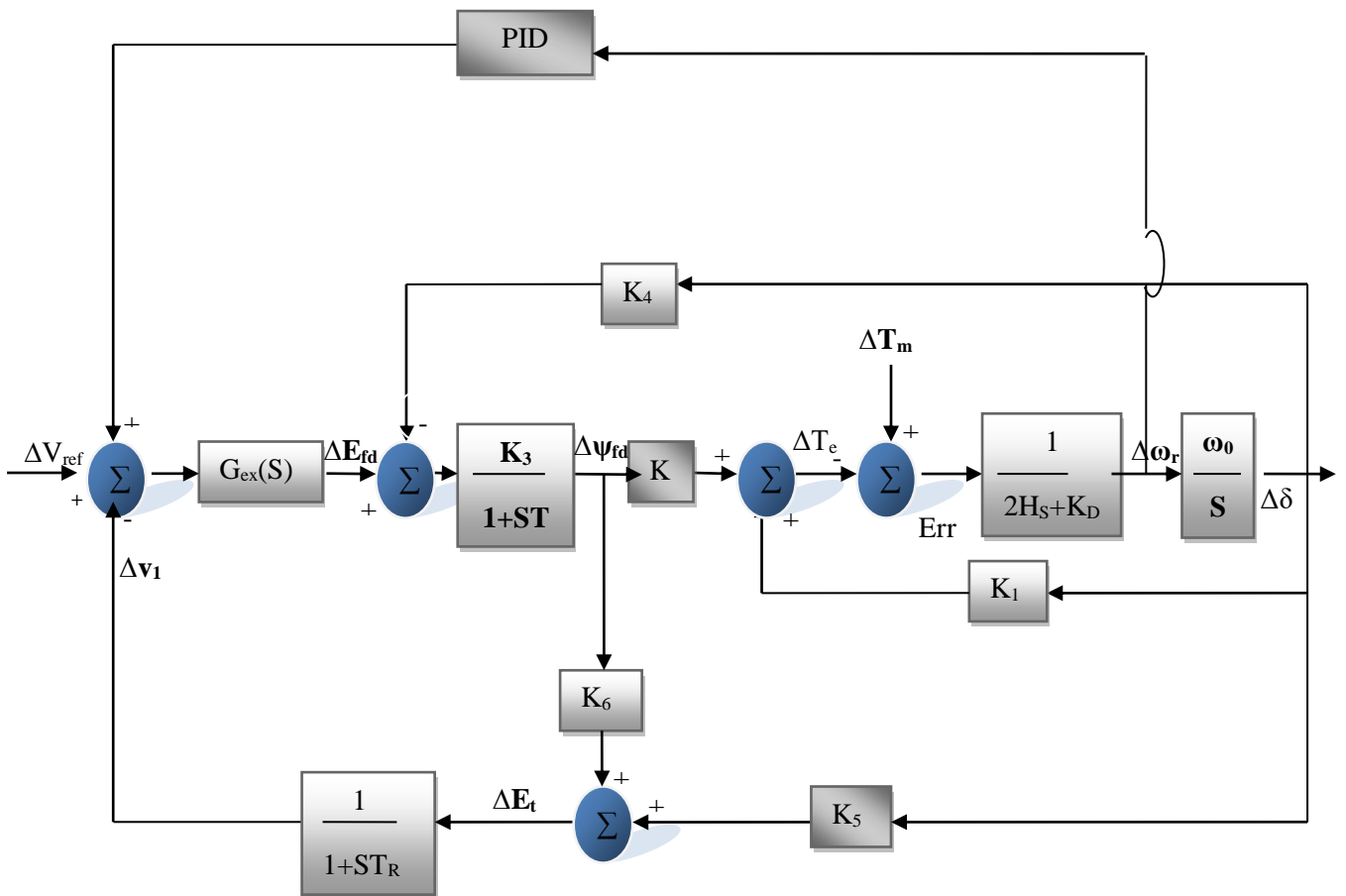


Figure V.6 Schéma bloc fonctionnel avec l'AVR et le PID

	Kp	Ki	Kd
Valeur minimal	0	0	0
Valeur maximale	50		10

Tableau V.2 Plages de variations des gains du PID

	Meilleure valeur de la fonction objectif		Temps d'exécution
	0.0382		275.5 (s)
Les paramètres de PID	Kp	Ki	Kd
Valeurs optimales des paramètres de PID	29.8361	0	3.1552

Tableau V.3 les valeurs optimales des paramètres de PID

V.4.1 Les courbes de $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err, ΔT_e de système avec PID

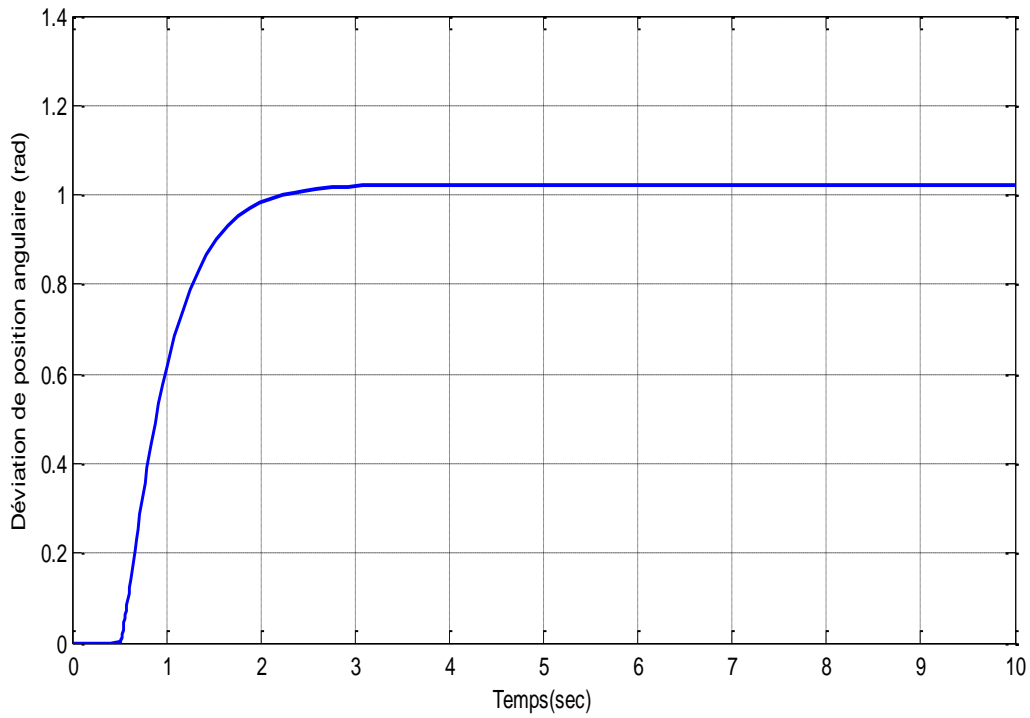


Figure V.7 déviation de position angulaire de système avec PID (rad)

