

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DJILALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES



Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique



Thèse présentée par :

Melle DEHIBA Imene

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} Cycle : Commande électrique

Intitulé de la thèse :

**Synthèse hybride On/Off - line des PSS robustes pour
l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques**

Présentée devant le jury composé de :

Mr. BENDAOU Abdelber	Professeur (UDL. Sidi Bel-Abbès)	Président
Mr. ABID Mohamed	Professeur (UDL. Sidi Bel-Abbès)	Directeur de thèse
Mr. BENABDALLAH Mohamed B.	Professeur (U STO.Oran)	Examineur
Mr. TAHOUR Ahmed	Professeur (ESSA de Tlemcen)	Examineur
Mr. BENTAALLAH Abderrahim	Professeur (UDL. Sidi Bel-Abbès)	Examineur

Soutenue le : 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je tiens à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **ABID Mohamed** Professeur à l'Université Djillali Liabes de SBA pour m'avoir encadré, Sa grande disponibilité, ses nombreux et excellents conseils qui m'a prodigué, ses critiques et ses encouragements m'ont en effet permis de faire progresser mes travaux dans le sens d'une plus grande clarté et rigueur scientifique.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon père **DEHIBA Boubeker** Professeur à l'Université Djillali Liabes de SBA , pour sa patience, ses conseils précieux , sa pédagogie, son soutien inestimable et sa générosité exceptionnelle. Je vous remercie de tout mon cœur.

Je tiens à remercier Monsieur **BENDAOU Abdelber**, Professeur à l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Mes sincères remerciements sont également adressés aux membres du jury, en l'occurrence :

Monsieur **BENABDALLAH Mohamed Badr Eddine**, Professeur à Université Sciences et technologie, ORAN

Monsieur **TAHOUR Ahmed** Professeur à l'Ecole supérieure des sciences appliquées, Tlemcen.

Monsieur **BENTAALLAH Abderahim** Professeur à l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes.

Qui ont accepté d'examiner ma thèse.

Mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réussite de ce travail

Finalement, je ne voudrais pas terminer sans témoigner ma reconnaissance à ma mère, et mes frères pour leur disponibilité, aide et soutien inconditionnel dans les moments difficiles.

Dédicaces

Je dédie mon travail

*A mes chers Parents qui m'ont soutenu
pendant toute la durée de ces longues études,*

« Que Dieux me les protègent »

A mes frères

A tous ceux que j'aime

Liste des Figures

Chapitre 1 :

Figure. 1.1	Evénements consécutifs dans les oscillations électromécaniques.	6
Figure. 1.2	<i>Les oscillations électromécaniques du système de puissance.</i>	7
Figure. 1.3	Contrôleur PSS avec système d'excitation d'un générateur synchrone.	11

Chapitre 2 :

Figure. 2.1	Structuration d'un réseau électrique.	16
Figure. 2.2	Caractéristiques des phénomènes dynamiques rencontrés dans les systèmes de puissance.	17
Figure. 2.3	Représentation de la machine synchrone Représentation bipolaire de la machine synchrone.	19
Figure. 2.4	Diagramme vectorielle de la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système multimachine.	20
Figure. 2.5	Couple mécanique et électrique agissant sur l'arbre d'un générateur.	22
Figure. 2.6	Modèle simplifié de l'excitation.	23
Figure. 2.7	Modèle en π du transformateur.	24
Figure. 2.8	Modèle en π d'une ligne de transmission.	25
Figure. 2.9	Représentation d'une charge par son admittance équivalente.	26
Figure. 2.10	Circuit dynamique de machine synchrone connecté au réseau interconnecté.	28
Figure. 2.11	Réponses du système pour $\Delta\omega$, δ et T_e .	40
Figure. 2.12	Réponse du système multimachine avec grand défaut.	41

Chapitre 3 :

Figure. 3.1	Illustration de la définition de la stabilité.	44
Figure. 3.2	Illustration de la définition de la stabilité asymptotique.	45
Figure. 3.3	Illustration de la définition de la stabilité exponentielle.	46
Figure. 3.4	Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.	48
Figure. 3.5	Deux composantes de couple positives avec oscillations amorties "état stable".	50
Figure. 3.6	Composantes de couple de synchronisation positif et de couple d'amortissement négatif avec oscillations non amorties "état instable".	50
Figure. 3.7	Réponses angulaires du rotor aux perturbations importantes.	53
Figure. 3.8	Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.	54
Figure. 3.9	Relation puissance- angle de rotor.	55
Figure. 3.10	Variation d'angle de rotor.	55
Figure. 3.11	Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de transmission.	57
Figure. 3.12	Schéma fonctionnel du PSS.	60

Figure. 3.13	Région de conception souhaitée des valeurs propres du mode d'oscillation électromécanique.	63
Figure. 3.14	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.8$, $Q=0.6$.	65
Figure. 3.15	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.4$, $Q=0.2$.	66
Figure. 3.16	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e $P=0.7$, $Q=-0.2$.	67
Figure. 3.17	Réponse du système multimachine avec grand défaut.	68

Chapitre 4 :

Figure. 4.1	Schématisation et analogie des termes d'un algorithme génétique.	71
Figure. 4.2	Exemples d'opérations de croisement.	75
Figure. 4.3	Exemple d'une opération de mutation.	76
Figure. 4.4	<i>Algorithme d'optimisation par essaim de particule (AG).</i>	77
Figure. 4.5	Déplacement d'une particule.	80
Figure. 4.6	Algorithme d'optimisation par essaim de particule (PSO).	82
Figure. 4.7	Organigramme de l'optimisation par colonies d'abeilles artificielles.	87
Figure. 4.8	Structure de PSS type PID.	88
Figure. 4.9	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.8$, $Q=0.6$.	90
Figure. 4.10	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.4$, $Q=0.2$.	91
Figure. 4.11	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.7$, $Q=-0.2$.	92

Chapitre 5 :

Figure. 5.1	Caractéristiques d'un sous ensemble flou A.	95
Figure. 5.2	Formes usuelles des fonctions d'appartenance.	96
Figure. 5.3	Variable linguistique.	98
Figure. 5.4	Structure de base d'un régulateur flou.	99
Figure. 5.5	Système de contrôle PID avec un programmeur de gain flou.	102
Figure. 5.6	Fonctions d'appartenance utilisées.	103
Figure. 5.7	Paramètres PID de gain on line flou pour le contrôle du système.	104
Figure. 5.8	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.8$, $Q=0.6$.	105
Figure. 5.9	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.4$, $Q=0.2$.	106
Figure. 5.10	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.7$, $Q=-0.2$.	107

Chapitre 6 :

Figure. 6.1	différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.	111
Figure. 6.2	Linéarisation exacte de l'écart.	112
Figure. 6.3	Commande équivalente u_{eq} .	115
Figure. 6.4	Définition de la fonction signe.	116
Figure. 6.5	Phénomène de Chattering.	117
Figure. 6.6	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.8$, $Q=0.6$.	123
Figure. 6.7	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.4$, $Q=0.2$.	124
Figure. 6.8	Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.7$, $Q=-0.2$.	125

Symboles et Abréviations

Symboles

δ	Angle du générateur (rads)
ω	Vitesse angulaire du rotor (pu)
ω_s	Vitesse de synchronisme (pu)
P_m	Puissance mécanique (pu)
P_e	Puissance électrique (pu)
T_m	Couple mécanique (pu)
T_e	Couple électromagnétique (pu)
I_d	Courant du générateur axe direct (pu)
I_q	Courant du générateur axe quadratique (pu)
x_d	Réactance du générateur axe direct (pu)
x_q	Réactance du générateur axe quadratique (pu)
x'_d	Réactance transitoire sur l'axe direct (pu)
E_{fd}	<i>Tension d'excitation</i> (pu)
E'_q	Force électromoteur transitoire axe quadratique (pu)
T'_{d0}	Constante de temps transitoire de l'axe direct (s)
V	Tension terminale du générateur (pu)
V_{ref}	Tension de référence d'excitation (pu)
D	Coefficient d'amortissement (pu)
H	Constante d'inertie (s)
K_a	Gain de tension d'excitation
T_a	Constantes de temps de la tension d'excitation.

Les autres symboles utilisés sont définis dans le texte.

Abréviations

<i>SMIB</i>	Machine reliée à un jeu de barre infini (Single Machine Infinite Bus).
<i>AVR</i>	Régulateur de tension d'une machine synchrone (Automatic Voltage Regulator).
<i>PSS</i>	Stabilisateur d'un système de puissance (Power System Stabilizer).
<i>FACTS</i>	Système de transmission de courant alternatif flexible. (Flexible Alternating Current Transmission System).
<i>C-PSS</i>	Stabilisateur conventionnel d'un système de puissance (Conventionnel power system stabilizer).
<i>LF</i>	Logique floue.
<i>MG</i>	Mode glissant.
<i>PID</i>	proportionnel, intégral, dérivé.
<i>AG</i>	Algorithmes génétiques.
<i>PSO</i>	Optimisation par essaim de particules (Particle swarm optimisation).
<i>ABC</i>	Colonie d'abeilles artificielles (Artificial Bee Colony).

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

1.1	Introduction	5
1.2	Stabilité et oscillation du système électrique	5
1.2.1	Oscillations du système électrique	6
1.2.2	Dynamique du rotor	8
1.3	Analyse de stabilité	10
1.3.1	Stabilisateur de système électrique (PSS)	11
1.4	Les techniques utilisées pour la conception des régulateurs PSS.....	11
1.5	Conclusion.....	15

CHAPITRE 2 : MODELISATION DU SYSTEME DE PUISSANCE

2.1	Introduction.	16
2.2	Phénomènes dynamiques dans les systèmes de puissance.....	17
2.2.1	Phénomènes de propagation.	18
2.2.2	Phénomènes électromagnétiques.....	18
2.2.3	Phénomènes électromécanique.....	18
2.2.4	Phénomènes thermodynamiques.	18
2.3	Modélisation du système de puissance	19
2.3.1	Modèle du générateur.....	19
2.3.2	Régulation de la tension	23
2.3.3	Réseau de transport.	24
2.3.4	Mise en équations du réseau de transport.	26
2.4	Analyse de stabilité de petit signal	27
2.4.1	Equations différentielles.....	27
2.4.2	Equations algébriques du stator.....	27
2.4.3	Equations algébriques du réseau	27
2.4.4	Linéarisation du modèle aux petits signaux.....	28
2.4.5	Conditions initiales	30
2.4.6	Linéarisation des systèmes de puissance multi-machines.....	30

2.5	Solution d'équations différentielles du premier ordre homogènes / particuliers à coefficients constants.....	34
2.5.1	Méthode d'analyse modale.....	34
2.5.2	Analyse des cas particuliers.....	36
2.5.3	Facteur de participation.....	37
2.6	Analyse de la stabilité des petits signaux dans les systèmes de puissance linéarisés	37
2.6.1	Conditions de stabilité	38
2.7	Résultats de simulations et interprétation	39
2.8	Conclusion.....	42

CHAPITRE 3 : STABILITE DU SYSTEME DE PUISSANCE

3.1	Introduction	43
3.2	Stabilité au sens de Lyapunov	43
3.2.1	Notions de base.....	43
3.2.2	Première méthode de Lyapunov (méthode indirecte)	46
3.2.3	Seconde méthode de Lyapunov (méthode directe)	47
3.3	Classification de la stabilité des systèmes électriques	47
3.3.1	Stabilité de l'angle du rotor.....	48
3.3.2	Stabilité de la tension	58
3.3.3	Stabilité de la fréquence	59
3.4	SYSTÈME STABILISATEUR DE PUISSANCE PSS.....	60
3.4.1	Structure du PSS	60
3.4.2	Linéarisation du PSS.....	60
	Les matrices A_{11} , A_{12} , A_{21} et A_{22} , voir réf [EKI15].....	62
3.4.3	Détermination du site le plus approprié pour le PSS.....	62
3.5	Résultats de simulations et interprétation	63
3.6	CONCLUSION	69

CHAPITRE 4 : CONCEPTION OPTIMISEE DES PSS PAR LES METHODES METAHEURISTIQUES

4.1	Introduction	70
4.2	Algorithme génétique.....	71
4.2.1	Éléments d'un algorithme génétique	71
4.2.2	Caractéristiques des algorithmes génétiques	72
4.2.3	Génération de population.....	73

4.3	Optimisation par essais de particules	78
4.3.1	Termes techniques	78
4.3.2	Principe de l'Algorithme PSO	78
4.3.3	Formalisation	80
4.4	Algorithme de colonies d'abeilles artificielles	82
4.4.1	Modèle comportemental de recherche de nourriture des essaims d'abeilles.....	83
4.4.2	Algorithme de colonie d'abeilles artificielles.....	84
4.5	Conception optimisée des PSS par les trois méthodes métaheuristiques	88
4.6	Résultats de simulations et interprétation	89
4.7	Conclusion.....	93

CHAPITRE 5 : COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE DU SYSTEME DE PUISSANCE SMIB

5.1	Introduction	94
5.2	Notion de base de la logique floue	94
5.2.1	Ensemble ordinaire et ensemble floue.....	94
5.2.2	Fonction d'appartenance.....	95
5.2.3	Opération sur les ensembles flous	97
5.2.4	Variable linguistique.....	97
5.3	Commande par logique floue	98
5.3.1	Fuzzification	99
5.3.2	Base de connaissance	99
5.3.3	Inférence floue	100
5.3.4	Défuzzification.....	101
5.4	Application de la logique floue à la commande d'un système de puissance SMIB	102
5.5	Résultats de simulations et interprétation	104
5.6	Conclusion.....	108

CHAPITRE 6 : COMMANDE PAR MODE GLISSANT DU SYSTEME DE PUISSANCE SMIB

6.1	Introduction	109
6.2	Définition de la commande à structure variable	109
6.3	Principe de la commande par mode glissant	110
6.4	Mode de trajectoire d'une variable d'état	110
6.5	Conception de la commande par mode glissant	111

6.6	Choix de la surface de glissement	111
6.6.1	Conditions de convergence et d'existence.....	112
6.6.2	Détermination de la loi de commande	113
6.7	Broutement (chattering)	116
6.8	Conception d'un contrôleur PSS par mode glissant	117
6.9	Résultats de simulations et interprétation	121
6.10	Conclusion.....	126
	 CONCLUSION GENERALE.....	 127
	 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	 130
	 ANNEXES.....	 137

Introduction Générale

L'énergie électrique est l'un des produits consommables qui possède une particularité unique par rapport aux autres produits, c'est qu'il doit être consommé au fur et à mesure de sa production. Les producteurs de cette énergie doivent donc satisfaire la demande des consommateurs, avec une qualité satisfaisante et de maintenir toujours l'équilibre en permanence entre l'offre (la production) et la demande (la consommation) tout en assurant la sécurité de l'alimentation et l'économie de l'exploitation. Les majeures préoccupations sollicitées par le bon fonctionnement d'un réseau électrique, c'est la conduite caractérisant le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation. Un bon réglage garantit la tenue de la tension et la fréquence du réseau dans les limites tolérées, par contre la protection favorise le bon fonctionnement de la totalité des appareils électriques, constituant l'ensemble du système, et finalement la stabilité assure la conservation du couplage dynamique entre la production et la consommation en cas de perturbations mineures ou majeures.

Une perturbation dans un point donné du réseau électrique, est suivie par une variation de tension. Les générateurs réagissent séparément suivant leurs puissances et leurs proximités de ce point. Pour maintenir la tension stable, les producteurs ont eu recours à des régulateurs électroniques de tension très rapides placés au niveau des circuits d'excitation de ces générateurs. Cette variation rapide agit directement sur le couple résistant de l'alternateur, demandant un couple moteur des turbines. L'interaction, entre un système électrique caractérisé par une dynamique très rapide et un système mécanique d'une dynamique lente, provoque un décalage angulaire au niveau des rotors des machines concernées. Le rotor essaie toujours de revenir à un point stable, ce qui génère des oscillations dites électromécaniques. Et si le système n'est pas bien amorti, ces oscillations vont augmenter jusqu'au décrochage de la machine. En outre, si le système de puissance n'arrive pas à compenser cette puissance, ce phénomène va persister et se retransmettre à d'autres machines, ce qui peut arriver jusqu'à un blackout s'il n'est pas traité précocement.

Par ailleurs, les réseaux électriques sont fréquemment soumis à des perturbations pouvant causer un dysfonctionnement partiel ou total. Ces perturbations sont de nature, très

diversifiées : pannes de ligne, variations brusques de la charge, défauts de court-circuit, foudre etc... Elles peuvent entraîner, selon leur gravité, la perte de synchronisme du réseau, des dommages sur les différents équipements de protection et de transport... Ces situations néfastes augmentent le risque de pannes en cascade, ce qui peut affecter la fiabilité et la sécurité du réseau.

Par conséquent, les fournisseurs d'électricité sont exposés à faire face à des coûts financiers énormes ; lesquels coûts vont avoir une répercussion directe sur les services publics et la société, il s'ensuit que la gestion des réseaux électriques devient de plus en plus complexe et que la prédiction de la stabilité en temps réel est un enjeu primordial.

Dans ces conditions, la stabilité des systèmes de puissance devient une des préoccupations majeures pour les fournisseurs d'électricité. Ces systèmes doivent rester stables pour toutes les petites variations au voisinage des points de fonctionnement ainsi que pour des conditions sévères. Les nouvelles méthodes et les nouvelles technologies permettant d'améliorer la stabilité des systèmes font par conséquent l'objet de travaux de recherche extrêmement importants. Suite à une perturbation transitoire, si le système est stable, il atteindra un nouvel état d'équilibre. Si le système est instable, cela se traduira, par exemple, par une augmentation progressive de l'écart entre les angles de rotor des générateurs ou par une diminution progressive des tensions des nœuds du réseau. Un état instable du système pourra conduire à des pannes en cascade et une déconnexion d'une grande partie du réseau électrique.

Les oscillations des systèmes de puissance ont été prédites dès la première installation d'un système de puissance. Un système ayant plusieurs générateurs interconnectés via un réseau de transport se comporte comme un ensemble de masses interconnectées via un réseau de ressorts et présente des modes d'oscillation multiples. L'amortissement des oscillations a toujours été considéré comme un élément important du bon fonctionnement des systèmes de puissance.

Plusieurs points considérés comme évidents restent toujours valables :

- les oscillations à faible fréquence (entre 0.2 et 2 Hz) se produisent dans les systèmes de puissance à cause de l'insuffisance des couples d'amortissement agissant sur les rotors des générateurs.
- les oscillations apparaissent principalement dans le système sous deux formes :
 - les oscillations des modes locaux, associées principalement à un générateur et ses contrôleurs.

- les oscillations des modes interrégionaux, associées à un groupe de générateurs et aux propriétés du système (configuration de son réseau de transport, écoulement de puissance, ...).

les oscillations des rotors des générateurs entraînent des fluctuations sur des variables électriques (tensions, puissances actives et réactives, fréquence,...), d'où l'origine de leur nom: oscillations électromécaniques.

Pour surmonter le problème des oscillations électromécanique et améliorer l'amortissement du système, des signaux supplémentaires stabilisateurs sont introduits dans le système d'excitation via son régulateur de tension (AVR). Ces signaux stabilisateurs vont produire des couples en phase avec la variation de vitesse de générateur pour compenser le retard de phase introduit par le système d'excitation. Les stabilisateurs de puissance (Power System Stabilizers, PSS), grâce à leurs avantages en terme de coût économique et d'efficacité, sont les moyens habituels, non seulement pour éliminer les effets négatifs des régulateurs de tension, mais aussi pour amortir les oscillations électromécaniques et assurer la stabilité globale du système . La conception du PSS est principalement basée sur un modèle de système électrique linéarisé obtenu à un point de fonctionnement spécifique. Cependant, dans la pratique, le point de fonctionnement d'un système électrique peut changer en raison de plusieurs facteurs, tels que les courts-circuits et les changements dans la topologie du réseau, produisant ainsi des problèmes de stabilité qui peuvent ne pas être résolus de manière satisfaisante par les contrôleurs PSS. Pour résoudre ces problèmes, l'attention des chercheurs s'est concentrée sur la conception de contrôleurs basés sur des techniques d'intelligence artificielle.

Dans notre travail, nous avons proposés des méthodes de conception des stabilisateurs robustes qui sont basées sur la théorie des modes glissants, logique flou et les techniques d'optimisation metaheuristiques, appliquée à un système électrique à machine synchrone connecté à un jeu de barre infini (SMIB). Afin d'assurer un amortissement maximum des oscillations rotoriques à faible fréquence et de garantir la stabilité globale du système.

La rédaction de cette thèse est structurée en six chapitres

Le premier chapitre de ce travail concerne l'état de l'art pour la stabilité du système de puissance.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation générale d'un système de puissance adapté à l'étude de la stabilité, deux modèles sont présentés, un modèle non linéaire et un modèle linéaire.

Le troisième chapitre, nous avons fait un rappel de la stabilité au sens de Lyapunov. Nous avons également rappelé les caractéristiques des différents types de stabilité d'un système de puissance. La structure des stabilisateurs du système électrique (PSS), leur linéarisation mathématique et la localisation optimale des PSS sont discutées.

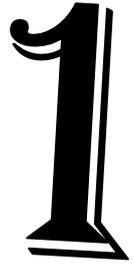
Le quatrième chapitre est réservé à l'optimisation des paramètres des PSS en utilisant trois techniques d'optimisation metaheuristiques (l'algorithme génétique, les essaims de particules, Colonie d'abeilles artificielles) pour la génération des paramètres optimisés.

Le cinquième chapitre est affecté à l'application d'un contrôleur non linéaire à un système de puissance SMIB lorsque le système est soumis à des perturbations. Nous appliquerons le contrôleur PID à l'aide d'une planification de gain flou qui est adaptée on line en fonction de l'estimation des paramètres.

Le sixième chapitre est consacré à une méthode de conception d'un stabilisateur robuste basée sur la théorie des modes glissants est proposée et appliquée à un système de puissance SMIB. Ce type de contrôle présente de nombreux avantages tels qu'une bonne robustesse, une grande précision, une bonne stabilité et un temps de réponse rapide.

Nous terminerons cette thèse par une discussion sur l'ensemble des résultats obtenus et nous donnerons quelques perspectives de recherche qui nous semblent intéressantes pour prolonger ce travail.

Chapitre 1 : Etat de l'art



1.1 Introduction

La stabilité du système de puissance est reconnue comme un problème important pour une exploitation sécurisée du système depuis les années 1920. De nombreuses pannes d'électricité majeures causées par l'instabilité du système électrique ont illustré l'importance de ce phénomène. Historiquement, l'instabilité transitoire a été le principal problème de stabilité sur la plupart des systèmes et a retenu l'attention de l'industrie pour la stabilité de ses systèmes. Les systèmes électriques ont évolué au fil de la croissance continue des interconnexions, de l'utilisation de nouvelles technologies et de nouvelles commandes et de l'exploitation accrue dans des conditions de stress extrême, différentes formes d'instabilité du système sont apparues. Par exemple, la stabilité de la tension, la stabilité de la fréquence et les oscillations entre zones sont devenues des préoccupations plus importantes que par le passé.

1.2 Stabilité et oscillation du système électrique

La stabilité d'un système électrique interconnecté est la principale préoccupation pour maintenir son fonctionnement sécurisé. L'interconnexion du système de puissance repose sur une exigence fondamentale : la synchronisation de tous les générateurs connectés. En outre, la demande persistante d'électricité à l'aide de l'infrastructure existante garantit que le système de puissance fonctionne à sa capacité maximale. Ces problèmes ont incité les ingénieurs et les chercheurs spécialisés en énergie à faire face aux oscillations et aux problèmes de stabilité des systèmes de puissance [SAR18] [TAN18]. La stabilité du système de puissance peut être classée en trois catégories principales : stabilité de l'angle du rotor, stabilité de la tension et la stabilité de la fréquence [KUN04]. Cette étude concerne principalement les problèmes de stabilité d'angle de rotor.

1.2.1 Oscillations du système électrique

La stabilité de l'angle du rotor est la capacité d'un générateur synchrone à rester synchronisé après avoir été soumis à une oscillation. Des problèmes de stabilité des angles de rotor peuvent survenir à la suite de petites oscillations continues (changements de charge) ou de fortes oscillations (catastrophes naturelles ou pannes système graves). L'oscillation du système électrique est le phénomène fondamental des générateurs synchrones, dans lequel la puissance de sortie générée varie lorsque les rotors oscillent à une vitesse synchrone. L'oscillation du système de puissance est une propriété héritée d'un système de puissance interconnecté, provoquée par la nature dynamique des machines synchrones. Tout incident (petite ou grande perturbation) dans le système de puissance peut déclencher des oscillations du système de puissance sous la forme d'événements consécutifs se produisant dans un générateur synchrone, comme illustré à la figure (1.1) [HAN18].

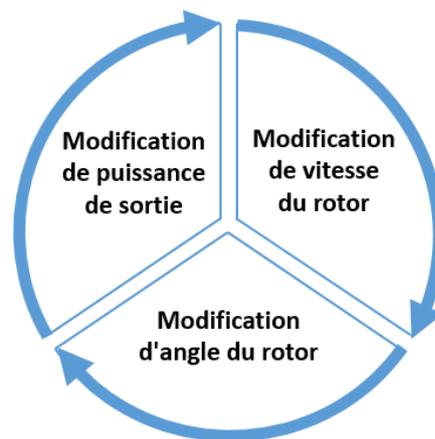


Figure. 1.1 : *Evénements consécutifs dans les oscillations électromécaniques.*

Dans des conditions non fluctuantes, l'équilibre entre les couples mécaniques et électromagnétiques d'un générateur synchrone et la vitesse du rotor reste à la vitesse synchrone. Lorsque l'équilibre est perturbé en raison d'une perturbation quelconque, la vitesse du rotor change (accélère ou ralentit) par rapport à sa vitesse synchrone [SAA99].

La modification de la vitesse du rotor entraîne une modification de l'angle relatif du rotor, la modification de la position angulaire du rotor entraîne une modification de la puissance de sortie générée en fonction des caractéristiques de l'angle de puissance. Lorsque la puissance de sortie change, le rotor change à nouveau de vitesse par conséquent, l'angle du rotor change également. Ces événements consécutifs sont bien connus sous le nom d'oscillations dans les systèmes électriques. Ces oscillations résultent du déséquilibre entre les couples électriques et mécaniques des générateurs synchrones. Par conséquent, ces

oscillations sont également connues sous le nom d'oscillations électromécaniques. La fréquence de ces oscillations électromécaniques est généralement de 0,2–3 Hz. De manière générale, les oscillations électromécaniques sont caractérisées visuellement en traçant l'écart de la vitesse du rotor en fonction de temps, comme illustré à la figure (1.2).

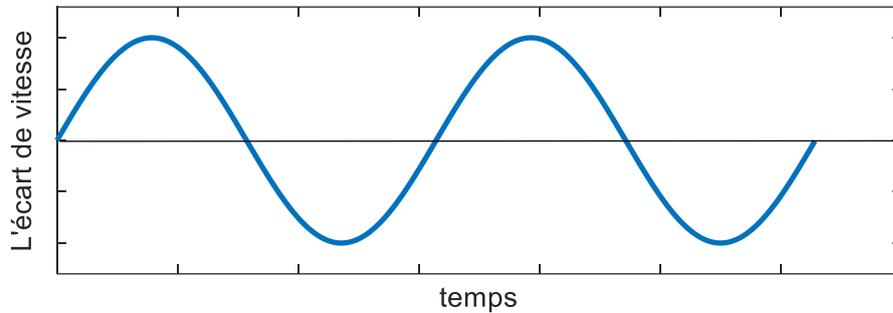


Figure. 1.2 : *les oscillations électromécaniques du système de puissance.*

Dans un scénario de système de puissance interconnecté, les générateurs d'une région sont connectés aux générateurs d'autres régions pour former un réseau national ou international de lignes électriques. Dans ce cas, les lignes de transmission sont appelées lignes de rattachement lorsque deux systèmes différents sont connectés via les lignes de transmission. La nature des oscillations du système de puissance est complexe. Compte tenu de l'analyse fondamentale, il est important de comprendre les différents modes d'oscillation se produisant dans le système. En général, les oscillations de puissance sont classées en deux types, à savoir [HAN18]:

- les modes d'oscillation de zone locale
- les modes d'oscillation inter-zone.

Les modes d'oscillation de la zone locale font osciller les générateurs proches ou les générateurs de la même région. Ainsi, les modes d'oscillation de la zone locale affectent les générateurs de la même région ou des régions voisines. Par contre, les modes d'oscillation entre zones sont les oscillations dans les générateurs cohérents de différentes régions connectées par de longues lignes de jonction. Les modes d'oscillations en zone locale sont des oscillations en petits cycles dont les hautes fréquences se situent dans la plage de 0,8 à 3,0 Hz. Les modes d'oscillation entre zones sont des oscillations à cycle long dont les basses fréquences sont comprises entre 0,2 et 0,7 Hz. Les oscillations entre zones peuvent provenir de forts transferts de puissance sur des lignes de jonction faibles. Ce type d'oscillation dans le réseau électrique limite la capacité de transfert de puissance des lignes de jonction entre

les régions contenant le groupe de générateurs cohérents. La présence de modes inter-zones est typique d'un système de puissance avec des lignes de jonction longue distance. Comparés aux modes locaux, les modes inter-zones sont dangereux car ils transmettent des oscillations qui affectent les générateurs d'autres régions. Ainsi, les oscillations entre zones sont considérées comme l'événement le plus catastrophique en termes de stabilité du système de puissance. Ces oscillations peuvent durer longtemps et il est parfois difficile de détecter sa présence, ce qui peut ensuite déstabiliser le système.

1.2.2 Dynamique du rotor

L'angle entre l'axe du champ magnétique résultant et l'axe du rotor s'appelle l'angle de puissance ou de couple. La position relative entre ces deux axes reste inchangée dans des conditions de fonctionnement normales. Cependant, un mouvement relatif est initié pendant toute perturbation et le rotor commence à accélérer ou à ralentir par rapport à rotation synchrone, dont l'expression mathématique explique que ce mouvement relatif est défini comme l'équation de mouvement. La stabilité du générateur sera restaurée si le rotor tourne à nouveau à une vitesse synchrone après que l'oscillation se produise. La position initiale du rotor sera conservée si la perturbation ne provoque aucune variation de puissance. Néanmoins, le rotor fonctionnera sous un nouvel angle de couple par rapport au champ tournant de manière synchrone si de brusques oscillations résultent d'une anomalie de la charge, de la génération ou des conditions du réseau.

Le générateur synchrone tourne à la vitesse synchrone ω_{sm} et génère le couple électromagnétique T_e et le couple mécanique d'entraînement T_m . La condition de régime permanent sans pertes peut être exprimée comme suit [KUN94] [SAA99]:

$$T_m = T_e \quad (1.1)$$

Toute perturbation provoque une instabilité, qui incite le rotor à accélérer $T_m > T_e$ ou à décélérer $T_m < T_e$ comme suit :

$$T_a = T_m - T_e \quad (1.2)$$

L'équation (1.2) peut être exprimée en termes de loi de rotation avec l'effet du moment d'inertie J en ignorant le couple d'amortissement et les pertes par frottement.

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (1.3)$$

où θ_m présente le déplacement angulaire du rotor par rapport à l'axe de référence stationnaire du stator. La référence angulaire est choisie par rapport à un cadre de référence en rotation synchrone se déplaçant avec une vitesse angulaire constante ω_{sm} , c'est-à-dire,

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (1.4)$$

où δ_m est la position du rotor avant la perturbation au temps $t = 0$, mesurée à partir du cadre de référence en rotation synchrone. Une dérivée de l'équation (1.4) donne la vitesse angulaire du rotor comme suit :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{ms} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (1.5)$$

L'accélération du rotor est exprimée comme suit :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (1.6)$$

En substituant l'équation (1.6) à l'équation (1.3), nous obtenons l'expression suivante :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (1.7)$$

En multipliant l'équation (1.7) par ω_m , on obtient l'expression suivante :

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (1.8)$$

L'équation (1.8) peut être exprimée en termes de puissance, qui est le produit de la multiplication du couple et de la vitesse, comme suit :

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1.9)$$

La quantité $J \omega_m$ est appelée constante d'inertie et est désignée par M , qui est liée à l'énergie cinétique des masses en rotation ω_k , comme suit :

$$\omega_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (1.10)$$

$$M = \frac{2\omega_k}{\omega_m} \quad (1.11)$$

M ne reste pas constant tant que le rotor ne tourne pas à la vitesse synchrone. Étant donné que ω_m ne varie pas en grand nombre avant que le système ne devienne instable, M est validé à la vitesse synchrone et est choisi pour rester inchangé, c'est-à-dire,

$$M = \frac{2\omega_k}{\omega_{sm}} \quad (1.12)$$

L'équation d'oscillation en termes de constante d'inertie est la suivante

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1.13)$$

L'équation (1.13) décrit le comportement de la dynamique du rotor, qui peut être utilisé pour expliquer l'oscillation d'amortissement du rotor dans le système électrique.

1.3 Analyse de stabilité

Étant donné que les oscillations du système électrique se produisent sans avertissement, des moyens de contrôle automatisés sont mis en œuvre pour amortir ces oscillations si elles sont détectées par des signaux d'entrée appropriés. Au cours des dernières années, de nombreuses études sur différents moyens d'amortissement ont été menées pour supprimer les oscillations dans le système électrique.

Les moyens d'amortissement peuvent être classés en trois catégories, à savoir les moyens d'amortissement basés sur les PSS, les moyens d'amortissement basés sur les FACTS et les moyens de contrôle de coordination.

Pour un aperçu rapide, le tableau 1.1 résume les objectifs fondamentaux des différents systèmes d'amortissement et leurs inconvénients [HAN18].

Tableau 1.1 : Comparaison des différents types de systèmes d'amortissement

Type de moyens d'amortissement	Amortissement général	Inconvénients
PSS	Fournir un amortissement sur les modes d'oscillations locaux	Les performances sont relativement faibles sur les modes d'oscillations inter-zones pour un système à longue ligne de transmission.
FACTS	Pour améliorer l'amortissement sur les modes d'oscillations entre zones.	L'amortissement réel ne peut pas être fourni pour tous les modes d'oscillations en zone locale.
PSS + FACTS	Pour assurer l'amortissement entre la zone locale et inter-zone modes d'oscillations.	Une conception des contrôleurs mal coordonnée peut affecter la stabilité du système en raison d'un amortissement négatif.

1.3.1 Stabilisateur de système électrique (PSS)

En 1969, De Mello et Concordia ont introduit le concept de PSS. Le PSS est l'outil d'amortissement principal et économique pour la stabilité du système électrique. La figure (1.3) montre un générateur synchrone avec PSS. Selon la théorie des machines synchrones, la puissance de sortie générée peut être contrôlée en commandant la tension d'excitation. L'installation du PSS a pour but de fournir un signal d'entrée supplémentaire au système d'excitation du générateur synchrone. Le PSS apporte un couple de synchronisation supplémentaire en phase avec la déviation de la vitesse. En conséquence, les oscillations croissantes sont amorties et la stabilité du système est restreinte. Divers chercheurs ont expliqué la stabilité du système de puissance en installant et en concevant des PSS pour des systèmes de puissance mono-machine et multimachine. Les performances d'amortissement du schéma PSS dépendent de sa conception appropriée. Habituellement, la conception appropriée du PSS est efficace non seulement pour amortir les modes d'oscillation locaux, mais également pour atténuer les modes d'oscillation inter-zones [MOH18][JAL14][MIL16][ZHA18][MAG14] [HAN18].

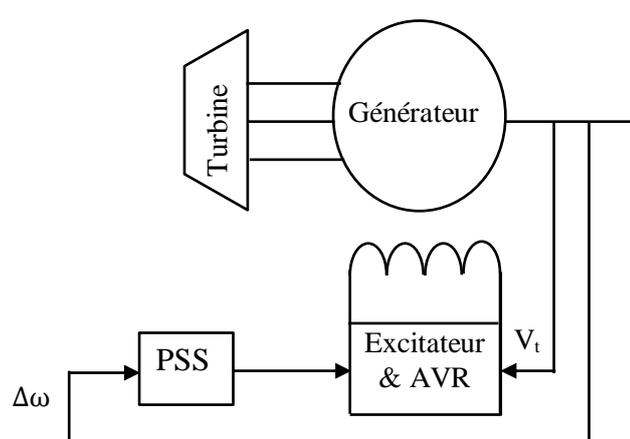


Figure. 1.3 : Contrôleur PSS avec système d'excitation d'un générateur synchrone

1.4 Les techniques utilisées pour la conception des régulateurs PSS.

Diverses techniques de contrôle ont été proposées pour la conception de PSS afin d'améliorer les performances globales du système [MUQ06] :

1.4.1. Méthode de placement des pôles

Ces raisons ont incité Othman et ses collègues dans [OTH89] à appliquer une procédure de déplacement des pôles pour concevoir des contrôleurs non commutables pour des systèmes avec des conditions de fonctionnement multiples. Un ensemble de gains a été

conçu séparément. Ensuite, une technique spéciale du lieu des racines a été utilisée pour ajuster les gains et seuls les modes dominants ont été utilisés dans la conception du contrôleur.

D'autre part, une nouvelle méthode de conception de PSS à déplacement de pôles, plus efficace, a été proposée par Yu et Li dans [YU 90].

1.4.2. Formulation du régulateur linéaire quadratique

Les auteurs de [NAM 96] ont présenté un stabilisateur de système électrique utilisant l'approche de linéarisation géométrique différentielle. Ce stabilisateur utilise les informations du bus secondaire du transformateur élévateur comme signaux d'entrée du bus interne du générateur en définissant le bus secondaire comme bus de référence au lieu d'un bus infini. Cependant, les PSS conçus à l'aide des formulations du régulateur quadratique linéaire (LQR) nécessitent des mesures complètes qui n'étaient ni pratiques ni économiques dans la plupart des cas. Ainsi, un stabilisateur de système d'alimentation basé sur un régulateur linéaire quadratique gaussien avec récupération du transfert de boucle a été présenté dans [RAD92].

1.4.3. Inégalités matricielles linéaires

Scavoni & et al [SCA01] ont appliqué aux systèmes de puissance une méthode de conception de contrôleurs robustes basée sur la solution des LMI. Boukarim et al. ont cependant proposé dans [BOU00] deux PSS d'ordre inférieur centralisés et décentralisés en utilisant les LMI. Les contrôleurs centralisés nécessitent un gain beaucoup plus faible pour obtenir la même amélioration de l'amortissement, ont moins de capacités de rejet des perturbations et nécessitent des liaisons de communication rapides pour être mis en œuvre.

1.4.4. Théorie de la rétroaction quantifiée

Shrikant et son collègue dans [RAO99] ont pensé à étendre la performance du stabilisateur conventionnel pour couvrir une large gamme de conditions de fonctionnement et de système en réajustant simplement le PSS existant. Ils ont traité l'incertitude paramétrique dans le modèle linéarisé à petits signaux de la centrale en utilisant la théorie de la rétroaction quantifiée (QFT). En outre, un stabilisateur de système d'alimentation robuste utilisant la théorie de la rétroaction quantifiée a été conçu par Sedigh et al. Dans [SED94] et [EKO00] pour surmonter le problème des variations de paramètres.

1.4.5. Analyse de sensibilité aux valeurs propres

Dans [RAM04], la coordination du stabilisateur du système électrique et du stabilisateur du dispositif FACTS a été effectuée par une fonction objective basée sur les sensibilités propres du second ordre. La fonction objective a été résolue par deux moyens : la méthode Levenberg-Marquardt et un algorithme génétique face à diverses conditions de fonctionnement. En considérant des conditions d'exploitation multiples, l'approche probabiliste a été appliquée à la conception robuste de PSS dans [TSE01]. Deux types d'indices de sensibilité probabilistes ont été développés pour la sélection du site PSS et l'ajustement des paramètres. Les auteurs de [ZHO91] ont utilisé à la fois le vecteur propre droit et le vecteur propre gauche pour définir la sensibilité de l'effet PSS.

1.4.6. Contrôle par mode glissant

Un PSS non linéaire avec une nouvelle technique de commande en mode glissant (SMC) a été proposé dans [SHA95] et [FAL95]. Cette dernière avait de bonnes performances pour la plupart des perturbations mais nécessitait souvent plus d'énergie de contrôle.

1.4.7. Contrôle H 2

L'application de l'algorithme de contrôle adaptatif optimal dans un stabilisateur de système électrique a été décrite dans [SOO02]. L'algorithme H2 traite de l'atténuation des perturbations au sens de la norme 2 pour les systèmes non linéaires. Le contrôleur ne nécessite pas de réglage répétitif des paramètres.

1.4.8. Logique floue

Les contrôleurs à logique floue sont des contrôleurs sans modèle. Ils ne nécessitent pas un modèle mathématique exact du système contrôlé. L'article [HIA99] résume le développement d'un PSS à logique floue. Dans [CHE98], un LFPSS a été conçu sans problèmes de battement et de décalage en régime permanent. Cependant, les références [LU00], [SHA02] proposent les méthodologies de conception de différents PSS adaptatifs basés sur les LF.

1.4.9. Réseaux de neurones

Deux raisons sont avancées pour l'utilisation des ANN dans la conception des stabilisateurs de systèmes d'alimentation : la facilité de traitement extrêmement rapide et la

capacité des ANN à réaliser une cartographie non linéaire complexe de l'espace d'entrée à l'espace de sortie. Les travaux sur l'application des réseaux neuronaux à la conception des PSS comprennent le réglage en ligne des paramètres conventionnels des PSS, la mise en œuvre du contrôle en mode inverse, le contrôle direct et le contrôle adaptatif indirect. La conception d'un PSS basé sur un réseau neuronal adaptatif indirect par Liu et ses collaborateurs dans [LIU03] et par Shamsollahi et Malik dans [SHA00] est la plus proche de ces travaux. Cependant, ces derniers ont considéré l'effet des lignes à retard piégées dans la structure du contrôleur. Dans [PAR96], les auteurs ont proposé un neuro-identificateur pour identifier la centrale en temps réel et un neuro-contrôleur pour amortir les oscillations du système électrique.

1.4.10. Techniques heuristiques

Les techniques d'optimisation heuristique sont des techniques d'optimisation globales qui utilisent la méthode stochastique pour découvrir la solution. Une technique heuristique est un processus ou un ensemble de règles qui apprend ou trouve une solution par essais et erreurs. La version améliorée des techniques heuristiques est connue sous le nom d'algorithmes métaheuristiques. La plupart des algorithmes heuristiques ont été développés sur la base de concepts inspirés de la nature. L'avantage de l'algorithme heuristique est qu'il n'est pas nécessaire de prévoir la solution initiale de la même manière que les techniques déterministes. Ce type d'optimisation est plus souple et efficace pour une optimisation robuste que les techniques déterministes. Les méthodes heuristiques sont robustes par rapport aux techniques d'optimisation conventionnelles et déterministes pour résoudre divers problèmes d'optimisation comprenant des problèmes complexes non linéaires et non différentiables. L'application d'algorithmes heuristiques dans la conception de contrôleurs d'amortissement robustes a été observée depuis les dernières décennies et est décrite comme suit [HAN18] : [ABD16] [SHA14] [KAU18] [MON12] [ALK13] [HAS14] [FAL16] :

- Recuit simulée,
- Algorithme génétique,
- Algorithme d'optimisation de la formation bactérienne,
- Optimisation des essaims de particules,
- Algorithme d'optimisation chaotique,
- Algorithme immunitaire,
- Algorithme de recherche par gravitation,

- L'apprentissage incrémental basé sur la population,
- algorithme évolutionnaire différentiel

Notons qu'il y a différentes techniques proposées pour l'optimisation des contrôleurs d'amortissement appelés Algorithmes hybrides. L'objectif principal de l'utilisation de ces techniques est d'obtenir un amortissement robuste des oscillations du système électrique.

