



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MASTER

Présenté Par :

ZAABANE FATIMA ZOHRA

BAKCHICHE HADIL

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Thème

Stabilisation Floue des Oscillations Rotoriques d'un Réseau Electrique Multi-Machine

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ARIF Salem	Prof	Président
CHETTIH Saliha	Prof	Examinatrice
DOUIDI Brahim	M.A	Rapporteur
MOKRANI Lakhdar	Prof	Co-Rapporteur

Promotion : 2021 -2022

ملخص :

إن اللجوء الى مثبتات الطاقة (*PSSs*)... في مجال إنتاج الكهرباء ضرورة حتمية لا مفر منها لأن تزايد الطلب على الطاقة أجبر شبكات الطاقة الكبيرة على العمل بكامل طاقتها وفي كثير من الأحيان فوق حدود طاقتها مما يؤدي إلى حدوث إضطرابات في الشبكة.

هذه المذكرة تعالج مشكلة استقرار نظام الطاقة الصغيرة للأنظمة الكهربائية متعددة المولدات. ولذلك, فقد استخدمنا المراقب الغامض (*PID floue*) الذي يشتغل بقاعدة المنطق الغامض (*logique floue*) على مستوى عدة مولدات. يتم تحويل مشكلة التصميم وحدة تحكم المقترحة الى مشكلة التحسين لتقليل معايير الخطأ التي تظهر في انحراف سرعة الزاوية. وهكذا. تم تحسين المعلمات *PID floue* باستخدام طريقة التدرج لضمان تخميد مرضي لتذبذبات دوار المولدات. قارنا النتائج التي حصل عليه *PID floue* مع تلك التي تم الحصول عليها باستخدام *PID _PSS* الكلاسيكي. وقد تم استخدام ماتلاب كأداة محاكاة. نتائج المحاكاة تظهر بوضوح الاداء العالي من وحدة تحكم المقترحة.

كلمات مفتاحية : استقرار الزاوية, شبكة متعددة المولدات, المنطق الغامض.

Résumé :

Le recours aux stabilisateurs de puissance (*PSS*) dans le domaine de la production d'électricité est une nécessité inévitable, car l'augmentation de la demande de l'énergie a forcé les grands réseaux d'énergie à fonctionner à pleine capacité ce qui mène à des perturbations dans le réseau.

Ce mémoire traite le sujet de stabilité angulaire d'un réseau électrique multi-machine. Pour ce faire, nous avons utilisé un *PSS* de type *PID* à base de logique floue au niveau de chaque générateur. Le problème de conception du *PSS* étudié est formulé sous forme d'un problème d'optimisation permettant de minimiser un critère d'erreur qui apparaît dans l'écart de vitesse rotorique. Ensuite, les paramètres du *PSS_PID* flou (*PSS_PIDF*) sont optimisés en utilisant une méthode de gradient afin d'assurer un amortissement satisfaisant des oscillations rotoriques des générateurs. Les résultats obtenus par le cas d'un *PSS_PIDF* ont été comparés avec ceux obtenus par un *PSS_PID* classique. Nous avons utilisé MATLAB Simulink comme outil de simulation. Les résultats de la simulation ont révélé la bonne performance du *PSS_PIDF*.

Mots-clés : Stabilité angulaire, Réseau multi-machine, logique floue.

Abstract:

The use of power stabilizers (*PSS*) in the field of electricity generation is an inevitable necessity, because the increase in the demand for energy has forced the large energy networks to operate at full capacity which leads to disturbances in the network.

This thesis deals with the subject of angular stability of a multi-machine electrical network. To do this, we used a *PID* type *PSS* based on *fuzzy logic* of each generator. The studied *PSS* design problem is formulated as an optimization problem to minimize an error criterion that appears in the rotor speed error or variation. Then, the parameters of the fuzzy *PSS_PID* (*PSS_PIDF*) are optimized using a gradient method in order to ensure a satisfactory damping of the rotor oscillations of the generators. The results obtained by the case of a *PSS_PIDF* were compared with those obtained by a classic *PSS_PID*. We used MATLAB Simulink as a simulation tool. The simulation results revealed the good performance of the *PSS_PIDF*.

Keywords: power system stabilizer, Multi-machine network, fuzzy logic,

Remerciements

Louange à Dieu qui m'a donné la force, le courage, et l'espoir nécessaire pour accomplir ce travail et surmonter l'ensemble des difficultés.

Je tiens à remercier vivement :

Mon encadreur Mr. Doudi Brahim pour ses conseils et son suivi durant la réalisation de mon projet.

Co-encadreur, Mr. Mokrani Lakhdar. Qui Nous constamment guidé avec ses multiples directives et ses conseils précieux pour contribuer à la réussite de ce travail, je tiens à lui remercier pour sa disponibilité tout au long de ce travail.

Tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Pour la même occasion avec profond respect j'adresse mes remerciements tous

Les enseignants du département d'électrotechnique, de l'université d'Amar Téliidji.

Je remercie également tous ceux qui ont participé de près ou de loin à élaborer ce travail.



DÉDICACES

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné à la vie
Qui s'est sacrifié pour mon bonheur et ma réussite, à ma*

Mère ...

*A mon père, qui a été mon ombre durant toutes les années
Des études, qui a veillé à me donner l'aide, à m'encourager Et à
me protéger.*

*A mes adorables sœurs 'HOURIA et KHADIDJA' et mon
frère 'BACHIR'.*


A mon neveu 'AHMED'

*A mes cher grands pères ' qui ont déménagé à la
miséricorde de Dieu' ; A mes chère grandes mères.*

A mes très chers amis 'FATIMA, ZHOUR, IKRAM,...'

A mon binôme 'HADIL'

FATIMA.





DÉDICACES

*Au nom de dieu le tout puissant et qui m'a permis
d'apprendre et d'acquérir le savoir ,je dédie ce*

modeste travail :

*A ceux qui ont attendu ce jour avec impatience et qui
n'ont cessé de m'encourager et qui se sont
toujours sacrifiés pour mon bonheur*

*A celui m'a offert tout le soutien dont j'ai besoin et sans
lequel je n'aurais pas à ce stade et*

accomplît ce travail.

A mes chers parents

A mes frères, A mes chères sœurs

A tous mes amis

A mon binôme ' FATIMA'

HADIL



TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	<i>i</i>
Remerciements.....	<i>ii</i>
Dédicaces.....	<i>iii</i>
Table des matières.....	<i>iv</i>
Liste des figures.....	<i>iv</i>
Liste des tableaux.....	<i>iv</i>
Liste des symboles et abréviations.....	<i>iv</i>
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Stabilité d'un Réseau Electrique	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition de la stabilité d'un système de puissance (R.E).....	4
I.3 Classification des différents types de stabilité de système de puissance (R.E).....	5
I.3.1 Stabilité de tension.....	6
I.3.2 Stabilité de fréquence.....	6
I.3.3 Stabilité angulaire.....	6
I.3.3.1 Stabilité angulaire de grande perturbation (stabilité transitoire).....	6
I.3.3.2 Stabilité angulaire de petite perturbation (stabilité dynamique).....	8
I.4 Les causes d'instabilité.....	9
I.5 Mode rotorique du système.....	9
I.6 Techniques d'amélioration de stabilité.....	9
I.7 PSS (Power System Stabilizer).....	10
I.7.1 Définition.....	10
I.7.2 Amélioration de la stabilité par <i>PSS</i>	10
I.7.3 Fonctionnement et modèle de <i>PSS</i>	11
I.7.4 Différents types de <i>PSS</i>	11

I.8 CONCLUSION.....	14
CHAPITRE II : Modélisation d'un Réseau Electrique	
II.1 Introduction.....	17
II.2 Définition de la modélisation.....	17
II.3 Modélisation des éléments des réseaux.....	17
II.3.1 Modèle du générateur.....	17
II.3.1.1 Equations électriques.....	18
II.3.1.2 Equations mécaniques.....	20
II.3.2 Modèle des transformateurs.....	20
II.3.3 Modèle des lignes de transmission.....	22
II.3.4 Modèle des charges.....	23
II.4 Linéarisation du système de puissance.....	24
II.9 Conclusion.....	30
CHAPITRE III : Conception optimisée d'un PSS à base de Logique Floue	
III.1 Introduction.....	33
III.2 Historique de la logique floue.....	33
III.3 Principe de la logique floue.....	34
III.3.1 Variables linguistiques et théorie des sous-ensembles flous.....	34
III.3.2 Fonctions d'appartenance.....	35
a) Fonction triangulaire.....	35
b) Fonction trapézoïdale.....	35
c) Fonction d'appartenance gaussienne.....	35
d) Fonction d'appartenance sigmoïde.....	35
III.3.3 Opérateurs de la logique floue.....	36
III.3.3.1 Opérateur OU.....	36
III.3.3.2 Opérateur ET.....	37
III.3.3.3 Opérateur NON.....	37
III.3.3.4 Opérateur Alors.....	37