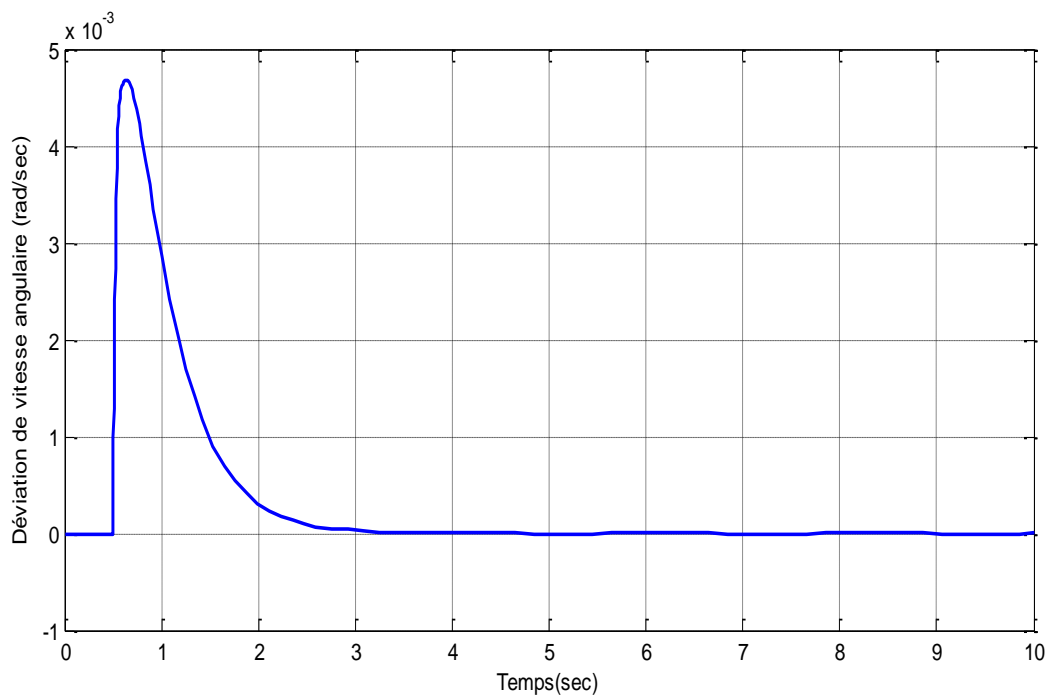


Figure V.8 déviation de vitesse angulaire de système avec PID (rad/s)

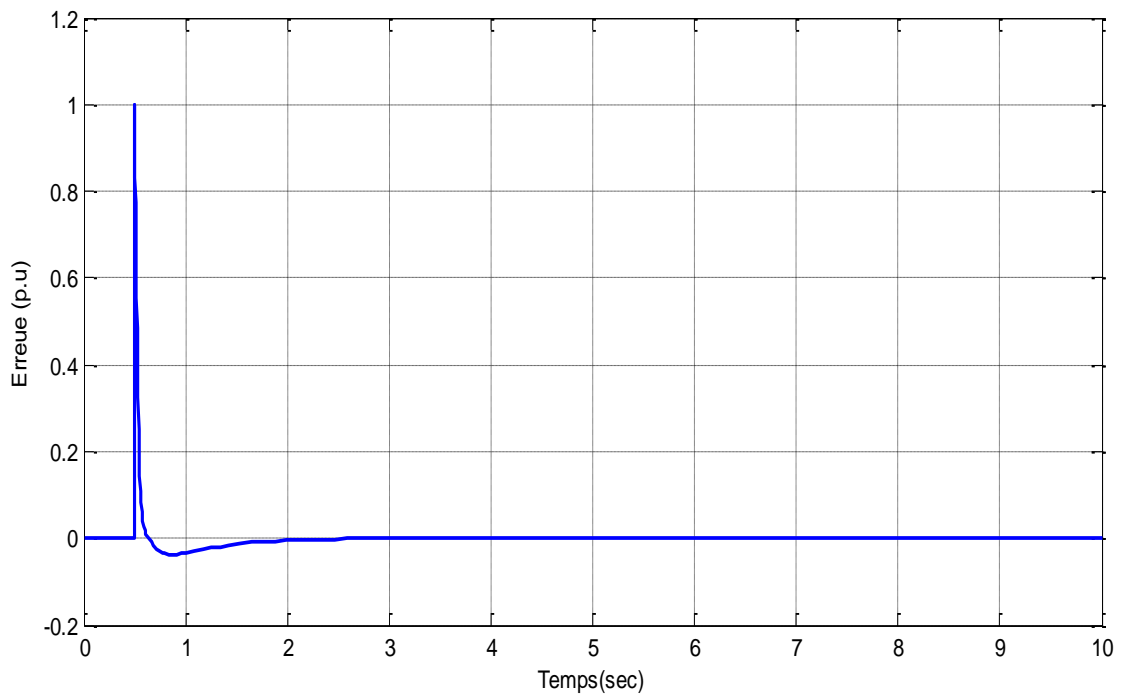


Figure V.9 Erreur de système avec PID (p.u)

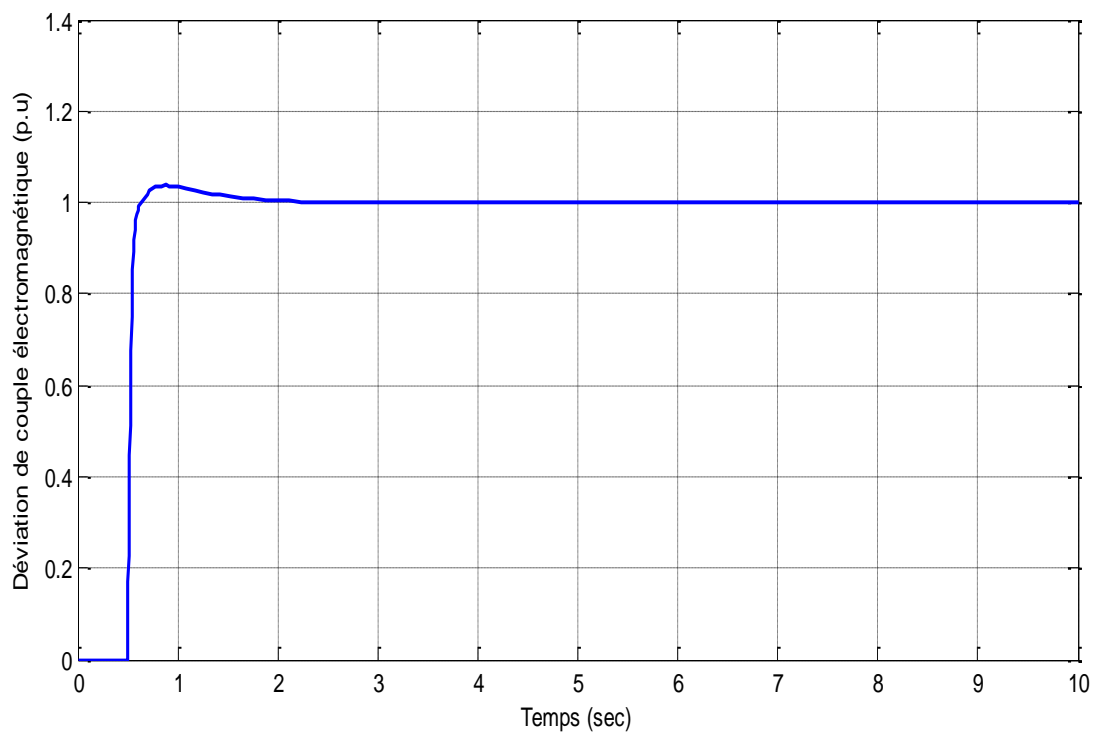


Figure V.10 déviation de couple électromagnétique de système avec PID (p.u)