1.5 Conclusion

Les oscillations électromécaniques dans le système de puissance sont un problème qui cause des problèmes de sécurité, limite la capacité de transmission d'énergie et conduit à l'effondrement et à la panne de tout le système interconnecté. Par conséquent, un contrôleur d'amortissement adéquat est de la plus haute importance pour résoudre les problèmes d'oscillation. Plusieurs contrôleurs d'amortissement, tels que les PSS, ont été développés en formulant des fonctions objectives et des techniques d'optimisation pour améliorer la stabilité dynamique du système et augmenter la flexibilité de fonctionnement du système. Cependant, le développement d'un contrôleur d'amortissement dans un système de puissance multi-machine complexe est un problème d'optimisation multimodale basé sur des contraintes, qui est difficile à résoudre en utilisant des algorithmes d'optimisation conventionnels.

Le chapitre suivant traite la modélisation du système de puissance.

Chapitre 2 : Modélisation du système de puissance

2

2.1 Introduction.

Les systèmes électriques modernes répondent aux demandes qui sont réparties sur de vastes zones contenant plusieurs composants majeurs tels que des générateurs, des transformateurs, des lignes de transmission et des lignes de distribution, etc. De nos jours, les réseaux de transmission d'énergie électrique sont capables de fournir de l'énergie électrique de n'importe quel fournisseur à n'importe quel consommateur sur une grande zone géographique en incorporant des dispositifs compensés en énergie réactive dans les lignes de transmission pour augmenter la capacité de transfert de puissance et améliorer l'intégrité du système. Ils sont conçus pour assurer un approvisionnement fiable en énergie avec la plus grande continuité possible. Avec l'augmentation de la demande, la continuité du service et la haute qualité de l'alimentation électrique sont devenues très importantes. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des équipements avec une énorme capacité de puissance et ayant des interconnexions complexes entre eux.

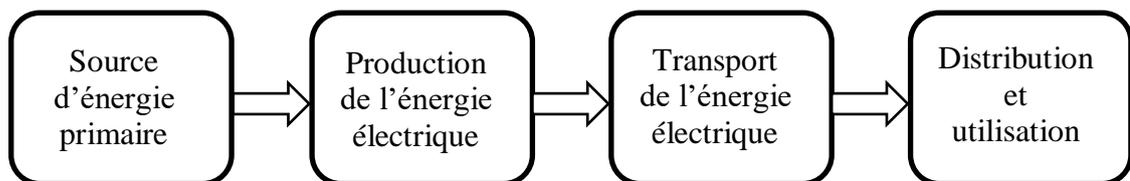


Figure. 2.1 : Structuration d'un réseau électrique.

L'étude de la performance dynamique d'un système de puissance est très importante pour les opérateurs du système (point de vue économique) et la société en général (point de vue de fiabilité). Une étape essentielle dans ce type d'étude est de comprendre physiquement et mathématiquement les phénomènes dynamiques d'intérêt. Ensuite, la modélisation et la simulation effectuées du système peuvent refléter son comportement critique.

2.2 Phénomènes dynamiques dans les systèmes de puissance.

Dans un système de puissance, une grande variété de phénomènes dynamiques différents est susceptible de se produire. Ces phénomènes dynamiques ont des caractéristiques et des origines physiques diverses et se produisent dans des gammes de temps différentes.

Un phénomène dynamique est généralement initié par une perturbation, une action d'un contrôleur, une manœuvre de protection,...

Selon le niveau de la perturbation d'origine, nous pouvons distinguer deux classes de phénomènes dynamiques :

- Les "petites" perturbations. Il s'agit de fluctuations normales, de faible amplitude, des grandeurs électriques ou mécaniques ; (par exemple, variation continue de charge). Ces phénomènes se manifestent habituellement dans le système par de faibles oscillations transitoires souvent peu amorties.
- Les "grandes" perturbations. Ce type de perturbation correspond, par exemple, à un court-circuit sur une ligne de transmission, à la perte d'un générateur,... . Elles exciteront par contre des oscillations importantes.

La figure ci-dessous montre la classification des phénomènes dynamiques [CUS02] [MAC20][ALK08].

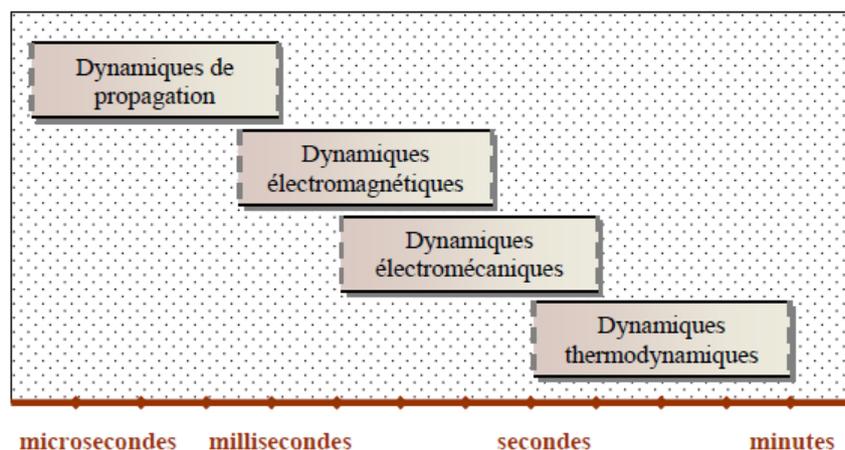


Figure. 2.2 : Caractéristiques des phénomènes dynamiques rencontrés dans les systèmes de puissance.

2.2.1 Phénomènes de propagation.

Ils se produisent dans les lignes de transmission haute tension de grande longueur et correspondent à la propagation des ondes électromagnétiques provoquées par des coups de foudre ou des opérations de coupure/fermetures. La gamme de temps de la dynamique de ces phénomènes va de la microseconde à la milliseconde. Ils possèdent les dynamiques les plus rapides.

2.2.2 Phénomènes électromagnétiques.

Ils ont lieu principalement dans les enroulements des générateurs et des moteurs (enroulements armatures et amortisseurs) et dans les dispositifs électroniques de puissance. Ils découlent d'une perturbation (tel un court-circuit), d'une opération d'un système de protection, d'une commutation (thyristors, ...), ou d'une interaction entre les machines électriques et le réseau.

Ces phénomènes génèrent des courants et des couples élevés à l'intérieur des générateurs, sur une échelle de temps typique de plusieurs millisecondes. Au-delà de ce laps de temps, les inerties de la turbine et du générateur sont suffisantes pour empêcher toute variation importante de vitesse de rotor.

2.2.3 Phénomènes électromécanique

Les phénomènes électromécaniques impliquent principalement les champs de rotors, les enroulements amortisseurs et les inerties des rotors. Ils sont principalement dus aux mouvements des masses tournantes des générateurs et des moteurs. Ils se produisent à la suite d'une perturbation, d'une opération de commande sur le système de contrôle de tension ou sur le contrôle de la turbine.

La gamme de temps de ces phénomènes s'étend environ d'une seconde à plusieurs secondes. Cette échelle de temps est considérée suffisamment grande pour que les phénomènes soient influencés par la turbine et les systèmes de commande de générateur. Dans cette gamme de temps, les variations de vitesse de rotor couplées aux variations électromagnétiques produisent alors des effets électromécaniques.

2.2.4 Phénomènes thermodynamiques.

Les phénomènes thermodynamiques se développent dans les chaudières des centrales thermiques lors de la demande de commande automatique de génération, mise en application suite à une perturbation d'équilibre entre la production et la consommation de puissance. Ils

s'étendent de quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes : ils présentent ainsi les dynamiques les plus lentes.

Pour élaborer le modèle complet d'un réseau électrique multimachines il faut d'abord connaître les modèles des éléments qui composent le réseau.

2.3 Modélisation du système de puissance

Un réseau électrique, selon la définition de *IEEE*, se compose d'un ou plusieurs générateurs, consommateurs, lignes de transmission et tous les appareils liés au réseau. Les régulateurs de tension et de vitesse sont considérés comme des parties intégrantes du réseau.

2.3.1 Modèle du générateur.

Le générateur constitue l'élément le plus important lors de l'étude des oscillations électromécaniques. Comme leur nom l'indique, les oscillations électromécaniques impliquent les deux phénomènes électrique et mécanique.

Le modèle électrique est basé sur la transformation de Park.

La figure (3.3) montre schématiquement les enroulements et les sens des courants dans un générateur synchrone, ainsi que le modèle équivalent dans le repère de Park.

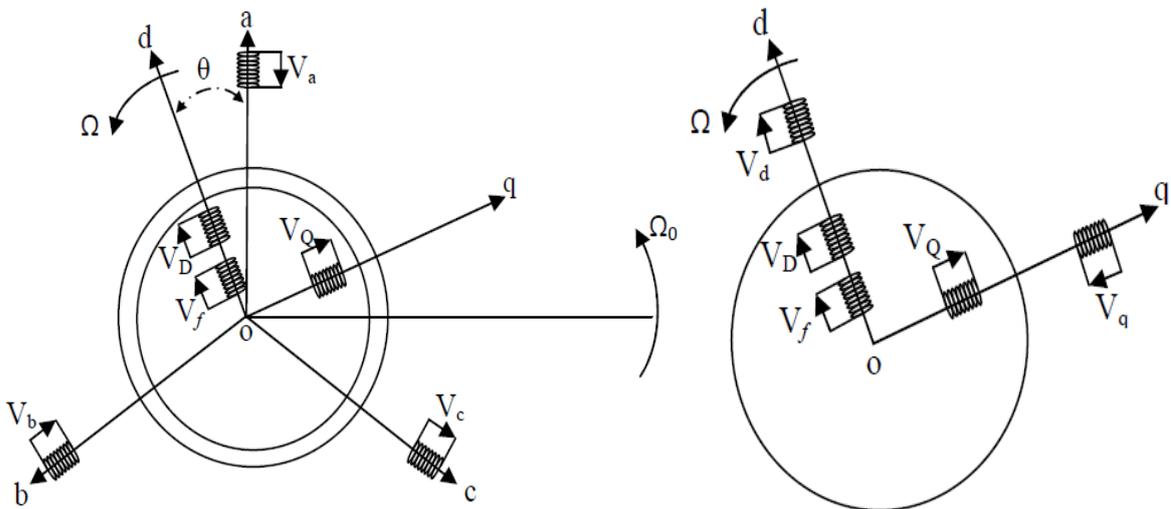


Figure. 2.3 : Représentation de la machine synchrone Représentation bipolaire de la machine synchrone.

2.3.1.1 Hypothèses simplificatrices

Il existe plusieurs modèles pour le générateur, allant du plus simple qui est le modèle mécanique au plus complexe celui du huitième ordre. L'ordre du modèle est défini selon le nombre d'équations dynamiques qui le décrivent. Dans cette étude, nous avons considéré le modèle le plus simple pour l'étude des oscillations électromécaniques. Ce modèle est établi en considérant que [ALK08] :

- Toutes les résistances sont négligées.
- Aucun enroulement amortisseur n'est considéré.
- Le courant au rotor génère un flux suivant l'axe d , par conséquent la f.é.m induite E aura une seule composante dans la direction de l'axe q .
- L'angle mécanique du rotor coïncide avec l'angle de la tension interne du générateur.

2.3.1.2 Equations électriques

On considère la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système électrique multimachines. Les grandeurs électriques de cette machine sont représentées sur la figure (2.4).

Le repère $(dq)_i$ concerne la $i^{\text{ème}}$ machine seule, alors que le repère (DQ) est commun à toutes les machines du système.

L'angle δ_i représente la position du repère (dq) de la $i^{\text{ème}}$ machine par rapport au repère commun (DQ) .

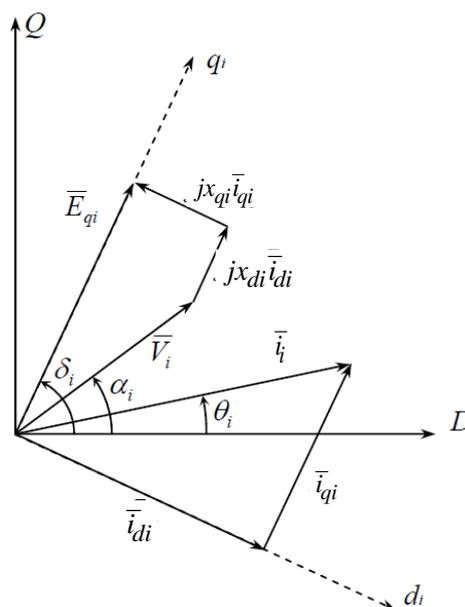


Figure. 2.4 : Diagramme vectorielle de la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système multimachine.

D'après la figure (2.4) nous avons :

$$\bar{V}_i = \bar{E}'_{qi} - jx'_{di}\bar{i}_{di} - jx_{qi}\bar{i}_{qi} \quad (2.1)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{E}'_q &= E'_q e^{j\delta} \\ \bar{i}_d &= i_d e^{j\delta} \quad , \quad \bar{i}_q = i_q e^{j(\delta+90)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\bar{V} = V e^{j\alpha}$$

En introduisant les relations (2.2) dans la relation (2.1), nous obtenons :

$$V e^{j\alpha} = E'_q e^{j\delta} - x'_d i_d e^{j\delta} - jx_{qi} i_q e^{j(\delta+90^\circ)} \quad (2.3)$$

Qui devient après arrangement :

$$V e^{-j(\delta-\alpha)} = E'_q - x'_d i_d - jx_{qi} i_q \quad (2.4)$$

$$\Rightarrow V_i \cos(\delta_i - \alpha_i) - jV_i \sin(\delta_i - \alpha_i) = E'_{qi} - jx'_{di} i_{di} - jx_{qi} i_{qi} \quad (2.5)$$

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

$$\begin{cases} V_d = x_{qi} i_{qi} \\ V_q = E'_{qi} - x'_{di} i_{di} \end{cases} \quad (2.6)$$

En considérant les relations (2.2) et la relation suivante: $\bar{i}_i = \bar{i}_{di} + \bar{i}_{qi}$, l'équation (2.1) peut être donc réécrite comme suit :

$$\bar{V}_i = E'_{qi} e^{j\delta_i} - jx'_{di} \bar{i}_i + jx'_{di} e^{j\delta_i} - jx_{qi} \bar{i}_{qi} e^{j\delta_i} \quad (2.7)$$

Pour n machines d'un système multimachine, l'équation (2.7) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[\bar{V}] = [E'_q] [e^{j\delta}] - j [x'_d] [\bar{i}] + j [x'_d - x_q] [\bar{i}_q] [e^{j\delta}] \quad (2.8)$$

Dans cette dernière équation, les termes $[\bar{V}]$, $[E'_q]$, $[\bar{i}]$ et $[\bar{i}_q]$ 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 :

$$\begin{aligned}\bar{S}_i &= P_{ei} + Q_{ei} = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \\ &= (V_{di} + jV_{qi}) \times j(i_{di} + j i_{qi}) \\ &= (V_{di} i_{di} + V_{qi} i_{qi}) \times j(V_{qi} i_{di} + V_{di} i_{qi})\end{aligned}\quad (2.9)$$

$$\begin{cases} P_{ei} = V_{di} i_{di} + V_{qi} i_{qi} \\ Q_{ei} = V_{qi} i_{di} + V_{di} i_{qi} \end{cases}\quad (2.10)$$

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

2.3.1.3 Equations mécaniques

La position du rotor par rapport à l'axe du champ magnétique est caractérisée par un angle δ_i connu sous le nom de l'angle de puissance ou l'angle de couple. Lors d'une perturbation, suivant le cas, surcharge ou décharge, le rotor décélère ou accélère et atteint une nouvelle position d'angle de puissance par rapport à la position initiale δ_0 . L'équation décrivant ce mouvement relatif est appelée équation d'oscillation [KUN94]. Les couples qui agissent sur le rotor de la machine, sont le couple électrique et le couple mécanique (voir figure (2.5))[BAS08] [WEE12].

Dans le cas des faibles oscillations autour de la vitesse de synchronisme $\omega_i \approx \omega_0$, on peut écrire :

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{2H} (P_{mi} - P_{ei} - D_i (\omega_i - 1)) \quad (2.11)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_S (\omega_i - 1) \quad (2.12)$$

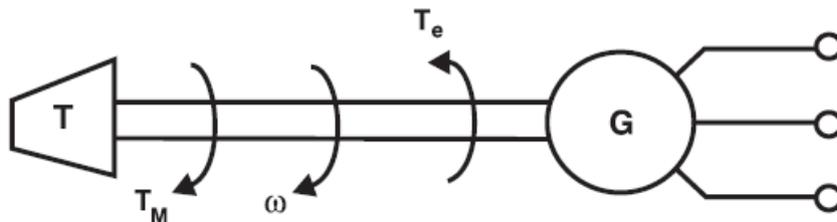


Figure.2.5 : Couple mécanique et électrique agissant sur l'arbre d'un générateur.

2.3.2 Régulation de la tension

Les machines synchrones nécessitent une alimentation en courant continu de leur inducteur. Ce courant est obtenu à partir d'un ensemble appelé système d'excitation comportant, dans la majorité des cas :

- La source de puissance proprement dite, fournissant la puissance d'excitation ; par exemple une excitatrice à courant continu.
- Le régulateur de tension (AVR: Automatic Voltage Regulator), servomécanisme ayant, dans le cas le plus simple, pour grandeur de sortie une tension commandant la puissance délivrée par la source d'excitation et, pour grandeur d'entrée, l'écart entre la tension aux bornes de la machine synchrone et une tension de consigne.

Nous considérerons, dans cette étude, un modèle très simple du régulateur de tension. Celui-ci est donné sur la figure (2.6). L'entrée U est une entrée de commande issue de certains dispositifs supplémentaires de commande comme les stabilisateurs de puissance (PSS). L'absence de ces dispositifs implique tout simplement que U est nulle.

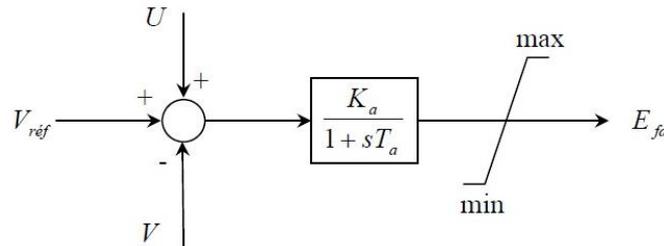


Figure.2.6 : *Modèle simplifié de l'excitation.*

Le fonctionnement de l'excitation est décrit par deux équations :

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_a} \left(K_a (V_{réf} - V + U) - E_{fd} \right) \quad (2.13)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}'} \left(E_{fd} - (X_d - X_d') I_d - E'_q \right) \quad (2.14)$$

La première équation correspond au modèle du régulateur de tension. La deuxième équation décrit la relation entre la tension d'excitation et la tension interne du générateur qui elle-même est liée à la tension terminale.

2.3.3 Réseau de transport.

2.3.3.1 Transformateurs

Les transformateurs sont nécessaires pour relier les parties des réseaux électriques qui fonctionnent à des niveaux de tension différents. En plus de modifier les niveaux de tension, les transformateurs sont également utilisés pour contrôler la tension et sont presque toujours équipés de prises sur un ou plusieurs enroulements pour permettre de modifier le rapport de transformation. Les transformateurs des réseaux électriques peuvent être classés selon leur fonction en trois catégories générales: les transformateurs élévateurs de générateur (qui relient le générateur au réseau de transmission) et les transformateurs de groupe (qui fournissent le service auxiliaire) ; les transformateurs de transmission, qui sont utilisés pour relier différentes parties du réseau de transmission, généralement à des niveaux de tension différents, ou pour relier les réseaux de transmission et de distribution ; les transformateurs de distribution, qui réduisent la tension aux centres de charge à un niveau de basse tension requis par le consommateur [MAC20].

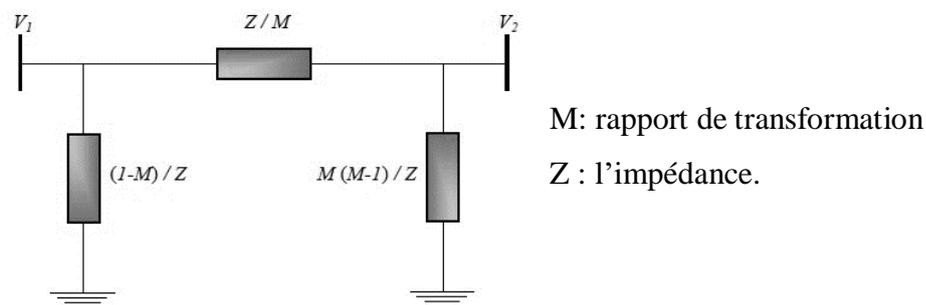


Figure. 2.7 : Modèle en π du transformateur.

2.3.3.2 Lignes de transmission

L'objectif principal des lignes de transmission est de transférer l'énergie des centrales vers le centre de charge pour la consommation [NAG14] [SAL15].

Les lignes de transmission sont caractérisées par des paramètres répartis :

- La résistance série (due à la résistivité du conducteur),
- L'inductance (due au champ magnétique entourant les conducteurs),
- La capacité (due au champ électrique entre les conducteurs)

Une ligne de transmission entre les extrémités émettrice et réceptrice peut être représentée par un circuit équivalent π , comme illustré à la figure (2.8). Il comprend une

série d'impédance équivalente Z_e et deux admittances de shunt équivalentes, $Y_e / 2$ chacune [SAL15].

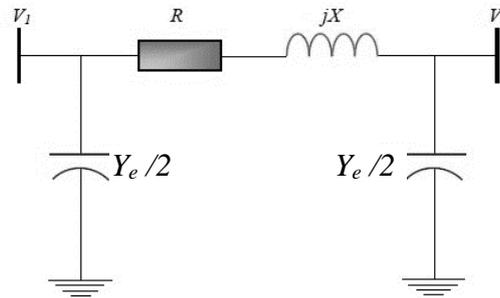


Figure. 2.8 : *Modèle en π d'une ligne de transmission.*

2.3.3.3 Modèles de charge

Pour les études de stabilité du système électrique, un équilibre entre la puissance produite et la puissance demandée par les charges doit être maintenu pour que le système fonctionne de manière stable en permanence. Par conséquent, les caractéristiques de la charge sont d'une importance cruciale pour être employées dans l'analyse du système car elles ont un effet significatif sur la performance du système et ont un impact important sur les résultats de stabilité. Pour cela, la modélisation des charges doit être déterminée de telle sorte que le modèle soit pertinent par rapport à la nature de l'étude et permette d'obtenir des résultats utiles et, dans une large mesure, précis. La modélisation précise des charges est une tâche difficile car, par exemple, le système électrique comprend un très grand nombre de composants de charge divers, situés à différents endroits, avec des caractéristiques différentes, et leur composition change de temps en temps. En outre, le manque de données concernant les charges dans l'ensemble du système et l'absence d'un outil permettant de développer des modèles à grande échelle font de la modélisation des charges une tâche formidable [SAL15].

Pour les études de stabilité angulaire, les charges sont généralement modélisées par des modèles statiques. Représentées par des admittances constantes. Après avoir effectué le calcul d'écoulement de puissance et obtention de la tension au nœud de charge, l'admittance équivalente est calculée [ALK08]:

$$\bar{Y}_L = \frac{P_L}{V_L^2} - j \frac{Q_L}{V_L^2} \quad (2.15)$$

$$\text{Avec : } G_L = \frac{P_L}{V_L^2}, \quad B_L = \frac{Q_L}{V_L^2}$$

Puis connectées au nœud de charge comme le montre la figure (2.9)

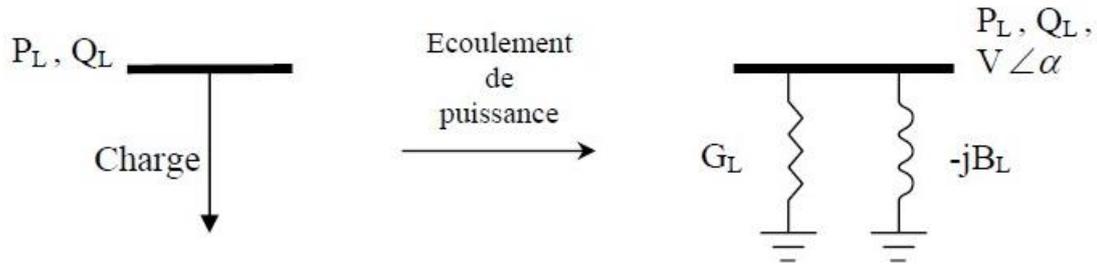


Figure.2.9 : Représentation d'une charge par son admittance équivalente.

2.3.4 Mise en équations du réseau de transport.

2.3.4.1 Matrice d'admissions de bus

L'établissement du modèle généralisé du réseau de transport et des charges implique de déterminer les équations algébriques représentant les interconnexions entre les circuits des générateurs et l'ensemble des transformateurs, des lignes de transmission et des charges du système [SAU18][EKI15].

Le réseau électrique peut être décrit sous la forme matricielle suivante [SAU98] [AND89]:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \cdots & \bar{Y}_{1n} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \cdots & \bar{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \bar{Y}_{n2} & \cdots & \bar{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\bar{I}_{bus} = \bar{Y}_{bus} \bar{V}_{bus} \quad (2.17)$$

[I] : Vecteur de courant de bus,

[V]: Vecteur de tension de bus,

[Y]: Matrice d'admittance de bus.

Les éléments diagonaux de la matrice admittance

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}} y_{ij} \quad (2.18)$$

Les éléments non diagonaux de la matrice admittance

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.19)$$

Le système ci-dessus est généralement résolu par la methode Newton-Raphson.

2.4 Analyse de stabilité de petit signal

Le comportement dynamique non-linéaire du réseau complet est représenté par un ensemble d'équations différentielles et algébriques :

2.4.1 Equations différentielles

Les équations différentielles de la machine et de l'excitation sont les suivantes [SAU18]:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_s (\omega_i - 1) = \omega_s \Delta\omega_i \quad (2.20)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{P_{mi}}{M_i} - \frac{E'_{qi}}{M_i} \frac{(x_{qi} - x'_{di})i_{di}i_{qi}}{M_i} - \frac{D_i(\omega_i - 1)}{M_i} \quad (2.21)$$

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = -\frac{E'_{qi}}{T'_{doi}} - \frac{(x_{di} - x'_{di})i_{di}}{T'_{doi}} + \frac{E_{fdi}}{T'_{doi}} \quad (2.22)$$

$$\frac{dE_{fdi}}{dt} = -\frac{E_{fdi}}{T_{ai}} - \frac{K_{ai}}{T_{ai}} (V_{ref,i} - V_i) \quad (2.23)$$

Où $i = 1, \dots, m$ pour les barres de générateur.

2.4.2 Equations algébriques du stator

$$V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + r_{si}i_{di} - x_{qi}i_{qi} = 0 \quad (2.24)$$

$$E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + r_{si}i_{qi} - x'_{di}i_{di} = 0 \quad (2.25)$$

2.4.3 Equations algébriques du réseau

Le circuit dynamique avec réseau statique et charges est illustré à la figure (2.10) Les équations du réseau à n bus sont écrites sous forme complexe et les équations du réseau pour le générateur et les barres de charge sont les suivantes :

Pour les jeux de barres des alternateurs :

$$i_{di}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + i_{qi}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + P_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (2.26)$$

$$i_{di}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + i_{qi}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + Q_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (2.27)$$

Pour les jeux de barres de charges :

$$P_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (2.28)$$

$$Q_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (2.29)$$

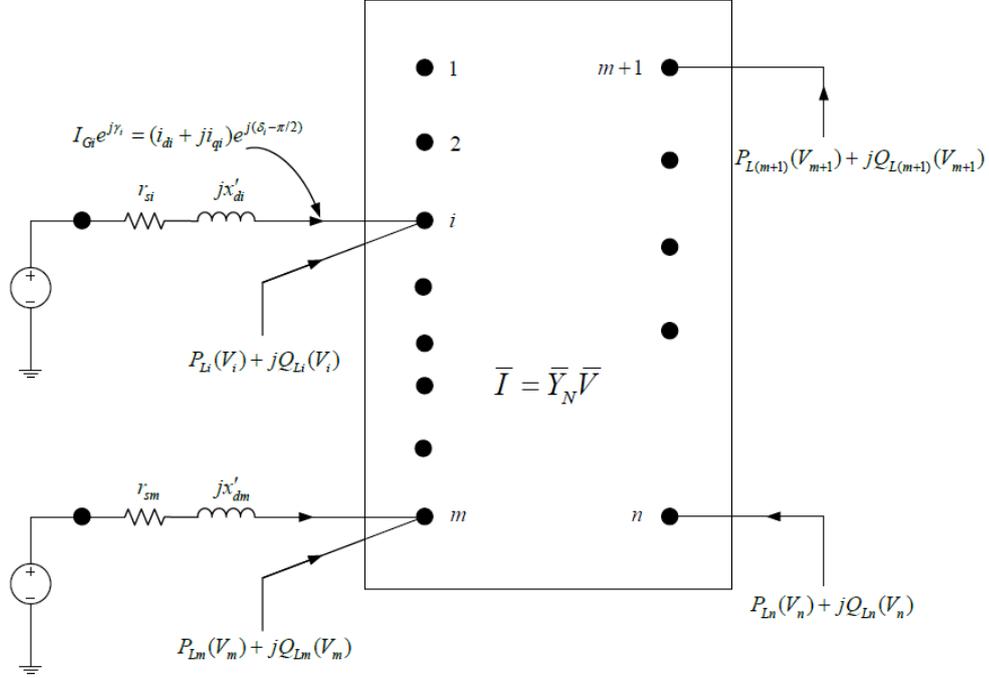


Figure.2.10 : Circuit dynamique de machine synchrone connecté au réseau interconnecté.

2.4.4 Linéarisation du modèle aux petits signaux

En général, les ensembles d'équations d'espace d'états non linéaires sont donnés comme suit ;

$$\frac{d}{dt} X(t) = \dot{X}(t) = F(X(t), u(t), t) \quad (2.30)$$

$$Y(t) = G(X(t), u(t), t) \quad (2.31)$$

les équations ci-dessus sont linéarisées aux points de fonctionnement $U(t_0)$, $X(t_0)$ et $Y(t_0)$, et les matrices du système linéarisé avec n états, m entrées et p sorties.

$$A(t) = \left[\frac{\partial F}{\partial X} \right]_0 = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2.32)$$

$$B(t) = \left[\frac{\partial F}{\partial U} \right]_0 = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \right|_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \right|_0 \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (2.33)$$

$$C(t) = \left[\frac{\partial G}{\partial X} \right]_0 = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial g_p}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial g_p}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix}_{p \times n} \quad (2.34)$$

$$D(t) = \left[\frac{\partial G}{\partial U} \right]_0 = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial g_1}{\partial u_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial g_1}{\partial u_m} \right|_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial g_p}{\partial u_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial g_p}{\partial u_m} \right|_0 \end{bmatrix}_{p \times m} \quad (2.35)$$

Les équations d'état du nouveau système linéarisé seraient :

$$\frac{d}{dt} \Delta X(t) = A(t) \Delta X + B(t) \Delta U(t) \quad (2.36)$$

$$\Delta Y(t) = C(t) \Delta X + D(t) \Delta U(t) \quad (2.37)$$

Les signaux d'entrée $\Delta U(t)$ linéarisés, les variables d'état $\Delta X(t)$ et les signaux de sortie $\Delta Y(t)$ peuvent être définis comme suit:

$$\Delta U(t) = U(t) - U(t_0) \quad (2.38)$$

$$\Delta X(t) = X(t) - X(t_0) \quad (2.39)$$

$$\Delta Y(t) = Y(t) - Y(t_0) \quad (2.40)$$

2.4.5 Conditions initiales

Pour calculer les conditions de départ dans le modèle multi-machines on doit suivre les étapes suivantes :

Étape 1 : à partir du flux de charge on aura : $I_{Gi} e^{j\gamma_i} = (P_{Gi} - jQ_{Gi}) / V_i e^{-j\theta_i}$

Étape 2 : on calcule : $\delta_i = \arctan \left(V_i e^{j\theta_i} + jX_{qi} I_{Gi} e^{j\gamma_i} \right)$

Étape 3 : À partir de l'équation (2.20) $\omega_i = \omega_s$

Étape 4 : i_{di} et i_{qi} sont calculés à partir de : $(i_{di} + j i_{qi}) = I_{Gi} e^{j(\gamma_i - \delta_i + \pi/2)}$

Étape 5 : À partir de l'équation (2.25) on aura : $E'_{qi} = V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + x'_{di} i_{di}$

Étape 6 : À partir de l'équation (2.22) on aura : $E_{fdi} = E'_{qi} + (x_{di} - x'_{di}) i_{di}$

Étape 7 : À partir de l'équation (2.23) on aura : $V_{refi} = \frac{E_{fdi}}{K_{Ai}} + V_i$

Étape 8 : À partir de l'équation (2.21) on aura : $P_{mi} = E'_{qi} i_{qi} + (x_{qi} - x'_{di}) i_{di} i_{qi}$

2.4.6 Linéarisation des systèmes de puissance multi-machines

Les équations (2.20) - (2.23) sont linéarisées analytiquement autour des points de fonctionnement, comme décrit ci-dessous.

$$\frac{d\Delta\delta_i}{dt} = \omega_s \Delta\omega_i \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = & \frac{1}{M_i} \Delta P_{mi} - \frac{i_{qi0}}{M_i} \Delta E'_{qi} - \frac{E'_{qi0}}{M_i} \Delta i_{qi} - \frac{(x_{qi} - x'_{di}) i_{di0}}{M_i} \Delta i_{qi} - \frac{(x_{qi} - x'_{di}) i_{qi0}}{M_i} \Delta i_{di} \\ & - \frac{D_i}{M_i} \Delta\omega_i \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\frac{d\Delta E'_{qi}}{dt} = -\frac{1}{T'_{doi}} \Delta E'_{qi} - \frac{(x_{di} - x'_{di})}{T'_{doi}} \Delta i_{di} + \frac{1}{T'_{doi}} E_{fdi} \quad (2.43)$$

$$\frac{d\Delta E_{fdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{ai}} \Delta E_{fdi} + \frac{K_{ai}}{T_{ai}} \Delta V_{ref,i} - \frac{K_{ai}}{T_{ai}} \Delta V_i \quad (2.45)$$

Ces équations différentielles linéarisés sont données sous forme de matrice :

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\delta_i \\ \Delta\omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 2\pi f & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_i}{M_i} & -\frac{i_{qi0}}{M_i} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{doi}} & \frac{1}{T'_{doi}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Ai}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_i \\ \Delta\omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{(x_{qi} - x'_{di})i_{qi0}}{M_i} & -\frac{E'_{qi0} + (x_{qi} - x'_{di})i_{di0}}{M_i} \\ -\frac{(x_{di} - x'_{di})}{T'_{doi}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{di} \\ \Delta i_{qi} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M_i} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{im} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.46}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{di} \\ \Delta i_{qi} \end{bmatrix} = \Delta I_{gi} \quad , \quad \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} = \Delta V_{gi} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} \Delta P_{im} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} = \Delta u_i \tag{2.47}$$

Sont des équations différentielles pour $i=1 \dots m$.

$$\Delta \dot{x}_i = A_{1i} \Delta x_i + B_{1i} \Delta I_{gi} + B_{2i} \Delta V_{gi} + E_i \Delta u_i \tag{2.48}$$

L'équation (2.48) est exprimée sous forme matricielle pour le système à m machines :

$$\Delta \dot{x} = A_1 \Delta x + B_1 \Delta I_g + B_2 \Delta V_g + E \Delta u \tag{2.49}$$

Où A_1 , B_1 , B_2 et E sont des matrices diagonales.

Les équations algébriques statoriques (2.26) et (2.27) sont linéarisées et réécrites sous formes matricielle:

$$0 = C_1 \Delta x + D_1 \Delta I_g + D_2 \Delta V_g \tag{2.50}$$

Où C_1 , D_1 et D_2 sont des matrices diagonales.

Les équations de réseau (2.26) et (2.27) pour les jeux de barres de générateurs sont linéarisées et réécrites sous formes matricielle :

$$0 = C_2 \Delta x + D_3 \Delta I_g + D_4 \Delta V_g + D_5 \Delta V_l \quad (2.51)$$

Les équations de réseau (2.28) et (2.29) pour les jeux de barres de charges sont linéarisées et réécrites sous formes matricielle :

$$0 = D_6 \Delta V_g + D_7 \Delta V_l \quad (2.52)$$

Le système peut être réécrit par la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A_1 \Delta x + B_1 \Delta I_g + B_2 \Delta V_g + E \Delta u \\ 0 = C_1 \Delta x + D_1 \Delta I_g + D_2 \Delta V_g \\ 0 = C_2 \Delta x + D_3 \Delta I_g + D_4 \Delta V_g + D_5 \Delta V_l \\ 0 = D_6 \Delta V_g + D_7 \Delta V_l \end{cases} \quad (2.53)$$

Pour un système avec m machines ; L'ordre de la matrice A_1 est de $4m * 4m$; Les ordres des matrices B_1 , B_2 et E_1 sont de $4m * 2m$; Les ordres des matrices C_1 et C_2 sont de $2m * 4m$; Les ordres des matrices D_1 , D_2 , D_3 et D_4 sont de $2m * 2m$; L'ordre de la matrice D_5 est $2m * 2(n-m)$; L'ordre de la matrice D_6 est $2(n-m) * 2m$; et l'ordre de la matrice D_7 est $2(n-m) * 2(n-m)$.

Aussi x_i , I_g , V_g , V_l et u sont des variables vectorielles ;

$$x_1 = \begin{bmatrix} \delta_i & \omega_i & E'_{qi} & E_{fdi} \end{bmatrix}^T \quad (2.54)$$

$$I_g = \begin{bmatrix} i_{d1} & i_{q1} & \cdots & \cdots & i_{dm} & i_{qm} \end{bmatrix}^T \quad (2.55)$$

$$V_g = \begin{bmatrix} \theta_1 & V_1 & \cdots & \cdots & \theta_m & V_m \end{bmatrix}^T \quad (2.56)$$

$$V_l = \begin{bmatrix} \theta_{m+1} & V_{m+1} & \cdots & \cdots & \theta_n & V_n \end{bmatrix}^T \quad (2.57)$$

$$u = \begin{bmatrix} P_{m1} & V_{ref1} & \cdots & \cdots & \theta_{mi} & V_{ref,i} \end{bmatrix}^T \quad (2.58)$$

Un modèle d'équation algébrique différentielle linéarisé dans les systèmes de puissance multi-machines. Ce modèle peut être facilement ajouté à la dynamique du stabilisateur du système de puissance (PSS). Comme ΔI_g ne nous concerne pas dans le modèle ci-dessus, elle peut être éliminée des équations (2.49) et (2.51).

A partir de l'équation (2.50) :

$$\Delta I_g = -D_1^{-1} C_1 \Delta X - D_1^{-1} D_2 \Delta V_g \quad (2.59)$$

Nous substituons l'expression de l'équation (2.59) à l'équation (2.51);

$$0 = C_2 \Delta X + D_3 \left(-D_1^{-1} C_1 \Delta X - D_1^{-1} D_2 \Delta V_g \right) + D_4 \Delta V_g + D_5 \Delta V_1 \quad (2.60)$$

L'équation (2.60) est réorganisée ;

$$0 = \left(C_2 - D_3 D_1^{-1} C_1 \right) \Delta X + \left(D_4 - D_3 D_1^{-1} D_2 \right) \Delta V_g + D_5 \Delta V_1 \quad (2.61)$$

Si $K_1 = \left(D_4 - D_3 D_1^{-1} D_2 \right)$ et $K_2 = \left(C_2 - D_3 D_1^{-1} C_1 \right)$; l'équation (2.61) peut maintenant être exprimée comme suit.

$$0 = K_2 \Delta X + K_1 \Delta V_g + D_5 \Delta V_1 \quad (2.62)$$

L'expression dans l'équation (2.59) est remplacée pour éliminer le ΔI_g dans l'équation (2.49), le nouveau modèle algébrique différentiel peut être donné comme suit ;

$$\Delta \dot{X} = \left(A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1 \right) \Delta X + \left(B_2 - B_1 D_1^{-1} D_2 \right) \Delta V_g + E_1 \Delta u \quad (2.63)$$

$$0 = K_2 \Delta X + K_1 \Delta V_g + D_5 \Delta V_1 \quad (2.64)$$

$$0 = D_6 \Delta V_g + D_7 \Delta V_1 \quad (2.65)$$

$$\Delta V_1 = D_7^{-1} D_6 \Delta V_g \quad (2.66)$$

Nous substituons l'équation (2.66) dans l'équation (2.64), on aura

$$0 = K_2 \Delta X + K_1 \Delta V_g - D_6 D_7^{-1} D_6 \Delta V_g \quad (2.67)$$

$$0 = K_2 \Delta X + \left(K_1 - D_6 D_7^{-1} D_6 \right) \Delta V_g \quad (2.68)$$

$$\Delta V_g = \left(K_1 - D_6 D_7^{-1} D_6 \right)^{-1} K_2 \Delta X \quad (2.69)$$

Ou pose $K_3 = \left(K_1 - D_6 D_7^{-1} D_6 \right)^{-1}$,

$$\Delta V_g = K_3 K_2 \Delta X \quad (2.70)$$

On remplace ΔV_g de l'équation (2.70) par sa valeur

$$\Delta \dot{x} = \left(A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1 \right) \Delta X + \left(B_2 - B_1 D_1^{-1} C_1 \right) K_3 K_2 \Delta X + E_1 \Delta u \quad (2.71)$$

$$\Delta \dot{x} = \left[A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1 + \left(B_2 - B_1 D_1^{-1} D_2 \right) K_3 K_2 \right] \Delta X + E_1 \Delta u \quad (2.72)$$

Ou pose $A_{sys} = \left[A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1 + \left(B_2 - B_1 D_1^{-1} D_2 \right) K_3 K_2 \right]$, le modèle de système linéarisé est :

$$\Delta \dot{X} = A_{sys} \Delta X + E \Delta u \quad (2.73)$$

A_{sys} est la matrice du système et le système est défini comme un système particulier en temps continu linéaire (invariant dans le temps) à coefficients constants. Si le signe d'entrée $\Delta u = 0$, le système sera homogène. Dans les sections suivantes, la technique de résolution mathématique de ce système sera discutée en détail.

2.5 Solution d'équations différentielles du premier ordre homogènes / particuliers à coefficients constants

Dans un système linéaire avec m entrées, n états et p sorties, les équations d'état et de sortie

$$\text{peuvent être écrites comme suit ; } \left. \begin{array}{l} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) + Du(t) \end{array} \right\} \quad (2.74)$$

$$\text{De même pour un système linéarisé : } \left. \begin{array}{l} \Delta \dot{x}(t) = A \Delta x(t) + B \Delta u(t) \\ \Delta y = C \Delta x(t) + D \Delta u(t) \end{array} \right\} \quad (2.75)$$

Bien qu'il existe de nombreuses méthodes dans la littérature pour la résolution d'équations d'état telles que l'analyse modale (diagonalisation ou forme canonique), la méthode de transformation de Laplace, la méthode de Cayley-Hamilton, la méthode d'analyse modale est plus couramment utilisée dans l'analyse de la stabilité des petits signaux des systèmes de puissance.

2.5.1 Méthode d'analyse modale

a. Solution homogène

Pour l'équation d'état $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$, le signe d'entrée $u = 0$ est pris et cette solution est appelée solution homogène.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (2.76)$$

La solution homogène de l'équation (2.76) est ;

$$x_h(t) = e^{A(t-t_0)}x_0 \quad (2.77)$$

Peut-être écrite sous forme suivant :

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i V_i e^{\lambda_i(t-t_0)} \quad (2.78)$$

C_i et V_i respectivement le coefficient constant de la valeur propre et le vecteur propre correspondant à la valeur propre.

Après tout calcul, l'équation précédente est écrite sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} v_{11} \\ v_{12} \\ \vdots \\ v_{1n} \end{bmatrix} e^{\lambda_1(t-t_0)} + c_2 \begin{bmatrix} v_{21} \\ v_{22} \\ \vdots \\ v_{2n} \end{bmatrix} e^{\lambda_2(t-t_0)} + \dots + c_n \begin{bmatrix} v_{n1} \\ v_{n2} \\ \vdots \\ v_{nn} \end{bmatrix} e^{\lambda_n(t-t_0)} \\ &= \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{n1} \\ v_{12} & v_{22} & \dots & v_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1n} & v_{2n} & \dots & v_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\lambda_1(t-t_0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2(t-t_0)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_n(t-t_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \\ &= Me^{\Lambda(t-t_0)}C \end{aligned} \quad (2.79)$$

b. Solution particulière

$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ Cette équation d'état pour $x(t_0) = 0$ (condition initiale nulle) est prise et sa solution est appelée solution particulière.

$$e^{A(t-t_0)} = Me^{\Lambda(t-t_0)}M^{-1} \quad (2.80)$$

La solution générale trouvée :

$$x(t) = e^{A(t-t_0)}x_0 + e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau = x_h + x_p \quad (2.81)$$

La première partie de l'équation (2.81) est la solution homogène et la seconde partie est la solution particulière.