III.3.4 Base de règles floues.....	37
III.4 Commande par logique floue.....	38
III.4.1 Fuzzification.....	38
III.4.2 Inférence.....	39
III.4.3 Défuzzification.....	40
III.5 Différents régulateurs flous.....	41
III.6 Application de la logique floue à la stabilité angulaire.....	43
III.7 Conclusion.....	45
CHAPITRE IV: Présentation et Discussion des Résultats de la Simulation	
IV.1 Introduction.....	47
IV.2 Présentation du réseau étudié.....	47
IV.3 Optimisation des paramètres des PSSs.....	48
IV.4 Présentation et discussion des scénarios utilisées.....	49
IV.4.1 Cas sans PSS.....	49
IV.4.2 Cas avec <i>PSS</i> avance-retard.....	50
IV.4.3 Cas avec <i>PSS</i> multi-bande.....	50
IV.4.4 Cas d'un <i>PID</i>	51
IV.4.5 Cas d'un <i>PID</i> Floue.....	52
IV.5 Comparaison des résultats obtenus.....	53
IV.6 Conclusion.....	55
Conclusion générale	57
Bibliographie	58
Annexe A : Les Equations mathématiques pour un système linéaire	62
Annexe B : Paramètres des différents éléments de système	63

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1 Classification des différents types de stabilité de système de puissance.....	5
Figure I.2 Variation d'angle de rotor.....	7
Figure I.3 Relation puissance- angle de rotor.....	8
Figure I.4 Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.....	11
Figure I.5 Schéma bloc d'un PSS (avance-retard).....	12
Figure I.6 Structure d'un PSS-PID.....	14

Chapitre II

Figure II.1 Modèle de la machine synchrone.....	18
Figure II.2 Diagramme des phases relatives à la machine d'un système Multi- machine.....	19
Figure II.3 Couples mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur.....	20
Figure II.4 Modèle simplifié de transformateur.....	21
Figure II.5 Modèle en π d'un transformateur.....	22
Figure II.6 Schéma simplifié d'une ligne.....	23
Figure II.7 Modélisation d'une charge par son admittance équivalente.....	23
Figure II.8 Développerons d'un modèle linéaire du système électrique.....	29
Figure II.9 Schéma bloc d'un PSS à avance-retard de phase.....	30
Figure II.10 Schéma bloc d'un régulateur PID parallèle.....	30

Chapitre III

Figure III.1 Représentation des variables linguistiques.....	34
Figure III.2 Différentes formes de la fonction d'appartenance.....	36
Figure III.3 Différentes étapes de calcul d'une commande floue.....	38
Figure III.4 Fuzzification avec cinq fonctions d'appartenance.....	39
Figure III.5 Schéma bloc d'un régulateur PD flou.....	41
Figure III.6 Schéma bloc d'un régulateur PI flou.....	42
Figure III.7 Schéma bloc d'un régulateur PID flou.....	42
Figure III.8 Interface graphique de l'outil d'optimisation 'OPTIMTOOL' de MATLAB.....	44

Liste des Figures

Chapitre IV

Figure IV.1 Représentation du réseau test sur MATLAB/Simulink.....	47
Figure IV.2 Optimisation des paramètres des <i>PSS_PID</i> et <i>PSS_PID</i> flous.....	49
Figure IV.3 Déviation des vitesses des deux générateurs sans <i>PSS</i> du système	49
Figure IV.4 Déviation des vitesses des deux générateurs du système étudié, munis de <i>PSSs</i> à avance-retard de phase.....	50
Figure IV.5 Déviation des vitesses des deux générateurs du réseau étudié munis de deux <i>PSSs</i> Multi-bandes.....	51
Figure IV.6 Déviation de la vitesse de générateur M1 du système étudié, équipé de <i>PSSs_PID</i>	51
Figure IV.7 Déviation de la vitesse de générateur M2 du système étudié, équipé de <i>PSSs_PID</i>	52
Figure IV.8 Déviation de la vitesse de générateur M1 du système étudié équipé de <i>PSSs</i> de typ <i>PID</i> flous.....	52
Figure IV.9 Déviation de la vitesse de générateur M2 du système étudié équipé de <i>PSSs</i> de type <i>PID</i> flous.....	53
Figure IV.10 Déviation de la vitesse de générateur M1 du système étudié équipés de <i>PSSs</i> de type <i>PID</i> et <i>PID</i> flous.....	53
Figure IV.11 Déviation de la vitesse de générateur M2 du système étudié équipés de <i>PSSs</i> de type <i>PID</i> et <i>PID</i> flous.....	54

Liste des Tableaux

Chapitre III

Tableau III.1 Matrice d'inférence d'un régulateur flou de type PD.....	40
---	----

Chapitre IV

Tableau IV.1 Paramètres optimisés des <i>PSS_PID</i> classiques.....	48
Tableau IV.2 Paramètres optimisés des <i>PSS_PID</i> flous.....	48
Tableau IV.3 Performances des différents types de <i>PSS-PID</i> et <i>PIDF</i> de générateur M1.....	54
Tableau IV.4 Performances des différents types de <i>PSS-PID</i> et <i>PIDF</i> de générateur M2.....	54
Tableau IV.5 Performances des différents types de <i>PSSs</i>	55

LISTE DES SYMBOLES

$R.E$	Réseau électrique
PSS	Stabilisateur de puissance (en anglais : P ower S ystem S tabilizer)
P_e	Puissance électrique active (pu)
δ	Angle de rotor, en (rad)
X_g	Réactance de générateur
X_E	Réactance de ligne
AVR	Régulateur de tension (en anglais : A utomatic V oltage R egulation)
RNA	Réseau de neurones artificiels
$\Delta\delta$	Déviations de position angulaire
$\Delta\omega$	Déviations de la vitesse angulaire
E_{fd}	Tension d'excitation de la machine synchrone (pu)
V_{ref}	Tension de référence (pu)
V_t	Tension mesurée à la sortie de la machine synchrone (pu)
V_S	Limite de la sortie du PSS (pu)
ΔT_e	Déviations du couple électrique
ΔT_m	Déviations du Couple mécanique fourni par la turbine (pu)
K_{pss}	Gain du PSS (pu)
$T\omega$	Constante de temps du régulateur (s)
S	Puissance apparente (pu)
T_1, T_2, T_3, T_4	Constantes de temps (s)
Vs_{min}	Limite inférieure de la sortie du PSS (pu)
Vs_{max}	Limite supérieure de la sortie du PSS (pu)
K_{PSS}	Un gain amplificateur

LISTE DES SYMBOLES

S Opérateur de Laplace

T_w Constante de temps du filtre du *PSS*

K Gain du *PSS*

U Vecteur de commande

PD Proportionnel Dérivé.

PID Proportionnel Intégral Dérivé.

PI Proportionnel Intégrale.

INTRODUCTION GENERALE

Le réseau électrique joue un rôle important en tant qu'infrastructure majeure dans chaque pays. Toutefois, l'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation d'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrale électrique, de ligne, de transformateurs etc... .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 important.

La stabilité d'un réseau électrique est caractérisée par la stabilité de fréquence, tension, et stabilité angulaire, notre objective dans ce modeste travail à revoir la stabilité angulaire aux petites perturbations.

Plusieurs phénomènes peuvent perturber la stabilité angulaire et la plus importante est celle qui est due aux oscillations électromécaniques qui sont des oscillations limitant la capacité de transmission de puissance, elles peuvent parfois entraîner une perte de synchronisme ou même un black-out.

Ce type d'instabilité a obligé les sociétés concertantes de prendre leurs responsabilité de concevoir des outils d'analyse et des systèmes nouveaux a développer pour résoudre ce genre de problème, et pour que les oscillations soient amorties et la stabilité soit améliorée on utilise des systèmes en boucle fermée avec des systèmes de contrôle, par :

- Contrôle côté générateur.
- Contrôle côté lignes de transmission.