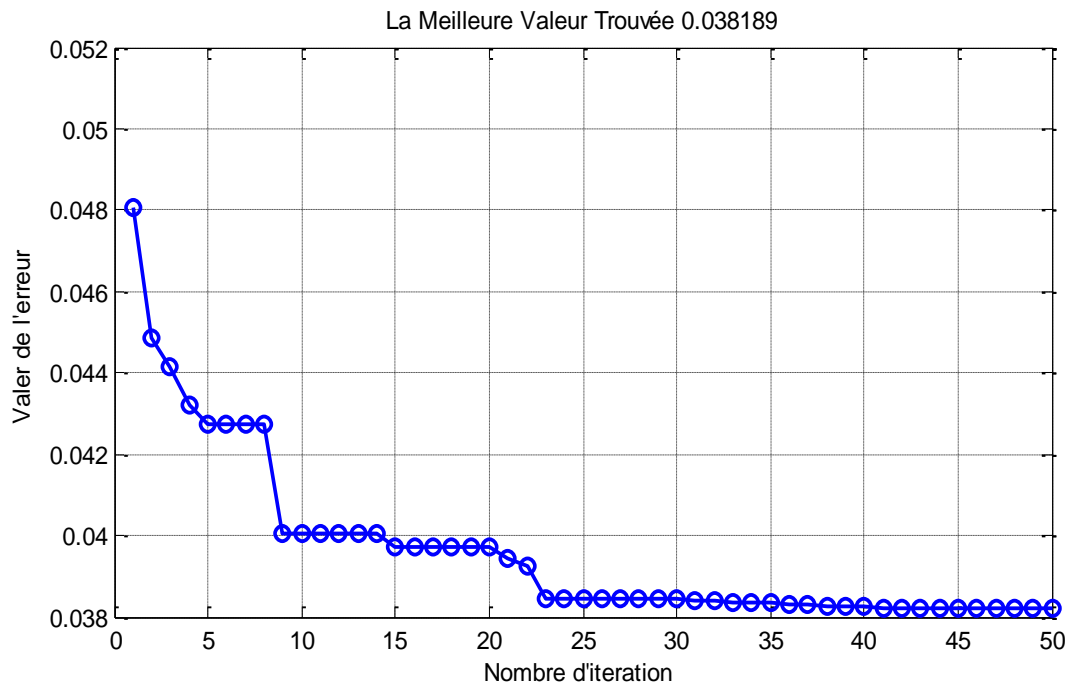


Figure V.11 L'évolution de la fonction objectif (Fobj) du système avec PID

Les grandeurs	$\Delta\delta$	$\Delta\omega$	ΔTe
Sys. Avec PID	2.35%	00.47%	3.8%

Tableau V.4 les dépassements des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ et ΔTe pour le système avec PID

Après les résultats de simulation du système étudié dans les figures (V.7, V.8, V.9, V.10), on remarque que les courbes de système devient stable dans un temps de réponse après 3 seconde presque les figure (7, 8) et les figure (9,10) après 2 seconde. La valeur de la fonction objectif a été réduite à 0.03818 de pourcentage d'erreur 3.8%.

V.5 Analyse du système avec introduction d'un PSS

Le contrôleur PSS décrit dans le chapitre 4 est introduit dans le modèle de la figure V.1, cela aboutit au modèle de la figure V.12. l'analyse est faite seulement pour $\Delta T_m=1$ p.u .

Les limites de gain K_p , et les constants de temps T_w et T_1, T_2, T_3, T_4 , sont données sur le Tableau V.5.

Les paramètres de PSS sont optimisés en utilisant la méthode d'optimisation métaheuristique PSO. Après implementation du modèle de SIMULINK et en coordination

	Meilleure valeur de la fonction objectif			Temps d'exécution		
	0.1186			304.6 (s)		
Les paramètres de PSS	Kp	Tw	T1	T2	T3	T4
Valeurs optimales des paramètres de PSS	69.9612	0.1001	0.2823	0.9892	0.2479	0.1010

Tableau V.6 les valeurs optimales des paramètres de PSS

V.5.1 Les courbes de $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err, ΔTe de système avec PSS

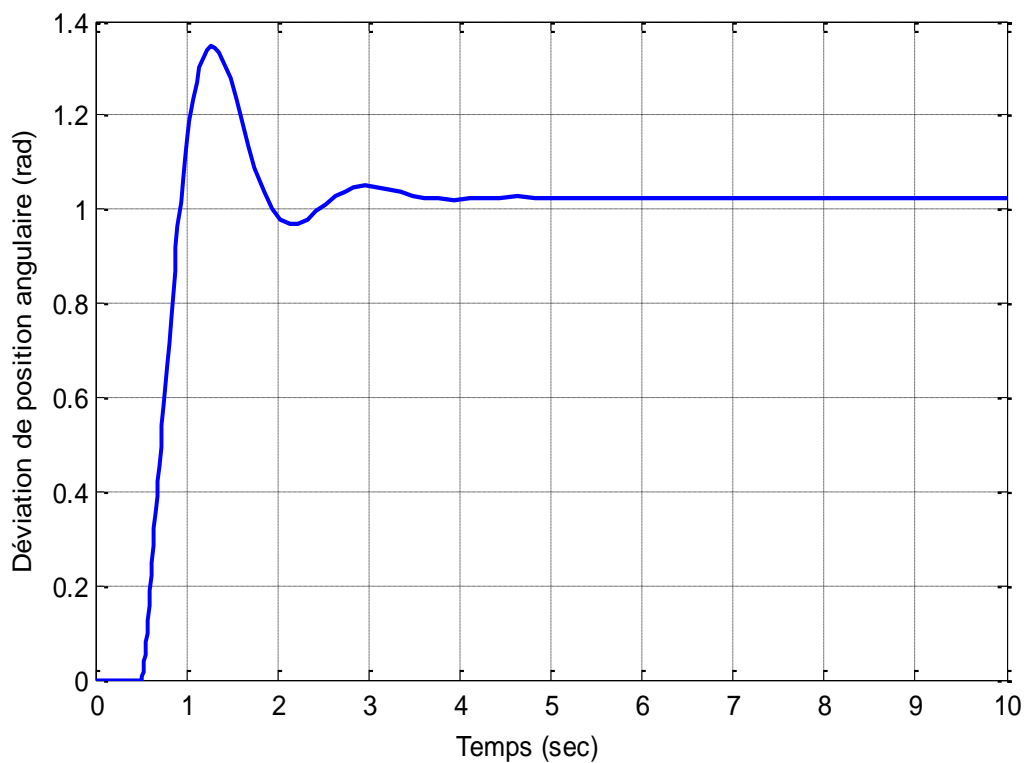


Figure V.13 déviation de position angulaire système avec PSS (rad)