Après tout calcul fait l'équation (2.81) devient :

$$x(t) = Me^{\Lambda(t-t_0)}M^{-1}x_0 + Me^{\Lambda(t-\tau)}M^{-1}Bu(\tau)d\tau = x_h + x_p \quad (2.82)$$

De même, pour un système linéarisé, cette expression serait la suivante.

$$\Delta x(t) = Me^{\Lambda(t-t_0)}M^{-1}\Delta x(t_0) + \int_{t_0}^t Me^{\Lambda(t-\tau)}M^{-1}B\Delta u(\tau)d\tau = \Delta x_h + \Delta x_p \quad (2.83)$$

2.5.2 Analyse des cas particuliers

Le système a des valeurs propres $\lambda_1 = 0$, $\lambda_{1,2} = 0$, l'analyse de stabilité du système sera analysée analytiquement pour quatre cas différents donnés dans le tableau, y compris les solutions homogènes et particulières et la solution générale du système $x(t) = x_h + x_p$.

Tableau2.1 : Analyse des cas particuliers

Cas 1	$\lambda_1 = 0$ et $\text{Re}[\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n] < 0$	cas correspondant à x_h solution homogène
Cas 2	$\lambda_1 = 0$ et $\text{Re}[\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n] < 0$	cas correspondant à x_p solution particulière
Cas 3	$\lambda_{1,2} = 0$ et $\text{Re}[\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_n] < 0$	cas correspondant à x_h solution homogène
Cas 4	$\lambda_{1,2} = 0$ et $\text{Re}[\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_n] < 0$	cas correspondant à x_p solution particulière

Le tableau suivant résume les quatre cas possibles

Tableau2.2 : Quatre analyses d'exception différentes.

Systèmes	Solution homogène	Solution particulière	Solution générale
$\lambda_1 = 0$ et $\text{Re}[\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n] < 0$	Le système est toujours stable (Cas 1)	Le système est toujours instable (Cas 2)	Le système est toujours instable (Cas 1+2)
$\lambda_{1,2} = 0$ et $\text{Re}[\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_n] < 0$	Le système est toujours instable (Cas 3)	Le système est toujours instable (Cas 4)	Le système est toujours instable (Cas 3+4)

2.5.3 Facteur de participation

Le facteur de participation correspond aux éléments diagonaux du système d'équation x_h , et les coefficients correspondant à chaque état $x(t)$ et à chaque valeur propre λ , il est utilisé pour choisir l'emplacement des PSS pour le cas du 2^{ème} système [SAU18][EKI15].

2.6 Analyse de la stabilité des petits signaux dans les systèmes de puissance linéarisés

Considérons la machine m linéarisée et le système de puissance n jeux de barres dont l'équation d'état est la suivante :

$$\Delta \dot{x} = A_{\text{sys}} \Delta x + E \Delta u \quad (2.84)$$

Dans l'équation (2.84) linéarisé aux points de fonctionnement, $\Delta u(t)$ représente de petits changements dans le signe d'entrée et $\Delta x(t)$ représente de petits changements dans les variables d'état.

$$\begin{cases} \Delta u(t) = u(t) - u(t_0) \\ \Delta x(t) = x(t) - x(t_0) \end{cases} \quad (2.85)$$

Dans les systèmes de puissance multi-machines ; Pour les variables d'état $\Delta x(t)$ et les signaux d'entrée $\Delta u(t)$, $i = 1, \dots, m$ seront :

$$\begin{cases} \Delta x_i = \begin{bmatrix} \Delta \delta_i & \Delta \omega_i & \Delta E'_{qi} & \Delta E_{fdi} \end{bmatrix}^T \\ \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1^t & \dots & \Delta x_m^T \end{bmatrix}^T \\ \Delta u_i = \begin{bmatrix} \Delta p_{mi} & \dots & \Delta V_{ref} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (2.86)$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_1^t & \dots & \Delta u_m^T \end{bmatrix}^T \quad (2.87)$$

De même, en utilisant l'équation (2.83), la solution générale pour les systèmes électriques linéarisés sera donnée sous la forme suivante :

$$\Delta x(t) = M e^{\Lambda(t-t_0)} M^{-1} \Delta x(t_0) + \int_{t_0}^t M e^{\Lambda(t-\tau)} M^{-1} E \Delta u(\tau) d\tau = \Delta x_h + \Delta x_p \quad (2.88)$$

Dans un système de puissance avec m machines, M est la matrice modale et se compose de $4m$ colonnes de vecteurs propres correspondant à $4m$ valeurs propres de la matrice du système A_{sys} d'ordre $4m * 4m$. La matrice diagonale Λ peut être exprimée sous la forme suivante.

$$\Lambda = M^{-1}A_{\text{sys}}M \quad (2.89)$$

2.6.1 Conditions de stabilité

La matrice d'état A_{sys} dans les systèmes de puissance multi-machines linéarisés. Il a toujours une valeur propre nulle si le coefficient d'amortissement $D \neq 0$ et toujours deux valeurs propres nulles si $D = 0$. A_{sys} est une matrice singulière (pas d'inverse).

Dans les systèmes de puissance multi-machines linéarisés avec m machines et n jeux de barres,

- ✓ Si $D \neq 0$, le vecteur propre V_1 correspondant à la valeur propre $\lambda_1 = 0$ de la matrice d'état du système A_{SYS} sera toujours le suivant.

$$V_1 = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_i \\ \vdots \\ \mu_m \end{bmatrix} \text{ et } \mu_i = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2.90)$$

- ✓ Si $D = 0$, le vecteur propre V_1 correspondant à la valeur propre $\lambda_1=0$ de la matrice d'état du système A_{sys} est toujours le même que l'équation (2.89). Le vecteur propre V_2 correspondant à la valeur propre $\lambda_2=0$ devient toujours le suivant pour $i=1\dots m$.

$$V_2 = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_i \\ \vdots \\ \psi_m \end{bmatrix} \text{ et } \psi_i = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \quad (2.91)$$

2.7 Résultats de simulations et interprétation

➤ Le premier système étudié consiste une seule machine liée à un jeu de barre infini (SMIB), Deux types de fonctionnements sont considérés.

1- Type de grand défaut : Un court-circuit triphasé a été appliqué à l'extrémité du générateur à $t = 1$ s et il a été supposé que le défaut sera éliminé après $t = 0,1$ s.

2- Type de petit défaut : Une augmentation soudaine de 10% de la puissance mécanique à $t = 1$ s ($\Delta P_m = 0,10$ pu).

L'exécution de la simulation de programme matlab nous a permis d'obtenir les résultats représentés dans les figures (2.11 a) et (2.11 b) qui montre respectivement la réponse dynamique de la déviation de vitesse de rotation ($\Delta\omega$), l'angle rotorique (δ), et le couple électromécanique (T_e).

Les résultats de simulations SMIB montre clairement que le système présente un comportement oscillatoire qui est mal amorti ce qui nécessite l'emplacement d'un PSS.

➤ Le deuxième système étudié est un système multimachine constitué de 3 machines-9 bus (voire annex A).

On suppose qu'un défaut triphasé est appliqué au bus 7 et que le défaut est éliminé par un déclenchement permanent de la ligne entre le bus 5 et le bus 7. Le temps de défaut et de retour à l'état initial est choisi de l'ordre de 6 périodes du réseau (0.1 s).

La réponse du système (Les angles de rotor relatifs et les vitesses angulaires de rotor relatives des générateurs G2 et G3 par rapport au générateur G1 et la réponse de puissance mécanique pour les trois générateurs) est illustrée sur la figure (2.12), montre que la dynamique du système est mal amortie et le générateur perd son synchronisme.

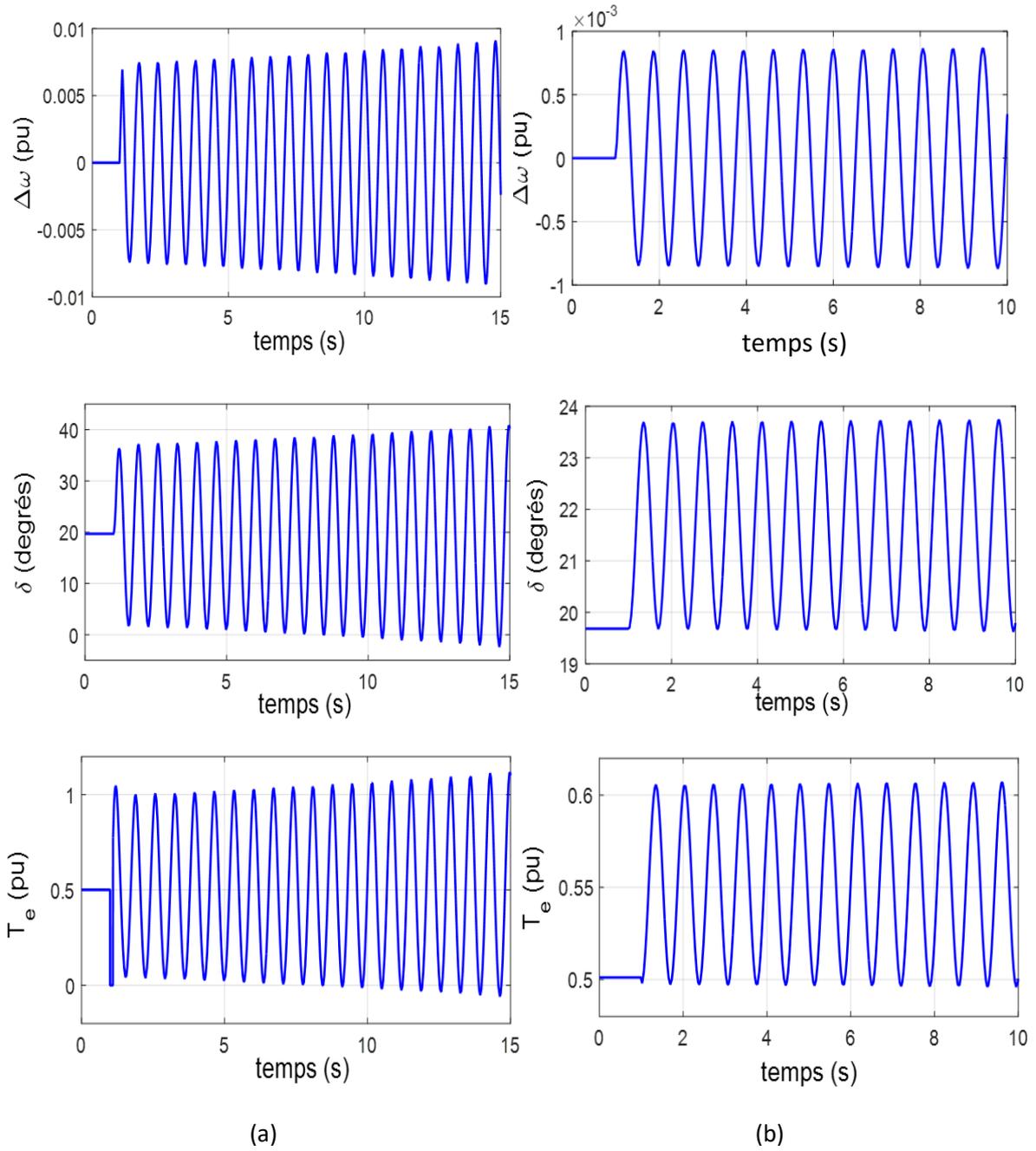


Figure. 2.11 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e .

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

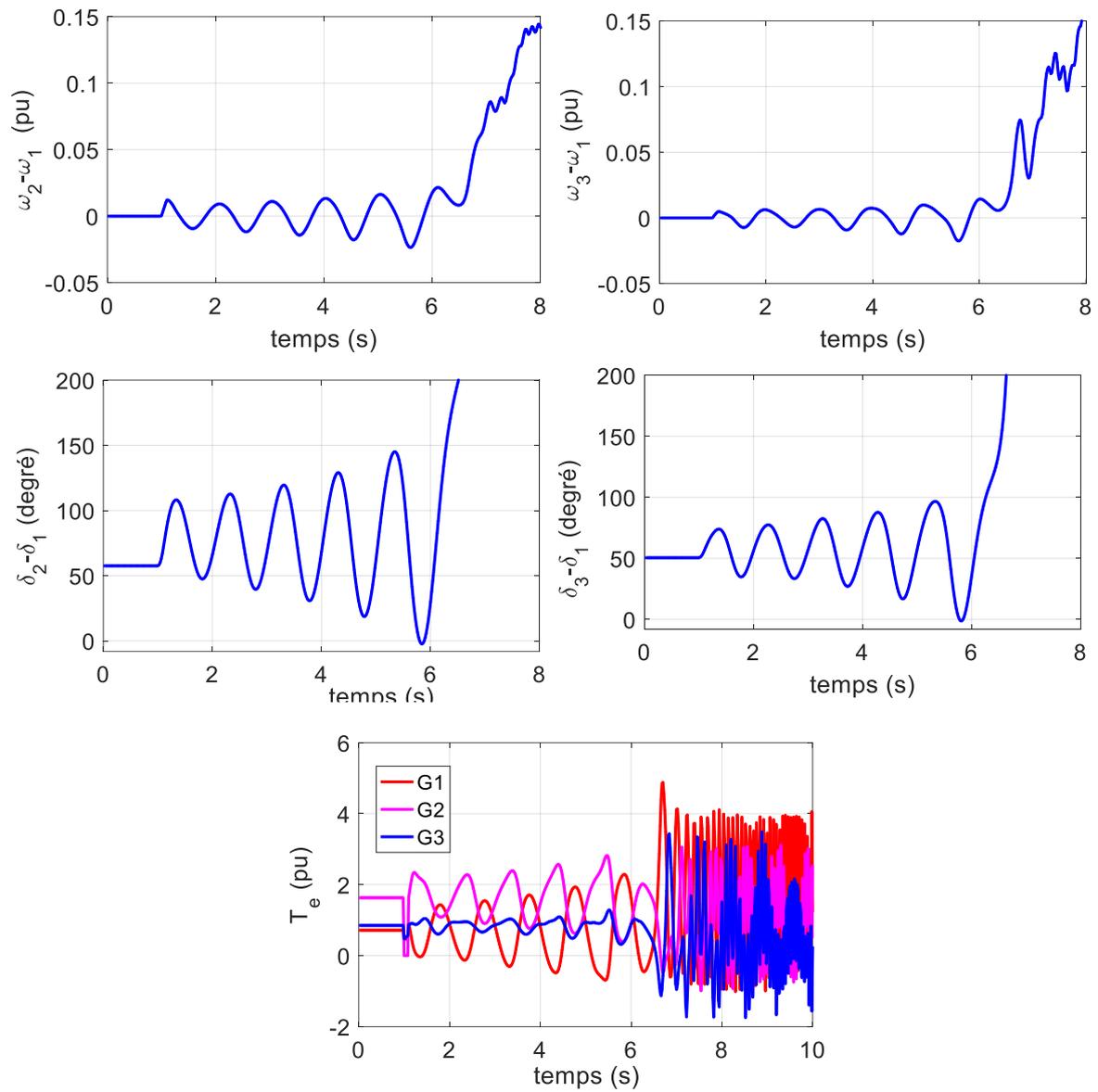


Figure. 2.12 : Réponse du système multimachine avec grand défaut.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de système de puissance (machine, lignes de transmission, transformateur, le système d'excitation et leur régulateur (AVR)) et nous avons montré que le comportement de système de puissance peut être traduit par un ensemble d'équations différentielles et algébriques qui dépendent des hypothèses adoptées. Ce modèle décrit le comportement non-linéaire du système de puissance.

Le système de puissance est souvent soumis à des petites perturbations qui se produisent continuellement sous l'influence de faibles variations de charges et des sources. Ces perturbations sont considérées comme suffisamment petites pour permettre de linéariser les équations du modèle général du système. La représentation d'état du système est ensuite déduite.

L'analyse modale du système donne des informations importantes concernant les caractéristiques des modes d'oscillations, les variables d'état participant à l'évolution de ces modes.

Et finalement, nous avons clôturé le chapitre par une simulation du comportement dynamique du système de puissance.

Chapitre 3 : *Stabilité du système de puissance*



3.1 Introduction

La notion de stabilité d'un système dynamique caractérise le comportement de ses trajectoires autour de son point d'équilibre, c'est à dire, la capacité à revenir à sa position d'équilibre lorsqu'il est ponctuellement écarté. L'analyse de la stabilité d'un système dynamique permet donc d'étudier l'évolution de ses trajectoires d'état lorsque l'état initial est proche d'un point d'équilibre. Dans la littérature, plusieurs approches ont été proposées : les méthodes d'analyse qualitative, les méthodes géométriques, la théorie d'hyperstabilité de Popov, la théorie de Lyapunov. La stabilité au sens de Lyapunov est une théorie générale valable pour toute équation différentielle.

Un système électrique est similaire à tout système dynamique. Sa fonction est de fournir de l'électricité aux charges à la qualité souhaitée avec le moins d'interruptions possible. Le système électrique est généralement soumis à des perturbations pendant son fonctionnement. Pour atteindre la fiabilité du système, le système doit être sécurisé la plupart du temps, pendant et après les périodes de défaillance. Cela implique que le système doit être stable.

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique de la stabilité du système de puissance. On va donner des principes de la stabilité au sens de Lyapunov. Par la suite les caractéristiques des différents types de stabilité de système de puissance seront présentées.

3.2 Stabilité au sens de Lyapunov

3.2.1 Notions de base

La stabilité est une condition nécessaire pour le bon fonctionnement des systèmes. C'est la qualité minimale que doit avoir un processus pour nous garantir qu'une perturbation ne conduira pas ce dernier à une catastrophe.

Les définitions relatives à la stabilité au sens de Lyapunov sont considérées dans ce qui suit [AME15][BAS13][SAF18][KHA96][MIC08]:

Soit un système dynamique décrit par son modèle d'état

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (3.1)$$

Définition 1 : Point d'équilibre

On appelle point d'équilibre tout point x_e satisfaisant $f(x_e) = 0$, c'est-à-dire

$$\text{Si pour } t = t_1, x(t_1) = x_e \Rightarrow \forall t > t_1, x(t) = x_e \quad (3.2)$$

Définition 2 : Stabilité du point d'équilibre

L'équilibre $x = x_e$ du système (3.1) est stable au sens de Lyapunov si :

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0, \exists \eta > 0, \forall t_0 \in \mathbb{R}, \\ \|x(t_0) - x_e\| < \eta \Rightarrow \forall t \in [t_0, +\infty], \|x(t) - x_e\| < \varepsilon \end{aligned} \quad (3.3)$$

Si cette condition n'est pas satisfaite, système est instable.

Autrement dit, un équilibre est stable si une faible perturbation dans les conditions initiales entraîne une faible perturbation de la trajectoire ultérieure.

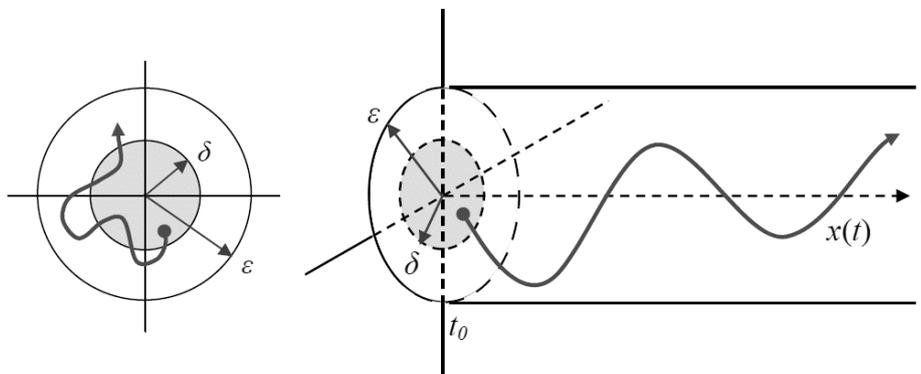


Figure. 3.1 : Illustration de la définition de la stabilité.

Définition 3 : Attractivité

L'équilibre x_e est attractif si l'état x converge au bout d'un temps infini vers x_e , lorsque les conditions initiales se situent dans une boule ouverte de centre x_e :

$$\forall t_0 \in \mathbb{R} \exists \eta > 0, \text{ tel que } \|x(t_0) - x_e\| < \eta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_e \quad (3.4)$$

Définition 4 : Stabilité asymptotique

Un équilibre est asymptotiquement stable s'il est à la fois stable et attractif.

Autrement dit, il existe $r > 0$ tel que pour toute solution $x(t)$ de (3.1) on a :

$$\|x(t_0) - x_e\| < r \Rightarrow \lim_{t \rightarrow +\infty} x(t) - x_e = 0 \tag{3.5}$$

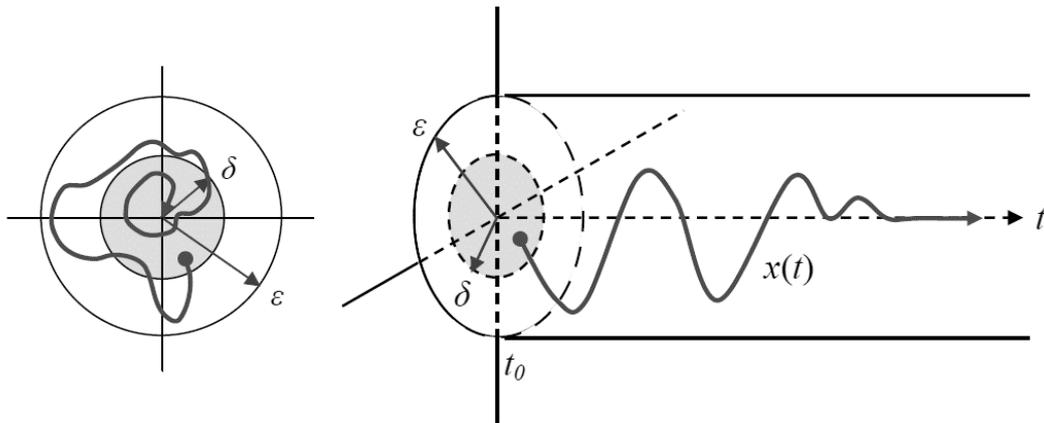


Figure .3.2 : Illustration de la définition de la stabilité asymptotique.

La stabilité asymptotique signifie que non seulement le point d'équilibre est stable, mais qu'on est aussi capable de déterminer un domaine proche du point d'équilibre tel que n'importe quelle trajectoire, issue d'un état initial $x(t_0)$ appartenant à ce domaine, tend vers x_e quand t tend vers ∞ .

Définition 5. Stabilité exponentielle

L'équilibre (x_e) est un équilibre exponentiellement stable si

$$\forall \epsilon > 0 \quad \exists a > 0, \quad b > 0 \quad \text{et} \quad \delta > 0$$

$$\|x(t_0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_e\| < a \cdot \|x(t_0) - x_e\| e^{-bt} \quad \forall t \geq t_0 \tag{3.6}$$

Dans ce cas, l'état $x(t)$ converge vers le point d'équilibre d'une manière exponentielle et la variable δ caractérise la vitesse de cette convergence.

Il est évident que la stabilité exponentielle implique la stabilité asymptotique mais l'inverse n'est pas nécessairement vrai.

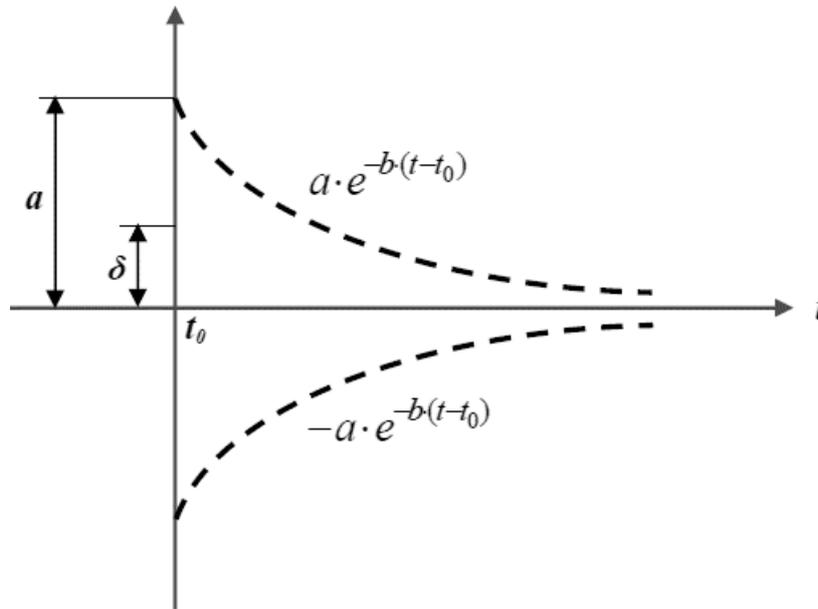


Figure. 3.3 : Illustration de la définition de la stabilité exponentielle.

Il existe deux approches possibles pour démontrer la stabilité du système [ZER19] [KHA16] [BAS13] [PAI89] :

3.2.2 Première méthode de Lyapunov (méthode indirecte)

La première méthode de Lyapunov est basée sur l'examen de la linéarisation du système autour de l'équilibre. Plus précisément, on examine les valeurs propres $\lambda_i(A)$ de la matrice Jacobienne évaluée à l'équilibre : $A = \frac{\partial f}{\partial x}(x_e)$

Théorème : Selon cette méthode, les propriétés de stabilité s'expriment comme suit.

1. Si toutes les valeurs propres de la matrice Jacobienne ont une partie réelle strictement négative ($\forall i, \text{Re}(\lambda_i(A)) < 0$), l'équilibre (x_e) est exponentiellement stable.
2. Si la matrice Jacobienne possède au moins une valeur propre à partie réelle strictement positive ($\exists i, \text{Re}(\lambda_i(A)) > 0$), l'équilibre (x_e) est instable.

Cette méthode apporte une validité théorique à la technique de linéarisation. Elle mentionne que si le système linéarisé est asymptotiquement stable, alors il y a stabilité asymptotique. Dans le cas où le système linéarisé est instable, il y a instabilité. Ce théorème est d'une importance limitée, car il ne permet d'étudier que la stabilité d'un point singulier (stabilité locale) et ne donne aucune information sur le domaine de stabilité (stabilité globale). De plus, dû aux approximations du premier degré (linéarisation), il n'est pas possible de tenir compte de tous les types de phénomènes non-linéaires.

3.2.3 Seconde méthode de Lyapunov (méthode directe)

Comme nous venons de le voir, la première méthode de Lyapunov est simple à appliquer mais elle ne permet d'analyser la stabilité des équilibres que très partiellement. En outre elle ne donne aucune indication sur la taille des bassins d'attraction. La seconde méthode est plus difficile à mettre en oeuvre mais, en contrepartie, est d'une portée beaucoup plus générale. Elle est basée sur la définition d'une fonction particulière, notée $V(x)$ et appelée *fonction de Lyapunov*, qui est décroissante le long des trajectoires du système à l'intérieur du bassin d'attraction.

Théorème : L'équilibre (x_e) du système (3.1) est stable s'il existe une fonction $V(x): D \rightarrow R$ continûment différentiable ayant les propriétés suivantes :

$$R^n \text{ et } x_e \in D$$

$$V(x) > V(x_e) \quad \forall x \neq x_e \text{ dans } D$$

$$\dot{V}(x) \leq 0 \quad \forall x \neq x_e \text{ dans } D$$

3.3 Classification de la stabilité des systèmes électriques

Un groupe de travail conjoint IEEE, CIGRE sur les termes et définitions de la stabilité a défini la stabilité du réseau électrique comme « *la capacité d'un réseau électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, à retrouver un état d'équilibre de fonctionnement après avoir été soumis à une perturbation physique, la plupart des variables du réseau étant limitées de sorte que pratiquement tout le réseau reste intact* ».

La classification de la stabilité du réseau électrique en se concentrant principalement sur une seule variable (c'est-à-dire la tension, la fréquence ou l'angle du rotor) est une pratique utile. Cette classification est basée sur les considérations suivantes [KUN 04] :

- La nature physique du mode d'instabilité qui en résulte, telle qu'indiquée par la principale variable du système dans laquelle l'instabilité peut être observée.
- L'importance de la perturbation considérée, qui influence la méthode de calcul et de prévision de la stabilité.
- Les dispositifs, les processus et la durée qui doivent être pris en considération pour évaluer la stabilité.

La figure (3.4) donne une vue d'ensemble du problème de stabilité du réseau électrique, en identifiant ses catégories et sous-catégories. Voici les descriptions des formes correspondantes de phénomènes de stabilité [KUN 04].

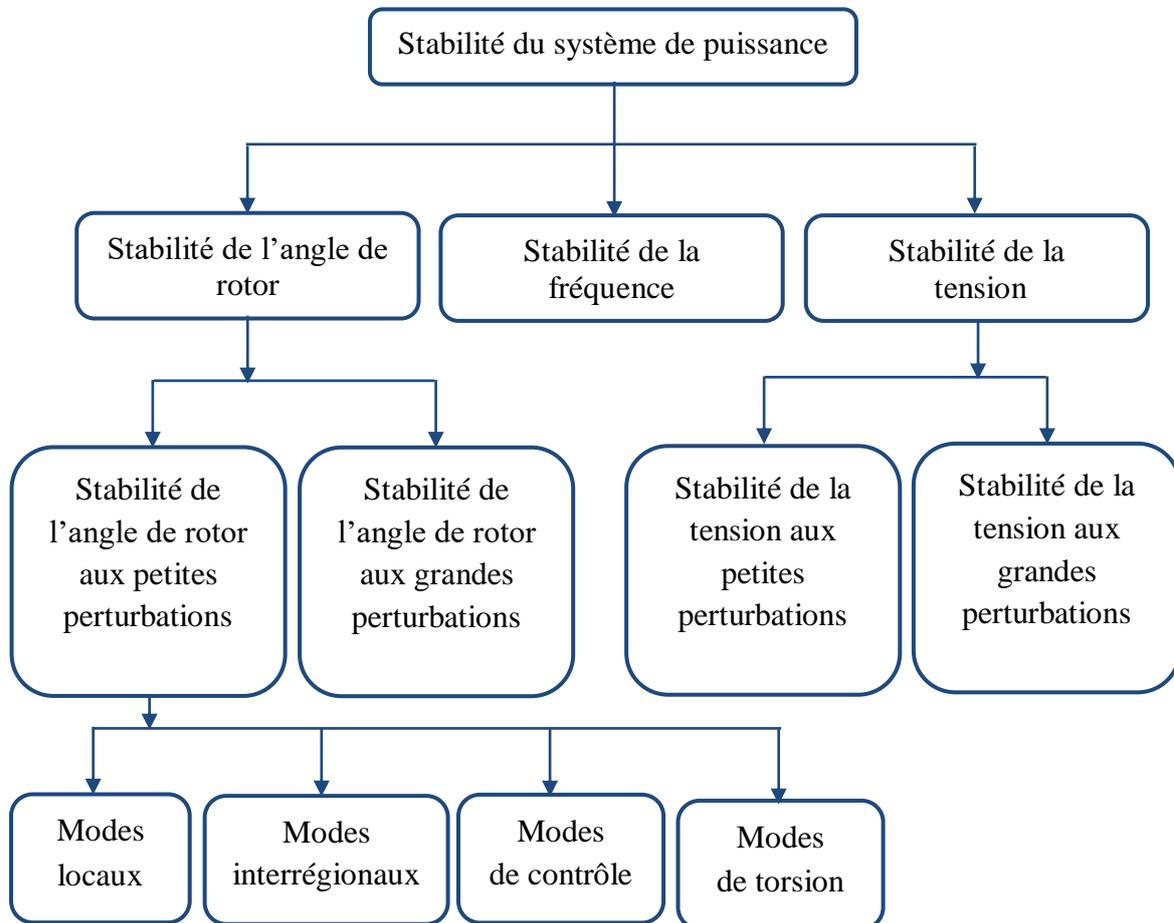


Figure. 3.4 : Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.

3.3.1 Stabilité de l'angle du rotor

La stabilité de l'angle du rotor fait référence à la capacité des machines synchrones d'un système de puissance interconnecté à rester en synchronisme après avoir été soumises à une perturbation. Elle dépend de la capacité à maintenir/rétablir l'équilibre entre le couple électromagnétique et le couple mécanique de chaque machine synchrone du système. L'instabilité qui peut en résulter se produit sous la forme d'oscillations angulaires croissantes de certains générateurs, entraînant leur perte de synchronisme avec d'autres générateurs.

En régime permanent, il existe un équilibre entre le couple mécanique d'entrée et le couple électromagnétique de sortie de chaque générateur, et la vitesse reste constante. Si le système est perturbé, cet équilibre est rompu, ce qui entraîne une accélération ou une

décélération des rotors des machines selon les lois du mouvement d'un corps en rotation. Si un générateur tourne temporairement plus vite qu'un autre, la position angulaire de son rotor par rapport à celle de la machine la plus lente. La différence angulaire qui en résulte transfère une partie de la charge de la machine lente à la machine rapide, en fonction de la relation puissance-angle. Cela tend à réduire la différence de vitesse et donc la séparation angulaire [KUN04].

La classification de la stabilité du réseau électrique est basée sur le type de perturbation. Les perturbations peuvent être divisées en deux types : les petites et les grandes perturbations.

3.3.1.1 Stabilité de l'angle du rotor en cas de petites perturbations (ou de petits signaux).

La stabilité du rotor en cas de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir le synchronisme en cas de petites perturbations, comme de petites variations de charge et de production. Les petites perturbations sont les changements se produisant dans le système électrique pour lesquels l'angle du rotor présente une variation presque linéaire permettant la linéarisation des équations du système autour du point d'équilibre sans rencontrer d'erreurs [ERE13] [SAL15].

La nature de la réponse du système aux petites perturbations dépend d'un certain nombre de facteurs tels que les conditions initiales, la force du système de transmission, le type de commande d'excitation du générateur et en grande partie la valeur du couple électrique. Dans les réseaux électriques, la variation du couple électrique d'une machine synchrone suite à une perturbation due à une perturbation peut être résolue en deux composantes [MON20][ERE13]:

- **La composante de synchronisation** $K_s \Delta \delta$ en phase avec la variation de l'angle du rotor.
- **La composante d'amortissement** $K_D \Delta \omega$ en phase avec la variation de vitesse.

$$\Delta T_e = K_s \Delta \delta + K_D \Delta \omega \quad (3.7)$$

Où

K_s : Coefficient de synchronisation.

$\Delta \delta$: Changement de l'angle du rotor.

$\Delta \omega$: Changement de la vitesse angulaire du rotor.

K_D : Coefficient d'amortissement.

On peut constater que pour une valeur positive de K_s , la composante du couple de synchronisation s'oppose aux changements d'angle du rotor à partir du point d'équilibre. Cela signifie qu'une augmentation de l'angle du rotor entraîne un couple de décélération net, ce qui entraîne un ralentissement de l'unité par rapport au système électrique. Le ralentissement se poursuit jusqu'à ce que l'angle du rotor soit ramené à son point d'équilibre et que la variation de l'angle du rotor disparaisse. De même, lorsque K_D a des valeurs positives, la composante du couple d'amortissement s'oppose au changement de vitesse du rotor par rapport au point de fonctionnement stable initial. Par conséquent, le générateur reste dans un état stable lorsque des couples de synchronisation et d'amortissement positifs suffisants agissent sur le rotor pour toutes les conditions de fonctionnement. Les figures (3.5) et (3.6) décrivent la relation entre les deux composantes du couple et l'état correspondant du système électrique [SAL15][KUN04][BAS08].

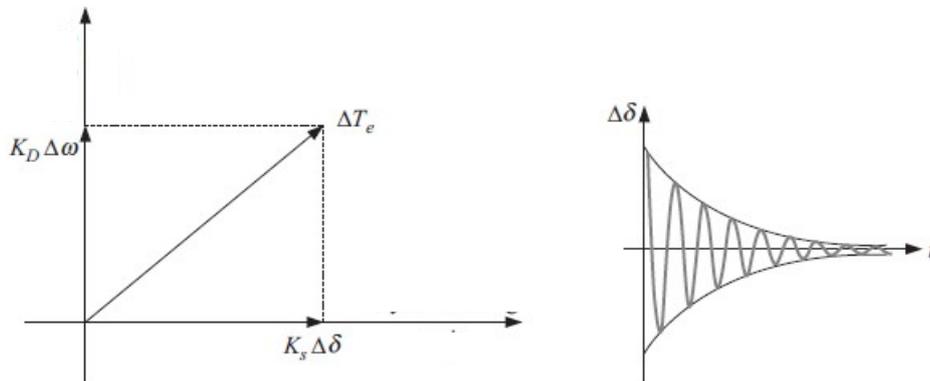


Figure. 3.5 : Deux composantes de couple positives avec oscillations amorties "état stable".

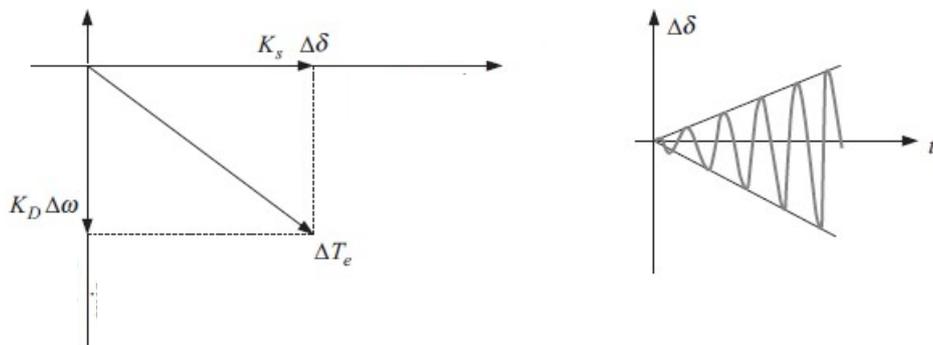


Figure. 3.6 : Composantes de couple de synchronisation positif et de couple d'amortissement négatif avec oscillations non amorties "état instable".

✚ Différents types d'oscillations à faible fréquence

En fonction des générateurs et des états impliqués dans les oscillations instables, la stabilité des types d'oscillations suivants est préoccupante [KUN04] [ERE13]:

- **Oscillations locales** en mode installation sont associées au basculement d'un générateur ou d'une centrale contre le reste du système électrique. La fréquence d'oscillation varie de 1 à 2 Hz, selon les caractéristiques de la machine et les conditions de fonctionnement du système de puissance.
- **Oscillations en mode interrégionaux** sont associées à l'oscillation d'un groupe géographiquement isolé de machines synchrones contre d'autres machines. Si les oscillations inter-zones deviennent instables, les groupes de générateurs peuvent perdre leur synchronisme et une partie du réseau électrique peut être îlotée suite à la déconnexion des lignes de transmission par le système de protection. La fréquence de ce mode d'oscillations va de 0,1 à 1 Hz.
- **Oscillations du mode de contrôle** peuvent être dues à des systèmes de contrôle mal réglés, reliés à des excitateurs de champ, des régulateurs de vitesse, des liaisons HVDC, SVC, etc.
- **Modes de torsion** font référence aux vibrations de torsion induites dans les composants rotatifs du générateur-turbine en raison de changements accidentels, soit du côté de la turbine, soit du côté du réseau électrique. Les couples appliqués sur l'arbre du rotor dans des directions opposées créent une torsion de l'arbre. De tels phénomènes peuvent provoquer la rupture de l'arbre ou des aubes de turbine, en particulier au niveau du cylindre basse pression des centrales thermiques. Toutes les perturbations sont caractérisées par le temps, la fréquence et l'amplitude. Les perturbations dans le réseau électrique peuvent être des commutations dans le réseau ou des changements de charge soudains et importants comme le fonctionnement des fours à arc ou le démarrage des moteurs. Un cas particulier de mode de torsion est la résonance subsynchrone, qui est due à l'interaction entre les condensateurs en série et les centrales électriques proches avec des arbres longs et flexibles. L'instabilité des modes de torsion peut également être causée par l'interaction avec les commandes d'excitation et les régulateurs de vitesse.

3.3.1.2 Stabilité de l'angle du rotor en cas de perturbation importante ou la stabilité transitoire

La stabilité de l'angle du rotor aux grandes perturbations, communément appelée stabilité transitoire, concerne la capacité du système électrique ou d'un générateur synchrone à maintenir le synchronisme lorsqu'il est soumis à une perturbation grave. La réponse du système qui en résulte implique de grandes divergences des angles du rotor de la génératrice, ce qui met en évidence la relation non linéaire entre l'angle de puissance et l'angle de rotation. En conséquence, les équations du système ne peuvent plus être linéarisées comme dans le cas de petites perturbations, et les variations des angles du rotor peuvent être analysées à l'aide de méthodes numériques d'intégration. Les exemples de grandes perturbations sont les courts-circuits sur les lignes de transmission, la déconnexion de grandes centrales électriques et la déconnexion de grandes charges. La stabilité dépend à la fois des conditions initiales de fonctionnement du système électrique et de la gravité de la perturbation. Les grandes perturbations les plus graves impliquent des changements dans la topologie du réseau. Par exemple, un court-circuit peut être éliminé par la déconnexion de l'élément affecté [KUN04].

Lorsqu'un court-circuit se produit sur une ligne de transmission à proximité d'un générateur synchrone, la tension aux bornes chute de manière significative et la capacité des générateurs à produire de l'énergie électrique est réduite. Pendant la brève période suivant l'apparition de la perturbation, le système d'excitation, avec une réponse rapide et une tension de plafond élevée, peut contribuer à maintenir la stabilité du générateur en forçant le champ, ce qui augmente la tension aux bornes des générateurs. Pour une telle perturbation, la première condition pour maintenir la stabilité est d'éliminer rapidement le court-circuit par déconnexion de la ligne. Si le générateur a persisté, après élimination du défaut, il entre en oscillations, qui doivent être amorties très rapidement. L'amortissement des oscillations est alors conditionné par les performances du système électrique en matière de petites perturbations. Les systèmes d'automatisation et de protection tentent de reconnecter la ligne de transmission et de rétablir les conditions de fonctionnement initiales. Cependant, si les oscillations ne sont pas correctement amorties, un réenclenchement rapide peut provoquer des oscillations plus importantes et donc une plus grande contrainte sur l'arbre du générateur [ERE13]:

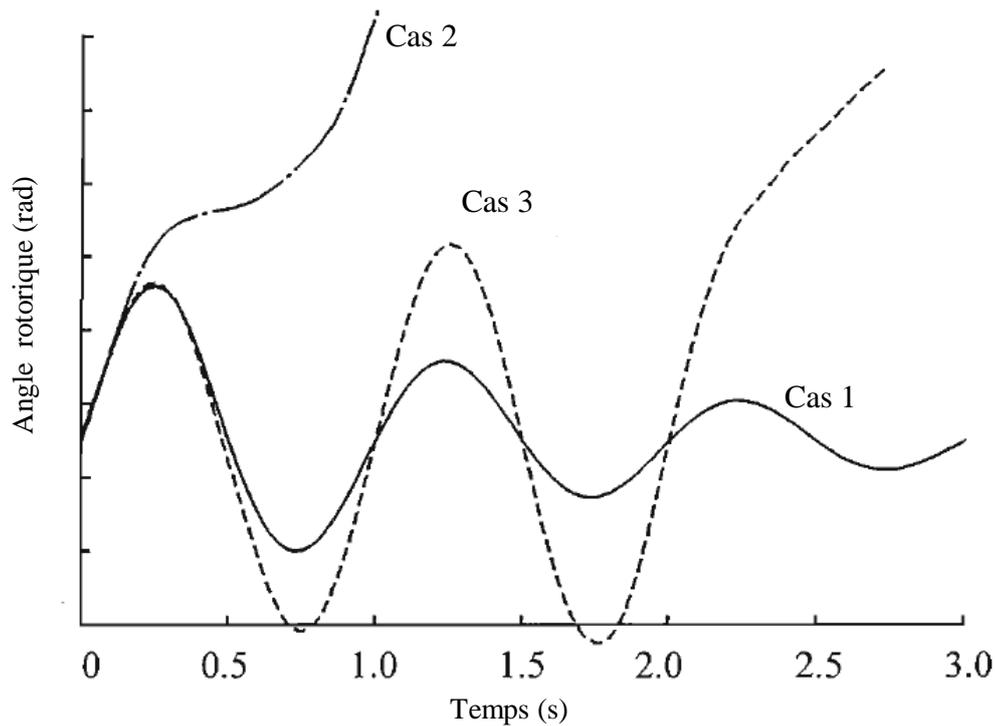


Figure. 3.7 : Réponses angulaires du rotor aux perturbations importantes

La figure (3.7) illustre les oscillations de l'angle du rotor subies par une machine synchrone indiquant la stabilité ou l'instabilité de la machine.