Ce mémoire s'articule autour de l'amélioration de la stabilité d'un système de puissance (R.E) multi-machine, en utilisant pour cela des stabilisateurs types PID et PID floue au niveau des générateurs. Les paramètres de ces derniers sont déterminés par le biais d'une technique d'optimisation. Pour atteindre ces objectifs de recherche, la rédaction de ce mémoire est comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les différents types de stabilité qui peuvent engendrer le système de puissance (R.E).

Le deuxième chapitre s'articule sur la modélisation des éléments du réseau électrique : modèle du générateur, modèle du transformateur, modèle de la ligne, modèle de la charge, modèle du PSS (Power System Stabilizer). Ensuite nous allons développer le modèle linéaire.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter les concepts de la logique floue, et la structure d'un régulateur à base de la logique floue de type *PID*. Nous allons aussi formuler le dimensionnement de *PSS-PID* flou (PIDF) sous forme d'un problème d'optimisation.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats obtenus par simulation sous **matlab Simulink** du réseau multi-machines, dont nous avons utilisé l'optimtool du matlab en choisissant comme méthode d'optimisation « méthode du gradient » pour l'optimisation des paramètres de nos PSSs (PID et PIDF).

A la fin, nous clôturerons notre mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I : STABILITE DE RESEAU ELECTRIQUE

I.1 Introduction

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

Le système de puissance (R.E) est un système hautement non-linéaire qui fonctionne dans un environnement en évolution continue : charges, puissance de génération, topologie de réseau, ... Le système peut aussi être soumis à des perturbations qui peuvent être faible ou importante. De petites perturbations, sous formes de variation de charge, se produisent continuellement. Le système doit être capable de « répondre » de façon satisfaisante aux besoins de la charge, ainsi le système de puissance se base sur trois études principales : la stabilité, l'écoulement de puissance et l'analyse des défauts. Il est clair que les études de stabilité sont les plus complexes, tant en termes de modélisation que de méthodes de recherche de solutions.

Pendant des années, des recherches diverses et complexes étaient effectuées pour comprendre les problèmes de stabilité des systèmes de puissance. Ainsi de nombreuses définitions de la stabilité de systèmes de puissance étaient proposées en insistant sur les divers aspects qui reflètent la manifestation de l'état stable de système de puissance. La définition la plus récente, que nous adopterons, est le résultat d'un groupe de travail conjoint IEEE/CIGRE [1].

I.2 Définition de la Stabilité d'un système de puissance

La stabilité d'un système de puissance est la capacité du système d'énergie électrique (R.E), pour une condition de fonctionnement initiale donnée retrouve le même état ou un autre état d'équilibre après avoir subi une perturbation physique, en gardant la plupart des variables de système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact.

Ainsi un système de puissance possédant un état d'équilibre est considéré comme stable, si suite à une perturbation, le système peut encore retrouver une position d'équilibre ou également considéré comme stable s'il tend vers une autre position d'équilibre située dans la proximité du point d'équilibre initial [2].

I.3 Classification des différents types de Stabilité de système de puissance (R.E)

Pour analyser et résoudre les problèmes d'instabilité dans les systèmes de puissances (R.E), il est indispensable de regrouper les différents groupes de stabilité. Cette classification de la stabilité est basée sur les considérations suivantes :

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

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

- La stabilité de l'angle de rotor (angulaire).
- La stabilité de tension.
- La stabilité de fréquence [3].

La figure (I.1) présente ces principales catégories de stabilité d'un système de puissance et leurs sous-catégories.

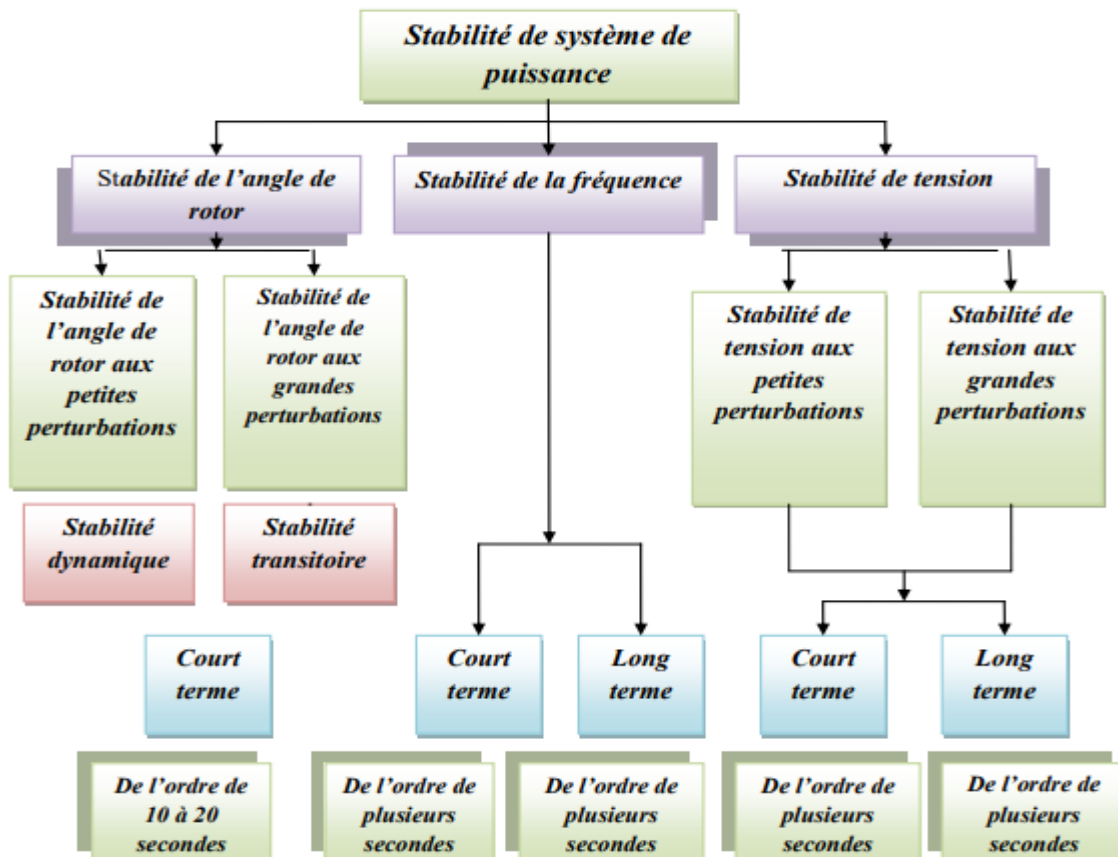


Figure I.1 Classification des différents types de stabilité de système de puissance [4].

I.3.1 Stabilité de tension

La stabilité de tension est la capacité d'un système électrique à maintenir, à partir d'un état initial donné, les tensions stables en tous ses nœuds après une perturbation [5].

L'instabilité de tension est la perte de charges dans une zone, ou le déclenchement de lignes de transport et d'autres éléments par leurs systèmes de protection conduisant à des pannes en cascade [3], qui peut être considérée comme un phénomène à court terme (de l'ordre de plusieurs secondes) ou, dans l'autre cas limite, comme un phénomène à long terme (de l'ordre de plusieurs minutes) [2].

I.3.2 Stabilité de fréquence

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée [6].

Le maintien de la fréquence à la valeur nominale dans un réseau électrique est lié à l'équilibre global entre la puissance active générée et consommée, après quelques perturbations l'équilibre global de la puissance consommée générée peut être déséquilibré : ce déséquilibre peut entraîner des changements de fréquence [7].

I.3.3 Stabilité angulaire

Dans un réseau électrique à courant alternatif, la stabilité de l'angle du rotor est définie comme la capacité que possède un générateur de rester en synchronisme après une perturbation [8]. Elle dépend de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre les couples électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque machine synchrone dans le système. L'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs. Suivant l'amplitude de la perturbation [6], la stabilité de l'angle du rotor peut être traitée selon deux approches différentes.

I.3.3.1 Stabilité angulaire de grande perturbation (stabilité transitoire)

La stabilité angulaire rotorique de grande perturbation (stabilité transitoire) est la capacité du système électrique à maintenir le synchronisme après une perturbation importante.

L'instabilité est habituellement sous forme d'une séparation angulaire périodique en raison du couple de synchronisation insuffisant, se manifestant comme une instabilité à la première oscillation. Cependant, dans les grands systèmes électriques, l'instabilité transitoire ne se produit

pas toujours comme une instabilité sur la première oscillation qui serait liée à un seul mode. C'est parfois le résultat de la superposition d'un mode d'inter-régions d'oscillation lent et d'un mode d'oscillation local de centrale causant une grande excursion d'angle rotorique avec dépassement de la limite de stabilité à la première oscillation [4], . La figure I.2 représente la variation d'angle de rotor où :

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

Le cadre de temps de la dynamique généralement observée de la stabilité transitoire est de l'ordre de 3 à 5 secondes après la perturbation, il peut se prolonger à 10-20 secondes.