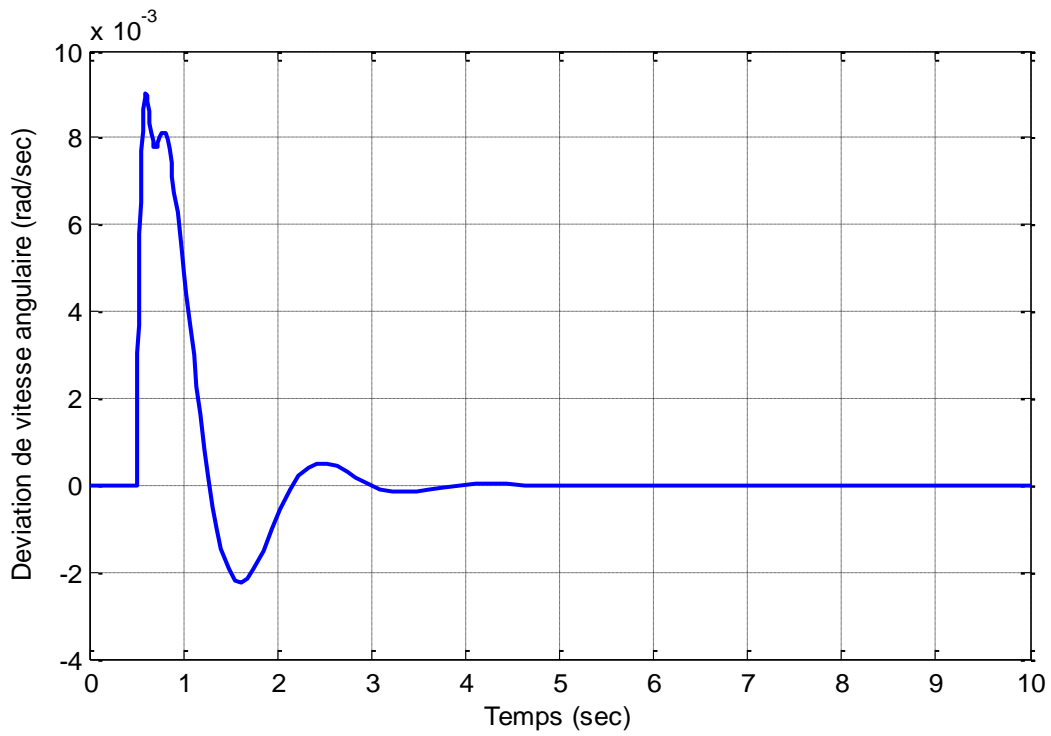


Figure V.14 déviation de vitesse angulaire de système avec PSS (rad/sec)

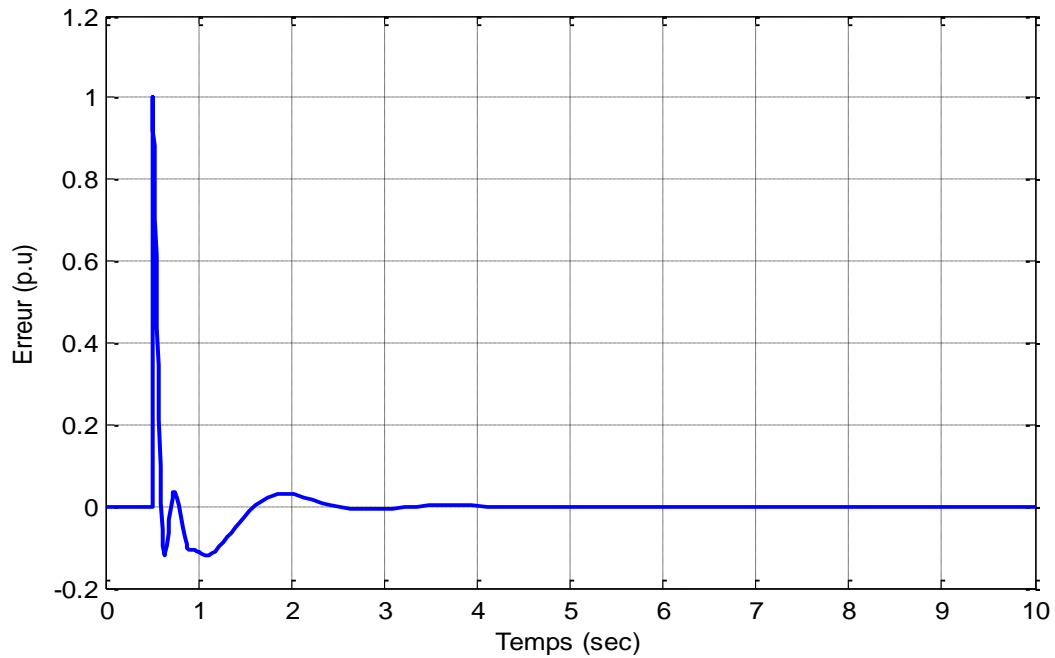


Figure V.15 Erreur de système avec PSS (p.u)