✓ Le cas 1 montre que les oscillations de l'angle du rotor sont amorties (diminution de l'amplitude) et que l'angle du rotor tend à se stabiliser à une valeur constante.

✓ Les cas 2 et 3 indiquent que l'angle du rotor peut augmenter considérablement en amplitude et que le générateur perd son synchronisme. Dans le cas 2, le synchronisme est perdu à la première oscillation. Cette forme d'instabilité est connue sous le nom ***d'instabilité à la première oscillation*** et est causée par un couple de synchronisation insuffisant. Dans le cas 3, la machine maintient le synchronisme lors des premières oscillations, mais les oscillations augmentent en amplitude et le synchronisme est perdu après quelques oscillations. Cette forme d'instabilité se produit généralement parce que le générateur n'est pas "stable aux petites perturbations" en raison de couples d'amortissement et/ou de synchronisation insuffisants et d'actions contradictoires des systèmes de commande, même si des mesures appropriées sont prises à temps pour éliminer les causes de la perturbation.

Le temps d'intérêt pour la stabilité des grandes perturbations va de 3 à 5 s et peut aller jusqu'à 10s pour les très grands réseaux électriques avec de faibles interconnexions entre les générateurs distants.

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion). Cette approche regroupe l'équation du mouvement et la courbe ($P-\delta$) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle de rotor [ALK08][SAA99].

Pour expliquer cette approche, nous prenons un système de puissance simple constitué d'un générateur synchrone connecté à un jeu de barre infini via une ligne de transmission, figure (3.8). Le générateur est modélisé par une source de tension idéale E_g en série avec une réactance X_g (modèle classique). La ligne et le transformateur sont représentés par la réactance X_E .

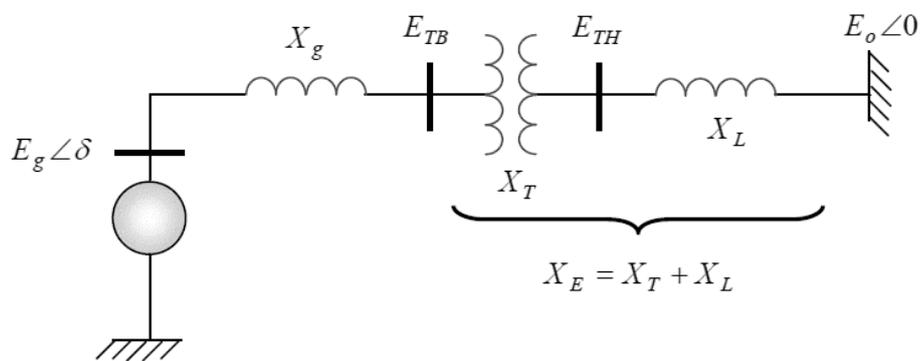


Figure. 3.8 : Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.

1- Relation ($P-\delta$)

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

$$P_e = \frac{E_g \cdot E_0}{X_g + X_E} \sin \delta \quad (3.8)$$

Où, δ , l'angle de rotor (dit ici, l'angle de puissance), est le déphasage entre la tension interne du générateur (E_g) et la tension du jeu de barres infini (E_0). L'équation (3.8) est représentée graphiquement à la figure (3.9).

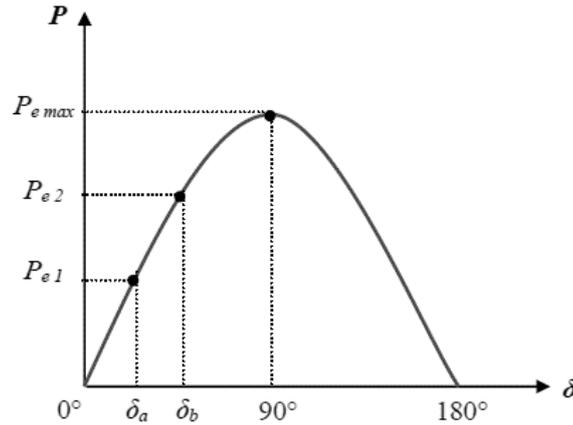


Figure. 3.9 : Relation puissance- angle de rotor.

Lors de l'équilibre, la puissance électrique P_{e1} est égale à la puissance mécanique appliquée pour l'angle correspondant δ_a .

Un brusque changement sur la charge du générateur entraîne une variation de la puissance mécanique, et par conséquent de la puissance électrique, par exemple de P_{e1} à P_{e2} , figure (3.9). Le rotor va donc accélérer de sorte que l'angle de puissance augmente, de δ_a à δ_b , pour pouvoir fournir une puissance supplémentaire à la charge. Cependant, l'accélération du rotor ne peut pas s'arrêter instantanément. Ainsi, bien que la puissance développée pour l'angle δ_b soit suffisante pour la charge, le rotor va dépasser l'angle δ_b jusqu'à ce qu'un couple opposé suffisant soit développé pour arrêter cette accélération. L'énergie supplémentaire va entraîner le ralentissement du rotor et la diminution de l'angle de puissance. Suivant l'inertie et l'amortissement du système, les oscillations de l'angle de rotor résultant vont ou s'amortir, et la machine restera stable (cas 1, figure (3.10)), ou diverger, et la machine deviendra instable en perdant le synchronisme avec le système (cas 2, figure (3.10)).

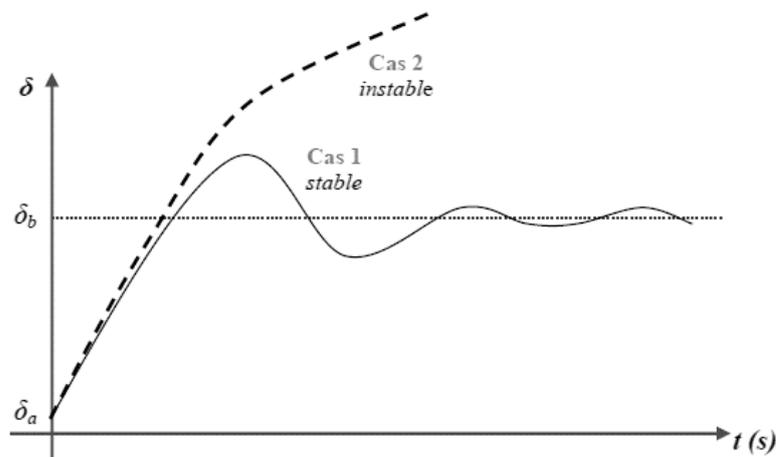


Figure. 3.10 : Variation d'angle de rotor.

2- Critère d'égalité des aires

Considérons un défaut sur la ligne de transmission, appliqué au système précédent disparaissant après quelques périodes du système. Ceci va modifier l'écoulement de puissance et, par conséquent, l'angle de rotor δ . Retraçons la courbe (P - δ) en tenant compte de ce défaut, figure (3.11). En dessous de cette courbe, nous pouvons considérer deux zones [SAA99] :

✓ La première zone (zone A_1 , zone d'accélération) se situe au-dessous de la droite horizontale correspondante au point de fonctionnement initial (la droite de charge). Elle est limitée par les deux angles de rotor (δ_0 et δ_1) correspondants à l'apparition et à la disparition de défaut. Cette zone est caractérisée par l'énergie cinétique stockée par le rotor du fait de son accélération : $P_m > P_e$.

✓ La deuxième zone (zone A_2 , zone de décélération), qui commence après l'élimination du défaut, se situe en dessus de la droite de charge : elle est caractérisée par la décélération du rotor : $P_m < P_e$.

Si le rotor peut rendre dans la zone A_2 toute l'énergie cinétique acquise durant la première phase, le générateur va retrouver sa stabilité. Mais si la zone A_2 ne permet pas de restituer toute l'énergie cinétique, la décélération du rotor va continuer jusqu'à la perte de synchronisme. La relation entre les aires des zones (A_1 et A_2) et la stabilité transitoire peut être mathématiquement expliquée comme suit :

Rappelons tout d'abord que l'équation du mouvement de générateur est donnée par la relation suivante :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \quad (3.9)$$

En multipliant cette équation par $2 \cdot \frac{d\delta}{dt}$, en intégrant par rapport au temps et en faisant un changement de variables, nous obtenons :

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 + cte = \int_{\delta_0}^{\delta_2} \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e).d\delta \quad (3.10)$$

δ_0 : l'angle de rotor, initial, à l'instant de l'application de défaut.

δ_2 : l'angle de rotor à la fin de la période transitoire.

Ainsi, lorsque : $t = 0 \Rightarrow \delta = \delta_0$, $\frac{d\delta}{dt} = 0 \Rightarrow cte = 0$

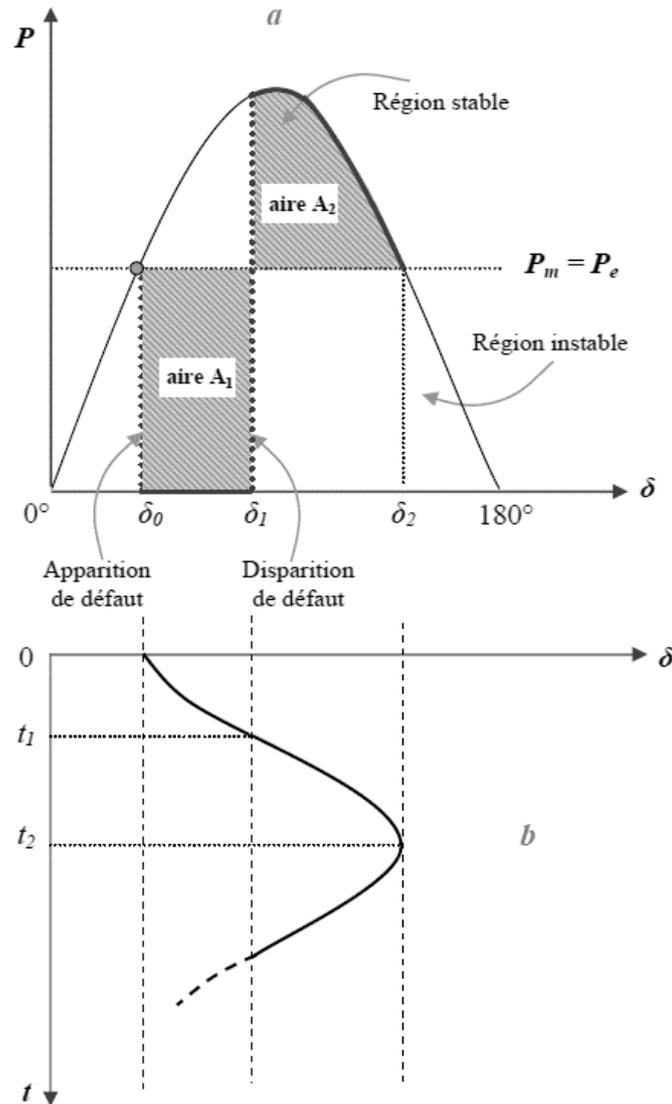


Figure. 3.11 : Courbes (a : puissance-angle) et (b : variation d'angle de rotor) du générateur suite à un défaut de transmission.

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

Par conséquent, l'équation (3.10) s'écrit comme suit :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} (P_m - P_e).d\delta = 0 \tag{3.11}$$

$$\Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e).d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e).d\delta = 0 \tag{3.12}$$

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

$$\Rightarrow A_1 - A_2 = 0 \quad (3.13)$$

Ainsi, la limite de la restauration de la stabilité transitoire se traduit mathématiquement par l'égalité des aires de la zone A_1 et de la zone A_2 : cette condition est appelée critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion).

En outre, un système statique d'excitation avec une tension maximale élevée et d'un régulateur de tension possédant une action "puissante" et rapide représente un moyen très efficace et économique pour assurer la stabilité transitoire. Enfin, une amélioration significative de la stabilité transitoire est obtenue avec des systèmes très rapides de détection des défauts et de disjoncteurs.

3.3.2 Stabilité de la tension

La stabilité de la tension fait référence à la capacité d'un système électrique à maintenir des tensions stables sur tous les bus du système après avoir été soumis à une perturbation à partir d'une condition de fonctionnement initiale donnée. Elle dépend de la capacité à maintenir/rétablir l'équilibre entre la demande de charge et l'offre de charge du système électrique. L'instabilité qui peut en résulter se produit sous la forme d'une baisse ou d'une hausse progressive des tensions de certains bus. Une conséquence possible de l'instabilité de la tension est la perte de charge dans une zone, ou le déclenchement de lignes de transmission et d'autres éléments par leurs systèmes de protection, ce qui entraîne des pannes en cascade. La perte de synchronisme de certains générateurs peut résulter de ces interruptions ou de conditions de fonctionnement qui violent la limite de courant de champ [KUN04].

3.3.2.1 Stabilité de la tension à fortes perturbations

Fait référence à la capacité du système à maintenir des tensions constantes après de grandes perturbations telles que des pannes du système, une perte de production ou des perturbations de circuit. Cette capacité est déterminée par les caractéristiques du système et de la charge, ainsi que par les interactions des commandes et protections continues et discrètes. La détermination de la stabilité de la tension à fortes perturbations nécessite l'examen de la réponse non linéaire du système de puissance sur une période de temps suffisante pour capturer les performances et les interactions de dispositifs tels que les moteurs, les changeurs de prises de transformateur de sous-charge et les limiteurs de courant de champ du générateur. La période d'étude d'intérêt peut s'étendre de quelques secondes à des dizaines de minutes.

3.3.2.2 Stabilité de la tension en cas de petites perturbations

Fait référence à la capacité du système à maintenir des tensions stables lorsqu'il est soumis à de petites perturbations telles que des changements progressifs de la charge du système. Cette forme de stabilité est influencée par les caractéristiques des charges, des contrôles continus et des contrôles discrets à un instant donné. Ce concept est utile pour déterminer, à tout instant, comment les tensions du système répondront à de petites modifications du système. Avec des hypothèses appropriées, les équations du système peuvent être linéarisées pour l'analyse, permettant ainsi le calcul d'informations de sensibilité précieuses, utiles pour identifier les facteurs influençant la stabilité. Cette linéarisation ne peut cependant pas tenir compte des effets non linéaires tels que les commandes de changeurs de prises (bandes mortes, pas de prises discrets et retards). Par conséquent, une combinaison d'analyses linéaires et non linéaires est utilisée de manière complémentaire.

3.3.3 Stabilité de la fréquence

La stabilité de la fréquence fait référence à la capacité d'un système électrique à maintenir une fréquence constante à la suite d'une perturbation grave du système entraînant un déséquilibre important entre la production et la charge. Elle dépend de la capacité à maintenir/rétablir l'équilibre entre la production et la charge du système, avec un minimum de perte de charge. L'instabilité qui peut en résulter se présente sous la forme de variations de fréquence soutenues entraînant le déclenchement de groupes de production et/ou de charges.

Les perturbations graves du système entraînent généralement de grandes divergences de fréquence, de flux de puissance, de tension et d'autres variables du système, invoquant ainsi les actions de processus, de commandes et de protections qui ne sont pas modélisées dans les études classiques de stabilité transitoire ou de stabilité de tension.

Dans les grands systèmes électriques interconnectés, ce type de situation est le plus souvent associé aux conditions suivant la division des systèmes en îlots. La stabilité dans ce cas est une question de savoir si chaque îlot atteindra ou non un état d'équilibre de fonctionnement avec une perte de charge minimale. En général, les problèmes de stabilité de fréquence sont associés à des insuffisances dans les réponses des équipements, à une mauvaise coordination des équipements de contrôle et de protection ou à une réserve de production insuffisante [KUN04].

3.4 SYSTÈME STABILISATEUR DE PUISSANCE PSS

3.4.1 Structure du PSS

Le contrôleur principal utilisé dans la littérature, est utilisé pour le stabilisateur à base de PSS. La structure du PSS est illustrée à la Figure (3.12) et sa fonction de transfert est la suivante :

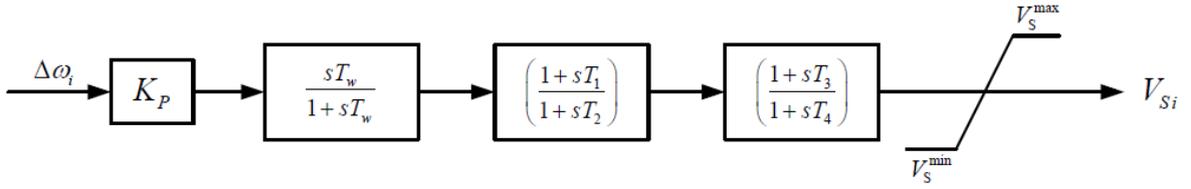


Figure. 3.12 : Schéma fonctionnel du PSS.

$$V_{Si} = K_p \left(\frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \cdot \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \cdot \left(\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \cdot \Delta\omega_i \quad (3.14)$$

$\Delta\omega$: signal d'entrée, c'est l'écart de vitesse ;

V_s : signal de sortie ;

K_p : gain du stabilisateur ;

T_w : constante de temps de compensation ;

T_1, T_2, T_3 et T_4 : constantes de temps du stabilisateur.

3.4.2 Linéarisation du PSS

A partir des équations différentielles (3.14), l'équation d'état dans la machine change.

$$\frac{dE_{fd,k}}{dt} = \frac{1}{T_{A,K}} \left[-E_{fd,k} + K_{A,k} (V_{ref,k} - V_k + V_{s,k}) \right] \quad (3.15)$$

La linéarisation de l'équation (3.15) est la suivante

$$\frac{d\Delta E_{fd,k}}{dt} = \frac{1}{T_{A,K}} \left[-\Delta E_{fd,k} + K_{A,k} (\Delta V_{ref,k} - \Delta V_k + \Delta V_{s,k}) \right] \quad (3.16)$$

Les équations de l'espace d'états pour PSS

$$\frac{dx_{pk1}}{dt} = -\frac{1}{T_w} x_{pk1} + K_p \Delta\dot{\omega}_k \quad (3.17)$$

$$\frac{dx_{pk2}}{dt} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) x_{pk1} - \frac{1}{T_2} x_{pk2} + K_p \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{\omega}_k \quad (3.18)$$

$$\frac{dx_{pk3}}{dt} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \frac{T_3}{T_4} x_{pk1} + \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_4} \frac{1}{T_2} \right) x_{pk2} - \frac{1}{T_4} x_{pk3} + K_p \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{\omega}_k \quad (3.19)$$

x_{pk1} , x_{pk2} et x_{pk3} sont des variable

La linéarisation des équations (3.16) - (3.19) sont :

$$\frac{d\Delta x_{pk1}}{dt} = -\frac{1}{T_w} \Delta x_{pk1} + K_p \Delta \dot{\omega}_k \quad (3.20)$$

$$\frac{d\Delta x_{pk2}}{dt} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \Delta x_{pk1} - \frac{1}{T_2} \Delta x_{pk2} + K_p \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{\omega}_k \quad (3.21)$$

$$\frac{d\Delta x_{pk3}}{dt} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \frac{T_3}{T_4} \Delta x_{pk1} + \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_4} \frac{1}{T_2} \right) \Delta x_{pk2} - \frac{1}{T_4} \Delta x_{pk3} + K_p \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{\omega}_k \quad (3.22)$$

L'équation d'état de notre système est :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} = A_{\text{sys}} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} + E \begin{bmatrix} \Delta P_{mi} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Les matrices A_{sys} et E sont définies comme suit :

$$A_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} A_{\text{sys},1} \\ \vdots \\ A_{\text{sys},4k-2} \\ \vdots \\ A_{\text{sys},4m} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad E = \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_{4k-2} \\ \vdots \\ E_{4m} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Après tout calcul fait on aura les équations suivantes :

$$\frac{d\Delta x_{pk1}}{dt} = -\frac{1}{T_w} \Delta x_{pk1} + K_p A_{\text{sys},4k-2} \Delta x + K_p E_{4k-2} \Delta u \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta x_{pk2}}{dt} &= \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \Delta x_{pk1} - \frac{1}{T_2} \Delta x_{pk2} + K_p \frac{T_1}{T_2} A_{\text{sys},4k-2} \Delta x \\ &= K_p \frac{T_1}{T_2} E_{4k-2} \Delta u \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta x_{pk3}}{dt} &= \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \frac{T_3}{T_4} \Delta x_{pk1} + \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_4} \frac{1}{T_2} \right) \Delta x_{pk2} - \frac{1}{T_4} \Delta x_{pk3} \\ &+ K_p \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} A_{\text{sys},4k-2} \Delta x + K_p \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} E_{4k-2} \Delta u \end{aligned} \quad (3.27)$$

Si les nouvelles équations d'état du système sont écrites sous forme matricielle pour le cas de l'ajout de PSS dans la machine ;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \\ \Delta x_{pk1} \\ \Delta x_{pk2} \\ \Delta x_{pk3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \\ \Delta x_{pk1} \\ \Delta x_{pk2} \\ \Delta x_{pk3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E \\ E_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{mi} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

L'équation (3.28) peut être écrite comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta x_{pk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta x_{pk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E \\ E_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{mi} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Les matrices A_{11} , A_{12} , A_{21} et A_{22} , voir réf [EKI15].

3.4.3 Détermination du site le plus approprié pour le PSS

Pour la conception PSS, le taux d'amortissement souhaité et la partie réelle de la valeur propre sont pris en compte. Le PSS est conçu pour les machines avec le coefficient de participation le plus élevé.

➤ **Troisième point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_3, Q_3).) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (3.16 a)), et une augmentation soudaine de 30% de la puissance mécanique à $t=1s$ (figure (3.16.b)).

Les résultats de simulations représentés dans les figures ci-dessous montrent respectivement la réponse dynamique de la déviation de vitesse de rotation ($\Delta\omega$), l'angle rotorique (δ), et le couple électromécanique (T_e) durant les trois phases :

- phase d'équilibre (avant perturbation)
- phase transitoire (pendant la perturbation)
- la nouvelle phase d'équilibre (après l'élimination du défaut).

D'après les résultats de simulations on remarque que le PSS fournit un amortissement des oscillations électromécanique et le système devient stable et atteint la vitesse de synchronisme mais avec un temps de réponse lent.

➤ **Système multimachine (3 générateurs et 9 bus)**

On suppose qu'un défaut triphasé est appliqué au bus 7 et que le défaut est éliminé par un déclenchement permanent de la ligne entre le bus 5 et le bus 7. Le temps de défaut et de retour à l'état initial est choisi de l'ordre de 6 périodes du réseau (0.1 s), figure (3.17).

D'après les différents points de simulation effectués et les résultats obtenus pour les deux systèmes, on remarque l'efficacité des PSS sur la stabilité du système de puissance.

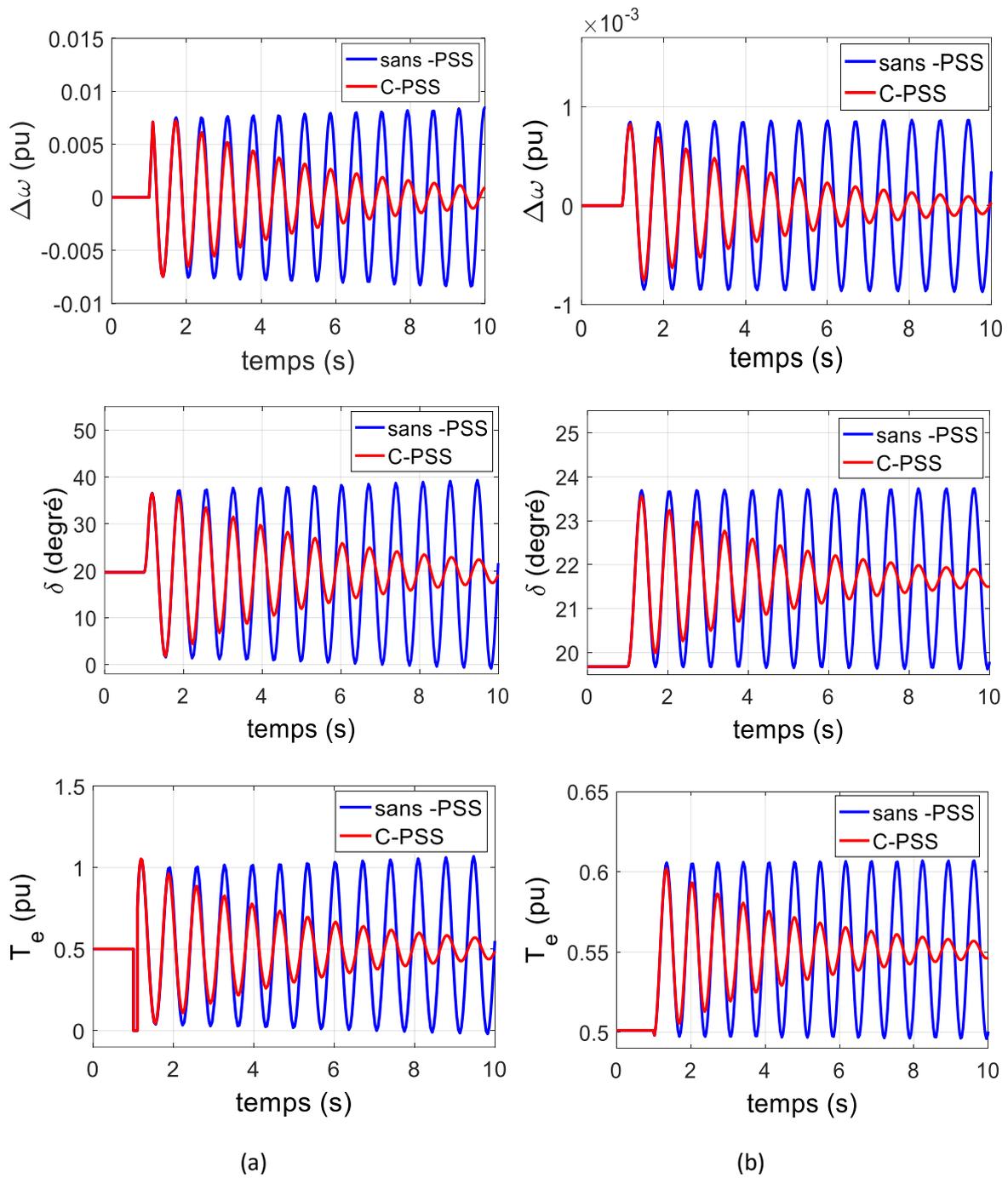


Figure. 3.14 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.8$, $Q=0.6$

(a) grand défaut. (b) petit défaut.

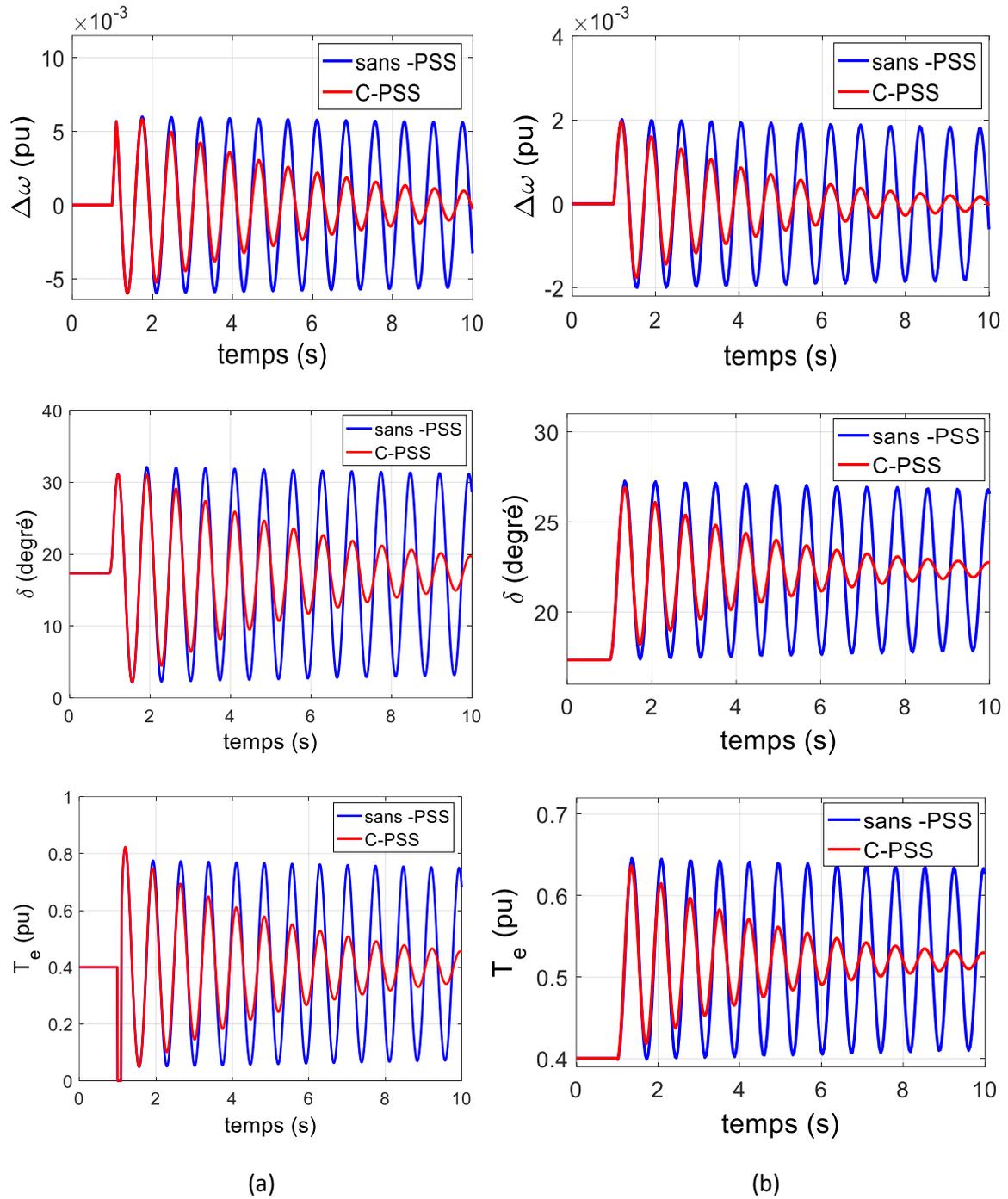


Figure. 3.15 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.4$, $Q=0.2$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

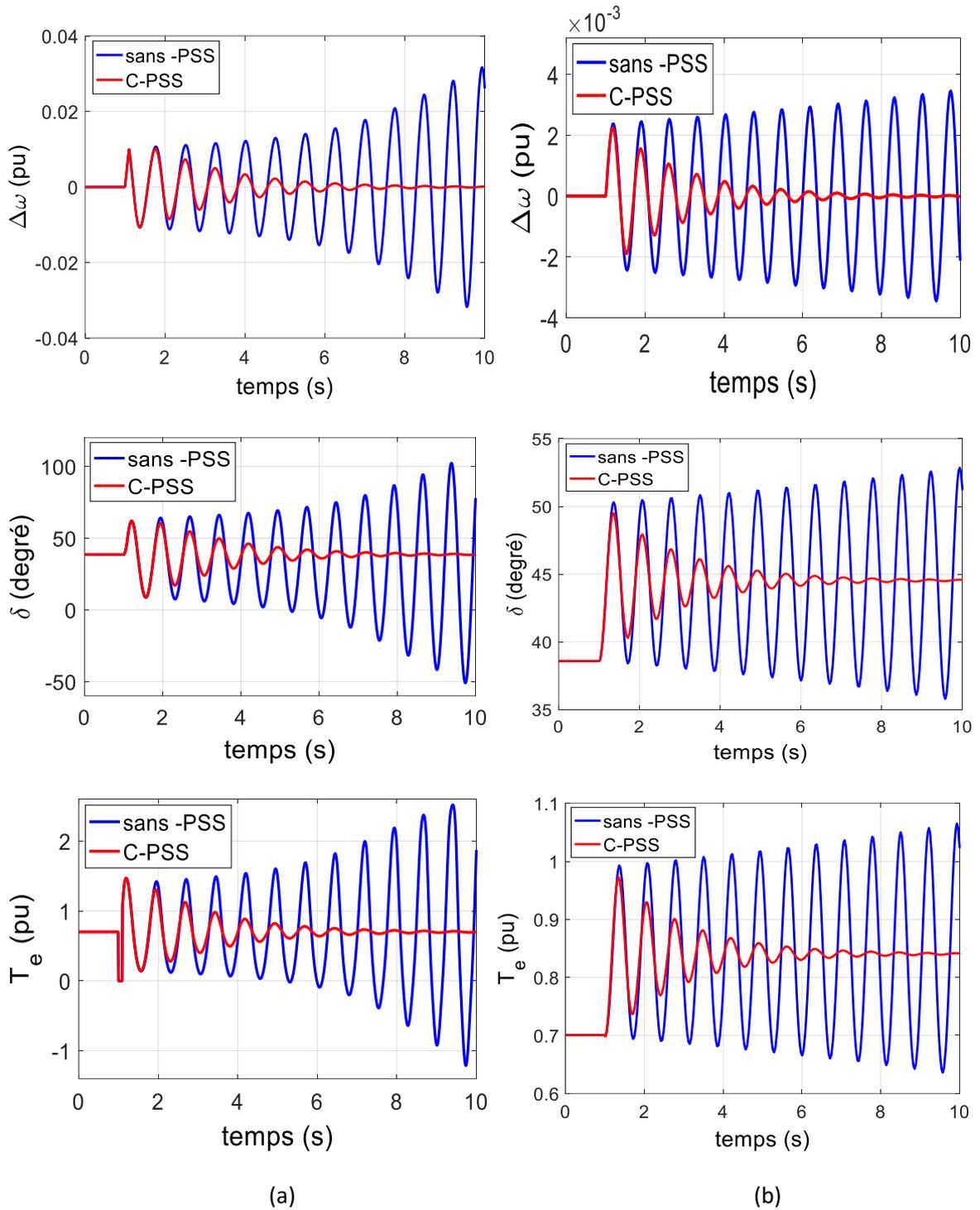


Figure. 3.16 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e $P=0.7$, $Q=-0.2$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

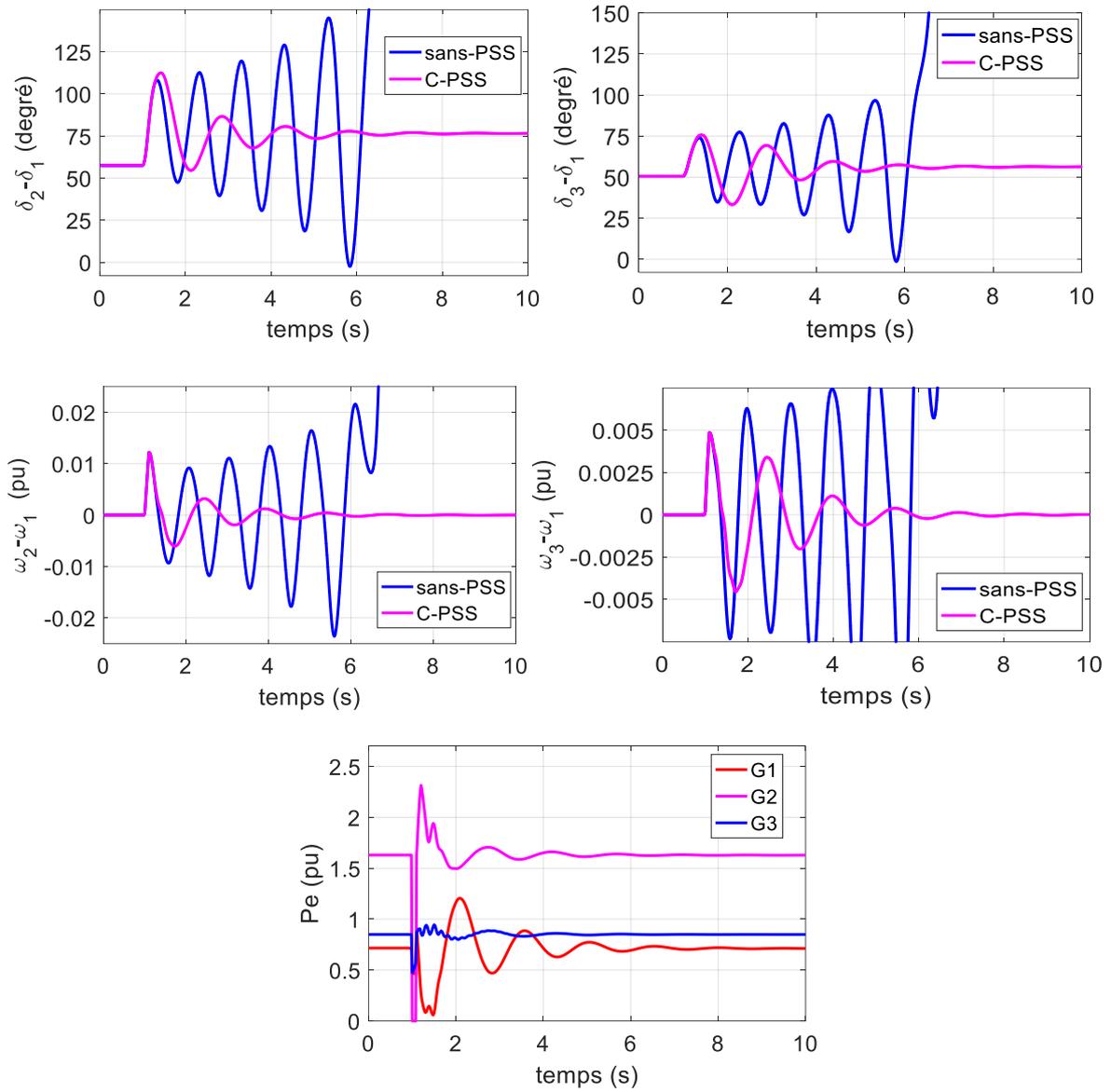


Figure. 3.17 : Réponse du système multimachine avec grand défaut.

3.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté 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). Cette classification est nécessaire pour mieux comprendre les mécanismes : des phénomènes de l'instabilité du système et des dispositifs nécessaires pour assurer la stabilité du système.

Suite à une perturbation, le système de puissance peut être transitoirement stable mais il peut présenter par la suite des oscillations divergentes. Suite à une grande perturbation, le régulateur de tension du système d'excitation de générateur, ayant une action puissante et rapide, contribue efficacement à augmenter les puissances électriques des générateurs pendant la première oscillation. Cela contribue à diminuer la puissance d'accélération du générateur en augmentant le couple synchronisant.

En conséquence, la plage de stabilité transitoire est bien améliorée. Malheureusement, cet avantage est contrebalancé par l'impact négatif du système d'excitation sur l'amortissement des oscillations en diminuant le couple d'amortissement.

Les stabilisateurs de puissance (PSS), par leur efficacité et leur coût réduit, sont les moyens habituels non seulement pour éliminer les effets négatifs des régulateurs de tension, mais aussi pour amortir les oscillations électromécaniques du système. En outre, l'amortissement assuré par les PSS permet au système de fonctionner au-delà même de la limite de la stabilité à l'état équilibré.

D'après les simulations effectuées et les résultats obtenus nous avons bien remarqué l'impact de l'installation du PSS pour l'amélioration de la stabilité du système de puissance subit par les différents types de perturbations. Afin d'optimiser les paramètres des régulateur PSS, le chapitre suivant aborde les techniques d'optimisation.

Chapitre 4 : Conception optimisée des PSS par les méthodes métaheuristiques



4.1 Introduction

Les techniques d'optimisation métaheuristiques sont des algorithmes heuristiques généraux applicables à une grande variété de problèmes, adaptées à la résolution de problèmes pour lesquels il est difficile de trouver un optimum global ou de bons optimums locaux par des méthodes classiques [HER19].

Les métaheuristiques sont apparues à partir des années 80, le mot « métaheuristique » est composé de deux mots grecs, le premier est signifié : « au-delà ou dans un niveau supérieur » et le deuxième signifie : « trouver ou découvrir ».

Les méthodes d'optimisation métaheuristiques disposent les caractéristiques communes suivantes :

- ✓ Elles sont généralement non- déterministes et elles peuvent ne pas trouver la solution optimale, et encore moins prouver l'optimalité de la solution trouvée.
- ✓ Elles sont inspirées par des analogies avec la physique (recuit simulé), avec la biologie (algorithmes évolutionnaires) ou encore l'éthologie (l'intelligence en essaim).
- ✓ Elles sont stochastiques, ce qui permet de faire face à l'explosion combinatoire des possibilités.
- ✓ Elles sont à l'origine dédiées aux problèmes combinatoires, où les paramètres ne peuvent prendre que des valeurs discrètes.

Cependant, elles ont l'inconvénient d'avoir plusieurs paramètres à régler, et le temps de calcul est élevé.

Généralement, les méthodes métaheuristiques sont classifiées en deux catégories :

- ✓ Les méthodes de trajectoire qui construisent une trajectoire dans l'espace des solutions et qui ne manipulent qu'une seule solution à chaque génération.
- ✓ Les méthodes basées sur une population de solutions comme les algorithmes évolutionnaires (les algorithmes génétiques GA, l'évolution différentielle DE ...) et

l'intelligence en essaim (l'optimisation par essaim de particules PSO, l'optimisation basés sur la biogéographie BBO ...).

On appelle la fonction coût, critère d'optimisation (fitness), c'est la fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (trouver un optimum).

4.2 Algorithme génétique

4.2.1 Éléments d'un algorithme génétique

Les termes utilisés pour l'algorithme génétique sont identiques à ceux utilisés en science de la génétique voir (figure (4.1)). On parlera ainsi d'une population composée d'individus, tels que [MEK18] :

- ✓ L'individu est composé d'un ou plusieurs chromosomes, représentant une solution potentielle du problème ;
- ✓ Les chromosomes sont eux-mêmes constitués de gènes et représentent la solution potentielle sous forme codée ;
- ✓ Les gènes contiennent les caractères héréditaires de l'individu et représentent la partie élémentaire d'un chromosome ;
- ✓ La fonction fitness est l'évaluation d'un individu, elle permet de définir le degré de performance d'un individu par rapport à la fonction à optimiser.

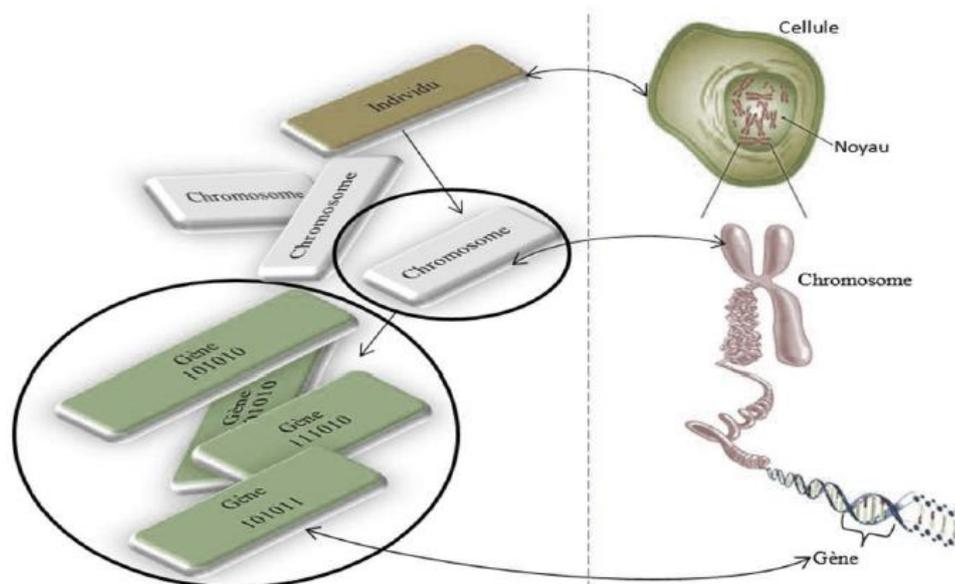


Figure. 4.1 : Schématisation et analogie des termes d'un algorithme génétique.