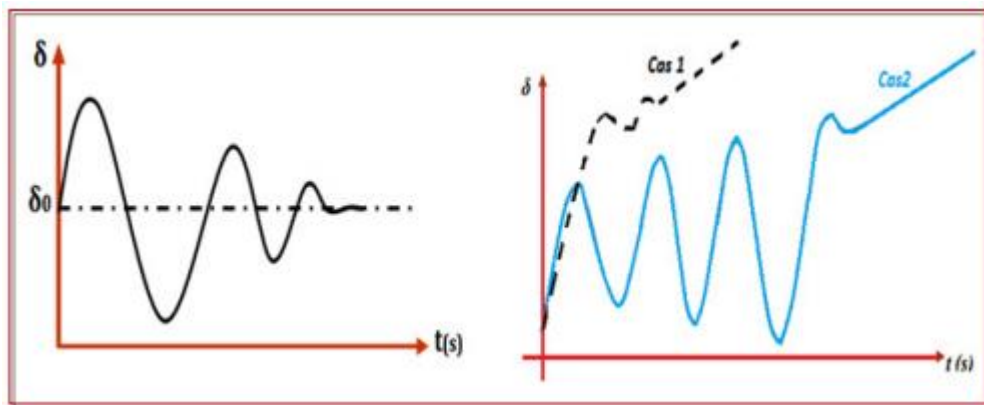


Figure I.2 Variation d'angle de rotor [4].

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

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

Où δ l'angle de rotor (dit ici, l'angle de puissance), qui est le déphasage entre la tension interne du générateur (E_g) et la tension du jeu de barre infini (E_0). L'équation (I.1) est représentée graphiquement sur la figure I.3 [2].

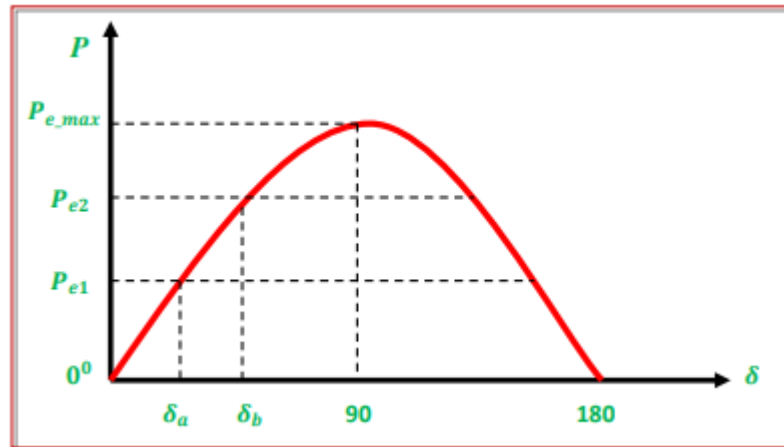


Figure I.3 Relation puissance- angle de rotor [4].

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 passe de P_{e1} à P_{e2} , figure I.3.

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 [2].

I.3.3.2 Stabilité angulaire de petite perturbation (stabilité dynamique)

La stabilité angulaire de petite perturbation (ou en petits signaux) est la capacité du système électrique à maintenir le synchronisme sous de petites perturbations. Les perturbations sont considérées comme suffisamment petites pour que la linéarisation des équations du système soit permise aux fins de l'analyse [7].

La stabilité aux petites perturbations sera associée à la présence d'un couple d'amortissement à la suite de la première oscillation. Si ce couple est suffisant, les oscillations s'amortiront (amortissement positif). Ou, si l'amortissement n'est pas suffisant, les oscillations vont continuer, ou même elles vont augmenter (amortissement négatif).

Ainsi, L'instabilité angulaire petite perturbation résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non-oscillatoire, entre les angles de rotor.

I.4 Les causes d'instabilité [9]

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

- Le court-circuit.
- Branchement d'une charge importante.
- Variations momentanées de la charge.

I.5 Mode rotorique du système

Dans les études portées sur la stabilité des systèmes de puissance (réseau électrique), les modes oscillatoires les plus importants sont ceux correspondants aux basses fréquences (Small Signal Stability Analysis).

L'intervalle de fréquence est compris entre 0.1 et 3 Hz. Ce sont des modes électromécaniques relatifs aux machines ou modes rotoriques [2].

On distingue trois types de modes oscillatoires :

- **Modes locaux**

Modes résultants des oscillations de générateurs avec des fréquences allant de 0.8 à 2 Hz.

- **Modes intra régionaux**

Modes se produisant lorsque des générateurs faisant partie d'une même région de génération oscillent l'un contre l'autre dans un intervalle de fréquence de 2.1 à 3 Hz.

- **Modes interrégionaux**

Modes résultants d'oscillations de groupes de machine oscillants d'une manière cohérente. Ces modes exposent des fréquences allant de 0.1 à 0.7 Hz.

I.6 Technique d'amélioration de stabilité

Dans l'évaluation de la stabilité, la plus grande attention est portée au comportement du réseau face à de petites ou de grandes perturbations. Après l'élimination d'une perturbation, le réseau sera

stable s'il continue à fonctionner en satisfaisant ses limites d'exploitation et en alimentant ses consommateurs.

Dans l'analyse des réseaux électriques, l'identification des causes d'instabilité et la connaissance des méthodes qui peuvent améliorer l'exploitation stable du réseau sont très importantes. Il existe différentes méthodes pour l'amélioration de la stabilité.

Telle que la compensation qui est une technique de la gestion d'énergie réactive afin d'améliorer la qualité énergétique dans les réseaux électriques à courant alternatif. Elle peut se réaliser de plusieurs manières, ayant pour buts :

- La correction du facteur de puissance.
- Equilibre des charges.
- L'aide au retour à la stabilité en cas de perturbation Amélioration de la régulation de la tension.

A revoir se base sur des contrôleurs à base de l'électronique de puissance (FACTS), la deuxième technique pour à revoir amortir les oscillations électromécaniques observés sur le rotor, dans notre étude nous allons nous intéresser qu'aux PSSs.

I.7 PSS (Power System Stabilizer)

I.7.1 Définition

La fonction de base d'un stabilisateur de puissance (en anglais : power system stabilizer) est d'apporter l'amortissement nécessaire au système, c'est-à-dire, maintenir la stabilité est l'amortissement des oscillations électromécaniques observées sur le rotor des générateurs [10].

I.7.2 Amélioration de la stabilité par PSS

Au fil des années, un effort de recherche important était effectué pour une meilleure conception de tels contrôleurs. Il y a principalement deux moyens rapides permettant d'améliorer la stabilité :

- L'utilisation d'un contrôleur côté générateur : (power system stabilizer (PSS)) est un contrôleur spécifique en ajoutant au générateur pour résoudre les problèmes d'oscillations électromécaniques.
- L'utilisation d'un contrôleur côté ligne de transmission : *FACTS* (flexible courant alternatif la transmission d'énergie électrique en courant alternatif)

I.7.3 Fonctionnement et modèle de PSS

Un PSS (power system stabilizer) permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la variation de vitesse de rotor dans l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur, figure (I.3). Un couple électrique en phase avec la variation de vitesse de rotor est ainsi produit dans le générateur. Par conséquent, avec un système d'excitation rapide et fort, l'avantage présenté par un couple synchronisant important est toujours assuré et le problème de la décroissance du couple d'amortissement est corrigé. Le PSS va s'opposer à toutes les faibles oscillations en forçant le système d'excitation à varier au plus juste et au bon moment [11].