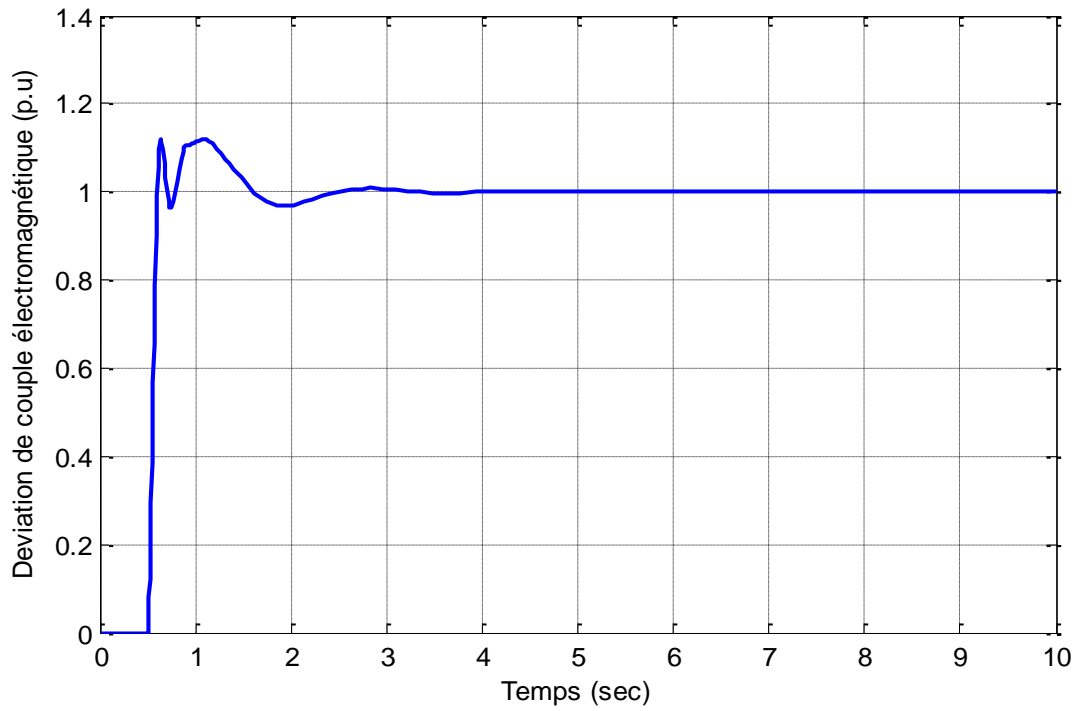


Figure V.16 déviation de couple électromagnétique de système avec PSS

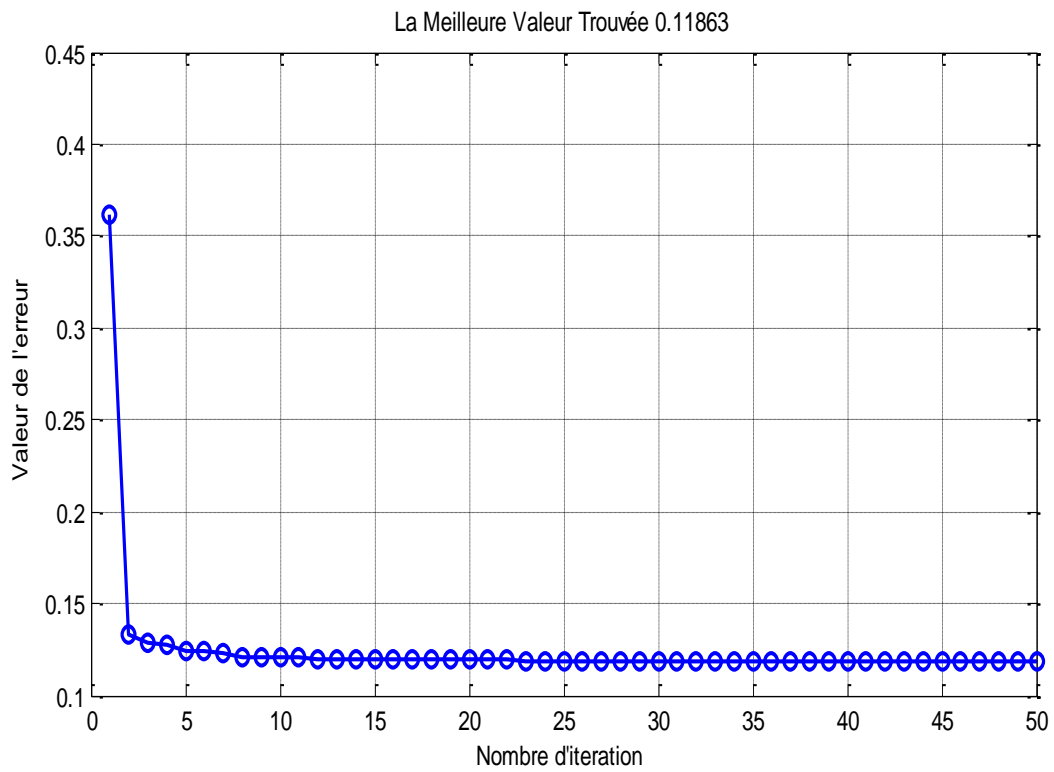


Figure V.17 L'évolution de la fonction objectif (Fobj) de système avec PSS

Les grandeurs	$\Delta\delta$	$\Delta\omega$	ΔT_e
Sys. Avec PSS	34.65%	00.90%	11.86%

Tableau V.7 les dépassements des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ et ΔT_e pour le système avec PSS

Les figures (V.13, V.14, V.15, V.16) montrent que d'après l'utilisation de PSS, le système devient stable que le système sans PSS dans un temps de réponse est égale a 5 seconde pour les courbe de figure (13, 14) et 4 seconde pour les figures (15, 16). La valeur de la fonction objectif a été réduire à 0.11863 (11.86%). Selon le tableau V.7 les valeurs de dépassement sont acceptables.

V.6 Comparaison entre l'efficacité de PID et PSS sur la stabilité de système

Les figures V.18 jusqu'à V.21 ci-dessus représentent réassemblage l'évolution des grandeurs $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, Err et ΔT_e des trois systèmes (système étudié sans PSS ou PID, système avec PID et le système avec PSS)

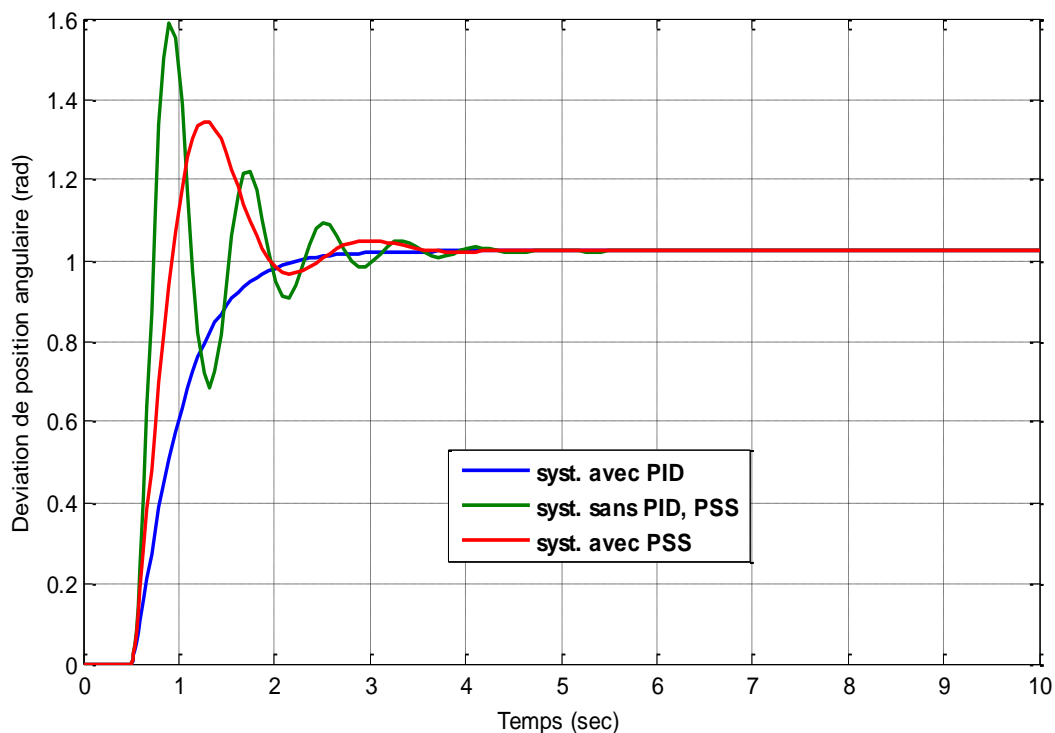


Figure V.18 déviation de position angulaire système sans PID et PSS et système avec PID, système avec PSS (rad)