4.2.2 Caractéristiques des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques, en tant qu'approche de résolution de problèmes, se caractérisent par certains aspects particuliers : le codage des paramètres du problème à traiter, l'espace de recherche et la fonction d'évaluation qui permet de déterminer la pertinence d'une solution trouvée et l'évolution d'une génération à une autre par la sélection des chromosomes qui participent à la reproduction et les chromosomes à disparaître.

4.2.2.1 Codage

Le codage est une fonction qui permet de passer de la donnée réelle du problème traité à la donnée utilisée par l'algorithme génétique. Le choix du codage est l'élément le plus important dans la conception de l'algorithme puisqu'il permet d'une part de représenter les données, les paramètres et les solutions et d'autre part il influe sur la mise en œuvre des opérations génétiques telles que le croisement et la mutation qui influent directement sur le bon déroulement de l'algorithme génétique et de leur convergence vers la bonne solution. Généralement on a trois types de codage les plus utilisés [CHO10] :

a. Codage binaire

Chaque gène dispose du même alphabet binaire $\{0, 1\}$. Chaque paramètre x_i situé dans un intervalle $[x_{i \min}, x_{i \max}]$, est associé à une chaîne binaire $b_0, b_1, \dots, b_{l_{xi}-1}$ définie sur l_{xi} bits. A chaque chaîne correspond une valeur entière naturelle :

$$g_i = \sum_{i=0}^{L_{xi}-1} 2^i \cdot b_i \quad (4.1)$$

Cette chaîne doit être décodée pour pouvoir calculer la valeur de la fonction coût (fonction d'évaluation) qui lui est associée. Le paramètre réel x_i de l'espace de recherche relatif à g_i est obtenu par interpolation linéaire :

$$x_i = x_{i \min} + \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2^{L_{xi}-1}} \quad (4.2)$$

b. codage réel

Cela peut être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle. La représentation des gènes par des nombres réels arrive naturellement dans le cas d'optimisation de paramètres avec des variables comprises dans des domaines continus. La taille des chromosomes est la même que la taille du vecteur qui sera la solution du problème.

c. Codage en base n

Dans ce type de codage, les gènes constituant un chromosome sont des chiffres exprimés dans une base de numération n, ce qui permet de représenter n valeurs discrètes.

4.2.2.2 Fonction d'évaluation

La fonction de performance qu'on appelle aussi fonction d'adaptation, fonction objectif ou fonction *fitness* associe une valeur de performance à chaque individu ce qui offre la possibilité de le comparer à d'autres individus et permet à l'algorithme génétique de déterminer qu'un individu sera sélectionné pour être reproduit ou pour déterminer s'il sera remplacé.

4.2.3 Génération de population

La création d'une nouvelle génération de population se fait en deux étapes :

➤ par sélection, ce qui va permettre une meilleure reproduction des bons individus par rapport aux individus moins bien adaptés.

➤ par reproduction (croisement et mutation), ce qui va permettre d'enrichir la population avec de nouveaux individus et de rendre l'algorithme génétique susceptible d'atteindre tous les points de l'espace d'états.

4.2.3.1 Sélection

La sélection consiste à choisir les individus qui vont participer à la reproduction de la population future. La fonction de sélection choisit, de façon déterministe ou selon une méthode probabiliste (roulette, tournoi, etc.)

a. Sélection par rang

Cette méthode consiste à attribuer à chaque individu son classement en fonction de la valeur de la fonction objectif. Pour un problème de maximisation, les individus sont classés dans un ordre décroissant des valeurs de la fonction objectif. Ainsi le plus mauvais individu est (celui qui possède la plus petite valeur de la fonction objectif) prendra le rang 1. Pour le problème de minimisation, le classement sera l'inverse du cas précédent. On prélève ensuite la nouvelle population à partir d'ensemble d'individus ordonnés en utilisant des probabilités indexées sur les rangs des individus [ZAG15].

$$\text{La probabilité de sélection } (parent_i) = \frac{\text{Rang}(parent_i)}{\sum_{j=population} \text{Rang}(parent_j)} \quad (4.3)$$

b. Sélection par roulette

Cette méthode consiste à associer à chaque individu i une probabilité de sélection notée $Prob_i$ proportionnelle à sa valeur F_i de la fonction de objectif.

$$Prob_i = \frac{F_i}{\sum_{j=population} (F_j)} \quad (4.4)$$

Chaque individu est alors reproduit avec la probabilité $Prob_i$, certains individus (« les bons») seront plus reproduits et d'autres (« les mauvais ») éliminés. Pour un problème de minimisation, on utilise une probabilité de sélection pour un individu i égal à $\frac{1-Prob_i}{N-1}$

c. Sélection par Tournoi

Elle consiste à sélectionner aléatoirement un nombre k d'individus dans la population, et de choisir parmi eux celui qui a la meilleure performance. On organise autant de tournois qu'il doit y avoir d'individus à sélectionner.

4.2.3.2 Le croisement

Le croisement est l'échange d'un certain nombre de bits entre deux chromosomes représentant deux individus de la population. En choisissant aléatoirement deux individus parents, l'opération de croisement donne naissance à deux nouveaux individus. [TAL14]

Il existe différents types de croisements pour un algorithme génétique classique

a. Croisement en un point

La population courante est divisée en deux sous populations de même taille ($N/2$) et chaque couple formé par un membre provenant de chaque sous population participe à un croisement avec une probabilité pc . Si le croisement a eu lieu entre deux chromosomes parents ($ch1$ et $ch2$), constitués de l gènes, on tire aléatoirement une position de chacun des parents. On échange ensuite les deux sous chaînes terminales de chacun des chromosomes, ce qui produit deux enfants $ch'1$ et $ch'2$ comme indiqué sur la figure (4.2.a).

On peut noter que le nombre de points de croisements ainsi que la probabilité de croisement pc permettent d'introduire plus ou moins de diversité. En effet, plus le nombre de points de croisements sera grand et plus la probabilité de croisement sera élevée plus il y aura d'échange de segments, donc d'échange de paramètres, d'information, et plus le nombre de points de croisements sera petit et plus la probabilité de croisement sera faible, moins le croisement apportera de diversité [CHO10] [TAL14] [GUE17].

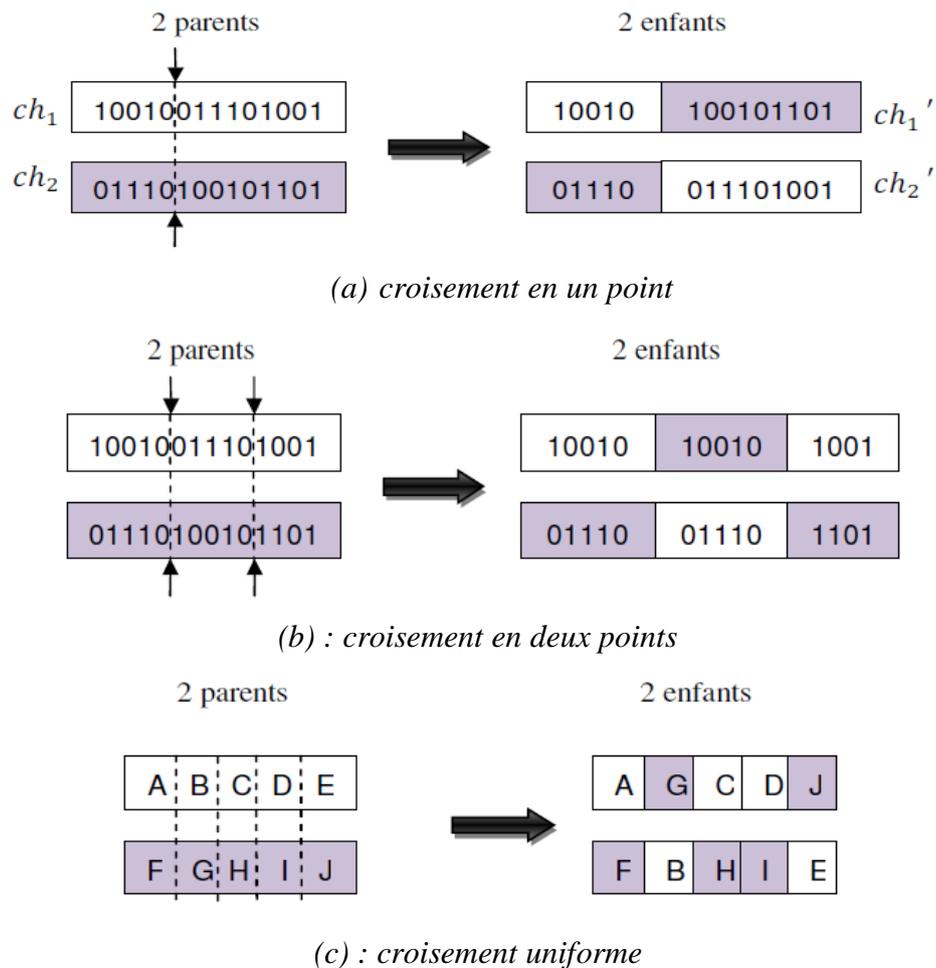


Figure. 4.2 : Exemples d'opérations de croisement.

b. Croisement uniforme

Il consiste à définir de manière aléatoire un "masque", c'est-à-dire une chaîne de bits de même longueur que les chromosomes des parents sur lesquels il sera appliqué. Ce masque est destiné à savoir, pour chaque locus, de quel parent le premier fils devra hériter du gène s'y trouvant ; si face à un locus le masque présente un 0, le fils héritera le gène s'y trouvant du parent #1, s'il présente un 1 il en héritera du parent #2. La création du fils #2 se fait de manière symétrique : si pour un gène donné le masque indique que le fils #1 devra recevoir celui-ci du parent #1 alors le fils #2 le recevra du parent #2, et si le fils #1 le reçoit du parent #2 alors le fils #2 le recevra du parent #1 [TAL14] [GUE17].

c. Croisement barycentre

Deux gènes $ch1$ et $ch2$ sont sélectionnés dans chacun des parents à la même position i . Ils définissent deux nouveaux gènes $ch'1$ et $ch'2$ par combinaison linéaire [CHO10] [TAL14]:

$$\begin{cases} ch_1' = \alpha ch_1(i) + (1-\alpha)ch_2(i) \\ ch_2' = \alpha ch_2(i) + (1-\alpha)ch_1(i) \end{cases} \quad (4.5)$$

Où α est un coefficient de pondération aléatoire adapté au domaine d'extension des gènes.

4.2.3.3 Mutation

Une mutation consiste simplement en l'inversion d'un bit se trouvant en un locus bien particulier avec une probabilité pm très faible. L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de la population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un "élément perturbateur" ; il introduit du "bruit" au sein de la population.

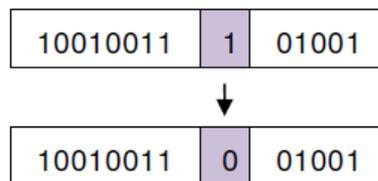


Figure. 4.3 : Exemple d'une opération de mutation.

Il existe plusieurs méthodes de mutation parmi lesquels on trouve :

a. Mutation binaire

Dans le cas du codage binaire, chaque bit est remplacé par son complément. Il existe une variante où plusieurs bits peuvent muter au sein d'un même chromosome. Un test sous le taux de mutation est effectué non plus pour le chromosome mais pour chacun de ses bits : en cas de succès, un nouveau bit tiré au hasard remplace l'ancien.

b. Mutation réelle

La mutation réelle ne se différencie de la mutation binaire que par la nature de l'élément qu'elle altère : ce n'est plus un bit qui est inversé, mais une variable réelle qui est de nouveau tirée au hasard sur son intervalle de définition.

c. Mutation uniforme

En supposant fixée la probabilité de mutation p_m , un tirage au sort pour chaque gène x_k d'un chromosome ch permet de décider si ce gène doit être ou non modifié. Le gène x_k sélectionné est remplacé par une valeur quelconque x'_k tirée aléatoirement dans l'intervalle $[x_k^{\min}, x_k^{\max}]$

4.2.3.4 Critère d'arrêt

Le cycle de génération et de sélection de population est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait.

Dans notre travail on a choisi les paramètres (voir tableau annexe B1).

La figure suivante montre l'organigramme de l'algorithme génétique proposée.

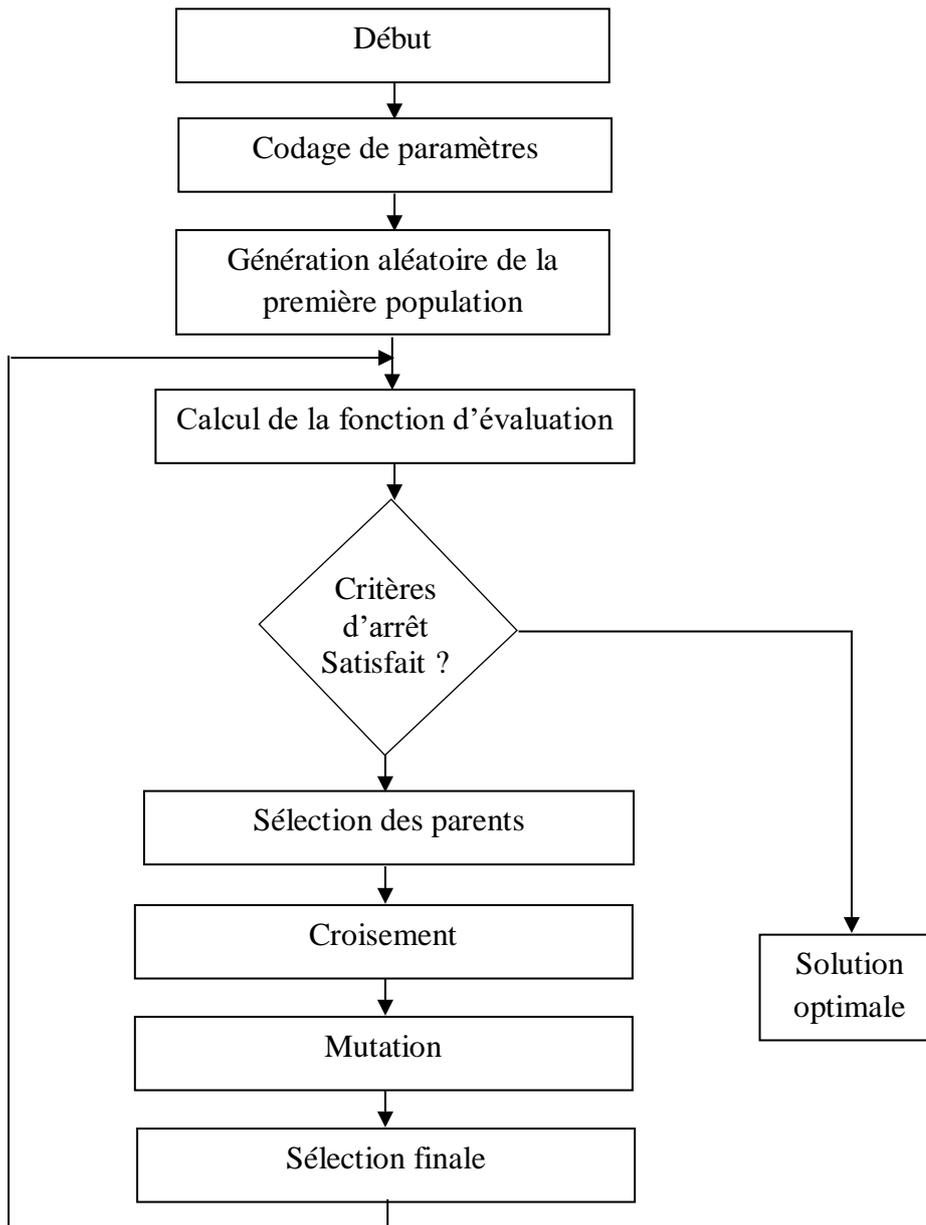


Figure. 4.4: *Algorithme d'optimisation par l'algorithme génétique (AG).*

4.3 Optimisation par essais de particules

4.3.1 Termes techniques

- **Essaim** : la population ; ensemble des particules qui contribuent à cet essaim.
- **Particule** : individu (membre) de l'essaim. Chaque particule représente une solution potentielle au problème d'optimisation à résoudre. La position d'une particule est déterminée par la solution courante qu'elle représente.
- **pbest** (record personnel) : la meilleure position personnelle d'une particule à un moment donné. Autrement dit, la position d'une particule qui a fourni le plus de succès (mesuré en termes d'une valeur scalaire analogue à l'évaluation en algorithmes évolutionnaires).
- **lbest** (record local) : la position de la meilleure particule du voisinage d'une particule donnée de l'essaim.
- **gbest** (record global) : la position de la meilleure particule de l'essaim entier.
- **Leader** : une particule utilisée pour guider une autre vers de meilleures régions de l'espace de recherche.
- **Déplacement** (vecteur) : le vecteur manipulant le processus d'optimisation. Il détermine la direction dans laquelle une particule doit voler (déplacer) afin d'améliorer sa position actuelle.
- **Inertie** : notée par W , c'est le paramètre de poids qui contrôle l'impact des déplacements précédents sur le déplacement courant d'une particule.
- **Coefficients d'accélération** : des constants qui représentent l'attraction d'une particule vers son propre succès ou celui des voisins. Les deux facteurs constructifs les plus souvent utilisés sont : le facteur personnelle C_1 représentant l'attraction d'une particule vers son propre succès et le facteur social C_2 représentant l'attraction vers le succès du groupe.
- **Voisinage** : l'ensemble des particules entrant dans la détermination du record local (lbest) d'une particule de l'essaim [AME16].

4.3.2 Principe de l'Algorithme PSO

L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller à la même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en oeuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs [MAS17] [HER19].

On dispose une fonction objective à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de recherche de la fonction objective. Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de recherche afin de trouver la solution optimale.

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 entre elles sa propre meilleure performance ;

➤ A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a 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 voisines.

Le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche. Naturellement, pour pouvoir être programmé, tout ceci est formalisé dans des équations de mouvement. Un point intéressant est que, contrairement à bien d'autres heuristiques qui restent purement expérimentales, il existe une analyse mathématique précisant les conditions de convergence et le choix des paramètres.

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules «voisines» (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage.

Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, «survole» l'espace de recherche, à la recherche de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [HER19] :

- Une composante d'inertie : 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.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure (4.5).

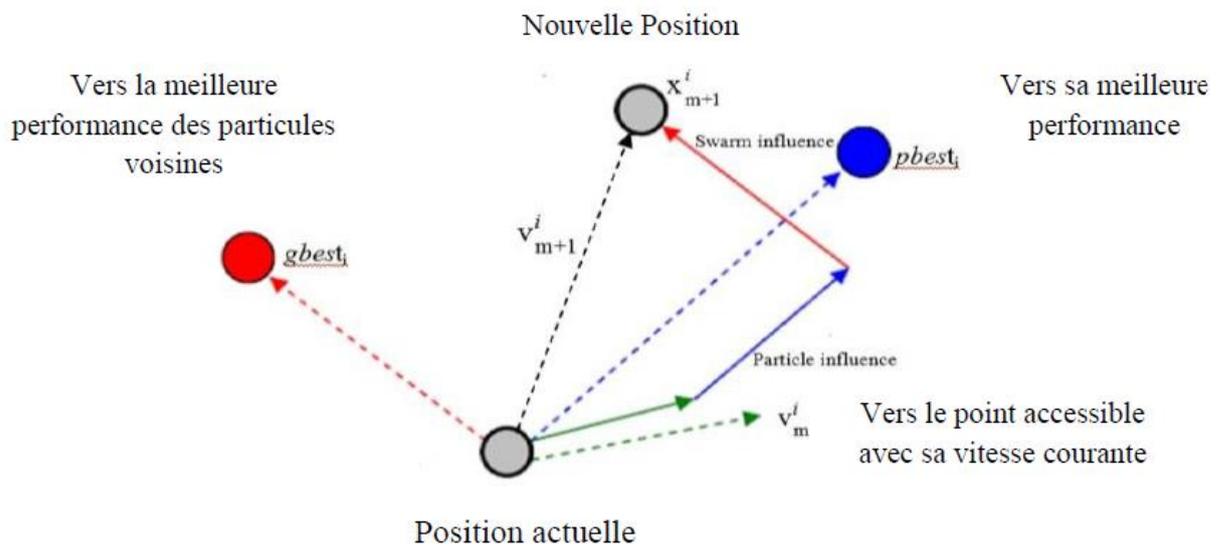


Figure. 4.5 : Déplacement d'une particule.

4.3.3 Formalisation

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\tilde{x}^i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\tilde{v}^i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$.

La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point.

Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $\check{P}_{besti} = (p_{besti1}, p_{besti2}, \dots, p_{bestiD})$. La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $\tilde{G}_{best} = (g_{best1}, g_{best2}, \dots, g_{bestD})$. Nous nous référons à la version globale

de PSO, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation \tilde{G}_{best} (global best).

Au départ de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire/régulière dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant linéairement les trois composantes citées ci-dessus. En effet, à l'itération $t + 1$, le vecteur vitesse et le vecteur position sont calculés à partir de l'équation (4.6) et de l'équation (4.7), respectivement.

$$V_{i,j}^{t+1} = \underbrace{W.V_{i,j}^t}_{\text{inertia}} + \underbrace{C_1 * rand_{1,i,j}' * (pbest_{1,i,j}' - x_{1,i,j}')}_{\text{influence cognitive}} + \underbrace{C_2 * rand_{2,i,j}' * (pbest_{2,i,j}' - x_{2,i,j}')}_{\text{influence sociale}} \quad (4.6)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1} \quad j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad (4.7)$$

Où W est une constante, appelée coefficient d'inertie ; C_1 et C_2 sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération ; r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1]$, à chaque itération t et pour chaque dimension j .

Les trois composantes mentionnées ci-dessus (i.e. d'inertie, cognitive et sociale) sont représentées dans l'équation (4.6) par les termes suivants :

- $W.V_{i,j}^t$ correspond à la composante d'inertie du déplacement, où le paramètre W contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur ;
- $C_1 * rand_{1,i,j}' * (pbest_{1,i,j}' - x_{1,i,j}')$ correspond à la composante cognitive du déplacement, où le paramètre C_1 contrôle le comportement cognitif de la particule ;
- $C_2 * rand_{2,i,j}' * (pbest_{2,i,j}' - x_{2,i,j}')$ correspond à la composante sociale du déplacement, où le paramètre C_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées et les deux vecteurs \tilde{Pbest}_i et \tilde{Gbest} sont mis à jour, à l'itération $t + 1$, suivant les deux équations (4.8) (dans le cas d'une minimisation) et (4.9) (dans une version globale de PSO), respectivement.

$$\tilde{Pbest}_i(t+1) = \begin{cases} \tilde{Pbest}_i(t), & \text{si } f(\bar{x}_i(t+1)) \geq \tilde{Pbest}_i(t) \\ \bar{x}_i(t+1), & \text{si non} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\tilde{Gbest}_i(t+1) = \left\{ \arg \min_{\tilde{pbest}_i} f(\tilde{pbest}_i(t+1)), \quad 1 \leq i \leq N \right\} \quad (4.9)$$

Dans notre travail on a choisi les paramètres (voir tableau annexe B2).

La figure suivante montre l'organigramme de colonie d'abeilles proposée.

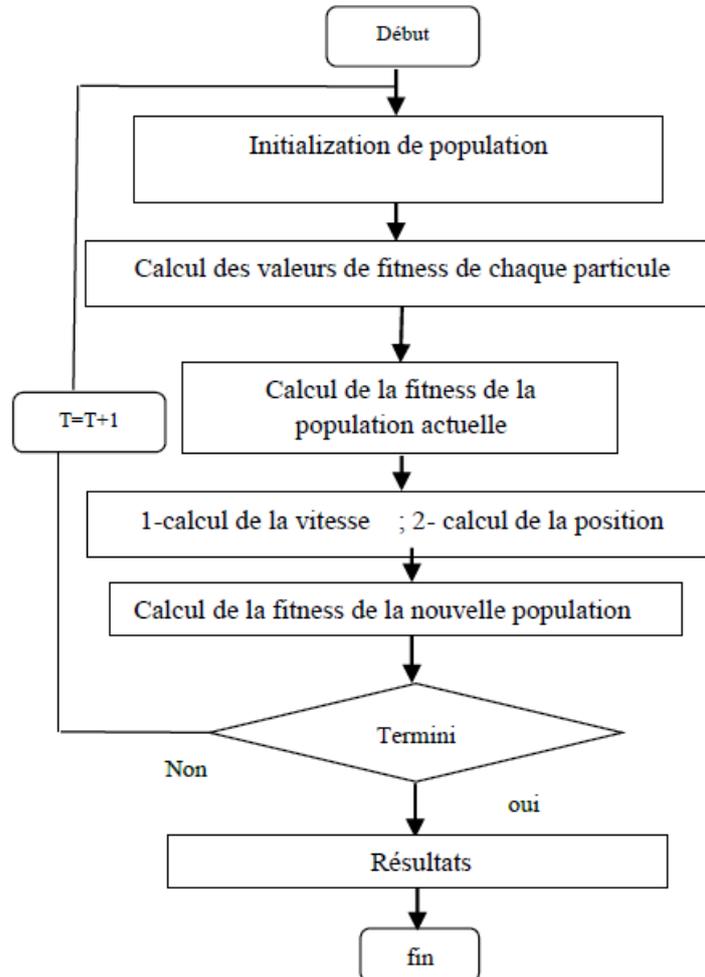


Figure. 4.6 : *Algorithme d'optimisation par essaim de particule (PSO).*

4.4 Algorithme de colonies d'abeilles artificielles

Les abeilles sont des insectes sociaux qui vivent en colonies, elles sont très organisées et très rigoureuses. Dans une colonie d'abeilles, les individus sont organisés pour effectuer les différentes tâches nécessaires à la survie de la colonie. En effet, ils sont engagés dans plusieurs activités : la recherche de nourriture, l'accouplement, la défense de la ruche, l'essaimage, etc. D'une manière générale, la colonie d'abeilles caractérise un système où le travail collectif des entités interagissant entre-elles, fait émerger un comportement complexe global. La coopération entre les individus est réalisée d'une manière distribuée sans aucun

mécanisme de contrôle centralisé, ce qui rend les modèles de l'intelligence en essaim assez manipulables.

De nombreux algorithmes tentent d'utiliser les principes du comportement collectif des abeilles pour résoudre plusieurs problèmes difficiles dans différents domaines. Généralement, on distingue deux principales classes d'algorithmes d'optimisation qui se fondent sur le comportement des abeilles :

- Les algorithmes qui s'inspirent des mécanismes génétiques et du comportement naturel associés au processus d'accouplement d'abeilles.
- Les algorithmes inspirés du comportement naturel associé à la recherche de nourriture chez les abeilles.

4.4.1 Modèle comportemental de recherche de nourriture des essaims d'abeilles

La recherche de nourriture est l'une des tâches complexes réalisées par un essaim d'abeilles, Le modèle minimal de sélection de nourriture qui conduit à l'émergence de l'intelligence collective des essaims d'abeilles mellifères se compose de trois composantes essentielles : les sources de nourriture, les butineuses employées et les butineuses sans emploi, et le modèle définit deux principaux modes de comportement : le recrutement à une riche source de nectar et l'abandon d'une source pauvre [KAR12] [SHA16].

a. Sources de nourriture

La qualité d'une source de nourriture dépend de nombreux facteurs tels que sa proximité de la ruche, sa richesse, sa concentration d'énergie, et la facilité d'extraction de cette énergie. Par souci de simplicité, la rentabilité d'une source de nourriture peut être évaluée à partir d'un seul descripteur appelé fonction d'adéquation.

b. Abeilles employées

Elles sont associées à une source de nourriture particulière en qualité d'exploitants effectifs du site ou bien employées pour l'exploitation. Elles diffusent des informations sur cette source particulière, sa distance, sa direction et sa rentabilité et partagent ces informations avec une certaine probabilité.

c. Abeilles sans emploi

Elles se trouvent continuellement en quête d'une source de nourriture à exploiter. On distingue deux types possibles d'abeilles sans emploi: les abeilles dites " les éclaireuses" qui cherchent de nouvelles sources en prospectant le voisinage de la ruche et les abeilles " spectatrices " qui attendent dans la ruche pour recevoir les informations partagées par les abeilles employées. Le nombre d'abeilles Scout est environ 5-10% de la population.

L'échange d'informations entre les abeilles est l'événement le plus important dans la formation du savoir collectif. En examinant la ruche entière, il est possible de distinguer certaines parties qui existent généralement dans toutes les ruches. La partie la plus importante de la ruche en ce qui concerne l'échange d'informations est la zone de danse. La communication entre les abeilles liée à la qualité des sources de nourriture a lieu dans la zone de danse. Cette danse s'appelle une danse frétilante. Étant donné que les informations sur toutes les sources riches actuelles sont disponibles pour une spectatrice sur la piste de danse, elle regarde probablement de nombreuses danses et décide de s'employer à la source la plus rentable. Il y a une plus grande probabilité que les spectatrices choisissent des sources plus rentables car plus d'informations circulent sur les sources les plus rentables. Ainsi, le recrutement est proportionnel à la rentabilité de la source de nourriture [KAR07].

4.4.2 Algorithme de colonie d'abeilles artificielles

La description de l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles est donnée par les étapes suivantes [AWA19] [AKA12][HU19]:

Étape 1 : initialisation des paramètres de l'algorithme ABC

Fondamentalement, il y a trois paramètres de contrôle dans l'algorithme ABC qui doivent être initialisés pour tout problème d'optimisation.

Ces paramètres sont le nombre de solutions (SN) qui représente le nombre de sources de nourriture dans la population et qui est similaire à la taille de la population dans l'AG ; le nombre maximum de cycles (MCN) qui est le nombre maximum de générations ; et la limite qui est responsable de l'abandon de la source de nourriture, chaque fois qu'elle n'est pas améliorée pendant un nombre limité de générations et qui est fondamentalement utilisée pour diversifier la recherche.

Étape 2 : génération de la population initiale

L'algorithme ABC commence par une population de solutions initiales (c'est-à-dire des sources de nourriture), $\text{population} = [x_1, x_2, \dots, x_{SN}]^T$, de taille SN. Chaque solution est générée aléatoirement en utilisant l'équation. (1):

$$x_{s,j} = LB_j + (UB_j - LB_j) \times U(0, 1) \quad (4.10)$$

où $s \in \{1, 2, \dots, SN\}$ et $j \in \{1, 2, \dots, D\}$. UB_j et LB_j sont les limites supérieure et inférieure de la variable de décision $x_{s,j}$. La longueur de chaque solution est déterminée par D , et $U(0, 1)$

génère un nombre aléatoire uniforme entre 0 et 1. Notez que les coûts de nectar (ou coûts de fitness) des solutions générées sont calculés et stockés par ordre croissant dans la population.

Étape 3 : envoi de l'abeille employée

Dans l'algorithme ABC, on suppose que chaque source de nourriture est associée à une abeille employée, dans laquelle chaque abeille employée modifie la source de nourriture x_s dans sa mémoire pour produire une nouvelle source de nourriture voisine x'_s conformément à l'équation de recherche formulée dans l'équation (4.11). Lorsque le coût de la fitness de la nouvelle source de nourriture voisine x'_s est meilleur que le coût de fitness de l'ancienne source de nourriture x_s . L'abeille employée mémorise la nouvelle source de nourriture ; sinon, elle conserve l'ancienne source de nourriture dans sa population.

$$x'_{s,j} = x_{s,j} + \text{rnd}(-1,1)(x_{s,j} - x_{k,j}) \quad (4.11)$$

Notez que, comme indiqué dans l'équation. (2), $x_{k,j}$ représentent la variable de décision à la $j^{\text{ème}}$ position dans une source de nourriture x_k choisie au hasard par une abeille employée autre que la source de nourriture d'origine x_s ; $\text{rand}(-1,1)$ est un nombre aléatoire entre -1 et 1 qui contrôle la génération de la source de nourriture voisine autour de $x_{s,j}$ et aide visuellement les abeilles à faire la comparaison entre deux sources de nourriture.

Étape 4 : calcul des valeurs de probabilité

Ici, l'abeille employée partage les informations sur les sources de nourriture liées aux positions et aux coûts de fitness avec l'abeille spectatrice sur la piste de danse, après avoir terminé ses recherches. Ensuite, l'abeille observatrice calcule les coûts de fitness de toutes les sources de nourriture prélevées sur l'abeille employée et sélectionne une source de nourriture avec une probabilité liée à la qualité de son nectar qui dépend des coûts de fitness des sources dans la population.

Dans ce cas, le schéma de sélection proportionnelle est utilisé par l'ABC d'origine comme indiqué dans l'équation (4.12).

$$p_s = \frac{f_s}{\sum_{i=1}^{SN} f_i} \quad (4.12)$$

où f_s représente le coût le coût de la fitness de la source de nourriture x_s dans la position s , et p_s est la probabilité de la source de nourriture x_s .

Étape 5 : envoyer l'abeille spectatrice

Une fois que les coûts de fitness de toutes les sources de nourriture sélectionnées par l'abeille employée sont évalués par l'abeille spectatrice, celle-ci choisit une source de nourriture x_s en fonction de la valeur de la probabilité de sélection p_s . Ensuite, la source de nourriture sélectionnée x_s est modifiée pour produire une nouvelle source de nourriture voisine x'_s en utilisant la même équation de recherche dans l'équation (4.11). Comme pour l'abeille employée, si la nouvelle source de nourriture voisine x'_s a un coût de fitness supérieur ou égal à celui de l'ancienne x_s , elle remplace l'ancienne et devient ainsi un nouveau membre de la population.

Encore une fois, le processus de génération de la source de nourriture voisine x'_s sur la base de la source de nourriture sélectionnée x_s dans l'opérateur abeille spectatrice dépend de la valeur d'origine $x_{s,j}$ de la source de nourriture sélectionnée. Ensuite, la distance entre la valeur d'origine de la source de nourriture sélectionnée et une valeur sélectionnée d'une source de nourriture voisine dans la population ($x_{s,j} - x_{k,j}$) est ajoutée à la valeur d'origine $x_{s,j}$. Ce processus pourrait être amélioré en sélectionnant la valeur d'origine parmi les sources alimentaires les plus prometteuses de la population pour accélérer la convergence.

Étape 6 : envoi de l'abeille scout

Si la source de nourriture x_s ne peut pas être améliorée davantage pendant un nombre prédéterminé de cycles (déterminé par limite), l'abeille spectatrice abandonne la source de nourriture et l'abeille employée associée devient automatiquement une éclaireuse. L'éclaireuse explore l'espace de recherche de façon aléatoire pour générer une nouvelle source de nourriture en utilisant l'équation (4.10) sans se fier à la recherche cumulative.

Étape 7 : condition d'arrêt

Répétez les étapes 3 à 6 jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit atteinte, qui est normalement déterminée par la valeur MCN.

Dans notre travail on a choisi les paramètres (voir tableau annexe B3).

La figure suivante montre l'organigramme de colonie d'abeilles proposée.

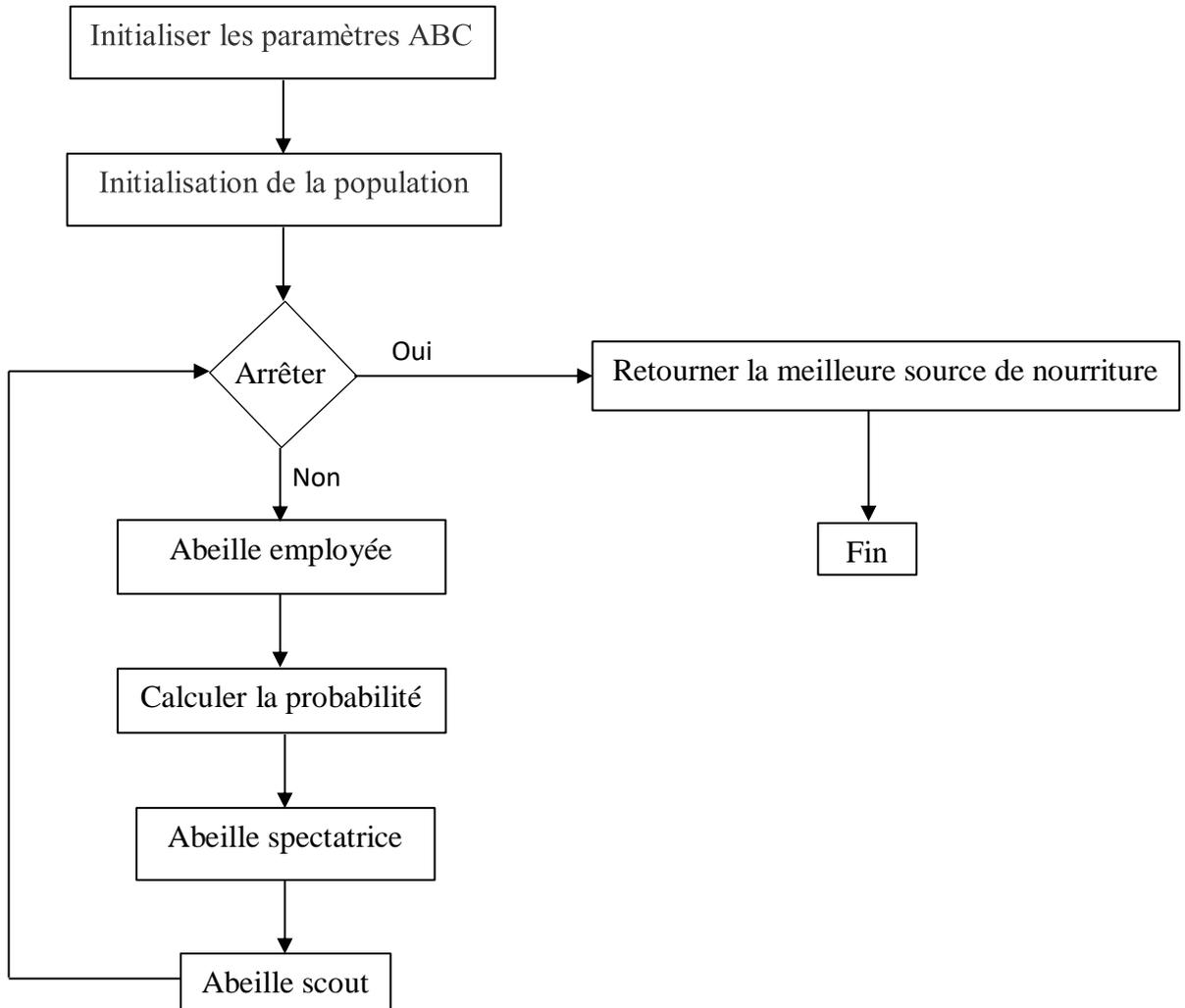


Figure. 4.7 : Organigramme de l'optimisation par colonies d'abeilles artificielles.

4.5 Conception optimisée des PSS par les trois méthodes métaheuristiques

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les différentes méthodes métaheuristiques déjà présentées pour la détermination des paramètres optimaux des PSS d'un type PID de système de puissance SMIB.

La tâche de base du stabilisateur de système de puissance de type PID est de compenser le retard de phase entre le couple électrique de la machine et l'entrée d'excitation pour créer un couple approprié dans le rotor du générateur. Le stabilisateur PID comprend P proportionnel, I intégral, constante de temps du circuit de filtre passe-haut T_W et limitations de sortie (v_{pss_max} et v_{pss_min}).

La structure du régulateur PID est illustrée à la figure (4.8).

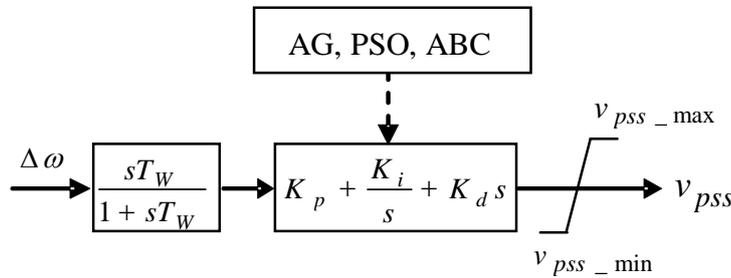


Figure. 4.8 : Structure de PSS type PID.

Avec

$$K_{p_min} < K_p < K_{p_max} \quad (4.16)$$

$$K_{i_min} < K_i < K_{i_max} \quad (4.17)$$

$$K_{d_min} < K_d < K_{d_max} \quad (4.18)$$

Les indices de performance incluant l'erreur absolue intégrale (IAE) sont utilisés pour minimiser le signal d'erreur, puis en minimisant les dépassements et le temps de stabilisation des oscillations du système électrique. Ces oscillations sont influencées par l'angle de puissance (δ), la vitesse du rotor ($\Delta\omega$) et les écarts de T_e). Pour trouver celui qui convient le mieux, où les algorithmes métaheuristiques (AG, PSO, ABC) ont été appliqué pour minimiser les valeurs fournies par les fonctions objectives du système qui sont données par.

$$J_{IAE} = \int_0^t |\Delta\omega(t)| dt \quad (4.19)$$

4.6 Résultats de simulations et interprétation

Nous avons appliqué les trois algorithmes métaheuristique (AG, PSO, ABC) présentée dans ce chapitre pour la recherche des paramètres optimisés du stabilisateur de puissance de type PID du système SMIB dans les différents points de fonctionnements.

➤ **Premier point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_1, Q_1) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures 4.9 a), et une augmentation soudaine de 10% de la puissance mécanique à $t=1s$ (4.9 b).

➤ **Deuxième point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_2, Q_2).) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (4.10 a)), et une augmentation soudaine de 30% de la puissance mécanique à $t=1s$ (4.10 b).

➤ **Troisième point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_3, Q_3).) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (5.11 a)), et une augmentation soudaine de 20% de la puissance mécanique à $t=1s$ (4.11 b).

Les résultats de simulation représentés dans les figures ci-dessous montrent respectivement la réponse dynamique de la déviation de vitesse de rotation ($\Delta\omega$), l'angle rotorique (δ), et le couple électromécanique (T_e) durant les trois phases :

- phase d'équilibre (avant perturbation),
- phase transitoire (pendant la perturbation),
- la nouvelle phase d'équilibre (après l'élimination du défaut).

D'après les figures (4.9), (4.10) et (4.11) la stabilité du système est nettement améliorée, et nous pouvons constater que le comportement du système avec les trois algorithmes métaheuristique (AG, PSO, ABC) a donné des bons résultats mais en faisant la comparaison entre les trois techniques, on remarque que l'algorithme génétique (AG) a donné une amélioration claire vis-à-vis du PSO et ABC.