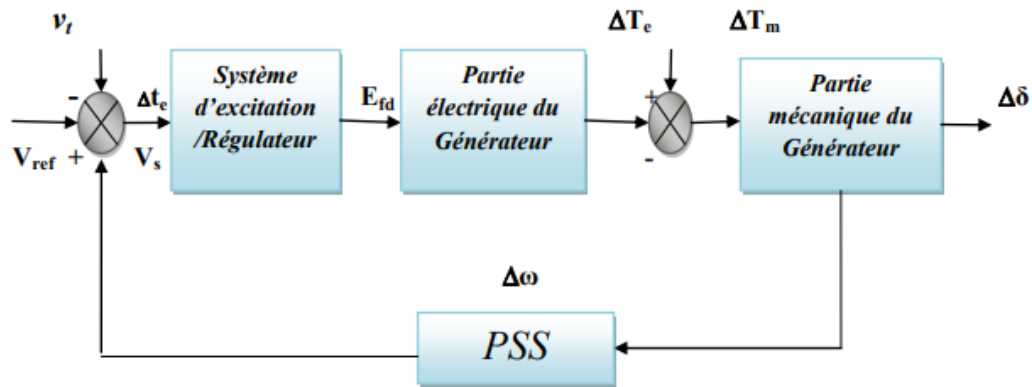


Figure I.4 Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système [4].

I.7.4 Différents types de PSS

Il existe plusieurs types de PSSs : les plus utilisés sont :

a) PSS à Avance-Retard de phase (PSS conventionnel)

La structure du PSS est représentée dans (Figure I.4), où la vitesse du générateur est généralement utilisée comme signal d'entrée [3]. Le PSS est mathématiquement formulé comme suit

$$\Delta U_{pss}(s) = K_{pss} \times \frac{ST_\omega}{ST_\omega + 1} \left(\frac{1 + ST_1}{1 + ST_2} \right) \times \left(\frac{1 + ST_3}{1 + ST_4} \right) \Delta \omega \quad (I.2)$$

Où $\Delta \omega$ est l'écart de vitesse en (p.u). Le PSS est composé d'un filtre passe-haut et d'un compensateur dynamique et un gain [3]. Le signal de sortie ΔU_{pss} est appliqué au système d'excitation en tant que signal d'entrée supplémentaire.

La structure de PSS est représentée par la figure ci-après :

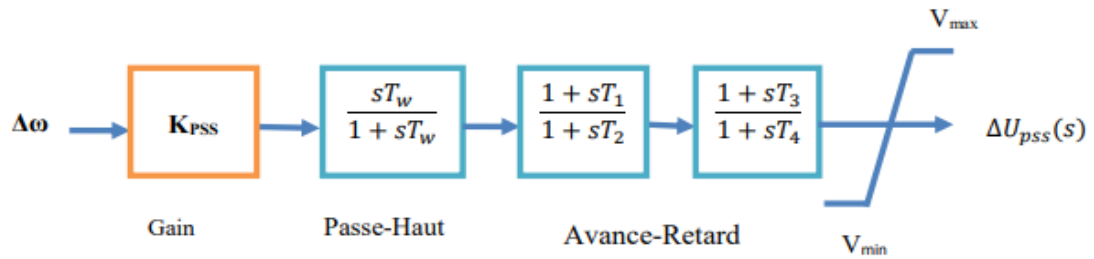


Figure I.5 Schéma bloc d'un PSS (avance-retard) [11].

Il se compose généralement de quatre blocs :

1) Gain de PSS :

Il détermine la valeur de l'amortissement introduit par le PSS. Théoriquement, sa valeur (K_{pss}) doit correspondre à l'amortissement maximal. Toutefois, la valeur du gain doit satisfaire l'amortissement des modes dominants du système sans risquer de dégrader la stabilité des autres modes ou la stabilité transitoire [12].

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

2) Filtre passe-haut "filtre washout" :

Il élimine les oscillations à très basse fréquence (inférieure à 0.2 Hz) présentées dans le signal d'entrée. Il supprime également la composante continue de la vitesse (la composante DC correspondant au régime statique). Le PSS ne réagit donc que lorsqu'il y a des variations de vitesse. La constante de temps de ce filtre (T_w) doit être suffisamment grand Pour permettre aux signaux, dont la fréquence est située dans la bande utile, d'être transmis sans atténuation. Mais, elle ne doit pas être trop grande pour éviter de mener à des variations indésirables de tension de générateur pendant les conditions d'ilotage. Généralement, T_w varie de 1 à 20 secondes. Une amélioration remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur T_w fixée à 10 secondes [14]. Sa fonction de transfert est donnée par l'équation :

$$G_{\text{filtre}} = \frac{sT_w}{1+sT_w} \quad (\text{I.3})$$

3) Bloc Avance-Retard de phase :

L'origine de l'amortissement négatif est associée au retard de phase introduit entre le couple électrique du générateur (ΔT_e) et l'entrée du système d'excitation (Δu). Par conséquent, le rôle de ce bloc est de fournir l'avance de phase nécessaire pour compenser le retard de phase entre l'entrée de

l'excitateur et le couple électrique. Pratiquement, un seul bloc de compensation est insuffisant pour garantir la stabilité du Système [25]. Pour mieux garantir cette dernière, deux étages (au moins) de compensations de phase sont nécessaires. La fonction de transfert de chaque étage est une simple combinaison de pole-zéro, les constantes de temps d'avance sont (T_1, T_3) et de retard sont (T_2, T_4) . La gamme de chaque constante de temps s'étend généralement de 0.01 à 2 secondes. Mais pour des considérations de réalisation physique, les constantes de temps de retard (T_2, T_4) sont considérées fixes et généralement autour de la valeur de 0.05 secondes. Sa fonction de transfert est donnée par l'équation [15] :

$$G_S = \left(\frac{1+ST_1}{1+ST_2} \right) \times \left(\frac{1+ST_3}{1+ST_4} \right) \quad (\text{I.4})$$

Avec $T_1 > T_2$

4) Limiteur de PSS :

Le PSS est conçu pour améliorer l'amortissement du système en cas de petites variations autour d'un point d'équilibre. Son objectif n'est pas de restaurer la stabilité du système aux perturbations sévères (la stabilité transitoire). Le PSS a parfois tendance à perturber le bon fonctionnement du régulateur de tension en le saturant lorsque ce dernier essaye de maintenir la tension lors des conditions transitoires. Ainsi, le PSS doit être équipé d'un limiteur afin de réduire son influence indésirable durant les phases transitoires [16]. Les valeurs et maximales du limiteur s'étendent de ± 0.02 à 0.1 per-unit [17].

b) PSS PID :

Un système asservi doit être suffisamment robuste pour garantir trois niveaux de performance

- Stabilité
- Précision statique.
- Rapidité suffisante.

En général, la précision et la rapidité sont liées au gain proportionnel, mais trop de gain peut avoir un effet déstabilisant. D'autre part, une action intégrale assurera une bonne précision statique et une action dérivée peut garantir un temps de réponse correct. Ainsi, les contrôleurs PID peuvent être utilisés pour la stabilisation des systèmes de puissance. Ces contrôleurs à contre réaction dont la sortie est généralement basée sur l'erreur entre la consigne définie par l'utilisateur et la variable

mesurée, nécessite l'ajustement de leurs gains K_p , K_d et K_i pour satisfaire un certain critère optimal de la réponse du système [18].

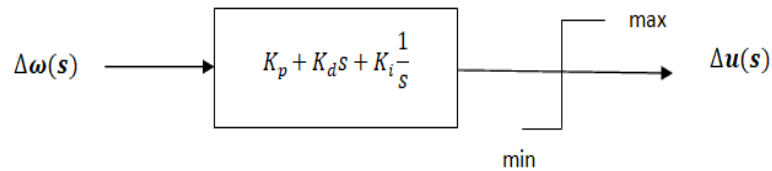


Figure I.6 Structure d'un *PSS-PID* [19]

La structure d'un *PSS PID* peut être mise en équation comme suit :

$$\Delta u(t) = K_p \Delta \omega(t) + K_d s \Delta \omega(t) + K_i \int \Delta \omega(t) dt \quad (\text{I.5})$$

Maintenant en appliquant la transformation de Laplace on obtient :

$$\Delta u(s) = (K_p + K_d s + K_i \frac{1}{s}) \Delta \omega(s) \quad (\text{I.6})$$

Avec :

K_p : gain proportionnel

K_d : gain du dérivateur

K_i : gain de l'intégrateur

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur la stabilité du système, nous avons présenté les différents types de stabilité électrique, et les méthodes d'analyse et d'amélioration, ainsi nous avons donné un aperçu sur les contrôleurs PSSs. Nous avons définis les types et les objectifs de ces derniers pour l'amélioration de la stabilité de notre système de puissance.

Cette étude nous a ainsi permis de mettre en évidence les points importants suivants :

- Un système de puissance doit présenter un point d'équilibre stable dans les conditions de fonctionnement normal.
- La stabilité angulaire aux petites perturbations est habituellement considérée comme la capacité du système de puissance à maintenir le fonctionnement synchrone des générateurs pour de faibles variations des charges et des sources.