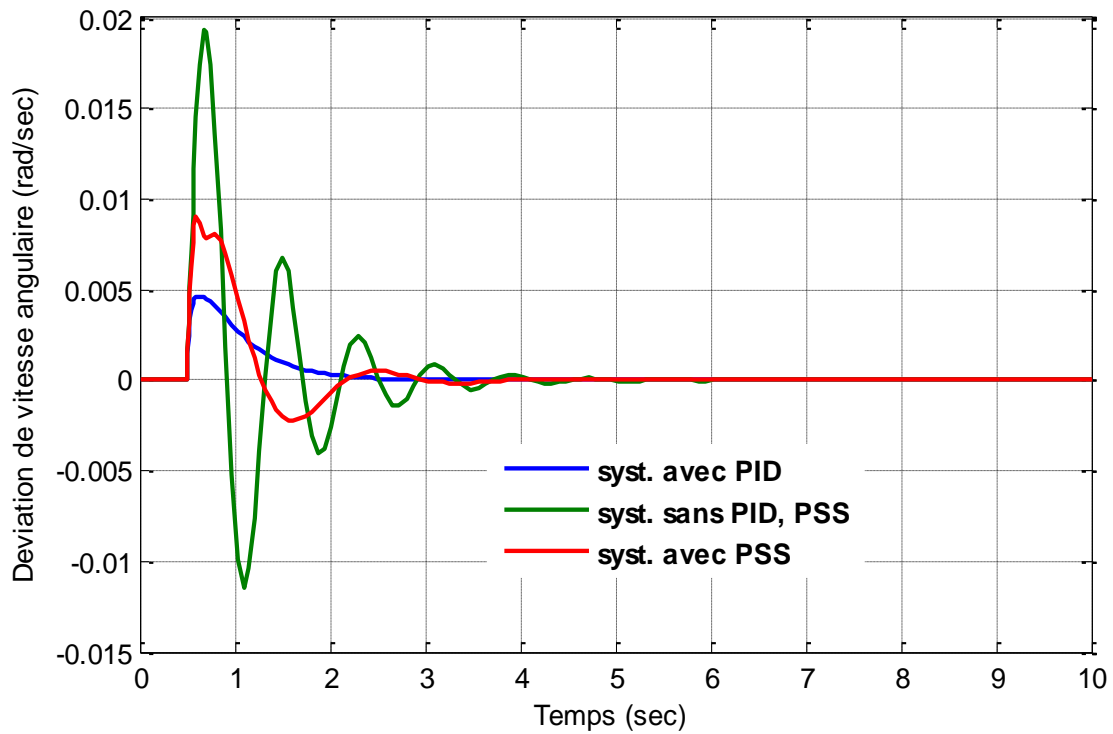


Figure V.19 déviation de vitesse angulaire de système sans PID et PSS et système avec PID, système avec PSS

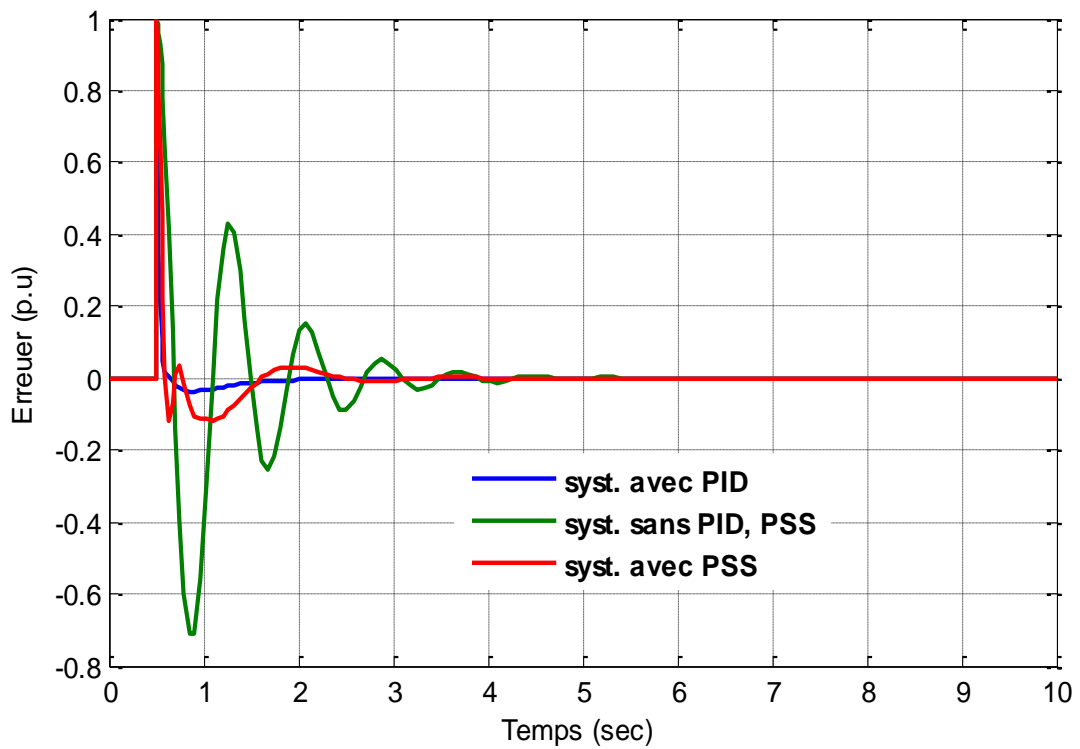


Figure V.20 Erreur de système sans PID et PSS et système avec PID, système avec PSS (p.u)