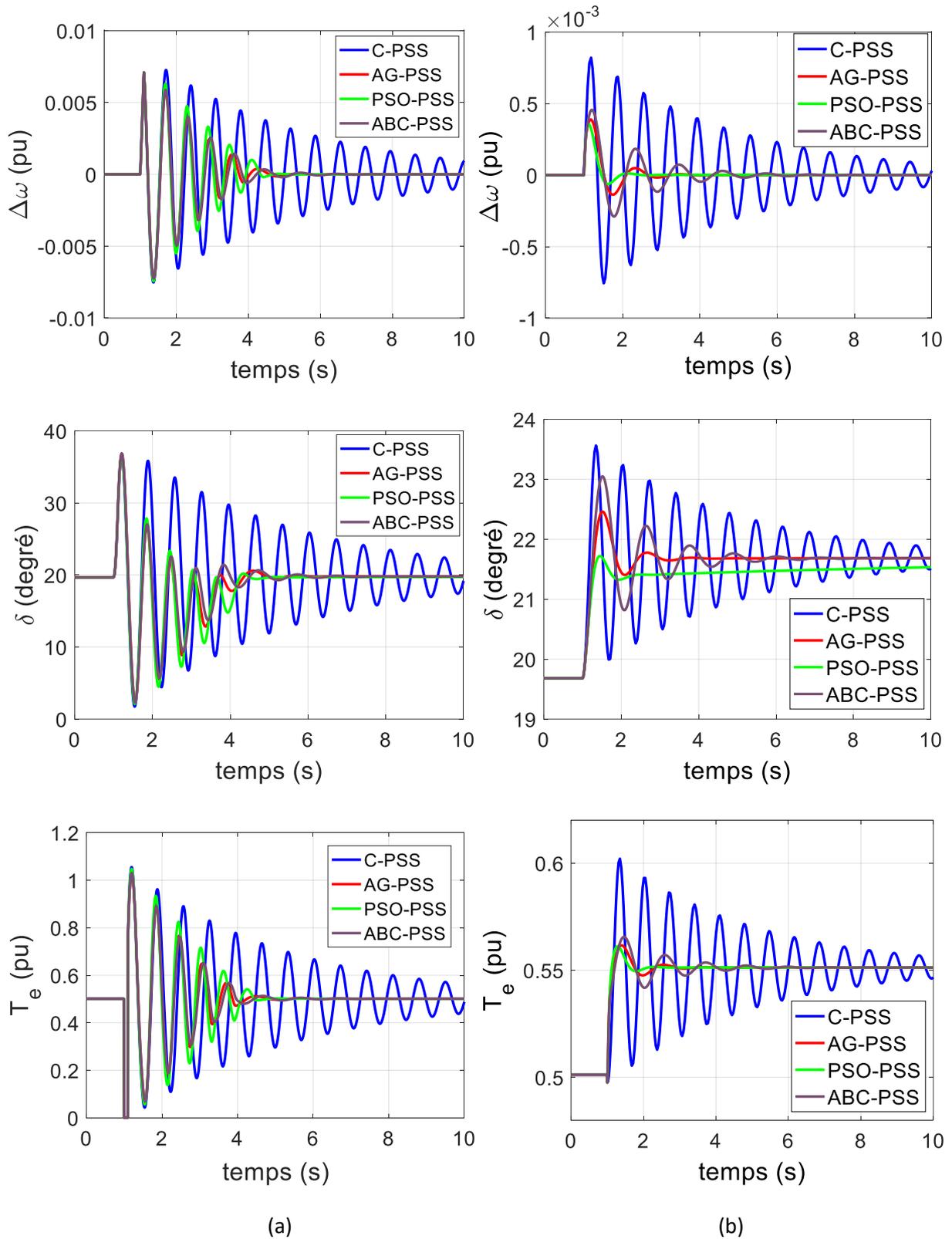


Figure. 4.9 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.8$, $Q=0.6$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

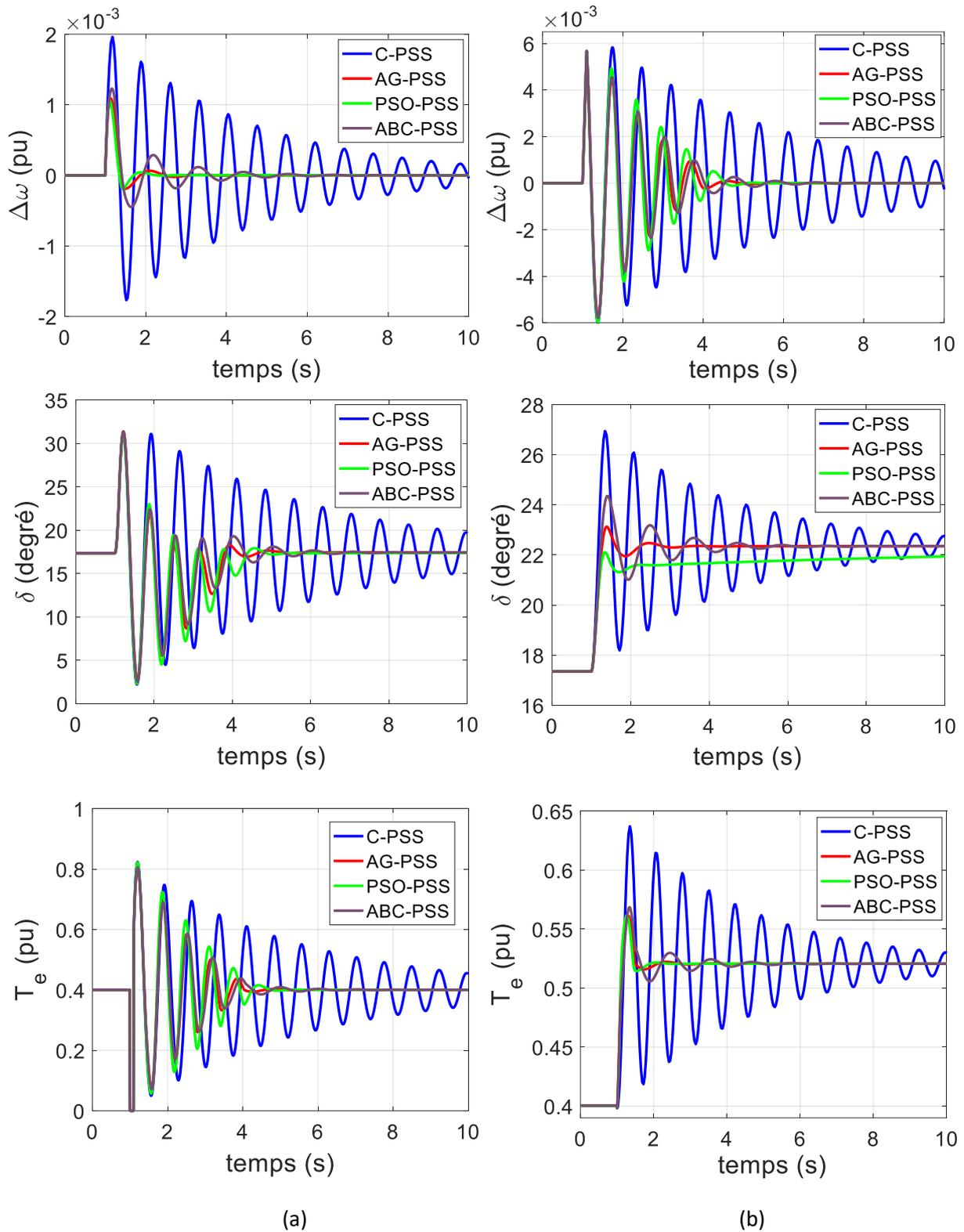


Figure. 4.10 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.4$, $Q=0.2$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

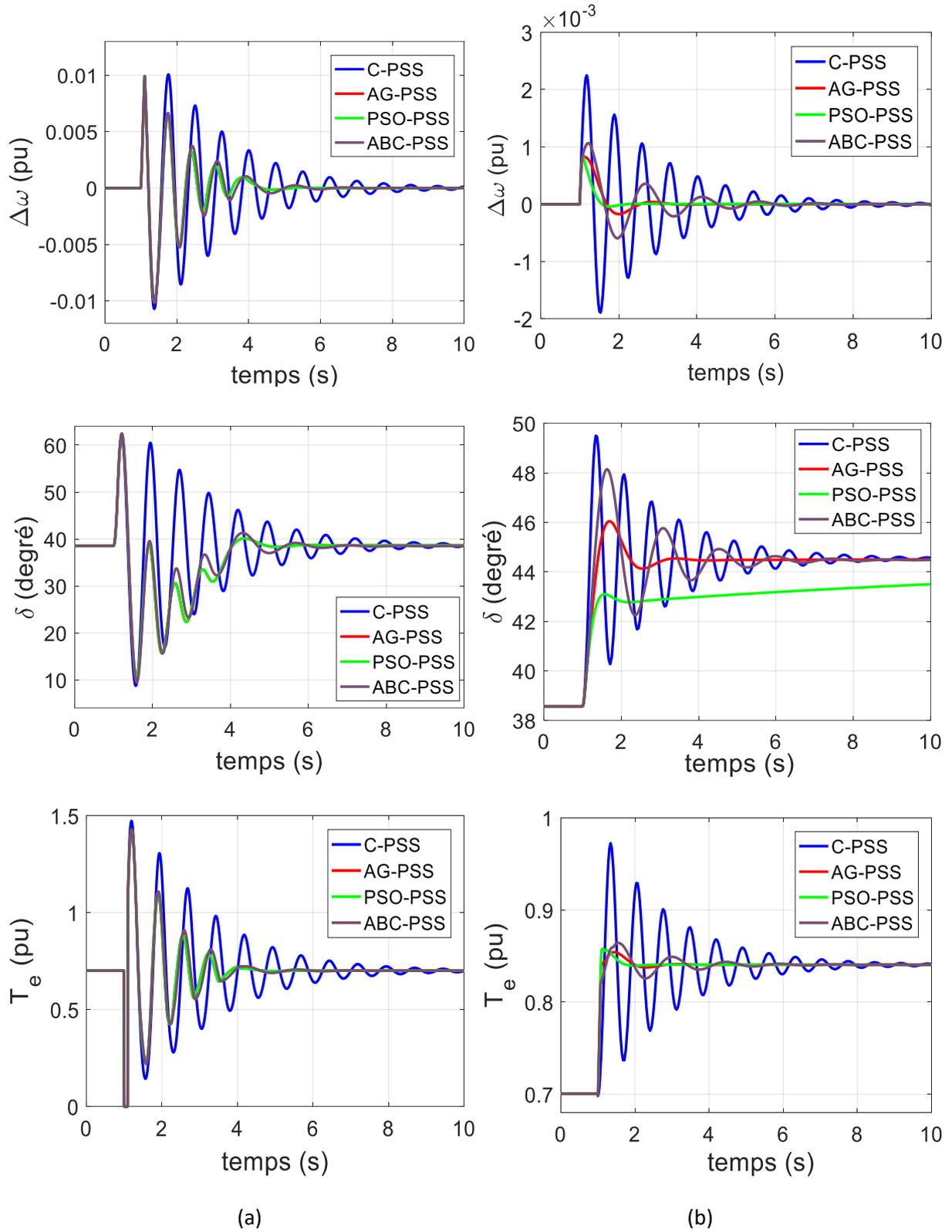


Figure. 4.11 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.7$, $Q=-0.2$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'optimisation des paramètres des stabilisateurs de puissance par les algorithmes métaheuristiques a été abordée. On a traité les théories des algorithmes génétiques, des essaims de particules et des colonies d'abeilles artificielles.

Les algorithmes proposés ont permis de déterminer les paramètres des stabilisateurs de manière à augmenter l'amortissement du système, quelles que soient les conditions de son fonctionnement.

Les résultats de simulation montrent que grâce à ces techniques la stabilité est considérablement améliorée. Les algorithmes métaheuristiques ont facilités la procédure d'optimisation parce qu'ils utilisent directement la fonction objective.

Afin d'augmenter le contrôle de système étudié vis-à-vis de la variation des paramètres internes et externes on a proposé l'application des techniques robustes tel que le contrôle par la logique floue et par mode glissant aux chapitres suivants.

Chapitre 5 : Commande par Logique Floue du système de puissance SMIB

5

5.1 Introduction

La logique floue (*fuzzy logic*) qui existait depuis longtemps est d'une grande actualité. Initialement, elle a été appliquée dans des domaines non-techniques, tel que : le commerce, la médecine, dans le but de compléter les systèmes experts. Durant l'année 1985, les Japonais ont commencé à utiliser la logique floue dans les industries pour résoudre les problèmes de réglage et de commande ; dernièrement, une intense activité de recherche a débuté en Amérique et en Europe pour introduire le principe du réglage par logique floue.

Le concept de la logique floue est basé sur la théorie des ensembles flous présentée par Lotfi A. Zadeh de l'université de Californie, Berkeley, en 1965. La théorie des ensembles flous est au sujet de l'imprécision ou l'incertitude et elle fournit une méthode pour l'utilisation de données imprécises dans des concepts mathématique [CEL09].

Dans la commande floue, les descriptions linguistiques de l'expertise humaine dans le contrôle d'un processus sont représentées sous forme de règles ou de relations floues. Cette base de connaissances est utilisée par un mécanisme d'inférence, en conjonction avec une certaine connaissance des états du processus (par exemple, des variables de réponse mesurées) afin de déterminer les actions de contrôle. Bien qu'ils n'aient pas la structure apparente des contrôleurs PID, les contrôleurs à logique floue peuvent être considérés comme des contrôleurs PID non linéaires dont les paramètres peuvent être déterminés en ligne sur la base du signal d'erreur et de leur dérivée.

5.2 Notion de base de la logique floue

5.2.1 Ensemble ordinaire et ensemble floue

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble : cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas...) ou 1 (...appartient à l'ensemble). Un ensemble flou est défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1.

Il existe 4 caractéristiques essentielles caractérisant l'ensemble flou de l'ensemble booléen : Le type, le noyau, la hauteur et le support [CEL09].

- **Les types** : peuvent être triangulaire, gaussienne, trapézoïdale, sigmoïdale ou de type pic 'singleton', ...etc. La figure (1.1) représente les caractéristiques d'une fonction trapézoïdale.

- **Le noyau** : est défini par :

$$\eta(A) = \{ x \in X \mid \mu_A(x) = 1 \} \quad (5.1)$$

C'est l'ensemble booléen de tous les éléments appartenant de façon absolue à l'ensemble flou A . Quand $\eta(A) \in]0, 1]$, celui-ci est appelée '*valeur modale*' de A . Pour la fonction d'appartenance triangulaire, la valeur modale correspond à la valeur du sommet.

- **La hauteur** : est la valeur maximale de la fonction d'appartenance, généralement, égale à 1. Elle est définie par :

$$h(A) = \text{Max}_{x \in X} \{ \mu_A(x) \} \quad (5.2)$$

- **Le support** : est l'ensemble des éléments de X qui appartiennent au moins un peu à A .

Il est défini par :

$$s(A) = \{ x \in X \mid \mu_A(x) > 0 \} \quad (5.3)$$

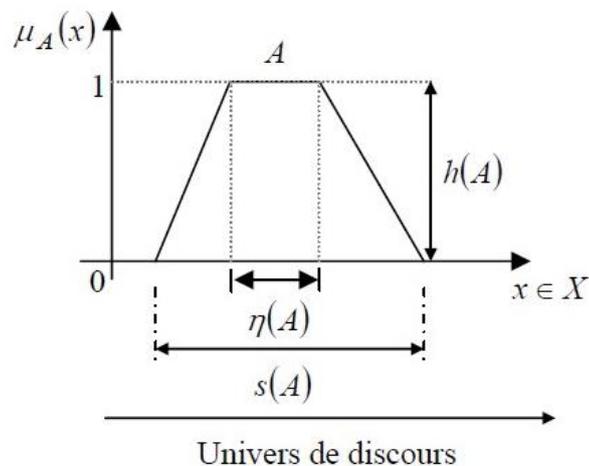


Figure. 5.1 : Caractéristiques d'un sous ensemble flou A .

5.2.2 Fonction d'appartenance

Soit un ensemble E et un sous-ensemble A de E ($A \subset E$), et x un élément de E appartenant à A ($x \in A$). Pour illustrer cette caractéristique, on utilise la fonction d'appartenance $\mu(x)$ compris entre 0 et 1, qui représente le degré d'appartenance de x à

l'ensemble flou A. Le plus souvent, la fonction d'appartenance est déterminée par l'une des fonctions suivantes (figure (5.2)) [TAL14]:

✓ **Fonction triangulaire** : qui est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$, (figure (5.2 a)).

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (5.4)$$

✓ **Fonction trapézoïdale** : qui est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$, (figure (5.2 b)).

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (5.5)$$

✓ **Fonction gaussienne** : qui est définie par deux paramètres $\{\sigma, x_0\}$, (figure 5.2-c).

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.6)$$

✓ **Fonction sigmoïde** : qui est définie par deux paramètres $\{a, x_0\}$, (figure 5.2-d).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-x_0))} \quad (5.7)$$

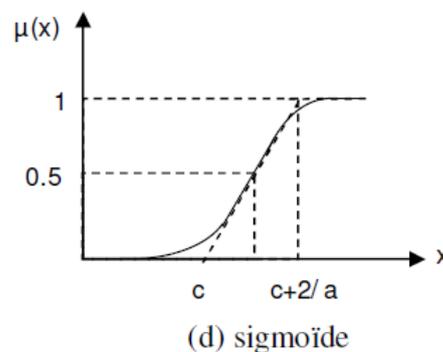
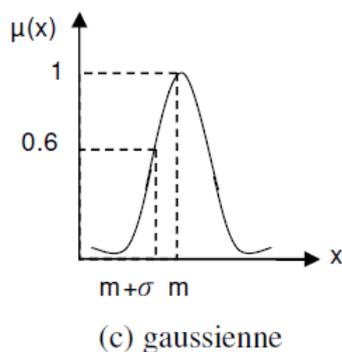
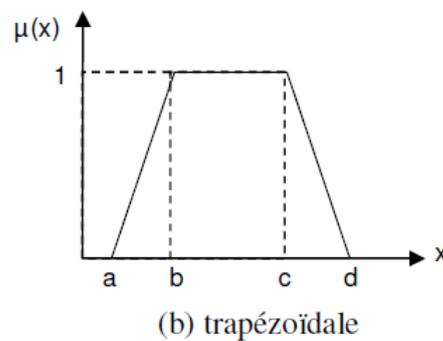
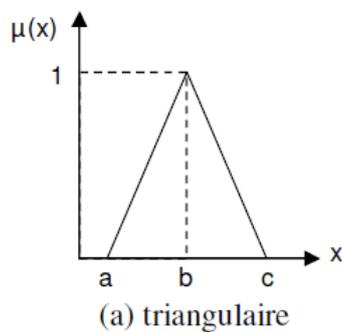


Figure. 5.2 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance

5.2.3 Opération sur les ensembles flous

Soient A et B deux ensembles flous dans U ayant respectivement μ_A, μ_B comme fonctions d'appartenance. L'union, l'intersection et la complémentation des ensembles flous sont définis à l'aide de leur fonction d'appartenance [ALL17].

✓ **Union** : de deux sous-ensembles flous A et B de E est un sous-ensemble flou $A \cup B$ qui est défini par le plus grand sous-ensemble flou qui contient A et qui contient B. Sa fonction d'appartenance est donnée par :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]; \forall x \in E. \quad (5.8)$$

✓ **Intersection** : de deux sous-ensembles flous A et B de E est un sous-ensemble flou qui est défini par le plus petit sous-ensemble contenu à la fois dans A et dans B. Sa fonction d'appartenance est donnée par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]; \forall x \in E. \quad (5.9)$$

✓ **Complément** : d'un sous-ensemble flou A de E est un ensemble flou dénoté par \bar{A} dont la fonction d'appartenance est donnée par :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x); \forall x \in E. \quad (5.10)$$

✓ **Inclusion** : se fait par deux sous-ensembles flous A et B de l'ensemble E, on dira que A est inclus dans B si :

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x); \forall x \in E. \quad (5.11)$$

Et on notera alors : $A \subset B$

5.2.4 Variable linguistique

Une variable linguistique est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases, utilisés comme étiquettes de sous-ensembles flous. Ces variables linguistiques servent à caractériser de façon approximative des systèmes qui ne peuvent pas être décrits avec précision par des valeurs numériques ou d'autres termes quantitatifs traditionnels [PON16].

En général, une variable linguistique est caractérisée par un quintuple $\{X, T, U, G, M\}$, où X est le nom de la variable linguistique (par exemple, la vitesse), T désigne l'ensemble des termes de X (c'est-à-dire l'ensemble des noms des étiquettes linguistiques de X sur un

univers de discours U : lent, moyen, rapide, etc.), G est la règle syntaxique ou la grammaire pour générer les noms et M est la règle sémantique pour associer à chaque X sa signification, $M(X) \subseteq U$ [SID13].

La figure (5.3) illustre un exemple de la variable linguistique 'vitesse' avec trois termes linguistiques : petite, moyenne et grande [SOU08].

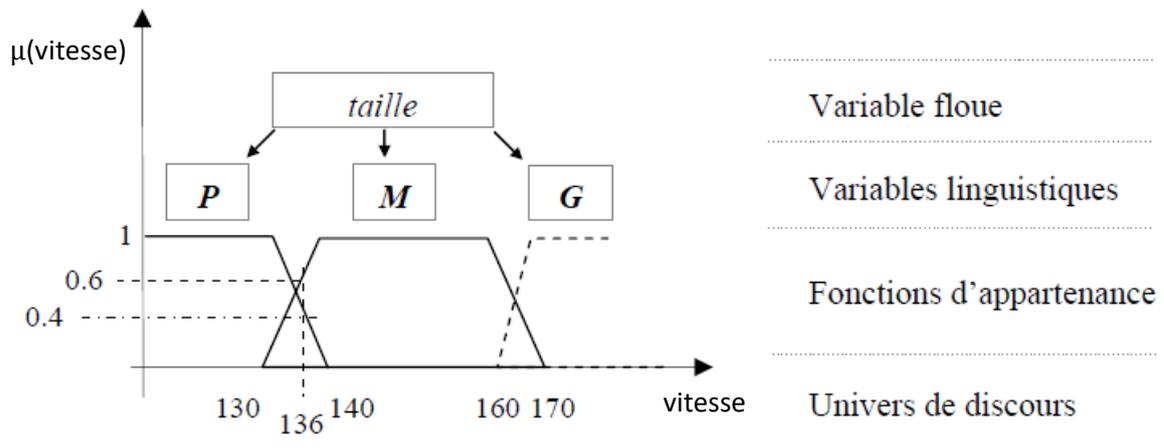


Figure. 5.3 : Variable linguistique

5.3 Commande par logique floue

Le principe d'un système flou, c'est de pouvoir calculer des paramètres de sorties en fournissant au système un ensemble de règles formulés en langage naturel. Pour implémenter un système d'inférence flou, trois étapes sont nécessaires [DEH06]:

1. **Fuzzification** : Convertir des données classiques ou des données numériques en données floues ou fonctions d'appartenance ;
2. **Processus d'inférence floue** : Combiner les fonctions d'appartenance avec les règles de contrôle pour avoir la sortie floue ;
3. **Défuzzification**: Utiliser différentes méthodes pour calculer chaque sortie associée et les mettre dans une table : la table de recherche. Décrochez la sortie de la table de recherche en fonction de l'entrée en cours pendant une application.

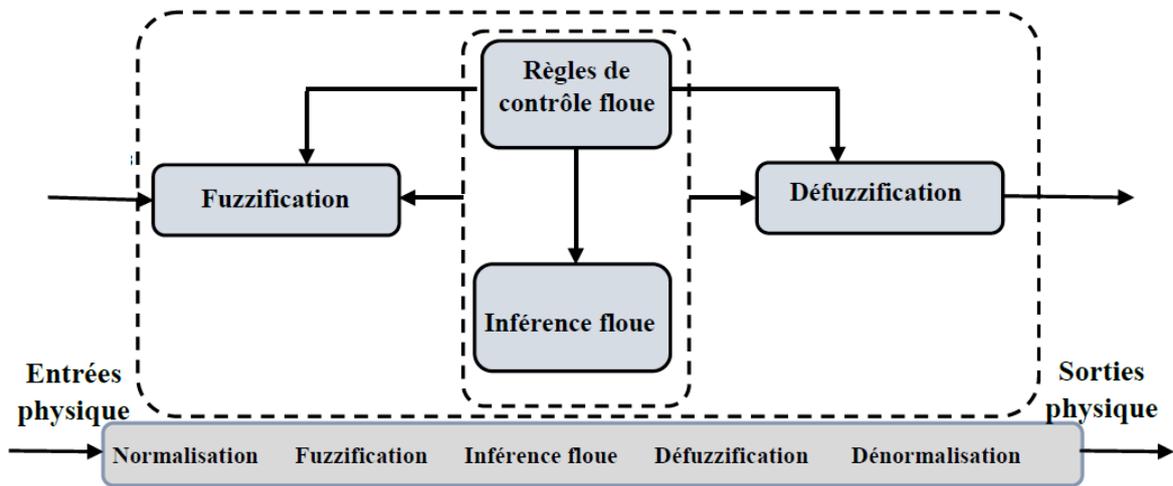


Figure. 5.4 : Structure de base d'un régulateur flou

5.3.1 Fuzzification

L'étape fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Etablit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées ;
- Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous.

La fuzzification proprement dite consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrées et de sortie.

5.3.2 Base de connaissance

Comporte une connaissance dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Elle est constituée en « base de données » et en « base de règles linguistiques de commande » [CEL09].

- La base de données : effectue des définitions qui sont nécessaires pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un RLF.
- La base de règles : représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistique. une règle indique que, si une condition est présenté dans le fonctionnement du système alors une décision est nécessaire pour mettre le système dans l'état de fonctionnement désiré, et est du type : Si "condition " Alors " conséquence".

5.3.3 Inférence floue

Le bloc inférence est le cœur d'un RF, il s'appelle mécanisme de décision et permet de calculer l'ensemble flou associé à la commande à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue.

Il existe plusieurs méthodes d'inférence [DEH 06] :

a. Méthode d'inférence Max-Min (méthode de MAMDANI)

La Méthode de l'inférence max-min réalise au niveau de la condition l'opérateur « ET » par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle introduit par « Alors » lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie réalisé par la formation de minimum.

En fin, l'opérateur « OU » lie les différentes règle réalisées par la formation de maximum.

b. Méthode d'inférence Max-Prod (méthode de LARSEN)

La Méthode de l'inférence max-prod réalise au niveau de la condition l'opérateur « ET » par la formule de produit. La conclusion dans chaque règle introduite par « Alors » est réalisée par la formation du produit.

L'opérateur « ou » qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.

c. Méthode d'inférence Somme-Produit (méthode de ZADEH)

Par opposition aux méthodes précédentes, les opérateurs « ET » et « OU » dans la méthode « Som-Prod » sont réalisés respectivement par la fonction du produit et de la somme arithmétique quel que soit leur position au niveau de la condition ou de la conclusion ou entre deux règle.

d. Méthode de SUGENO

L'opérateur « ET » est réalisé par la fonction de minimum, la conclusion de chaque règle floue à une forme polynomiale. La sortie finale est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue.

5.3.4 Défuzzification

Dans cette étape on réalise l'opération inverse de l'étape fuzzification, c'est l'opération qui permet de passer d'une représentation sous forme de variables linguistiques aux variables numériques applicable physiquement. Il faut donc disposer d'une méthode de composition des règles pour obtenir la valeur finale des sorties. Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de de défuzzification, Parmi les plus couramment utilisées sont :

a. Méthode du centre de gravité

La méthode du centre de gravité est la technique de défuzzification la plus populaire et est largement utilisée dans des applications réelles. Cette méthode est similaire à la formule de calcul du centre de gravité en physique. La moyenne pondérée de la fonction d'appartenance ou le centre de gravité de l'aire délimitée par la courbe de la fonction d'appartenance est calculée pour être la valeur la plus nette de la quantité floue. La sortie du régulateur peut être représentée comme. Elle peut être définie par l'expression algébrique

$$dU_R = \frac{\int \mu_R(x)xdx}{\int \mu_R(x)dx} \quad (5.12)$$

b. Méthode par valeur maximum

Cette méthode est beaucoup plus simple, s'applique uniquement dans le cas où la fonction d'appartenance associée à l'ensemble de sortie n'admet qu'un seul maximum. On choisit comme sortie u_r l'abscisse correspondant à ce maximum :

$$\mu_A(u_r) = \max(\mu_A(u)) \quad (5.13)$$

c. Méthode de la moyenne des maxima

Dans cette méthode, la valeur de sortie est estimée par l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle M pour lequel la fonction d'appartenance est maximale. Cette valeur est fournie par l'expression :

$$u_r = (\inf(M) + \sup(M)) / 2 \quad (5.14)$$

5.4 Application de la logique floue à la commande d'un système de puissance SMIB

La figure (5.5) montre le système de contrôle PID avec un programmeur de gain flou. L'approche adoptée ici est d'exploiter les règles floues et le raisonnement pour générer des paramètres de contrôleur en on line [DEHI21].

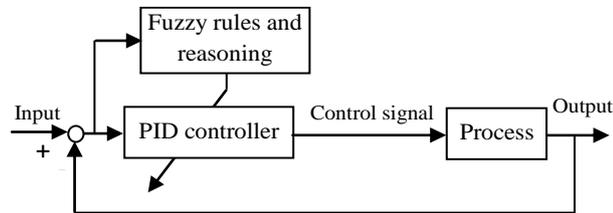


Figure. 5.5 : Système de contrôle PID avec un programmeur de gain flou.

On suppose que K_p , K_d sont dans les plages prescrites $[K_{p_min}, K_{p_max}]$ et $[K_{d_min}, K_{d_max}]$, respectivement. Les plages appropriées sont déterminées par la méthode d'optimisation algorithmique génétique qui a déterminée dans le chapitre précédent.

Les paramètres PID sont déterminés sur la base de l'erreur $e(k)$ et de sa dérivée $\Delta e(k)$.

Les paramètres K_p , K_i et K_d sont déterminés par un ensemble des équations suivantes.

$$K_p = (K_{p_max} - K_{p_min}) K'_p + K_{p_min} \quad (5.16)$$

$$K_d = (K_{d_max} - K_{d_min}) K'_d + K_{d_min} \quad (5.17)$$

$$K_i = K_p^2 / (\alpha K_d) \quad (5.18)$$

Les paramètres K'_p , K'_d et α sont déterminés par un ensemble de règles floues.

Les fonctions d'appartenance sont présentées dans la figure (5.6) (Entrées: appartenances a et b; Sorties: appartenances : c,d et e)

- L'implication de Mamdani pour l'inférence.
- La méthode de centre de gravité pour la défuzzification.

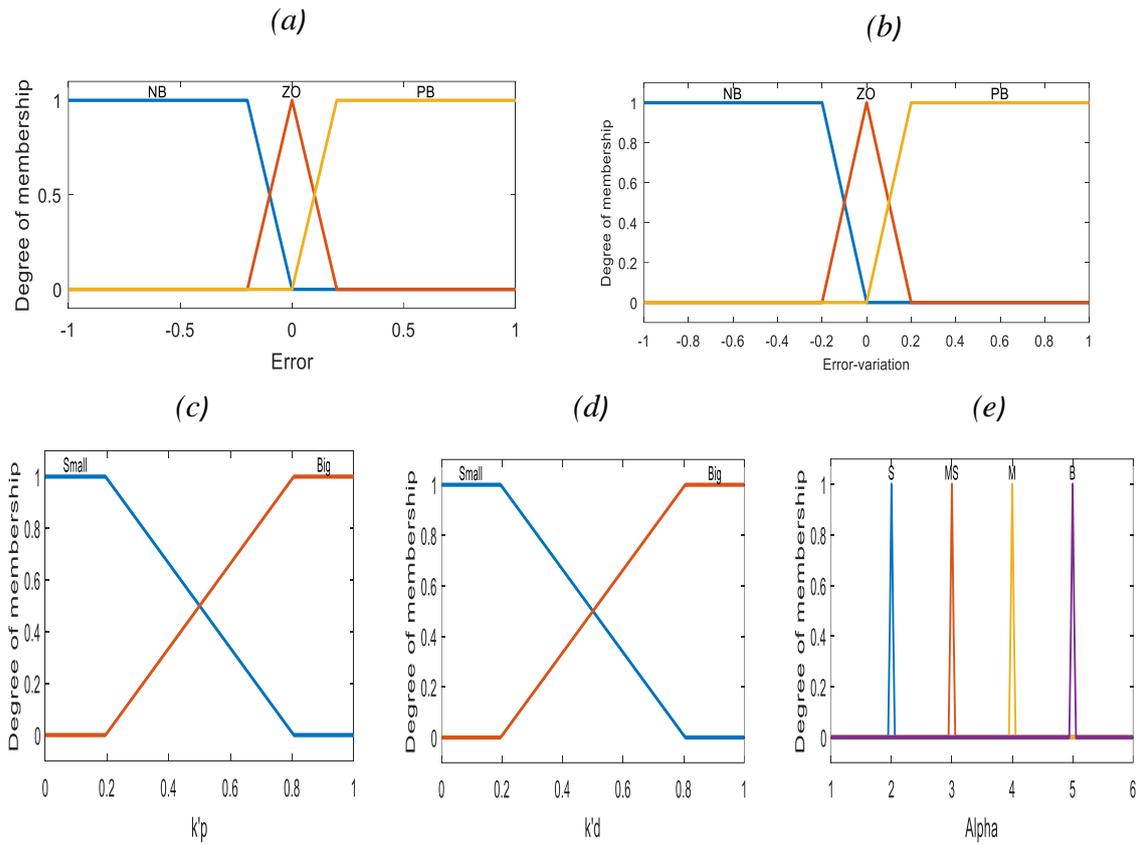


Figure. 5.6 : Fonctions d'appartenance utilisées.

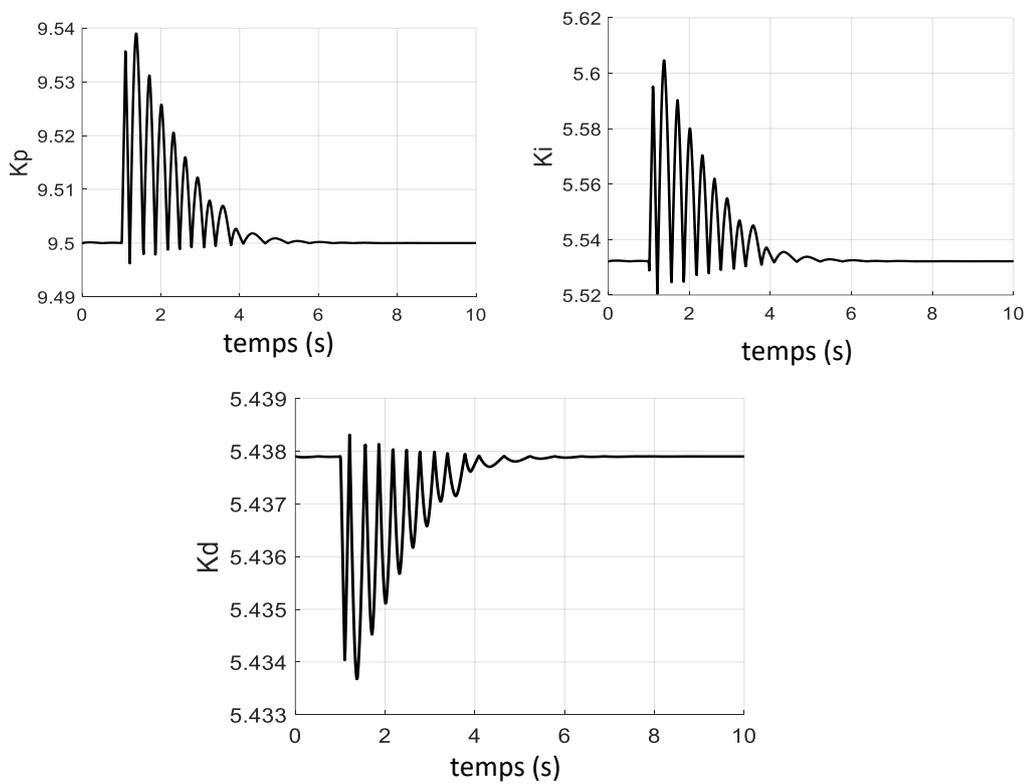


Figure. 5.7 : Paramètres PID de gain on line flou pour le contrôle du système.

5.5 Résultats de simulations et interprétation

Pour améliorer l'amortissement des oscillations électromécaniques et rétablir la stabilité du système SMIB, on a proposé un stabilisateur LF-PSS adaptatif dont les paramètres sont ajustés on line pour différents points de fonctionnement.

➤ **Premier point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_1, Q_1) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (5.8 a)), et une augmentation soudaine de 10% de la puissance mécanique à $t=1s$ (figures (5.8 b)).

➤ **Deuxième point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_2, Q_2).) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (5.9 a)), et une augmentation soudaine de 30% de la puissance mécanique à $t=1s$ (figures (5.9 b)).

➤ **Troisième point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_3, Q_3).) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (5.10.a)), et une augmentation soudaine de 20% de la puissance mécanique à $t=1s$ (figures (5.10 b)).

Les résultats de simulation représentés dans les figures ci-dessous montrent respectivement la réponse dynamique de la déviation de vitesse de rotation ($\Delta\omega$), l'angle rotorique (δ), et le couple électromécanique (Te) durant les trois phases :

- phase d'équilibre (avant perturbation),
- phase transitoire (pendant la perturbation)
- la nouvelle phase d'équilibre (après l'élimination du défaut).

Les résultats montrent que le contrôleur de stabilisateur de système de puissance basé sur un contrôleur PID utilisant une programmation de gain floue adaptative en ligne basée sur l'estimation des paramètres, ce qui peut garantir la stabilité et la robustesse du système de puissance dans une large gamme de conditions de fonctionnement du système. Les résultats sont prometteurs et confirment le potentiel de l'algorithme dans l'optimisation et la coordination de la conception du PSS.

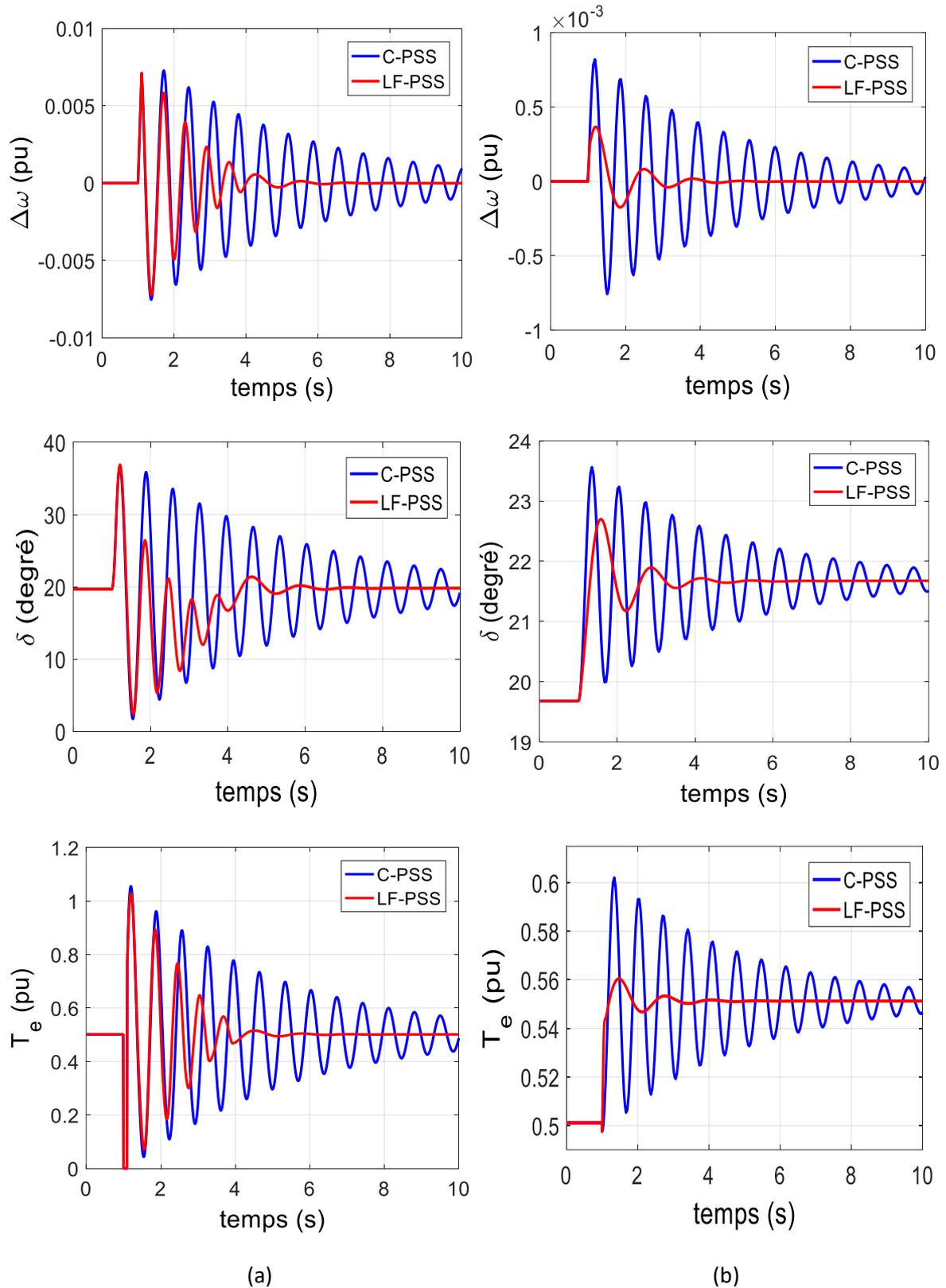


Figure. 5.8 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P = 0.8$, $Q = 0.6$

(a) grand défaut. (b) petit défaut.