- 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.

CHAPITRE II : MODELISATION DE RESEAU ELECTRIQUE

II.1 Introduction

La modélisation est une étape importante dans l'analyse et le contrôle des systèmes d'énergie électrique, qui conduit à trouver un bon modèle mathématique. Généralement, en analyse de systèmes, un modèle est un ensemble d'équations ou de relations qui décrivent adéquatement les interactions entre les différentes variables étudiées, sur l'horizon temporel considéré et avec la précision requise, pour un élément ou un même système physique pouvant générer différents modèles.

Les modèles qui seront présentés dans ce chapitre concernent les éléments suivants :

- Modèle du générateur.
- Modèle du transformateur.
- Modèle de la ligne.
- Modèle de la charge.

II.2 Définition de modélisation

La modélisation c'est la description mathématique des éléments par des modèles mathématiques (exemple: représentation d'un système par des équations différentielles et algébriques) [20].

II.3 Modélisation des éléments des réseaux

II.3.1 Modèle du générateur

Les générateurs synchrones sont les éléments de production de l'énergie électrique, ils sont capables de fournir de la puissance active au système. Ils peuvent aussi produire, voire consommer, de la puissance réactive de manière à maintenir un certain niveau de tension [21].

Dans la machine idéale, le stator est muni de trois enroulements repérés a, b et c, décalés de 120 degrés. Le rotor comporte un certain nombre d'enroulements, répartis sur deux axes: l'axe-d, (axe direct) qui coïncide avec celui de l'enroulement d'excitation et l'axe-q (axe quadratique) situé en quadrature avance par rapport à l'axe direct.

Pour supprimer la non-linéarité entre les grandeurs du stator et celles du rotor, doivent être ordonnés les enroulements de la machine selon deux axes perpendiculaires, chaque machine est modélisée dans sa référence locale ($d-q$) tournant avec son rotor.

Le modèle électrique de l'alternateur est basé sur la transformation de Park, également appelée transformation à deux axes (dq) ; il consiste à transformer le système triphasé du stator en un système biphasé relié au rotor, qui est plus adapté à l'analyse des machines synchrones.

- a, b et c, enroulements statoriques et leurs enroulements équivalents notés d_s et q_s .
- L'axe direct comporte l'enroulement d'excitation noté f , et un enroulement amortisseur noté d_a .
- L'axe en quadrature comporte un enroulement amortisseur noté q_a .

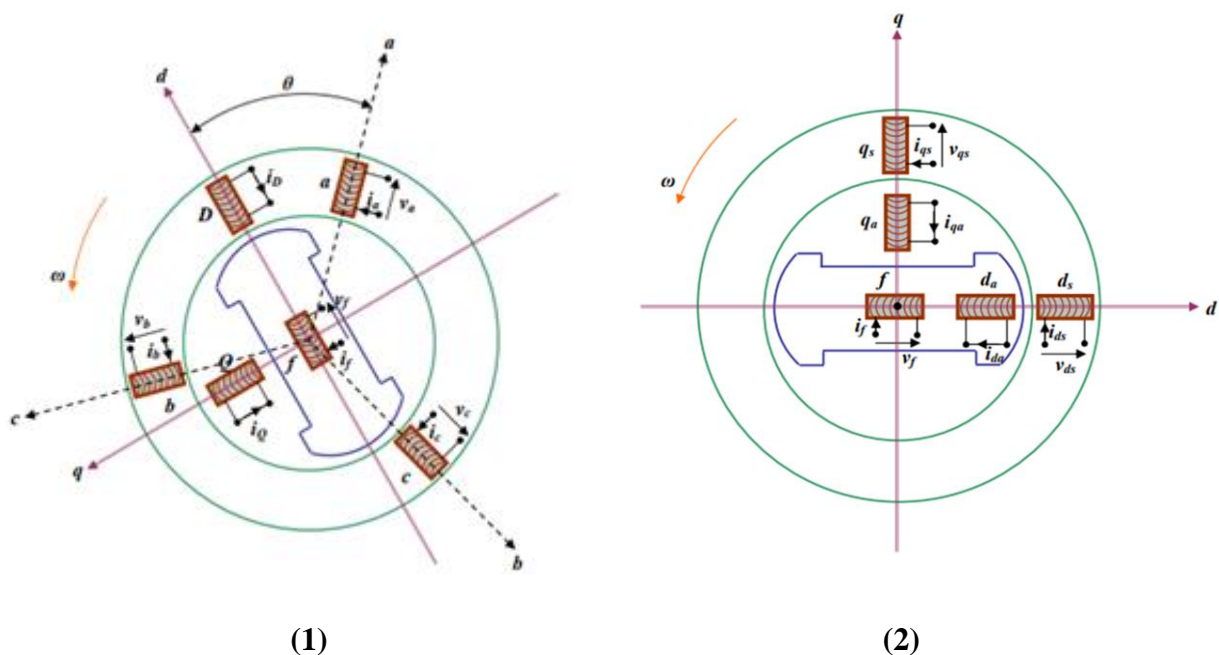


Figure II.1 (1) Modèle de la machine synchrone.

(2) Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park [2].

Nous allons déterminer dans cette partie les équations électriques et mécaniques concernant la modélisation non-linéaire de la machine synchrone.

II.3.1.1 Equations électriques

Nous allons déterminer dans de ce paragraphe les équations algébriques du stator de multi-machine : à savoir les équations concernant les tensions suivant les axes d et q et les puissances électriques.

D'après la figure II.2 nous avons :

$$\bar{V}_i = \bar{E}'_{qi} - jX_{di}\bar{I}_{di} - jX_{qi}\bar{I}_{di} \tag{II.1}$$

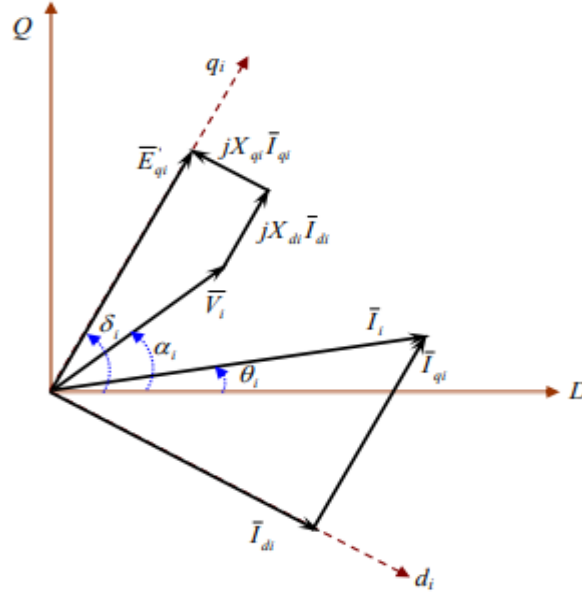


Figure II.2 Diagramme des phases relatives à la machine d'un système Multi- machine.

Par rapport au repère (DQ) , on peut écrire :

$$V_i e^{j\alpha_i} = E_{qi} e^{j\delta_i} - X_{di} I_{di} e^{j\delta_i} - jX_{qi} I_{qi} e^{j(\delta_i + 90^\circ)} \quad (\text{II.2})$$

Qui devient après arrangement :

$$V_i e^{-j(\delta_i - \alpha_i)} = E_{qi} - X_{di} I_{di} - jX_{qi} I_{qi} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{cases} V_i \sin(\delta_i - \alpha_i) = X_{qi} I_{qi} = V_{di} \\ V_i \cos(\delta_i - \alpha_i) = E_{qi} - X_{di} I_{di} = V_{qi} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Lors de perturbations, le système d'équations (II.3) n'est plus valable car il faut tenir compte de la réactance et de la force électromotrice. Électromotrice transitoire. La machine est supposée être en régime permanent avant d'être perturbée, entraînant des oscillations au niveau du rotor. Alors le courant et la tension deviennent (l'exposant 0 signifie état stable) :

$$I_{di} = I_{di}^0 + \Delta I_{di}$$

$$I_{qi} = I_{qi}^0 + \Delta I_{qi} \quad (\text{II.5})$$

Et

$$V_{di} = V_{di}^0 + \Delta V_{di} = X_{qi} I_{qi} \quad (\text{II.6})$$

$$V_{qi} = V_{qi}^0 + \Delta V_{qi} = E_{qi} - X_{di} I_{di}^0 - X'_{di} I_{di} \quad (\text{II.7})$$

$$V_{qi} = E_{qi} - (X_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di}^0 - X'_{di} I_{di}) = E'_{qi} - X'_{di} I_{di} \quad (\text{II.8})$$