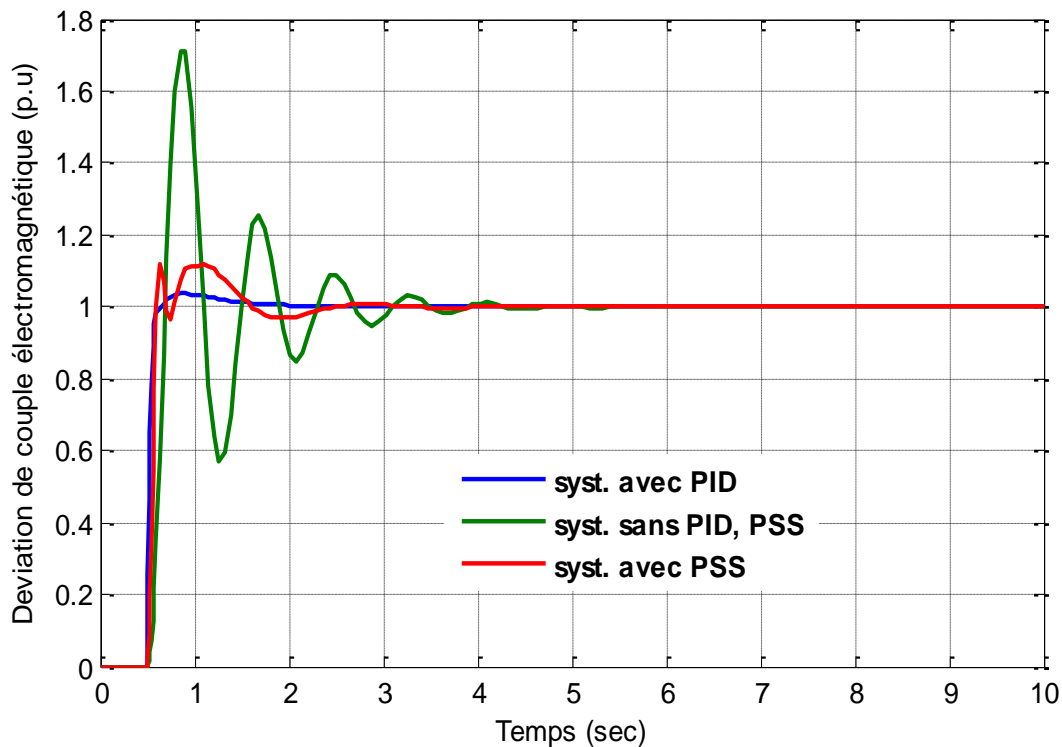


Figure V.21 déviation de couple électromagnétique de système sans PID et PSS et système avec PID, système avec PSS (p.u)

On utilise la méthode de PSO pour évaluer la meilleure valeur de la fonction objective (par sa minimisation) en fonction des valeurs des gains de PID et de PSS.

Les résultats de simulations montrent que le système équipé d'un régulateur PID revient à sa position d'équilibre avec des durées courtes en régime transitoire par rapport au PSS. Avec bonne influence sur la régulation, avec un bon amortissement des oscillations de la vitesse angulaire, ainsi que l'angle de charge, erreur et la déviation du couple électromagnétique.

V.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode d'optimisation des essais de particules (PSO) pour le réglage des paramètres de PID et PSS dans le but d'améliorer de plus la stabilité transitoire d'une machine synchrone raccordée à un jeu de barre infini. Les résultats de simulation ont montré qu'un régulateur PID influence beaucoup plus rapidement qu'un contrôleur PSS sur la stabilité transitoire, atténuation du dépassement et amélioration de l'amortissement des oscillations du système.

CONCLUSION GÉNÉRALE

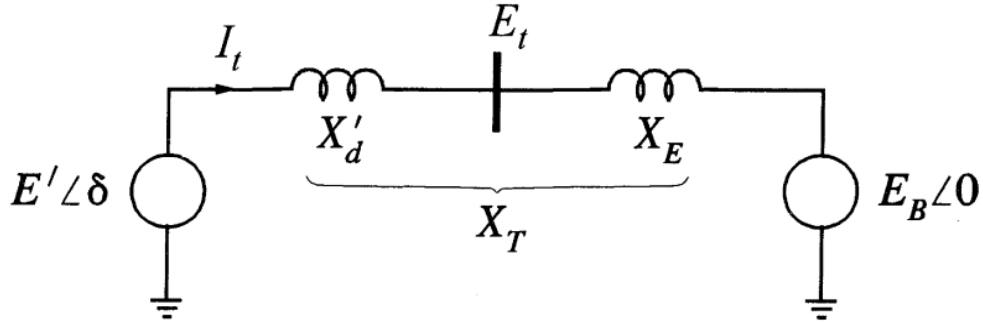
Les différentes perturbations sur les systèmes électro-énergétiques engendrent des oscillations importantes qui ont une influence néfaste sur la stabilité des réseaux électriques. Dans ce travail, nous avons essayé de contribuer à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant deux systèmes de régulation qui sont le régulateur Proportionnel-Intégrateur-Dérivateur (PID) et le Stabilisateur de Réseau Electrique (PSS). A cause de l'interaction des différentes grandeurs agissant sur la stabilité d'un réseau électrique, la détermination des paramètres que se soit du PID ou du PSS n'est pas assuré avec des méthodes simples mais ca nécessite des techniques qui peuvent surmonter la complexité des problèmes traités dans ce domaine. Pour résoudre les problèmes liés à la stabilité, nous avons utilisé une méthode métaheuristique appelée l'optimisation par essaim particulaire (PSO), appliquée pour la synthèse d'un régulateur PID et d'un contrôleur PSS qui sont destinés pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. Le modèle d'étude est formé d'une machine synchrone liée à un jeu de barres infini à travers une ligne de transport.

Les travaux que nous avons menés dans ce mémoire ont pour but de présenter une approche de commande optimale d'un régulateur PID et d'un contrôleur PSS en utilisant l'optimisation par essaim particulaire (PSO). Il s'agit de rechercher les gains optimaux d'un régulateur PID d'un coté et les gains, ainsi que les constantes de temps d'un contrôleur PSS d'un autre coté pour améliorer les performances de la boucle de régulation.

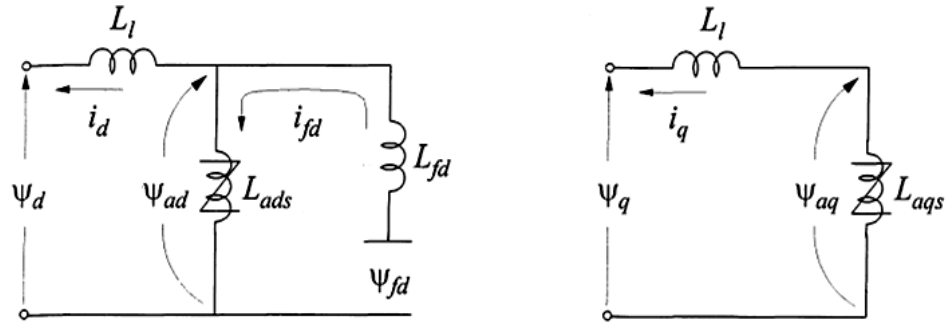
Dans ce mémoire, nous avons fait la simulation de système sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, en dégagant et en interprétant les courbes de déviation angulaire, déviation de la vitesse, déviation du couple électromagnétique et l'erreur. Une comparaison entre le régulateur PID et le contrôleur PSS a été faite. Après cette interprétation des courbes, nous pouvons conclure que l'évaluation des performances soit du contrôleur PSS, soit du régulateur PID, 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 que se soit du contrôleur PSS ou du régulateur PID utilisé dans le système d'énergie assure un bon amortissement et une efficacité en termes de temps de réponse. Mais l'impact du régulateur PID sur le réseau est plus efficace par rapport à celui du contrôleur PSS.