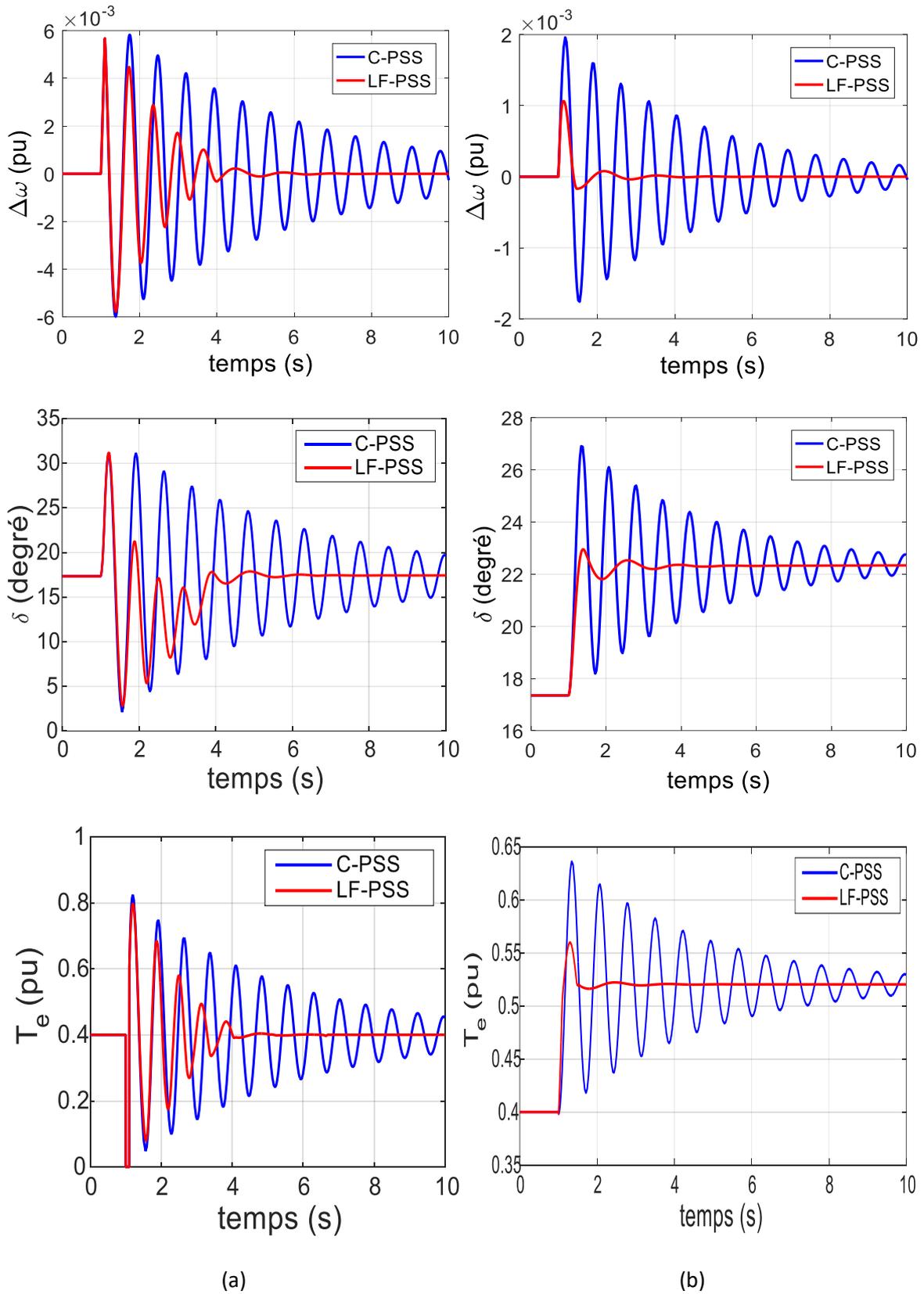


Figure. 5.9 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.4$, $Q=0.2$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

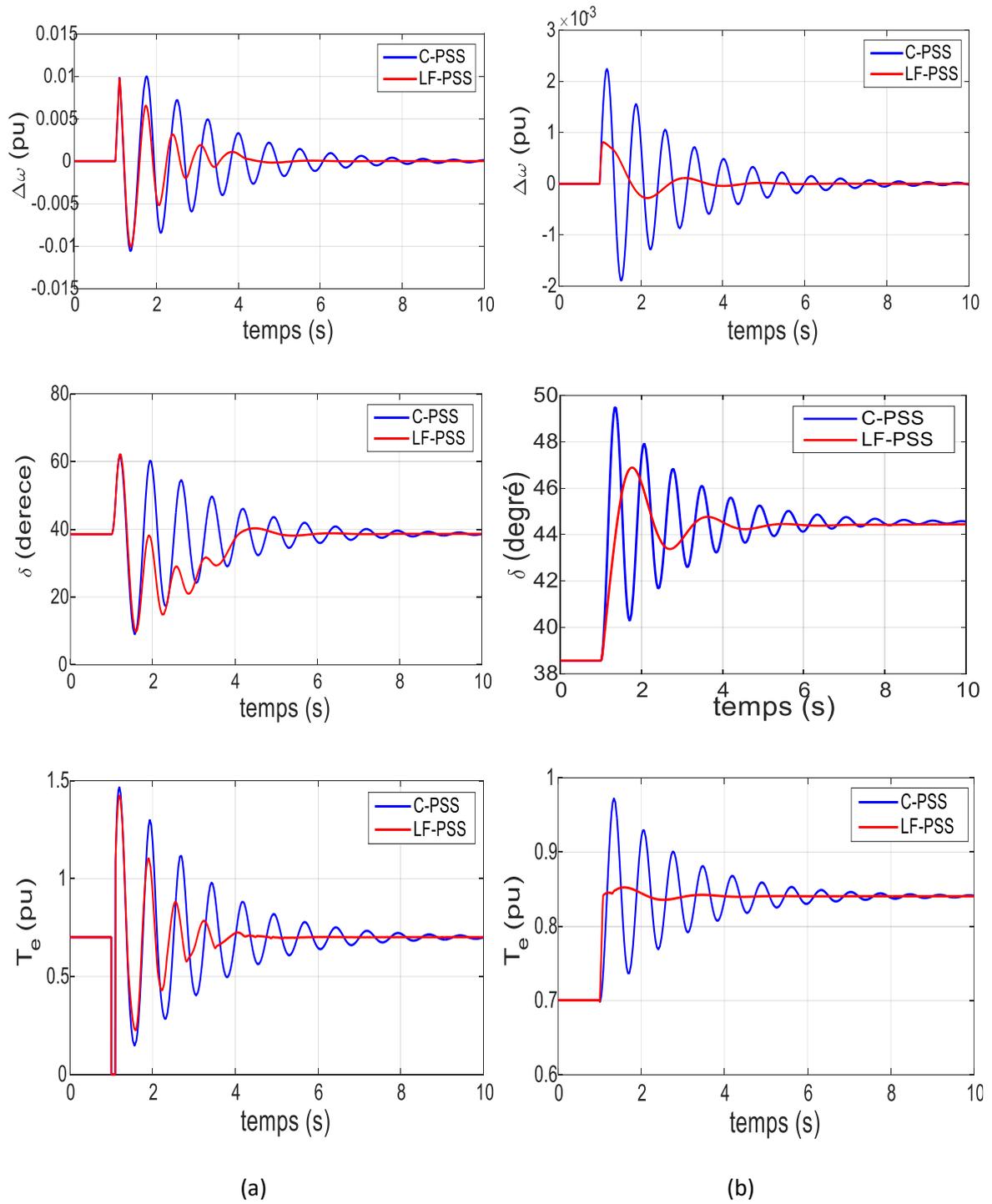


Figure. 5.10 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.7$, $Q=-0.2$

(a) grand défaut. (b) petit défaut.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux de la logique floue. D'un point de vue mathématique, un système flou définit une relation non linéaire d'un espace d'entrée vers un espace de sortie, et d'un point de vue logique, un système flou est une structure de prise de décisions composée de quatre parties essentielles : la fuzzification, base de connaissance et moteur d'inférence floue et la défuzzification. L'architecteur d'un système flou est déterminé par une meilleure compréhension des ensembles flous et des opérateurs flous.

L'optimisation d'une conception de contrôleur PSS d'un stabilisateur de système de puissance basée sur un contrôleur PID utilisant une programmation de gain floue qui est adaptée on line en fonction de l'estimation des paramètres.

La conception a été appliquée à un système de puissance SMIB. Les résultats de simulation du système pour l'angle du rotor et la déviation de vitesse montrent que le LF-PSS basé sur la méthode d'optimisation AG augmente la stabilité et les performances du système de puissance par rapport au C-PSS.

Chapitre 6 : Commande par Mode glissant du système de puissance SMIB



6.1 Introduction

Le mode glissant est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. Il est considéré comme un des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis. La caractéristique principale de la commande par mode glissant est que la loi de commande se modifie d'une manière discontinue. Les commutations de la commande s'effectuent en fonction des variables d'état, utilisées pour créer une hyper surface dite de glissement dont le but est de forcer la dynamique du système pour correspondre avec celle définie par l'équation de l'hyper surface. Quand l'état du système est maintenu sur cette hyper surface, le système est dit en régime glissant. Ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation dans une gamme qui reste relativement plus large, et à certaines perturbations [DER17].

Ce type de commande présente plusieurs avantages tels que robustesse, précision importante, stabilité, simplicité, temps de réponse très faible. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de simplification sur le modèle du système.

6.2 Définition de la commande à structure variable

Un système à structure variable (VSS) est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure [DEH06][LIU12].

Considérons le système suivant décrit par :

$$\dot{x}(t) = A(x, t) + B(x, t) u(t) \quad (6.1)$$

Où $x \in R^n$ est le vecteur d'état, $u \in R^m$ le vecteur de commande avec $n < m$. La structure d'un système de commande à structure variable est définie par chacune des composantes du vecteur de commande, $u = (i = 1, \dots, m)$ par :

- m fonctions de commutations représentées sous forme vectorielle par la fonction $S(x)$.
- une commande à structure variable,

$$u(x) = \begin{cases} u^+(x) & \text{pour } S(x) > 0 \\ u^-(x) & \text{pour } S(x) < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6.2)$$

La relation $S(x) = 0$ forme un hyperplan d'ordre $(n-1)$ dans l'espace d'état. Lorsque la trajectoire perse l'hyperplan la grandeur de commande change de u_i^+ à u_i^- ou vis versa. Par conséquent cet hyperplan est aussi un hyperplan de commutation.

6.3 Principe de la commande par mode glissant

Le principe de la commande par mode glissant consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers une région convenablement sélectionnée en un temps fini, la région considérée est alors désignée comme surface de glissement ou de commutation représentant une relation entre les variables d'état du système. Elle est définie par une équation différentielle déterminant totalement la dynamique du système. Le comportement dynamique résultant est appelé régime glissant. Le comportement du système peut être décrit par trois phases : phase de convergence, phase de glissement, phase d'équilibre [LIU12].

6.4 Mode de trajectoire d'une variable d'état

Dans la commande des systèmes à structure variable avec mode glissant, la trajectoire d'état est amenée vers une surface (hyperplan) puis, à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière dite surface de glissement.

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes (figure (6.1))

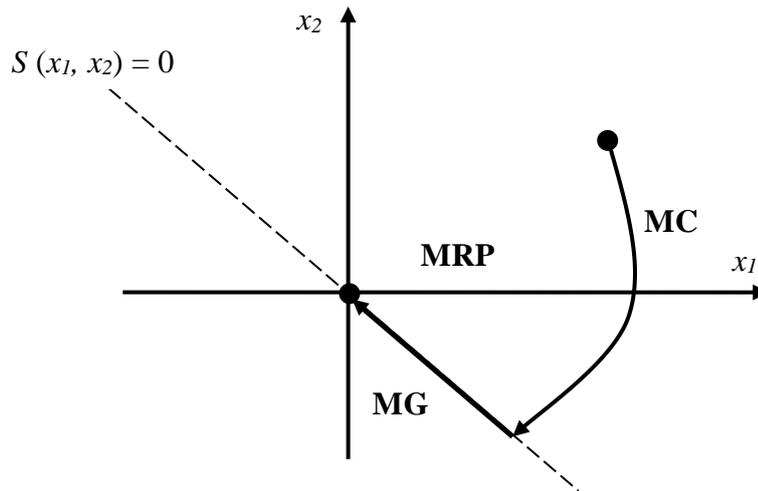


Figure. 6.1: différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

Le mode de convergence (MC) : c'est le mode dans lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x_1, x_2) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

Le mode glissant (MG) : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x_1, x_2)$.

Le mode du régime permanent (MRP) : Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre, il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

6.5 Conception de la commande par mode glissant

La conception de cette commande nécessite trois principales étapes très dépendantes. Ces étapes sont [DEH06] [SLO98]:

- Le choix de la surface de glissement.
- L'établissement de condition d'existence.
- La détermination de la loi de commande.

6.6 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et l'objectif visé. La surface de glissement est une fonction scalaire telle que l'erreur sur la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi, la surface représente le

comportement dynamique désiré. Dans la littérature, différentes formes de surface sont traitées, dont chacune donne de meilleures performances pour certaines utilisations.

Dans notre travail, on s'intéresse à une surface de forme non linéaire donné par J.J.Slotine :

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \tag{6.3}$$

Avec :

$e(x)$: écart sur la variable à régler $e(x) = x^* - x$

λ : coefficient positif.

n : ordre de système.

x^* : valeur désiré.

$$s(x) = \begin{cases} e(x) & n = 1 \\ \lambda e(x) + \dot{e}(x) & n = 2 \\ \lambda e(x) + 2\lambda \dot{e}(x) + \ddot{e}(x) & n = 3 \end{cases} \tag{6.4}$$

L'objectif de cette commande est de garder la surface qui tend vers zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$. Pour un choix convenable du paramètre λ , ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence. La linéarisation de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre ' n '.

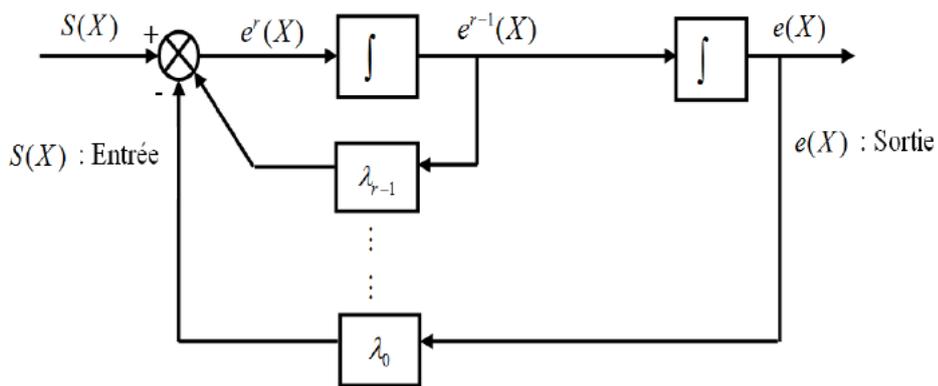


Figure. 6.2: Linéarisation exacte de l'écart

6.6.1 Conditions de convergence et d'existence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester

indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence [TAL16].

6.6.1.1 Fonction discrète de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est proposée et étudiée par Emil Lyapunov et Utkin. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par [KEB13]:

$$\begin{aligned} \dot{S}(x) > 0 & \text{ si } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 & \text{ si } S(x) > 0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Cette condition peut être formulée comme suit :

$$\dot{S}(x).S(x) < 0 \quad (6.6)$$

6.6.1.2 Fonction de Lyapunov

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système. La loi de commande doit faire décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$. L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de construire une commande u tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov, en définissant cette dernière par:

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (6.7)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x).S(x) < 0 \quad (6.8)$$

Pour que la fonction $V(x)$ décroît, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative.

L'équation explique que le carré de la distance vers la surface mesurée par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface dans les deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie.

6.6.2 Détermination de la loi de commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants [SLO98].

La structure d'un contrôleur par mode glissant est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et l'autre stabilisante (U_n) [SLO98]:

$$u = u_{eq} + u_n \quad (6.9)$$

U_{eq} : Correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin, elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(t)$.

U_n : est déterminée pour vérifier la condition de convergence.

a. Commande équivalente

La commande équivalente est déduite en considérant que la dérivée de la surface demeure nulle. Supposons que le comportement en mode glissant existe sur la surface de glissement $S(x, t)$ et essayons de trouver la commande continue telle que, à partir de la position initiale du vecteur d'état sur la région $(S(x(t_0), t_0))$, la dérivée du vecteur $S(x, t)$ demeure nulle [SLO98]:

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial S}{\partial t} S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e(x) \quad (6.10)$$

En remplaçant (6.1) et (6.2) dans (6.9) nous trouvons :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} (A(x, t) + B(x, t)U) A + \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)U + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (6.11)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où nous déduisons, l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \right)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x} A(x, t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right) \quad (6.12)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que

$$\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \neq 0 \quad (6.13)$$

La commande u_{eq} peut être interprétée comme étant la valeur moyenne que prend la commande u lors des commutations rapides entre u_{\max} et u_{\min} (figure (6.3)).

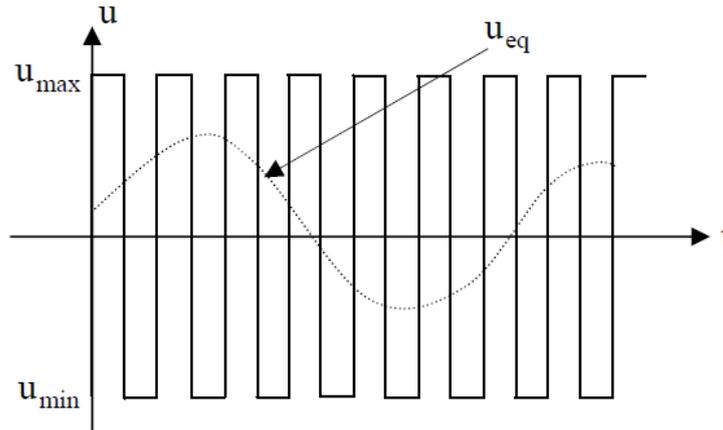


Figure. 6.3 : Commande équivalente u_{eq} .

b. Commande discontinue de base

U_n : est un terme introduit pour vérifier la condition de convergence $\dot{S}(x).S(x) < 0$. Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement.

Durant le mode de convergence, on remplace le terme U_{eq} par sa valeur donné par l'équation (6.13) dans l'équation (6.12), nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x,t) \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t) U_n \quad (6.14)$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (6.14) devient :

$$S(x,t) \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t) U_n < 0 \quad (6.15)$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de $S(x,t) \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)$ la forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais de la figure (6.4).

$$U_n = K \text{ Si } gn(S(x,t)) \quad (6.17)$$

Le signe de K doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)$

$$\text{Sign}(S(x)) = \begin{cases} +1 & \text{si } S(x,t) < 0 \\ -1 & \text{si } S(x,t) > 0 \end{cases} \quad (6.18)$$

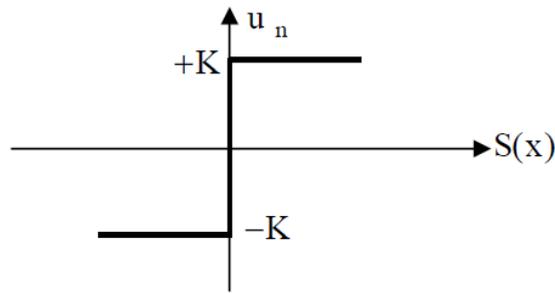


Figure. 6.4 : Définition de la fonction signe

Si le gain K est très petit, le temps de réponse sera long, si K est très grand, le temps de réponse sera rapide mais des oscillations indésirables risquent d'apparaître (effet Chattering) sur les réponses en régime permanent.

6.7 Broutement (chattering)

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé réticence ou "chattering". Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement. Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande. Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable).

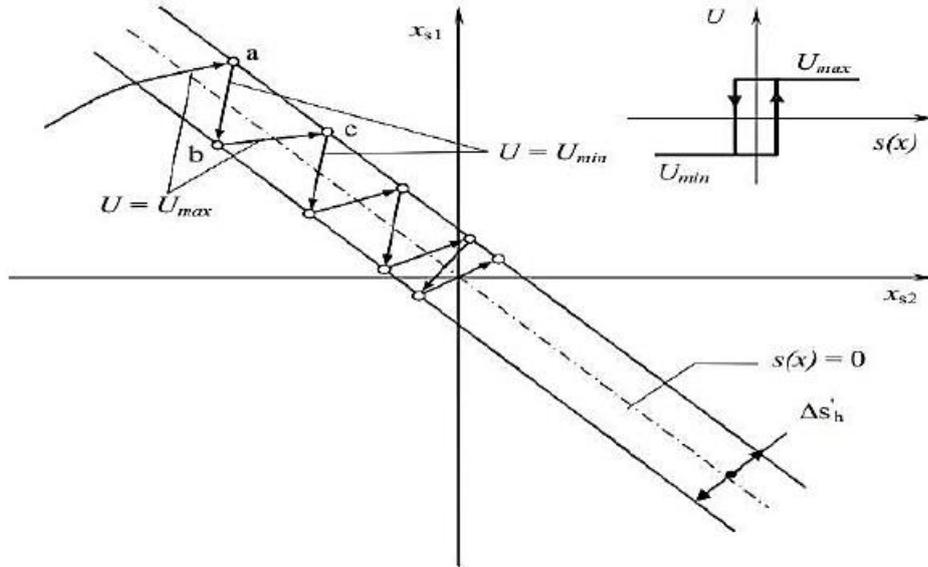


Figure. 6.5: Phénomène de Chattering.

Dans le but de réduire les oscillations de hautes fréquences (indésirables sur les réponses), des solutions classiques qui consiste à imposer une variation de la valeur de la commande u_n en fonction de la distance entre la variable d'état et la surface de glissement. Cependant, il est possible de réduire ce phénomène par l'introduction de la fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences.

$$U_n = K \cdot f_{sat} \left(\frac{S}{\varepsilon} \right) \quad (6.19)$$

f_{sat} : fonction de saturation, elle est définis comme suit :

$$f_{sat} \left(\frac{S}{\varepsilon} \right) = \begin{cases} \frac{S}{\varepsilon} & \text{si } \left| \frac{S}{\varepsilon} \right| < 1 \\ \text{Sign} \left(\frac{S}{\varepsilon} \right) & \text{si } \left| \frac{S}{\varepsilon} \right| > 1 \end{cases} \quad (6.20)$$

ε : Largeur du seuil de la fonction saturation

6.8 Conception d'un contrôleur PSS par mode glissant

Dans cette section on a développé un contrôleur PSS basé sur la technique mode glissant [DEH21].

Les variables de la dérivée de la vitesse angulaire et de l'accélération de la vitesse angulaire sont introduites pour contrôler $\Delta\omega$ l'écart de la vitesse angulaire. L'erreur de traçage est $e = \Delta\omega^d - \Delta\omega$, le signal désiré $\Delta\omega^d = 0$.

Avec $n=2$, la surface de glissement proposée et sa dérivée sont :

$$S(e) = \Delta\dot{\omega}^d - \Delta\dot{\omega} + \lambda(e) \quad (6.21)$$

$$\dot{S}(\Delta\omega) = \Delta\ddot{\omega}^d - \Delta\ddot{\omega} + \lambda(\dot{e}) \quad (6.22)$$

En remplaçant la dérivée de l'expression (2.21) dans l'équation (6.22), on obtient :

$$\dot{S}(\Delta\omega) = \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{e}) - \frac{1}{2H} \frac{d}{dt} (T_m - T_e - D(\omega - \omega_s)) \quad (6.23)$$

$$\dot{S}(\Delta\omega) = \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{e}) - \frac{1}{2H} \frac{d}{dt} (-T_e) \quad (6.24)$$

En remplaçant l'expression dérivée de T_e dans l'expression (6.24) :

$$\begin{aligned} \dot{S}(\Delta\omega) &= \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{e}) \\ &+ \left(\frac{1}{2H} \right) \left(i_q \frac{d}{dt} e'_q + e'_q \frac{d}{dt} i_q \right) \\ &+ \left(\frac{1}{2H} \right) \left((x_q - x'_d) i_q \frac{d}{dt} i_d \right) \\ &+ \left(\frac{1}{2H} \right) \left((x_q - x'_d) i_d \frac{d}{dt} i_q \right) \end{aligned} \quad (6.25)$$

En remplaçant l'expression de $\frac{d}{dt} e'_q$ par son équation (2.22) dans l'expression (6.25),

on obtient ce qui suit :

$$\begin{aligned} \dot{S}(\Delta\omega) &= \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{e}) \\ &+ \left(\frac{1}{2H} \right) \left(\left(-\frac{1}{T'_{d0}} \right) \left(e'_q + (x_d - x'_d) i_d - e_{fd} \right) i_q \right) \\ &+ \left(\frac{1}{2H} \right) \left(\frac{d}{dt} i_q e'_q + (x_q - x'_d) \left(i_q \frac{d}{dt} i_d + i_d \frac{d}{dt} i_q \right) \right) \end{aligned} \quad (6.26)$$

En substituant l'expression de e_{fd} par son équation (2.23) dans l'expression (6.26), on obtient ce qui suit :

$$\begin{aligned}
\dot{S}(\Delta\omega) &= \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{\omega}) \\
&\quad - \left(\frac{i_q}{2HT_{d0}'} \right) \left(\dot{e}_q + (x_d - x_d') i_d \right) \\
&\quad - \left(\frac{i_q}{2HT_{d0}'} \right) \left(T_a \frac{d}{dt} e_{fd} - K_a (v_{ref} - v_t) - K_a u_{PSS} \right) \\
&\quad + \left(\frac{1}{2H} \right) \left(\frac{d}{dt} i_q \dot{e}_q + (x_q - x_q') \left(i_q \frac{d}{dt} i_d + i_d \frac{d}{dt} i_q \right) \right)
\end{aligned} \tag{6.27}$$

En réorganisant l'expression obtenue, on déduit l'expression suivante

$$\begin{aligned}
\dot{S}(\Delta\omega) &= \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{\omega}) \\
&\quad - \left(\frac{i_q}{2HT_{d0}'} \right) \left(\dot{e}_q + (x_d - x_d') i_d \right) \\
&\quad - \left(\frac{i_q}{2HT_{d0}'} \right) \left(T_a \frac{d}{dt} e_{fd} - K_a (v_{ref} - v_t) \right) \\
&\quad + \left(\frac{1}{2H} \right) \left(\frac{d}{dt} i_q \dot{e}_q + (x_q - x_q') \left(i_q \frac{d}{dt} i_d + i_d \frac{d}{dt} i_q \right) \right) \\
&\quad + \frac{K_a i_q}{2HT_{d0}'} u_{PSS}
\end{aligned} \tag{6.28}$$

L'expression (6.28) s'écrit

$$\dot{S}(\Delta\omega) = \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{\omega}) - f(x, t) - g(x, t) u_{PSS}(t) \tag{6.29}$$

Où :

$$\begin{aligned}
f(x, t) &= \frac{i_q}{2HT_{d0}'} \left(\dot{e}_q + (x_d - x_d') i_d \right) \\
&\quad + \frac{i_q}{2HT_{d0}'} \left(T_a \frac{d}{dt} e_{fd} - K_a (v_{ref} - v_t) \right) \\
&\quad - \left(\frac{1}{2H} \right) \left(\frac{d}{dt} i_q \dot{e}_q + (x_q - x_q') \left(i_q \frac{d}{dt} i_d + i_d \frac{d}{dt} i_q \right) \right)
\end{aligned} \tag{6.30}$$

$$g(x, t) = \frac{-K_a i_q}{2HT_{d0}'} \tag{6.31}$$

En remplaçant u_{pss} par $u_{eq} + u_n$, le contrôle apparaît clairement dans l'équation suivante :

Pendant le mode glissant et en régime permanent :

$$S(\Delta\omega) = 0, \quad \dot{S}(\Delta\omega) = 0, \quad u_{eq} = 0 \quad (6.32)$$

Le montant de contrôle équivalent u_{eq} , est trouvé à partir des équations précédentes et s'écrit comme suit :

$$u_{eq} = \left(\frac{2HT_{d0}'}{K_a} \right) (\Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{\omega}) - f(x, t)) \quad (6.33)$$

Afin de satisfaire aux conditions d'atteinte de la commande par mode glissant $\dot{S}(\Delta\omega)S(\Delta\omega) \leq K|S(\Delta\omega)|$, il est nécessaire de choisir une commande de commutation dont la loi de commande est

$$u_n = - \left(\frac{2HT_{d0}'}{K_a} \right) K \cdot \text{sgn}(S(\Delta\omega)) \quad (6.34)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre K doit être positif.

Pour réduire un éventuel dépassement de la tension de référence u_{pss} , il est souvent utile d'ajouter un limiteur de tension.

Finalement, la commande proposée est exprimée sous la forme suivante :

$$u_{pss} = \left(\frac{2HT_{d0}'}{K_a} \right) (\Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{\omega}) - f(x, t)) + \left(-\frac{2HT_{d0}'}{K_a} \right) K \cdot \text{sgn}(S(\Delta\omega)) \quad (6.35)$$

➤ Preuve de stabilité

En remplaçant l'expression de u_{pss} dans l'équation (6.29), on obtient ce qui suit :

$$\dot{S}(\Delta\omega) = \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{\omega}) - f(x, t) + g(x, t)(u_{eq} + u_n) \quad (6.36)$$

$$\dot{S}(\Delta\omega) = \Delta\ddot{\omega}^d + \lambda(\dot{\omega}) - f(x, t) + g(x, t)u_{eq} + g(x, t)u_n \quad (6.37)$$

$$\dot{S}(\Delta\omega) = - \left(\frac{2HT_{d0}'}{K_a} \right) \text{sgn}(S) \quad (6.38)$$

Par conséquent, la condition de convergence peut être écrite.

$$\dot{S}(\Delta\omega).S(\Delta\omega) = -\left(\frac{2H.T'_{d0}}{K_a}\right) \text{sgn}(S).S(\Delta\omega) \quad (6.39)$$

$$\dot{S}(\Delta\omega)S(\Delta\omega) = -K|S| \leq 0 \quad (6.40)$$

Alors, la surface est attractive et le système est stable.

6.9 Résultats de simulations et interprétation

Le contrôleur développé proposé pour le control du système étudié pour les différents points de fonctionnement afin d'améliorer la rapidité, la précision et la stabilité du système de puissance.

➤ **Premier point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_1, Q_1) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (6.6 a)), et une augmentation soudaine de 10% de la puissance mécanique à $t=1s$ (6.6 b).

➤ **Deuxième point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_2, Q_2).) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (6.7 a)), et une augmentation soudaine de 30% de la puissance mécanique à $t=1s$ (6.7 b).

➤ **Troisième point de fonctionnement** : dans ce cas, le générateur fonctionne dans les conditions de charge (P_3, Q_3).) un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t=1s$ pour une durée de 0,1s (figures (6.8 a)), et une augmentation soudaine de 20% de la puissance mécanique à $t=1s$ (6.8 b).

Les résultats de simulation représentés dans les figures ci-dessous montrent respectivement la réponse dynamique de la déviation de vitesse de rotation ($\Delta\omega$), l'angle rotorique (δ), et le couple électromécanique (T_e) durant les trois phases :

- Phase d'équilibre (avant perturbation),
- Phase transitoire (pendant la perturbation)
- La nouvelle phase d'équilibre (après l'élimination du défaut).

les performances dynamiques pour différentes conditions de fonctionnements sont représentés dans le tableau suivant sur la base de variation de vitesse:

Tableau 6.1 : les performances dynamiques du système SMIB avec LF-PSS et MG-PSS

	P	Q	Grand défaut		Petit défaut	
			Dépassement (pu)	Temps de d'établissements (s)	Dépassement (pu)	Temps d'établissements (s)
PSS C	0.8	0.6	0.0074	17.6566	1.1853	15.6793
	0.4	0.2	0.0060	18.9456	0.0020	14.4962
	0.7	-0.2	0.0107	8.9050	0.0022	8.3194
LF	0.8	0.6	0.0072	5.4546	0.00036703	4.5476
	0.4	0.2	0.0058	5.3994	0.0011	3.0756
	0.7	-0.2	0.0101	5.0658	0.00081	5.0514
MG	0.8	0.6	0.0072	5.1040	0.00065	3.2196
	0.4	0.2	0.0058	4.6851	0.0016	2.9381
	0.7	-0.2	0.0101	4.1214	0.0015	2.8523

Les résultats ont démontré que le contrôleur proposé du stabilisateur du système de puissance peut garantir la stabilité et la performance robuste du système de puissance dans une large gamme de conditions de fonctionnement du système.

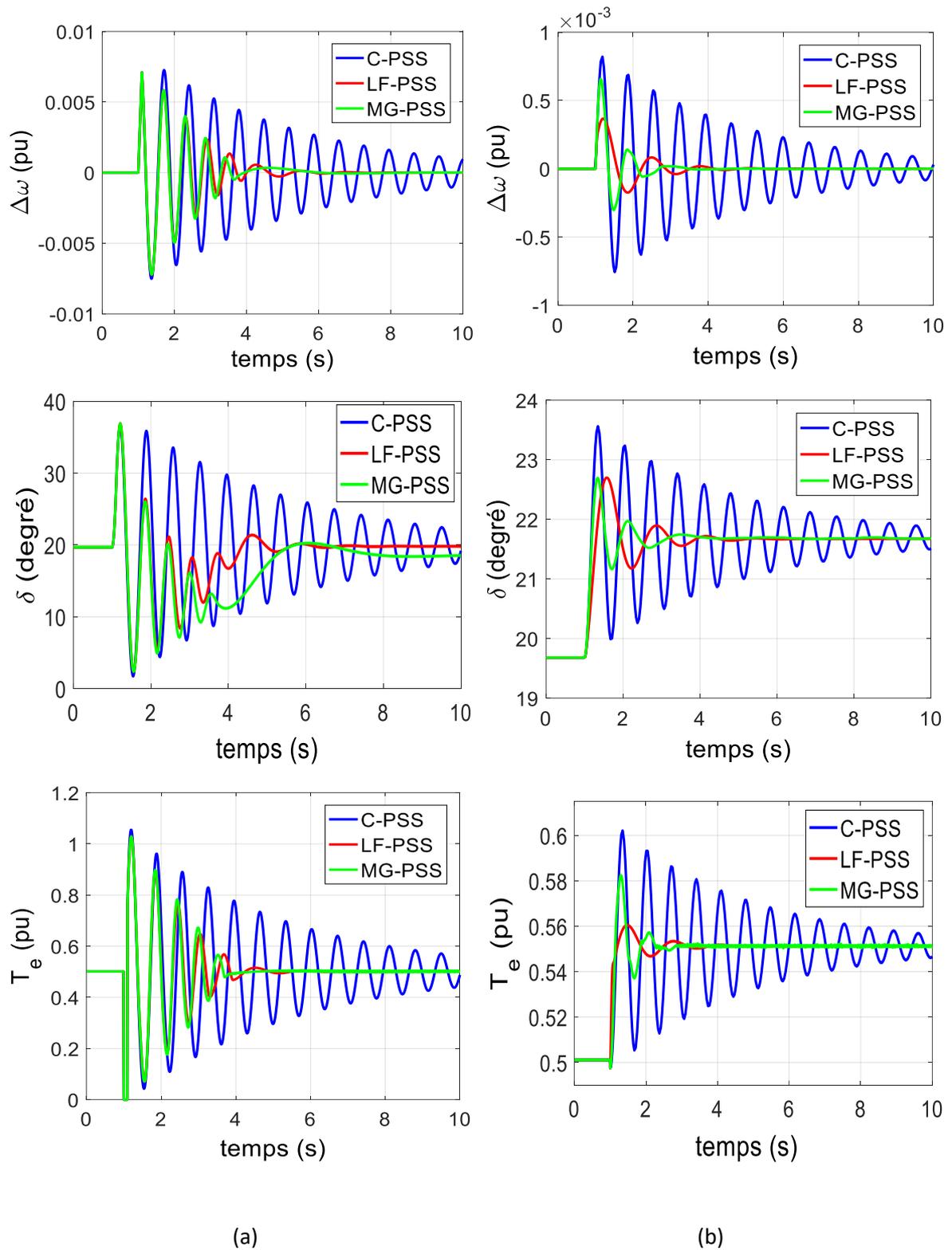


Figure. 6.6 : Réponses du système pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.8$, $Q=0.6$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

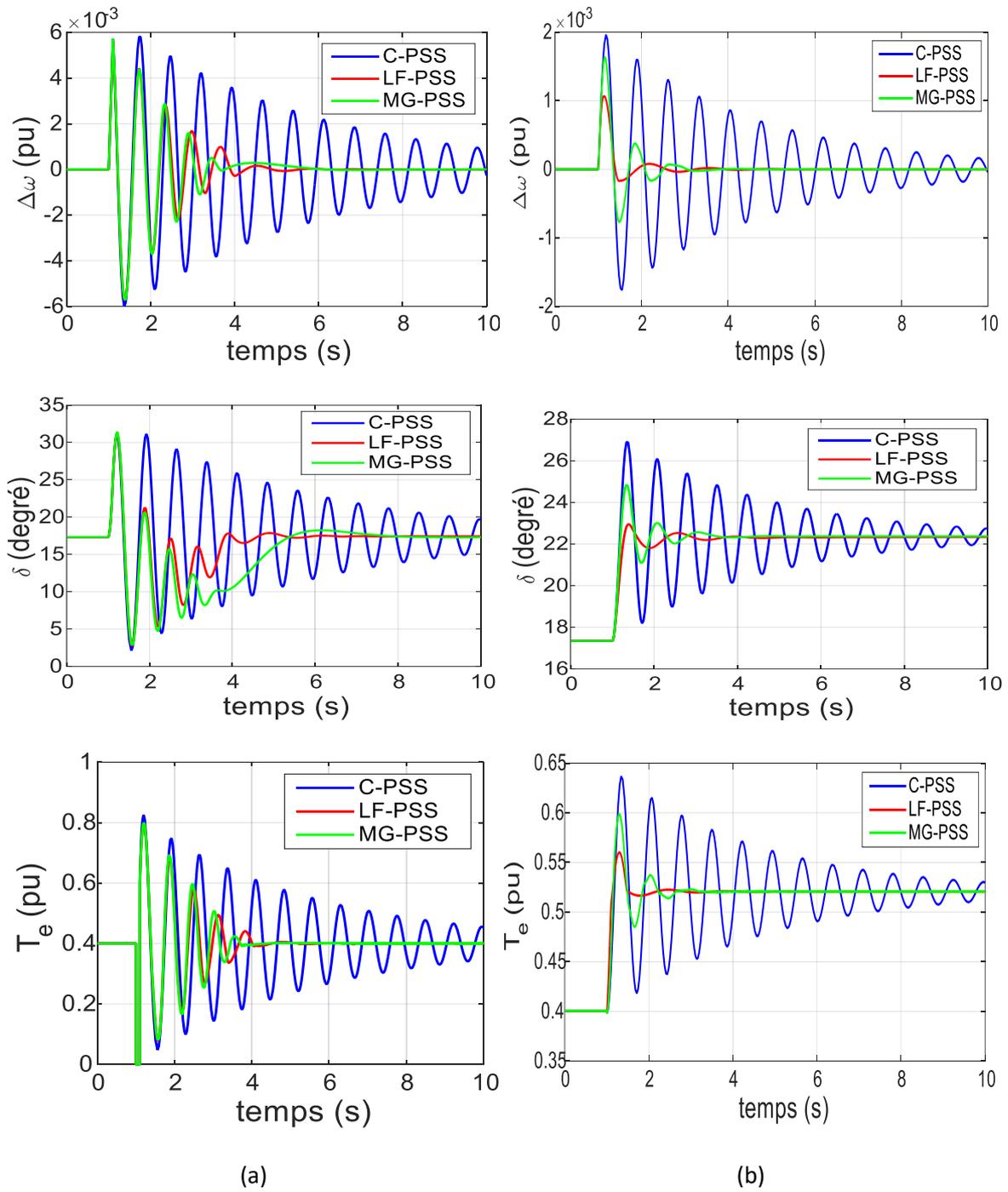


Figure. 6.7 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.4$, $Q=0.2$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

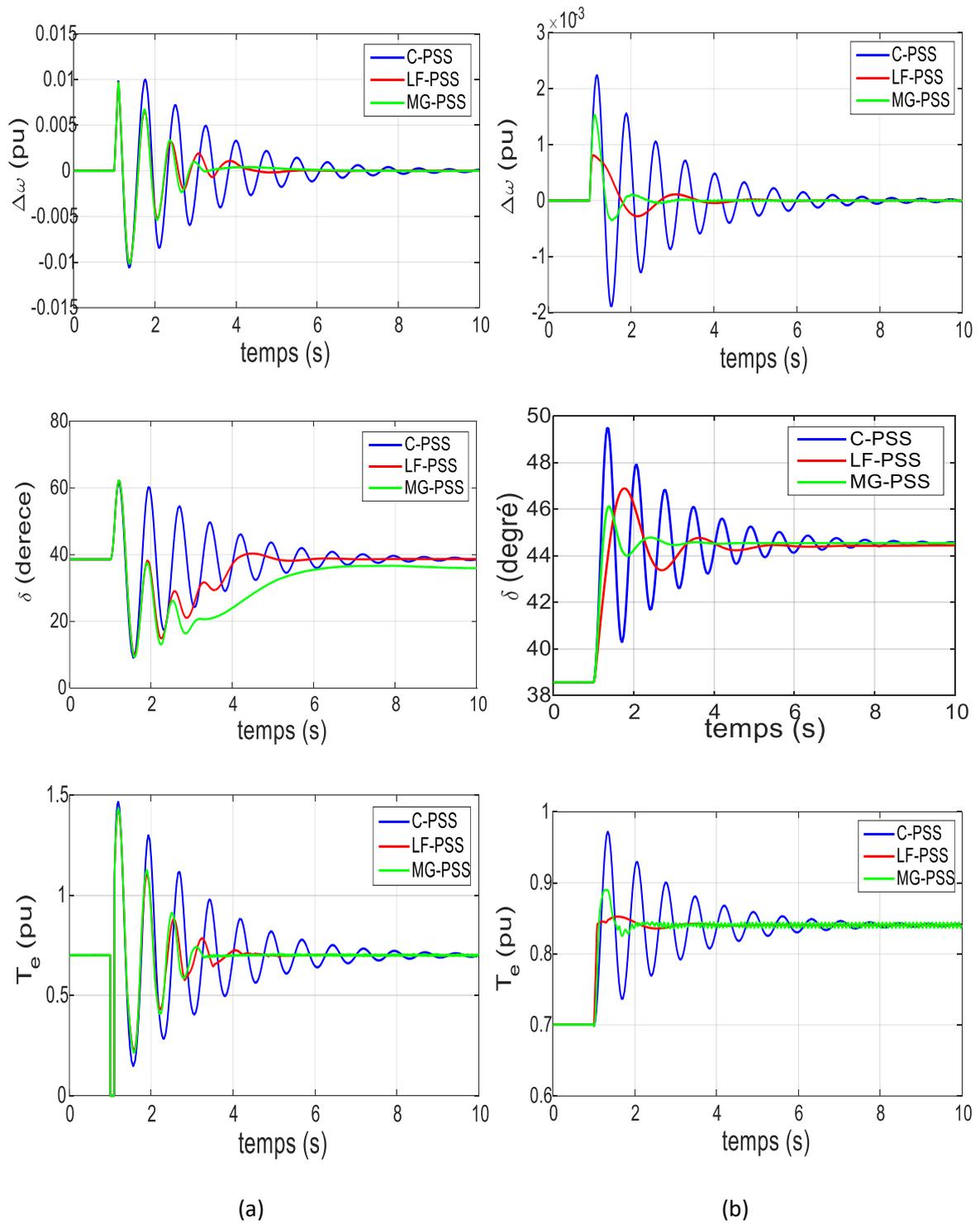


Figure. 6.8 : Réponses du système SMIB pour $\Delta\omega$, δ et T_e , $P=0.7$, $Q=-0.2$

(a) grand défaut, (b) petit défaut.

6.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une contribution au contrôle du système de puissance pour la conception d'un stabilisateur du système de puissance pour l'amortissement des oscillations électromécaniques de faible fréquence basé sur la commande par mode glissant en développant un régulateur PSS inséré dans les système d'excitation pour un système SMIB. Les résultats de simulations ont montré que les deux régulateur LFPSS et MGPSS permettent efficacement d'améliorer l'amortissement et assurer la stabilité de système pour différents points de fonctionnement, comparativement aux PSS conventionnelle.

Conclusion générale

Les oscillations électromécaniques dans le système électrique de grandes puissances posent des problèmes de sécurité, limitent la capacité de transport d'énergie et conduisent à l'effondrement et à la panne de tout le système interconnecté. Par conséquent, un contrôleur d'amortissement adéquat est de la plus haute importance pour résoudre les problèmes d'oscillations. On note que plusieurs études de ces régulateurs sur la stabilité des réseaux électriques ont été relevées par les de nombreux chercheurs.

L'étude présentée dans cette thèse porte sur l'application algorithmes génétiques, de l'essaim de particules et la colonie d'abeilles artificielles dans la synthèse et l'optimisation des paramètres du dispositif stabilisateur du système de puissance PSS, pour améliorer la stabilité dynamique du système et augmenter la flexibilité de fonctionnement du système, on a opté à la commande (mode glissant, logique floue). Le rôle principal est d'apporter l'amortissement nécessaire aux oscillations électromécaniques des générateurs, lorsque le système subit des perturbations.

Pour atteindre cet objectif, nous avons élaboré plusieurs étapes :

En premier lieu, comme dans toute étude des systèmes dynamiques réels, une modélisation du système électrique est développée en vue d'étudier sa stabilité, deux modèles sont présentés un modèle non linéaire pour étudier sa stabilité vis à vis des grandes perturbations et un modèle linéaire pour l'étude de la stabilité vis à vis des petites perturbations. Dans cette partie du travail, nous avons effectué une linéarisation des équations du système autour d'un point de fonctionnement afin d'obtenir la représentation d'état du système.

En plus, nous avons essayé de contribuer à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant, le stabilisateur du réseau électrique (PSS) qui a été considéré comme un moyen efficace d'améliorer l'amortissement des oscillations électromécaniques dans les réseaux électriques. L'action du PSS est d'étendre les limites de stabilité angulaire d'un système électrique en fournissant un amortissement supplémentaire à l'oscillation des rotors des machines synchrones par l'excitation du générateur. Cet amortissement est assuré par un couple électrique appliqué au rotor qui est en phase avec la variation de vitesse.

Sachant que la conception du PSS est principalement basée sur un modèle de système électrique linéarisé obtenu à un point de fonctionnement spécifique. Cependant, en pratique, le point de fonctionnement d'un système de puissance peut changer en raison de plusieurs facteurs, tels que des courts-circuits et des changements dans la topologie du réseau, produisant ainsi des problèmes de stabilité qui peuvent ne pas être résolus de manière satisfaisante par les contrôleurs PSS. Par conséquent, pour résoudre ces problèmes, l'attention des chercheurs s'est portée sur la conception de contrôleurs basés sur des techniques d'intelligence artificielle.