On en déduit que :

$$E'_{qi} = E_{qi} - (X_{di} - X'_{di} - X'_{di} - X'_{di}) I_{di}^0 \quad (\text{II.9})$$

Les puissances électriques (apparente, active et réactive) sont données par :

$$\bar{S}_i = P_{ei} + jQ_{ei} = \bar{V}_i \bar{I}_i^* = (V_{di} + jV_{qi})(I_{di} - jI_{qi}) = (V_{di}I_{di} + V_{qi}I_{qi}) + j(V_{qi}I_{di} - V_{di}I_{qi}) \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{cases} P_{ei} = V_{di}I_{di} + V_{qi}I_{qi} \\ Q_{ei} = V_{qi}I_{di} - V_{di}I_{qi} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Ainsi, la puissance électrique active s'écrit :

$$P_{ei} = E'_{qi}I_{qi} + (X_{qi} - X'_{di}) I_{di}I_{qi} \quad (\text{II.12})$$

III.3.1.2 Equations mécaniques

Lors d'une perturbation, un ou plusieurs générateurs peuvent accélérer ou ralentir et donc risquer de perdre la synchronisation. Cela peut avoir un impact majeur sur la stabilité du système et les générateurs désynchronisés doivent être débranchés ou ils peuvent être gravement endommagés.

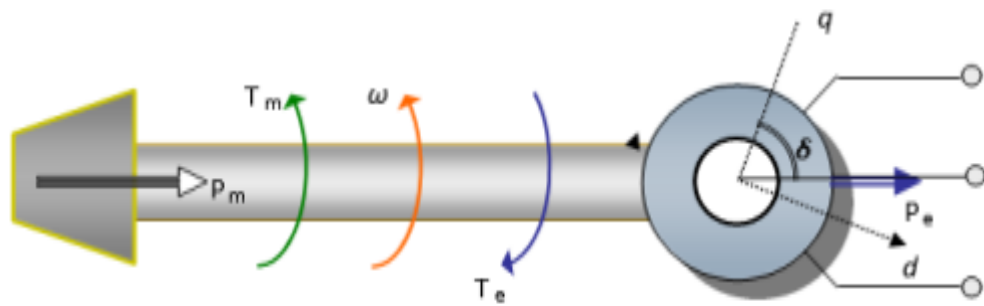


Figure II.3 Couples mécanique et électrique agissant sur l'axe d'un générateur [2].

Pour un système multi-machines, si le couple agissant sur le rotor de la $i^{\text{ème}}$ machine est déséquilibré, ce dernier va accélérer ou décélérer selon l'équation de mouvement suivante :

$$\Delta\dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (T_{mi} - T_{ei} - D_i(\Delta\omega_i - 1)) \quad (\text{II.13})$$

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

$$\delta_i = \omega_0(\Delta\omega_i - 1) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

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

H_i : Constante d'inertie

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

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

$$T_{ei} = \frac{P_{ei}}{\omega_i}$$

D_i : Coefficient d'amortissement du générateur, en p.u.

ω_0 : Vitesse de synchronisme (vitesse de base), en rad/s.

δ : Angle de rotor, en rad [2].

II.3.2 Modèle de transformateurs

Le transformateur est le composant permettant d'élever l'amplitude de la tension alternative disponible à la sortie de l'alternateur pour l'amener aux niveaux requis pour le transport [22]. A l'autre bout de la chaîne, côté consommateur, le réseau est raccordé à un transformateur abaisseur pour réduire la tension et la ramener à la valeur utilisé dans le réseau de distribution basse tension.

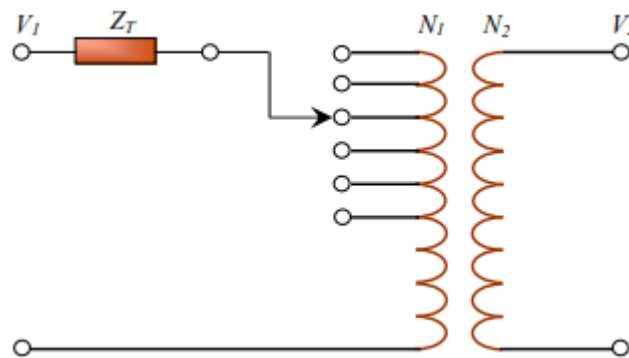


Figure II.4 Modèle simplifié de transformateur [2].

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

$$m = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{II.15})$$

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

$$V_2 = \frac{V_1}{m} \quad (\text{II.16})$$

Si la tension du primaire diminue, la tension du secondaire peut être maintenue constante en diminuant le rapport m , pratiquement en effectuant un changement de prise du côté primaire. En

charge, l'équation (II.14) ne s'applique plus car l'impédance est ramenée au primaire du transformateur Z_T , mais le principe de fonctionnement reste le même.

La figure (II.5) représente le schéma équivalent en π du transformateur sans circuit magnétique. Dans notre étude, les régleurs en charge ne sont pas modélisés : ainsi le rapport de transformation reste fixe pendant les simulations dynamiques. Toutefois, nous en tenons compte lors du calcul d'écoulement de puissance, de manière à ce que les tensions restent dans leurs limites autorisées et que la convergence de l'algorithme de l'écoulement de puissance reste assurée [23].

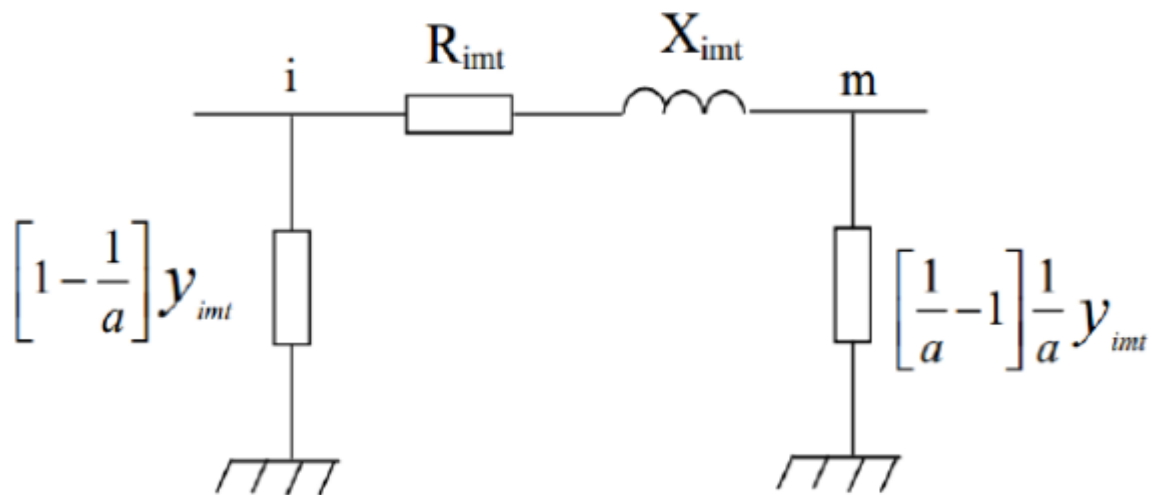


Figure II.5 Modèle en π d'un transformateur.

L'admittance de transformateur est exprimée par :

$$y_{imt} = \frac{1}{R_{imt} + jX_{imt}} \quad (\text{II.17})$$

a : Rapport de transformation.

R_{imt} : Résistance du transformateur placé entre les nœuds i et m.

X_{imt} : Réactance du transformateur placé entre les nœuds i et m.

En négligeant les pertes, le transformateur peut être représenté par la réactance X_{imt} .

II.3.3 Modèle des lignes de transmission

Une ligne de transmission est modélisée par un schéma équivalent constitué d'une impédance série (résistance R en Série avec une réactance inductive X) et une admittance shunt qui consiste en

une susceptance capacitive B (due à l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation G [24].

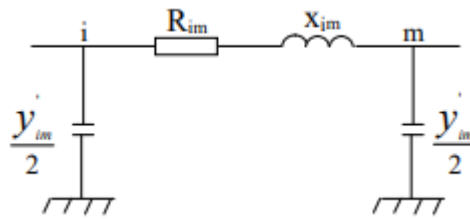


Figure II.6 schéma simplifié d'une ligne.