ANNEXE

Annexe A



Modèle classique de générateur



Circuit équivalent

Les valeurs des paramètres de système de puissance :

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

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

$$K_3 = \frac{L_{ads} + L_{fd}}{L_{adu}} \frac{1}{1 + \frac{X_{Tq}}{D} (X_d - X'_d)}$$

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

$$K_5 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} [-R_a m_1 + L_l n_1 + L_{aqs} n_1] + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} [-R_a n_1 + L_l m_1 + L_{ads} m_1]$$

ANNEXE

$$K_6 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} [-R_a m_2 + L_l n_1 + L_{aqs} n_2] + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \left[-R_a n_2 + L_l m_2 + L'_{ads} \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) \right]$$

$$T_3 = \frac{L_{ads} + L_{fd}}{\omega_0 R_{fd}} \frac{1}{1 + \frac{X_{Tq}}{D} (X_d - X'_d)}$$

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K _D	T _R	T3	H
1.591	1.5	0.333	1.8	0.12	0.3	0	0.02	1.91	3.0

$$G_{ex}(s) = K_A$$

200

Paramètres de l'algorithme PSO :

Taille de population	Nombre d'itération	Vitesse minimale	Vitesse maximale	Cr1	Cr2
100	50	-0.5*Prsmax	0.5*Prsmax	2	2

Prsmax : sans les valeurs maximales des paramètres de stabilisateur.

Prsmax de PID :

K _p	K _i	K _d
50	0	10

Prsmax de PSS :

K _p	T _w	T1	T2	T3	T4
70	10	1	1	1	1

BIBLIOGRAPHIE

- [AIT11] AIT KAID Djamila, « Commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide des régulateurs fractionnaires », thèse doctorat en sciences de l'ingénieur, Université MOULOUD MAMMARI TIZI-OUZOU, 2011.
- [AND06] **Andersson G.**, Modeling and analysis of Electric Power Systems, Lectures 227-526, EEH Power Systems Laboratory, ETH, Zurich, March 2006.
- [AND03] Anderson P.M. and Fouad A.A., Power System Control and Stability, IEEE. Press. 2003.
- [A.OU08] A. OUALI, "Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences," Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene Thèse de Magister, 2008.
- [BAS05] Basler M.J. and Schaefer, R.C., « Understanding power system stability », Proceedings of the 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 46-67, April 2005
- [BEN12] Benabdi sofiane, saoudi abd erraouf « optimisation d'un régulateur PID par les (ACO) 03-06-2012
- [BOR05] Bornard P., Pavard M. et Testud G., « Réseaux d'Interconnexion et de Transport : Réglages et Stabilité », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique, D4-092, 2005.
- [BOU09] Boutaba Samia « amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC » thème de magister 09-06-2009
- [BRO00] Brogan W.L., Lee G.K.F., Sage A.P., Kuo B.C., Phillips C.L., Harbor R.D., Jacquot R.G., McInroy J.E., Atherton D.P., Bay J.S., Baumann W.T. and Chow M-Y., Control Systems, The Electric Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton, 2000.
- [BAR08] 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.
- [CUS02] Custem T.V. Systèmes électriques de Puissance II. Cours ELEC 047, Département d'Electricité, Electronique et Informatique : Institut Montefiore, Université de Liège, 2002.
- [DJA13] (Djamel Eddine GHOURAF and Abdellatif NACERI, 3103). « Commande par PSS pour améliorer la stabilité du système électro-énergétique », Acta electrotechnica , Volume 54, Number 1, 2013.
- [EAF07] E.A Feilat, fast estimation of synchronizing and damping torque coefficient using an adaptive network, 42nd international universities power engineering conference, Brighton, 2007

BIBLIOGRAPHIE

[ESK03] Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI, Apport de l'UPFC à l'Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Électriques, Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.

[FAR06] Farmer R.G., Power System Dynamics and Stability, The Electric Power Engineering Handbook, 2nd édition, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

[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.

[JSI05] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems », Springer, 2005.

[HAS08] Hasan ALKHATIB, 2008 « Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques » Doctorat de l'université Paul-Cézanne D'aix Marseille.

[HME07] H. MERMOUL, "Évaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique par le critère d'égalité des aires élargie," Ecole Nationale Polytechnique Projet de fin d'étude, 2007.

[IEE05] IEEE, IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. USA, Std.421.5, 2005.

[IEE03] IEEE Task Force on Power System Stabilizers, « Overview of Power System Stability Concepts », IEEE Trans. On Power Systems, pp. 1762-1768, 2003.

[KBE01] K. BELACHEHEB, "Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport," Université de HENRI POINCARÉ Thèse de Doctorat de Université de HENRI POINCARÉ, 2001.

[KET14] 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

[KUN89] Kundur P., Klein M., Rogers G.J. and Zywno M.S., « Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability », IEEE Transaction on Power System, vol. 4, n° 2, pp. 614-626. May, 1989.

[LAR81] 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.

[MAX11] Maxime BOMBRUN Abdoulaye SENE « L'optimisation par essaim particulière pour des problèmes d'ordonnement » ISIMA, 24/03/2011

BIBLIOGRAPHIE

[MPO87] M.Poloujadoff, « The Theory of Three Phase Introduction Squirrel Cage Motors », Review of Electrical Machines and Power Systems, Vol. 13, pp. 245-264, 1987.

[OAI06] O.Aidan, « handbook of PI and PID controller tuning rules 1 », published by Imperial College Press, 2006.

[PAL05] Pal B. and Chaudhuri B., Robust Control in Power Systems, Springer Science + Business Media, Inc, 2005.

[PRA94] Prabha Kundur scholarly article « power system stability and control» mcgraw hill university of Toronto 1994

[RAB07] Rabah BENABID « Optimisation Multiobjectif 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

[SAU98] Sauer P. and Pai M., Power System Dynamics and Stability, Upper. Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998.

[TID16] Tidjani ebd eljaouad, al amoudi baderddine « identification paramétrique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil par la technique (PSO) » 02-06-2016

[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

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

[YBE14] Y.BEKAKRA, «Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation», thèse de doctorat, Université de Biskra, 21/10/ 2014.

[YUY83] Yu Yao-Nan, Electric Power System Dynamics, Academic Press 1983.

[ZIA94] Zia A. Yamayee, Juan L. Bala, Jr., Electromechanical Energy Devices and Power Systems, Wiley & Sons Inc., Canada, 1994.

[ZWE04] Zwe-Lee Gaing , “A Particle swarm optimization approach for optimum designof PID Controller in AVR system” , IEEE Transactions on Energy Conversion ,Vo.19, No.2, 2004.