Dans une seconde étape, nous avons abordé la synthèse des paramètres du PSS en utilisant les commandes d'optimisation métaheuristique (AG, PSO, ABC). L'objectif principal dans la procédure d'optimisation est d'obtenir un PSS suffisamment robuste vis-à-vis d'éventuels changements dans les conditions de fonctionnement du système électrique. Les algorithmes métaheuristicques proposés, permettent de considérer différents points de fonctionnement ou topologies, afin d'assurer, à tout moment, une stabilité satisfaisante de l'ensemble du système.

La troisième phase consiste à appliquer la commande logique floue pour la conception optimale du contrôleur PSS d'un stabilisateur de système de puissance basée sur un contrôleur PID utilisant une programmation de gain floue qui est adaptée on line en fonction de l'optimisation des paramètres. Les résultats obtenus montrent que le système présente de bonnes performances dynamiques avec un meilleur amortissement observé.

La dernière étape est consacrée à la méthode de conception d'un stabilisateur intelligent basée sur la théorie des modes glissants, appliquée à un système de puissance à un seul générateur-bus infini (SMIB). Ce contrôle apporte de nombreux avantages tels qu'une bonne robustesse, une grande précision, une bonne stabilité et un temps de réponse rapide. Cela le rend particulièrement adapté aux systèmes de manipulation avec des incertitudes. L'effet d'incertitude de façon succincte peut être dû aux variations des paramètres du système, aux perturbations environnantes, aux défauts des capteurs ou actionneurs de mesure et aux simplifications sur le modèle du système. Et d'une façon générale toute manœuvre sur le réseau électrique.

En comparant les deux techniques, nous avons constaté que le MG donne une amélioration claire vis-à-vis de LF.

Une extension de ce travail dans l'avenir est envisagée spécialement pour :

- Application des commandes robuste (logique floue, mode glissant) dans les systèmes multi-machines.

- Mettre en œuvre des algorithmes d'optimisation avancés avec des contrôleurs intelligents tels que le réseau de neurones pour le contrôle PSS et FACTS,
- La conception de coordination des contrôleurs PSS et de plusieurs contrôleurs FACTS doivent être mis en œuvre pour fournir des performances améliorées composites
- La conception du contrôleur d'amortissement pour un système de puissance relativement grand.

Références Bibliographiques

A

- [ABD16] S. M. Abd Elazim and E. S. Ali, « Optimal SSSC design for damping power systems oscillations via Gravitational Search Algorithm, » *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol. 82, pp. 161–168, 2016.
- [ABU08] N. Abu-tabak, « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines: modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de doctorat, École Centrale De Lyon, 2008.
- [AKA12] B. Akay, D. Karaboga, «A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization », *Artificial Intelligence Review*, vol. 192, pp. 120-142, 2012.
- [ALK08] H. Alkhatib, « Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques: optimisation de la régulation par une méthode metaheuristique », Thèse de doctorat, université Paul Cézanne d'Aix Marseille, 2008.
- [ALK13] H. Alkhatib and J. Duveau, « Dynamic genetic algorithms for robust design of multimachine power system stabilizers, » *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol. 45, no. 1, pp. 242–251, 2013.
- [ALL17] M. Allam, « Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable », Thèse de doctorat, UDL, SBA, 2017.
- [AME15] O. AMEUR «Commande et stabilité des systèmes commutés : Application Fluid Power », Thèse de Doctorat de l'université de Lyon, 2015.
- [AME16] T. AMEUR « Optimisation du processus d'usinage en utilisant la méthode des essaims de particules », Thèse de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [AND08] M.P. Anderson, A.A. Fouad, Abu-tabak « Power system control and stability», John Wiley & Sons, Second Edition, 2008. 2003
- [AND12] G. Andersson, «Dynamic and Control of Electric Power Systems », Lectures 227-0528-00, ITET ETH, EEH Power Systems Laboratory, ETH, Zurich, February 2012.

- [AWA19] M. A. Awadallah, M. A. Al-Betar, A. L. A. Bolaji, E. M. Alsukhni, H. Al-Zoubi, « Natural selection methods for artificial bee colony with new versions of onlooker bee », *Soft Computing*, vol. 23, no.15, pp. 6455-6494, 2019.

B

- [BAN14] H. U. Banna, A. Luna, P. Rodriguez, A. Cabrera, H. Ghorbani, S. Ying, « Performance analysis of conventional PSS and fuzzy controller for damping power system oscillations », 2014 International conference on renewable energy research and application (ICRERA), pp. 229–234. 2014.
- [BAS05] M. J. Basler, R. C. Schaefer, « Understanding power system stability » 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, IEEE, pp. 46-67. 2005.
- [BAS08] M.J. Basler, R. C. Schaefer, « Understanding power system stability » IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 2, 2008.
- [BAS13] G. Bastin, « Modélisation et analyse des systèmes dynamiques » cour, 2013.
- [BOU16] Z. Bouchama, N. Essounbouli, M. N. Harnas, A. Hamzaoui, K.Saoudi, «Reaching phase free adaptive fuzzy synergetic power system stabilizer», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 77, pp. 43-49, 2016.
- [BOU00] G. E. Boukarim, & et al., «A comparison of classical, robust, & Decentralized control designs for multiple PSS », *IEEE Pr Sys*, vol.15,no.4,pp.1287-1292, 2000.

C

- [CAI05] L. J. Cai and I. Erlich, « Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Damping Controllers in Large Power Systems », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 294–300, 2005.
- [CEL09] A. Celikyilmaz, I. B. Turksen, «Modeling uncertainty with fuzzy logic. Studies in fuzziness and soft computing », Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [CHE98] S. Chen, & et al., « The PSS design using optimal path estimation method », IEEE, pp. 194-199, 1998.
- [CHO10] I. Chouchani, « Utilisation d'un algorithme génétique pour la composition de services web », Thèse de doctorat, université du QUÉBEC, 2010.
- [CUS02] T.V. Custem « Systèmes électriques de Puissance II », Cours ELEC 047

D

- [DAS18] B. Dasu, M. Sivakumar, R. Srinivasarao, « Interconnected multi-machine power system stabilizer design using whale optimization algorithm », *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 4, no. 1, pp.1-11, 2019.
- [DEH06] B. Dehiba, «commande adaptative par mode glissant d'un actionneur électrique a courant alternatif pilote vectoriellement », Thèse de doctorat, UDL, SBA, 2006.
- [DEH21] I. Dehiba , M. Abid , A. Aissaoui ,B. Dehiba, «Robust control of power system stabilizer using sliding mode approach », *Przegląd elektrotechniczny*, pp.82-86, 2021.
- [DEHI21] I. Dehiba , M. Abid , A. Aissaoui. « ROBUST DESIGN OF POWER SYSTEM STABILIZER FOR A SINGLE GENERATOR-INFINITE BUS POWER SYSTEM », *Revue Roumaine des Sciences Techniques—Série Électrotechnique et Énergétique*, vol. 66, no 4, pp. 249-253,2021.
- [DER17] N. Derbel, J. Ghommam, Q.Zhu, « Applications of sliding mode control », Springer Singapore., Vol. 79, pp. 335-337, 2017.
- [DEY17] P. Dey, A. Bhattacharya, J.Datta , P. Das, «Small signal stability improvement of large interconnected power systems using power system stabilizer », 2nd International Conference for. IEEE, pp. 753–760, 2017.

E

- [EKİ15] S. Ekinci «analyse de la stabilité angulaire et optimisation des paramètres du contrleur dans un système d'alimentation multi-machine » thèse de doctorat, université université technique d'istanbul, 2015.
- [EKİ19] S. Ekinci, B. Hekimoğlu, E. Uysal, “Kidney-inspired algorithm for determination of PID power system stabilizer parameters”, *Journal of polytechnic*, vol. 22, no.2, pp. 453-460, 2019.
- [EKO00] A. F. Okou, & et al., « Towards a systematic procedure to design robust PSSs », IEEE, pp. 2361-2366, 2000.
- [ERE13] M. Eremia, M. Shahidehpour, « Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control », John Wiley & Sons, vol. 92, 2013.

F

- [FAL16] A. D. Falehi and A. Mosallanejad, «Neoteric HANFISC–SSSC based on MOPSO technique aimed at oscillation suppression of interconnected multi-source power systems, » IET Gener. Transm. Distrib, vol. 10, no. 7, pp. 1728–1740, 2016.
- [FAL95] C. M. Falkner, and B. S. Heck, «Accelerating power versus electrical power as input signals to power system stabilizers », IEEE Proc. Amer. Contl. Conf. Washington, pp. 1550-1555, 1995.
- [FEY15] P. FEYEL « Optimisation des correcteurs par les métaheuristiques – Application à la stabilisation inertielle de ligne de visée », thèse de doctorat, école doctorale Stits, 2015.
- [FOU91] A. A. Fouad, V. Vittal « Power system transient stability analysis using the transient energy function method », Pearson Education, 1991.

G

- [GAB19] A.Gabour, «Optimisation et Commande d'un système énergétique multi source » thèse de doctorat, université 20 Août 1955-Skikda, 2019.
- [GAC19] A. Gasem, « Commande robuste d'un dispositif FACTS par les méthodes métaheuristiques pour la stabilité de tension d'un réseau électrique » Thèse de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [GOM18] S. Gomes, C. H. C. Guimarães, N. Martins, Taranto, G. N, « Damped Nyquist Plot for a pole placement design of power system stabilizers», Electric Power Systems Research, vol. 158, pp. 158-169, 2018.
- [GUE10] O. Guenounou, «Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé », thèse de doctorat, université de Toulouse ,2010.
- [GUE17] A. Guediri, « Etude et commande d'une chaine de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension » thèse de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra, 2017.
- [GUE19] R. Gueddouche, « Equivalents Dynamiques des Grands Réseaux Electriques par les Algorithmes Intelligents et Métaheuristiques », thèse de doctorat, université des Sciences et de La Technologie Houari Boumediene, 2019.

H

- [HAN18] M. A. Hannan., N. N. Islam, M. Azah, M. S. H. Lipu, P. J. Ker, M. M. Rashid, H. Shareef, « Artificial intelligent based damping controller optimization for the multi-machine power system » Rev. IEEE Access, 6, pp. 39574-39594, 2018.
- [HAR19] F.Harfouchi « Contribution à l'optimisation par colonies d'abeilles artificielles : Application à la conception de systèmes intelligents », thèse de doctorat, université M'hamed Bougara, Boumerdes, 2019.
- [HAS14] L. H. Hassan, M. Moghavvemi, H. A. F. Almurib, K. M. Muttaqi, and V. G. Ganapathy, « Optimization of power system stabilizers using participation factor and genetic algorithm, » Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 55, pp. 668–679, Feb. 2014.
- [HEM18] R. Hemmati, Power system stabilizer design based on optimal model reference adaptive system », Ain Shams Engineering Journal, vol. 9, no. 2, pp. 311-318, 2018.
- [HER19] O. Herbadji, « Contribution à l'optimisation des réseaux électriques en présence des Multi FACTS par des méthodes métaheuristiques hybrides», thèse de doctorat, université Ferhat Abbas - Setif 1, 2019.
- [HIA99] T. Hiyama, « Development of fuzzy logic PSS and further studies », IEEE, pp. 545-550, 1999.
- [HOG96] P. Hoang, & K. Tomsovic, « Design and analysis of an adaptive fuzzy PSS », IEEE Trans. Energy Con., vol. 11, no. 2, pp. 455-461, June 1996.
- [HOS14] J. Hossain, H. R. Pota, « Robust control for grid voltage stability: high penetration of renewable energy», Power systems. Springer Science+ Business Media, 2014.
- [HU19] Y.C. Hu, S.Tiwari, K. K. Mishra, « Ambient Communications and Computer Systems », Springer, 2019.

I

- [IZA15] H. Izadi, R. Effatnejad, « Power system stabilizers and control of reactive power compensator in multi-machine by particle swarm optimization algorithm », Indian Journal of Science and Technology, vol. 8, no. 3, pp.254, 2015.

J

- [JAB10] R. A. Jabr, B. C. Pal, N. Martins, J. C. R. Ferra, « Robust and coordinated tuning of power system stabiliser gains using sequential linear programming », *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. 8, p. 893, 2010.
- [JAI18] N. K. Jain, U. Nangia, J. Jain, « A review of particle swarm optimization », *Journal of the Institution of Engineers, India*, vol. 99, no. 4, pp.407-411, 2018.
- [JAL14] R. Jalayer and B.-T. Ooi, « Co-Ordinated PSS Tuning of Large Power Systems by Combining Transfer Function-Eigenfunction Analysis (TFEA), Optimization, and Eigenvalue Sensitivity », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2672–2680, 2014.
- [JEB17] M. Jebali, O. Kahouli, H. H. Abdallah, « Optimizing PSS parameters for a multi-machine power system using genetic algorithm and neural network techniques », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 90, no. 9, pp. 2669-2688, 2017.
- [JUN16] M. Juneja, S. K. Nagar, « Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review », In 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM), IEEE, pp. 1-5, 2016.

K

- [KAR07] D. Karaboga, B. Basturk, «A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm », *Journal of global optimization*, vol.39 no.3, pp.459-471, 2007.
- [KAR12] D. Karaboga, B. Gorkemli, C. Ozturk, N. Karaboga, « A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications », *Artificial Intelligence Review*, vol. 42, no. 1, pp. 21-57, 2012.
- [KEB13] Y. KEBBATI, «Commande en Mode Glissant avec Observateur Robuste Associée à un Estimateur pour le Diagnostic du Moteur Asynchrone», thèse de doctorat, université de Mohamed Boudiaf, Oran ,2013.
- [KIR15] M. S.Kiran, O. Findik, «A directed artificial bee colony algorithm », *Applied Soft Computing*, vol. 26, pp. 454-462, 2015
- [KHA96] H-K. Khalil. « Nonlinear systems », Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- [KHE16] K. KHETTAB, « Techniques avancées pour la synthèse et l'amélioration des performances des systèmes de commande adaptative d'ordre fractionnaire pour

les processus incertains », thèse de doctorat, université du 20 août 1955 Skikda, 2016.

- [KUN94] P. Kundur, «Power System Stability and Control », Mc Graw-Hill Companies, 1994.
- [KUN04] P. Kundur, P. John, A. Venkat, « Definition and classification of power system stability », IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions, IEEE trans. on Power Systems, vol. 19, No. 3, pp. 1387-1401, 2004.

L

- [LAB17] H. Labdelaoui, F. Boudjema, D. Boukhetala, « Multiobjective optimal design of dual-input power system stabilizer using genetic algorithms », Rev. Roum. Sci. Techn.-Électrotechn.et Énerg., **62**, 1, pp. 93–97, Bucarest, 2017.
- [LAO19] F. Laouafi «Optimisation du plan de tension et de la répartition de la puissance réactive par les techniques intelligentes hybrides améliorées », thèse de doctorat en, université 20 Août 1955 - Skikda,2019.
- [LIU12] J. Liu, X. Wang, « Advanced sliding mode control for mechanical systems », Berlin: Springer, 2012.
- [LIU03] W. Liu, and et al., « Adaptive neural network based PSS design », IEEE, pp. 2970-2975, 2003.
- [LU 00] J. Lu, & et al., « A fuzzy logic-based adaptive PSS for multi-machine systems », IEEE, pp. 111-115, 2000.

M

- [MAC20] J. Machowski, Z .Lubosny, J. W. Bialek, J. R. Bumby, « Power system dynamics: stability and control » John Wiley & Sons,2020.
- [MAG14] M. A. Magzoub, N. B. Saad, and R. B. Ibrahim, « Power system stabiliser for single machine in infinite bus based on optimal control methods », 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014), pp. 313–317, 2014.
- [MAS17] M.Masdari, F.Salehi, , M. Jalali, , M. Bidaki, « A survey of PSO-based scheduling algorithms in cloud computing. Journal of Network and Systems Management », Journal of Network and Systems Management, vol. 25, no.1, pp. 122-158, 2017.

- [MEK18] M. Mekhanet « Conception des Stabilisateurs de Puissance d'un Réseau Électrique Multimachine : Optimisation et Auto-Ajustement en Temps Réel », thèse de doctorat, Université Amar Telidji - Laghouat, 2018.
- [MIC08] A.N. Michel, D. Liu, L. Hou, « Stability of Dynamical Systems-Continuous, Discontinuous, and Discrete Systems », Birkhauser Boston, 2008.
- [MIL16] F. Milla and M. A. Duarte-Mermoud, « Predictive optimized adaptive PSS in a single machine infinite bus », *ISA Trans.*, vol. 63, pp. 315–327, Jul. 2016.
- [MOH18] B. Mohandes, Y. L. Abdelmagid, and I. Boiko, « Development of PSS tuning rules using multi-objective optimization », *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 100, pp. 449–462, 2018.
- [MON12] D. Mondal, A. Chakrabarti, and A. Sengupta, « Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem, » *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol. 42, no. 1, pp. 334–340, 2012.
- [MON20] D. Mondal, A. Chakrabarti, et A. Sengupta, « Power system small signal stability analysis and control. », Academic Press, 2020.
- [MOO96] G. V. Moodley, & et al., « Fuzzy logic PSS in multi- machine stability studies», IEEE, pp. 843-848, 1996.
- [MUQ06] B.A. MUQABEL, A. A. ABIDO, «A Review of conventional power system stabilizer design methods»,.In : 2006 IEEE GCC Conference (GCC). IEEE, pp. 1-7, 2006.

N

- [NAG14] T. K. Nagsarkar, M. S. SUKHIJA, « Power system analysis » Oxford university press, 2014.
- [NAM 96] M. Nambu, and Y. Ohsawa, «Development of an advanced power system stabilizer using a strict linearization approach» , *IEEE Trans. Power Sys*, vol. 11, no. 2, pp. 813-818, 1996.

O

- [OTH89] H. Othman, al., «On the design of robust power system stabilizers, » IEEE Proc of 28th conf on Dec. et control, pp. 1853-1857, 1989.

P

- [PAI89] M. A. Pai, P. W. Sauer, « Stability analysis of power systems by Lyapunov's direct method », IEEE Control Systems Magazine, 9(1), 23-27, 1989.
- [PAR96] Y. Park, & et al., « A wide range operation PSS design with neural network using power flow characteristics»,IEEE, pp. 294-298, 1996.
- [PED 97] M. M. Pedram, and H. Seifi, F. M. G. Tomescu, «Extended Algorithm of a Fuzzy-set Based Power-system Stabilizer with Genetic Algorithm Timing», European Transactions on Electrical Power, **7**, 3, pp. 205–210, 1997.
- [PEN18] Y. Peng, Q. Chen, W. Sun, M. Kashif, «A disturbance-rejection power stabilizer for power system based-on internal model control framework », 37th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, pp. 714-719, 2018.
- [PON16] P. Ponce-Cruz, A. Molina, B. MacCleery, « Fuzzy Logic Type 1 and Type 2 Based on LabVIEW», FPGA. Cham: Springer, 2016.

R

- [RAD92] G. Radman, «Design of PSS based on LQG/LTR formulations » , IEEE, pp. 1787-1792, 1992.
- [RAM04] J. M. Ramirez, & I. Castillo, « PSS & FDS simultaneous tuning », EPSR 68, 33-40, 2004
- [RAO99] P. S. Rao, and I. Sen, «Robust tuning of power system stabilizers using QFT », IEEE Trans.Cont. Sys. Tech., vol.7, no. 4, pp. 478-486, 1999.
- [RIT20] J. Ritonja, , B. Grčar, B. Polajžer, « Model Reference Adaptive Approach for Power System Stabilizer for Damping of Power Oscillations », International Journal of Electrical and Information Engineering, vol.14, no. 3, pp 80-84,2020.

S

- [SAA99] H. Saadat, « Power system analysis », McGraw-Hill, 1999.
- [SCA01] F. E. Scavoni, & et al., « Design of robust power system controllers using linear matrix inequalities », 2001 IEEE Porto power Tech Conf, Porto, Portugal.
- [SAF18] Mohammed SAFI, « Stabilité de Lyapunov de systèmes couplés impliquant une équation de transport », université, Toulouse, 2018.
- [SAL15] Sallam, A. A., & Malik, O. P, «Power system stability: modelling, analysis and control» (Vol. 2). IET, 2015

- [SAL18] A. Salgotra, S. Pan, « Model based PI power system stabilizer design for damping low frequency oscillations in power systems », *ISA transactions*, vol. 76, pp. 110-121, 2018.
- [SAR18] M. Sarailoo, N. E. Wu, J. S. Bay, « Transient stability assessment of large lossy power systems», *IET Gener. Transm. Distrib.* vol. 12, no. 8, pp. 1822–1830, 2018.
- [SAU18] P. W.Sauer, M. A. Pai. « Power system Dynamics and Stability», Prentice Hall, 2018.
- [SCH17] P. Schavemaker, L. Van der Sluis. « Electrical power system essentials», John Wiley & Sons, 2017.
- [SED94] A. K. Sedigh, & G. Alizadeh, «Design of robust PSS using quantitative feedback theory», *IEE contrl Conf.*, pub.no.389, pp. 416-421, March 1994.
- [SHA14] B. Shaw, V. Mukherjee, and S. P. Ghoshal, « Solution of reactive power dispatch of power systems by an opposition-based gravitational search algorithm, » *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol. 55, pp. 29–40, 2014.
- [SHA16] M. R. Shakarami, I. F. Davoudkhani, I. F., « Wide-area power system stabilizer design based on grey wolf optimization algorithm considering the time delay », *Electric Power Systems Research*, vol. 133, pp.149-159, 2016.
- [SHA16] S. Sharma, P. Bhambu, « Artificial bee colony algorithm: A survey », *International Journal of Computer Applications*, vol. 149, no.4, pp. 11-19, 2016.
- [SHA02] A. Sharma, & M. L. Kothari, « Intelligent dual input PSSs for multi-machine system», *IEEE*, pp. 168-173, 2002.
- [SHA00] P. Shamsollahi, & O. P. Malik, « Design of a neural adaptive PSS using dynamic back-propagation method », *Electrical power and energy systems*, pp. 29-34, 2000.
- [SHA95] S. S. Sharif, «Nonlinear PSS design technique», *IEEE*, pp. 44-47, 1995.
- [SID13] N. Siddique, H. Adeli, « Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks and evolutionary computing», John Wiley & Sons, 2013.
- [SLO98] Slotine, J.J.E. Li, W, «Applied nonlinear control», Prentice Hall, USA, 1998.
- [SOU08] A. Soukkou, « Modélisation et Commande des systèmes Industriels Complexes par les Techniques Intelligentes », thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2008.

- [SOO02] A. Soos, & O. P. Malik, « An H_2 optimal adaptive PSS», IEEE Trans. Energy Con, vol. 17, no. 1, pp. 143-194, 2002.
- [SRE19] K. M.Sreedivya, P. A.Jeyanthi, D. Devaraj, , « Design of an Optimal tuned Sliding Mode Controlled Power System Stabilizer for Stability Enhancement by Damping the Low Frequency Oscillations », In TENCON IEEE Region 10 Conference TENCON, pp. 181-186. IEEE, 2019.
- [ŠTI18] V. J. Štil, M. Mehmedović, « Interconnection and damping assignment automatic voltage regulator for synchronous generators », International Journal of Electrical Power et Energy Systems, vol. 101, pp.204-212, 2018.
- [SUN04] K. Sundareswaran, and S. Razia Begum, « Genetic Tuning of a Power System Stabilizer », European Transactions on Electrical Power, vol. 14, no. 3, pp. 151–160, 2004.

T

- [TAL14] N. Talbi «Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des Approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Non linéaires » Thèse de doctorat en, université de Constantine 1 ,2014.
- [TAL16] H. Talhaoui, « Contrôle par mode glissant : Observation et estimation paramétrique d'une machine à induction avec défauts », thèse de doctorat, université de Biskra, 2016.
- [TAN18] Y. Tang, F. Li, Q. Wang, and Y. Xu, « Hybrid method for power system transient stability prediction based on two-stage computing resources », IET Gener. Transm. Distrib, vol. 12, no. 8, pp. 1822–1830, 2018.
- [TSE01] C. T. Tse, & et al., «Robust PSS design by probabilistic eigenvalue sensitivity analysis », EPSR 59, 47-54,2001.

U

- [USM14] J. Usmana, M. W. Mustafaa, G. Aliyua, B. U. Musab, « Coordinated AVR-PSS for Transient Stability Using Modified Particle Swarm Optimization », Jurnal Teknologi -Sciences & Engineering., Vol. 67, No 3, pp. 9–16, Malaysia, 2014.

W

- [WAN16] H. Wang, W. Du, « Analysis and Damping, Control of Power System Low-frequency Oscillations », New York: Springer, 2016.

- [WEE12] B. M. Weedy, B. J. Cory, N. Jenkins, J. B. Ekanayake, G. Strbac, «Electric power systems », John Wiley & Sons, 2012.

Y

- [YU 90] Y. Yu, Q. Li, «Pole-placement power system stabilizers design of an unstable nine-machine system», IEEE Trans. Pr Sys, vol. 5, no. 2, pp.353-358, 1990.

Z

- [ZAG15] R. ZAGHDOUD «Hybridation d'algorithme génétique pour les problèmes des véhicules intelligents autonomes : applications aux infrastructures portuaires de moyenne taille », thèse de doctorat, école centrale de Lille ,2015.
- [ZHA15] Y. Zhang, S. Wang, G. Ji, « A comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications », *Mathematical problems in engineering*, 2015.
- [ZHA18] C. Zhang, D. Ke, Y. Sun, C. Y. Chung, J. Xu, and F. Shen, «Coordinated Supplementary Damping Control of DFIG and PSS to Suppress Inter-Area Oscillations With Optimally Controlled Plant Dynami », IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 9, no. 2, pp. 780–791, 2018.
- [ZHE93] Z. Zhen-Yu, T. Masayoshi and I. Satoru, «Fuzzy gain scheduling of PID controllers», Rev. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 23, 5, pp. 1392–1398, 1993.
- [ZHO91] E. Z. Zhout, and et al., «Theory and method for selection of power system stabilizer location », IEEE Trans. Energy Con., vol. 6, no. 1, pp. 170-176, 1991.

Annexe A

Système SMIB

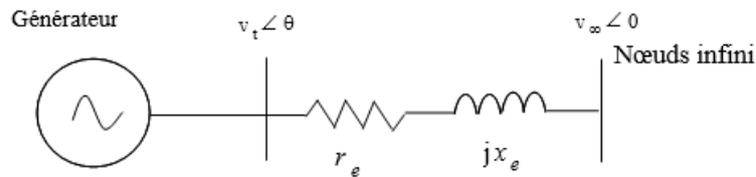


Figure.A.1 : Système SMIB.

Les paramètres du système SMIB utilisés sont [WAN16] :

Tableau A.1 : Paramètres du système SMIB.

	Paramètre
Générateur	$H = 7/2$; $T'_{d0} = 5$; $r_s = 0.005$; $x_q = 0.78$; $x_d = 1.18$; $x'_d = 0.2951$; $D = 0$; $f = 60$; $\omega_s = 2 * \pi * f$; $e_{fd_max} = 7$; $e_{fd_min} = 0$.
Line de transmission	$x_e = 0.15$; $r_e = 0$; $v_t = 1.05$; $\theta^0 = 0.0715$; $v_\infty = 1$.
AVR	$K_a = 200$; $T_a = 0.01$.
PSS	$K_{PSS} = 0.5$; $T_W = 10$; $T_1 = 0.2$; $T_2 = 0.1$

Tableau A.2 : Valeurs propres et taux d'amortissement du système SMIB.

Type de système	Valeurs propres	Taux d'amortissement
Système sans PSS	$-84.5289 + 0.0000i$	1.0000
	$-16.0687 + 0.0000i$	1.0000
	$-0.0000 + 9.0605i$	0.0000
	$-0.0000 - 9.0605i$	0.0000
Système avec PSS	$-84.7336 + 0.0000i$	1.0000
	$-0.2440 + 9.0562i$	0.0269
	$-0.2440 - 9.0562i$	0.0269
	$-13.4945 + 0.0000i$	1.0000
	$-11.8815 + 0.0000i$	1.0000

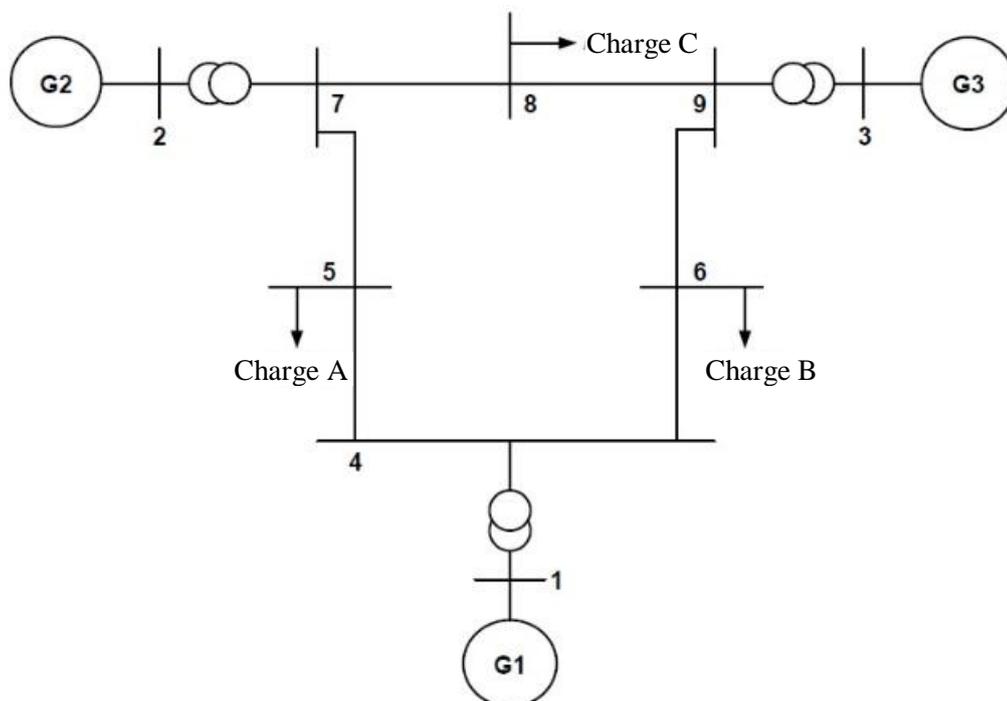
Système multi-machine**Figure. A.2 : Système multimachine WECC à 3 machines, 9 bus [SAU18].**

Tableau A.3 : Données du système multimachine WECC 3-Machine, 9-Bus [SAU18].

nœud	Type	Tension	Angle (degrés)	P _L (pu)	Q _L (pu)	P _G (pu)	Q _G (pu)
1		1.0400	0	0	0	0.7164	0.2705
2	PV	1.0250	9.2800	0	0	1.6300	0.0665
3	PV	1.0250	4.6648	0	0	0.8500	-0.1086
4	PQ	1.0258	-2.2168	0	0	0	0
5	PQ	0.9956	-3.9888	1.2500	0.5000	0	0
6	PQ	1.0127	-3.6874	0.9000	0.3000	0	0
7	PQ	1.0258	3.7197	0	0	0	0
8	PQ	1.0159	0.7275	1.0000	0.3500	0	0
9	PQ	1.0324	1.9667	0	0	0	0

Tableau A.4 : Paramètres du système multimachine WECC 3-Machine, 9-Bus [SAU18].

Parameters	G1	G2	G3	Parameters	G1	G2	G3
H	23.64	6.40	3.01	K _P	0	15,1707	13,1606
D	0	0	0	T1	1	1,0000	0,4365
R _s	0	0	0	T2	1	0,6116	0,2325
x _d	0.1460	0.8958	1.3125				
x _d '	0.0608	0.1198	0.1813				
x _q	0.0969	0.8645	1.2578				
T _d '	8.96	6	0.535				
K _a	100	100	100				
T _a	0.05	0.05	0.05				
T _w	10	10	10				
T3	1	0,3137	0,5800				
T4	1	0,0100	0,0100				

Tableau A.5 : Valeurs propres et taux d'amortissement du système multimachine

Type de système	Valeurs propres	Taux d'amortissement
Système sans PSS	-9.8638 +13.6643i	0.5853
	-9.8638 -13.6643i	0.5853
	-12.7012 + 0.0000i	1.0000
	-1.3738 +11.7499i	0.1161
	-1.3738 -11.7499i	0.1161
	-0.3831 + 7.8846i	0.0485
	-0.3831 - 7.8846i	0.0485
	-9.9194 + 6.4142i	0.8397
	-9.9194 - 6.4142i	0.8397
	-5.5006 + 0.0000i	1.0000
	-0.0000 + 0.0000i	1.0000
	0.0000 + 0.0000i	-1.0000
	Système avec PSS	-1.0653 + 0.0000i
-0.0524 + 0.2735i		0.0019
-0.0524 - 0.2735i		0.0019
-0.0867 + 0.1082i		0.0063
-0.0867 - 0.1082i		0.0063
-0.0202 + 0.0000i		0.0100
-0.0254 + 0.1032i		0.0024
-0.0254 - 0.1032i		0.0024
-0.0838 + 0.0320i		0.0093
-0.0838 - 0.0320i		0.0093
-0.0220 + 0.0357i		0.0052
-0.0220 - 0.0357i		0.0052
-0.0043 + 0.0000i		0.0100
0.0000 + 0.0000i	-0.0000	
0.0000 - 0.0000i	-0.0000	

Annexe B

Tableau B.1: Paramètres choisis pour l'algorithme génétique.

Designation	Valeur
Nombre d'individus	20
Probabilité de croisement	1
Probabilité de mutation	0.02
Nombre maximal de generations	10
Codage	Binaire

Tableau B.2: Paramètres choisis pour l'algorithme PSO.

Désignation	Valeur
Nombre maximal d'itérations	10
Taille de la population (taille de l'essaim)	50
Coefficient d'accélération personnel	$c1 = 2$
Coefficient d'accélération sociale	$c2 = 2$
Coefficient d'intervalle	1
Taux d'amortissement du coefficient d'inertie	0.99

Tableau B.3: Paramètres choisis pour l'algorithme ABC.

Désignation	Valeur
Nombre maximal d'itérations	10
Taille de la population (taille de la colonie)	10
Nombre d'abeilles spectatrices	10
Paramètre de limite d'abandon (limite d'essai)	$L = \text{rond}(0.6 * nVar * nPop)$;
Limite supérieure du coefficient d'accélération	1

Tableau B.4: Résultats d'optimisation du régulateur du PSS optimisés par AG, PSO et ABC.

		PID		
		K_P	K_i	K_d
AG	MAX	15	3	10
	MIN	4	0.001	4
PSO	MAX	32.8859	44.8767	10
	MIN	15	15.2178	4
ABC	MAX	4.9637	26.2953	10
	MIN	0.0074	1.4336	4

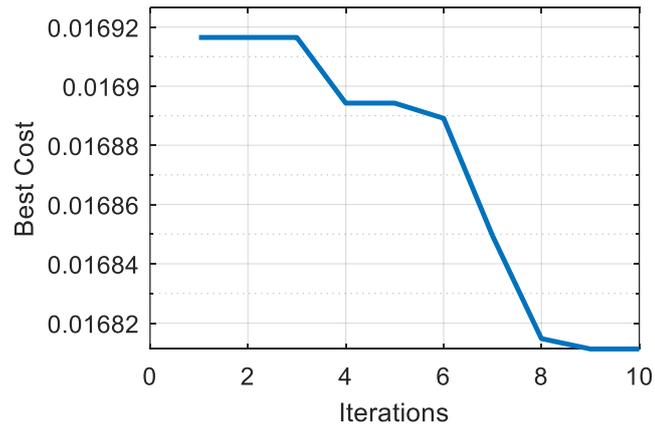


Figure. B1: Variation et convergence de la fonction objectif en utilisant l'algorithme AG.

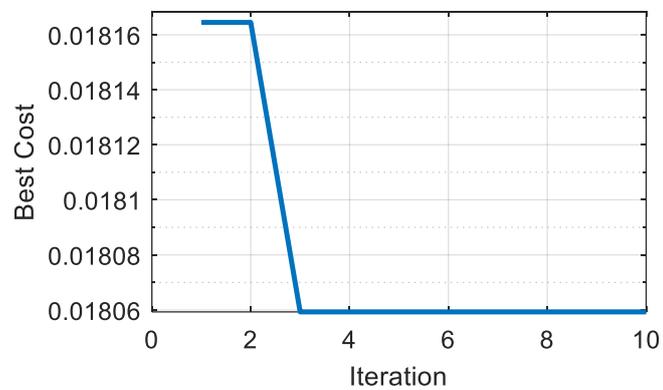


Figure. B2: Variation et convergence de la fonction objectif en utilisant l'algorithme PSO.

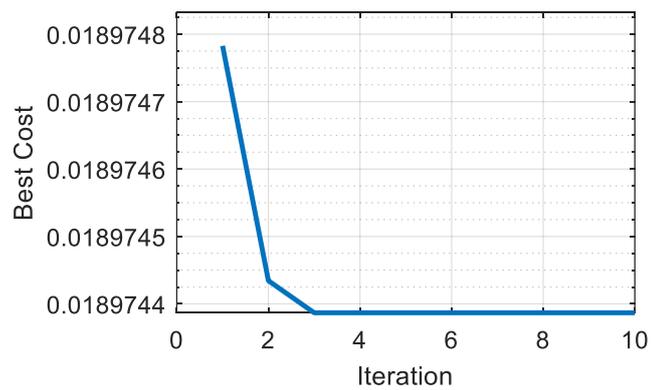


Figure. B3: Variation et convergence de la fonction objectif en utilisant l'algorithme ABC.

Annexe C

➤ **Ecriture des matrices C_1 , D_1 et D_2 :**

$$C_1 = \begin{bmatrix} -V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 0 \\ V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} -r_{si} & x_{qi} \\ -x_{di} & -r_{si} \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & -\sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \\ -V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & -\cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} i_{di0}V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) - i_{qi0}V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 0 \\ -i_{di0}V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) - i_{qi0}V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \\ V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & -V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \end{bmatrix}$$

➤ **Ecriture des matrices D_4 , D_5 , D_6 et D_7 :**

Soit la matrice D_{4567} constituée des sous-matrices D_4 , D_5 , D_6 et D_7 exprimée comme suit :

$$D_{4567} = \begin{bmatrix} \overline{D_4} & \overline{D_5} \\ \overline{D_6} & \overline{D_7} \end{bmatrix}$$

Les matrices A_{4567} , B_{4567} , C_{4567} et D_{4567} sont :

$$A_{d,4567} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad B_{d,4567} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

$$C_{d,4567} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad D_{d,4567} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}$$

$$D_4 = \begin{bmatrix} D_{41,1} & \cdots & D_{41,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{4m,1} & \cdots & D_{4m,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & b_{11} & \cdots & a_{1m} & b_{1m} \\ c_{11} & d_{11} & \cdots & c_{1m} & d_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & b_{m1} & \cdots & a_{mm} & b_{mm} \\ c_{m1} & d_{m1} & \cdots & c_{mm} & d_{mm} \end{bmatrix}$$

$$D_5 = \begin{bmatrix} D_{51,m+1} & \cdots & D_{51,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{5m,m+1} & \cdots & D_{5m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,m+1} & b_{1,m+1} & \cdots & a_{1,n} & b_{1,n} \\ c_{1,m+1} & d_{1,m+1} & \cdots & c_{1,n} & d_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m,m+1} & b_{m,m+1} & \cdots & a_{m,n} & b_{m,n} \\ c_{m,m+1} & d_{m,m+1} & \cdots & c_{m,n} & d_{m,n} \end{bmatrix}$$

$$D_6 = \begin{bmatrix} D_{6m+1,1} & \cdots & D_{6m+1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{6n,1} & \cdots & D_{6n,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m+1,1} & b_{1,m+1} & \cdots & a_{m+1,m} & b_{m+1,m} \\ c_{m+1,1} & d_{m+1,1} & \cdots & c_{m+1,m} & d_{m+1,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & b_{n,1} & \cdots & a_{n,m} & b_{n,m} \\ c_{n,1} & d_{n,1} & \cdots & c_{n,m} & d_{n,m} \end{bmatrix}$$

$$D_7 = \begin{bmatrix} D_{7m+1,m+1} & \cdots & D_{7m+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{7n,m+1} & \cdots & D_{7n,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m+1,m+1} & b_{m+1,m+1} & \cdots & a_{1,n} & b_{1,n} \\ c_{m+1,m+1} & d_{m+1,m+1} & \cdots & c_{1,n} & d_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n,m+1} & b_{n,m+1} & \cdots & a_{n,n} & b_{n,n} \\ c_{n,m+1} & d_{n,m+1} & \cdots & c_{n,n} & d_{n,n} \end{bmatrix}$$

ملخص :

يمثل تذبذب النظام الكهربائي تهديدًا كبيرًا لاستقرار النظام الكهربائي المترابط. يرتبط التشغيل الآمن للنظام الكهربائي الحديث إلى حد كبير بالتخميد الناجح للتذبذبات. ومع ذلك، فإن تطوير وحدات التحكم في التخميد يمثل مشكلة تحسين قائمة على القيود، والتي يصعب حلها نسبيًا باستخدام التقنيات التقليدية. الهدف من هذا العمل هو توفير أقصى قدر من التخميد، باستخدام مثبتات الطاقة (PSS) التي تستخدم عادةً لتخميد الأوضاع الكهروميكانيكية عند تعطل النظام. للقيام بذلك، قمنا بتطوير طرق تحسين *metaheuristic* بناءً على الخوارزميات الجينية، وأسراب الجسيمات، ومستعمرات النحل الاصطناعية. الطريقة التي اقترحناها تسمح بالتعديل الأمثل لـ PSS. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بتوفير عناصر تحكم قوية (المنطق الضبابي ووضع الانزلاق) لتحسين أداء النظام وسرعته. تظهر نتائج المحاكاة الأداء العالي لوحدات التحكم المقترحة لتحسين استقرار نظام الطاقة مقارنةً بوحدات التحكم PSS التقليدية.

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة، مثبتات نظام الطاقة، الخوارزميات الجينية، أسراب الجسيمات، مستعمرات النحل الاصطناعية، المنطق الضبابي، الوضع الانزلاقي.

Abstract :

Power system oscillation is a major threat to the stability of an interconnected power system. The safe operation of a modern power system is largely related to the success of damping oscillations. However, the development of damping controllers is a constraint-based optimisation problem, which is relatively difficult to solve using conventional techniques. The objective of this work is to ensure maximum damping, using power stabilisers (PSS) typically used for damping electromechanical modes when the system is subject to disturbances. For this purpose, we have developed metaheuristic optimisation methods based on genetic algorithms, particle swarms, artificial bee colonies. The method we have suggested allows an optimal tuning of the PSS. In addition, we proposed robust controls (fuzzy logic and sliding mode), in order to improve the performance and speed of the system. The simulation results show the high performance of the proposed controllers to improve the stability of the power system compared to the conventional PSS.

Keyword: Power system, power system stabilizers, genetic algorithms, particle swarms, artificial bee colonies, fuzzy logic, sliding mode.

Résumé :

L'oscillation du système électrique est une menace majeure pour la stabilité d'un système électrique interconnecté. Le fonctionnement sûr d'un système électrique moderne est en grande partie lié au succès de l'amortissement des oscillations. Cependant, le développement des contrôleurs d'amortissements est un problème d'optimisation basé sur des contraintes, qui est relativement difficile à résoudre en utilisant des techniques conventionnelles. L'objectif de ce travail est d'assurer un amortissement maximum, à l'aide des stabilisateurs de puissance (PSS) généralement utilisés pour l'amortissement des modes électromécaniques lorsque le système subit des perturbations. Pour ce faire, nous avons développé des méthodes d'optimisation métaheuristique basées sur les algorithmes génétiques, essais de particules, Colonies d'abeilles artificielles. La méthode que nous avons suggérée permet un réglage optimal des PSS. Nous avons proposés en outre des commandes robustes (logique floue et mode glissant), afin d'améliorer les performances et la rapidité du système. Les résultats de la simulation montrent les performances élevées des contrôleurs proposés pour améliorer la stabilité du système de puissance par rapport au PSS conventionnel.

Mot clé : Système de puissance, stabilisateurs de système de puissance, algorithmes génétiques, essais de particules, colonies d'abeilles artificielles, logique floue, mode glissant.