L'expression de l'admittance série de la ligne :

$$Y_{im} = \frac{1}{(r_{im} + jX_{im})_m} + j\mathbf{b}_{im} \quad (\text{II.18})$$

Où:

r_{im} : Résistance de la ligne

X_{im} : Réactance de la ligne

$y'_{im} / 2$: Admittance shunt de la ligne [25].

II.3.4 Modèle des charges

Les modèles de charges les plus utilisés sont généralement des modèles statiques. Le caractère statique est lié à la description de la charge par des équations purement algébriques.

Considérons un nœud de tension V_L , auquel une charge consommant une puissance $P_L + jQ_L$ est reliée. Cette charge peut être représentée par des admittances statiques $G_L = P_L / V_L^2$ et comme le montre la figure (II.7).

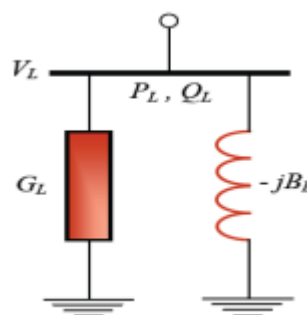


Figure II.7 Modélisation d'une charge par son admittance équivalente [26].

II.4 Linéarisation du Système de Puissance

Presque tous les systèmes dynamiques réels ont des propriétés non linéaires. Le comportement dynamique d'un système de puissance peut être décrit par un ensemble d'équations différentielles et algébriques (*EDA*). Compte tenu que le système de puissance, évolue généralement autour d'un point de fonctionnement donné lors des petites perturbations, il est possible de linéariser ses équations *EDA* autour de ce point [2].

Les dérivées des variables d'état de point de fonctionnement normal du système se définissent comme un point d'équilibre ou une condition initiale sont donc égales à zéro. (Voir annexe A)

$$\begin{cases} \Delta\dot{\omega}_i = \frac{1}{2Hi} (\Delta Tm - \Delta Tei - D\Delta\omega_i) \\ \Delta\dot{\delta}_i = \omega_0 \cdot \Delta\omega_i \\ \Delta\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0}} (\Delta E_{fdi} - \Delta E'_{qi} (X_{di} - X'_{di}) \Delta I_{di}) \\ \Delta\dot{E}'_{fdi} = \frac{1}{T'_{ai}} (-K_{ai} (\Delta V_{ref} - \Delta U_i) - \Delta E_{fdi}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{cases} P_{ei} = E'_{qi} I_{qi} X_{qi} X'_{di} I_{di} I_{qi} \\ I_{di} = \text{Re}(\overline{I_{dqi}}) = \sum_{j=1}^n Y_{mij} (-S_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) C_{ij} I_{qj}) \\ I_{qi} = \text{Im}(\overline{I_{dqi}}) = \sum_{j=1}^n Y_{mij} (C_{ij} E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj}) S_{ij} I_{qj}) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{cases} V_{di} = X_{qi} I_{qi} \\ V_{qi} = E'_{qi} - X'_{di} I_{di} \\ V = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Afin de former l'équation d'état du système, les équations du système (II.19) doivent s'exprimer uniquement en fonction des variables d'état.

A partir de l'équation du courant d'axe direct du système (II.20) et après linéarisation nous obtenons :

$$\Delta I_d = N_d \Delta \delta + O_d \Delta E'_q + M_d \Delta I_q \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$N_{dij} = -Y_{mij} (C_{ij}^0 E'_{qj} + S_{ij}^0 (X_{qi} X'_{dj} I_{qj}^0)) \quad (\text{II.23})$$

$$N_{dii} = - \sum_{j \neq i}^n N_{dij}$$

$$O_{dij} = -Y_{mij} S_{ij}^0$$

$$M_{dij} = Y_{mij} C_{ij}^0 (X_{qj} - X'_{dj})$$

(L'exposant 0 indique les conditions initiales). De même pour le courant d'axe en quadrature nous avons :

$$\Delta I_q = N_q \Delta \delta + O_q \Delta E'_q + M_q \Delta I_q \quad (\text{II.24})$$

Qui devient :

$$L_q \Delta I_q = N_q \Delta \delta + O_q \Delta E'_q \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$N_{qij} = Y_{mij} \left(-S_{ij} E_{qj}^0 + C_{ij} (X_{qj} X'_{dj} I_{qj}^0) \right)$$

$$N_{qii} = -\sum_{j \neq i}^n N_{qij}$$

$$O_{qij} = Y_{mij} C_{ij}$$

$$M_{qij} = Y_{mij} S_{ij} (X_{qj} - X'_{dj})$$

$$L_q = 1 - M_q \quad \text{Ou } 1 = \text{Matrice identité}$$

Remplaçons (II.25) dans (II.22) :

$$\begin{cases} \Delta I_d = (N_d + M_d L_q^{-1} N_q) \Delta \delta + (L_q^{-1} N_q) \Delta \delta + (O_d + M_d L_q^{-1} O_q) \Delta E'_q \\ \Delta I_d = L_q^{-1} N_q \Delta \delta + L_q^{-1} O_q \Delta E'_q \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

On pose :

$$F_q = L_q^{-1} N_q$$

$$Y_q = L_q^{-1} O_q$$

$$F_d = N_d + M_d F_q$$

$$Y_d = M_d Y_q$$

Enfin, nous aurons :

$$\Delta I_d = F_d \Delta \delta + Y_d \Delta E'_q$$

$$\Delta I_q = F_q \Delta \delta + Y_q \Delta E'_q \quad (\text{II.27})$$

A partir de l'expression de la puissance électrique active nous obtenons :

$$\Delta P_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$\begin{aligned} K_1 &= O_t F_q + W_t F_d \\ K_2 &= O_t Y_q + W_t Y_d + [I_q^0] \\ O_t &= [X_q - X'_d][I_d^0] + [E_q'^0] \\ W_t &= [X_q - X'_d][I_q^0] \end{aligned}$$

A partir de la dynamique nous avons :

$$(1 + [T'_{d0}]S)\Delta E'_q = \Delta E_{fd} - [X_d - X'_d]\Delta I_d \quad (\text{II.29})$$

Nous remplaçons ΔI_d par son expression (II.27), l'équation (II.29) s'écrit :

$$(1 + [T'_{d0}]S)\Delta E'_q = \Delta E_{fd} - [X_d - X'_d](F_d \Delta \delta + Y_d \Delta E'_q) \quad (\text{II.30})$$

Développons (II.30) pour la $i^{\text{ème}}$ machine :

$$(1 + (X_{di} - X'_{di})Y_{di} + sT'_{d0i})\Delta E'_{qi} = \Delta E_{fdi} - (X_{di} - X'_{di})\left\{\sum_{j=1}^n F_{dij}\Delta\delta_j - \sum_{j \neq 1}^n Y_{dij}\Delta E'_{dj}\right\} \quad (\text{II.31})$$

Et nous posons :

$$\begin{aligned} K_{3ij} &= (X_{di} - X'_{di})F_{dij} \\ K_{4ij} &= 1 + (X_{di} - X'_{di})Y_{dii} \\ K_{4ij} &= (X_{di} - X'_{di})Y_{dij} \end{aligned}$$

A partir des équations des tensions :

$$\begin{cases} V_{di} = X_{qi}I_{qi} \\ V_{qi} = E'_{qi} - X'_{di}I_{di} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta V_{di} = X_{qi}\Delta I_{qi} \\ \Delta V_{qi} = \Delta E'_{qi} - X'_{di}\Delta I_{di} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

$$V_i = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \rightarrow \Delta V_i = \frac{1}{V_i^0} (V_{di}^0 \Delta V_{di} + V_{qi}^0 \Delta V_{qi}) \quad (\text{II.33})$$

Nous aurons enfin :

$$\Delta V = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q$$

Avec :

$$\begin{aligned} K_5 &= D_v [X_q] F_q - O_v [X'_d] F_d \\ K_6 &= D_v [X_q] Y_q - O_v [X'_d] Y_d + O_v \end{aligned}$$

$$D_v = \left[\frac{1}{V^0} \right] [V_d^0]$$

$$O_v = \left[\frac{1}{V^0} \right] [V_q^0]$$

Ainsi, les équations différentielles décrivant la dynamique de la machine sont réécrites sous une forme linéaire.

A partir des équations (II.29), (II.30) et (II.32) le système (II.19) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{\omega}_i = \frac{1}{2Hi} \left[-D_i \Delta \omega_i - \sum_{j=1}^n (K_{1ij} \Delta \delta_{ij}) - \sum_{j=1}^n (K_{2ij} \Delta E'_{qi}) \right] + \frac{1}{2Hi} \Delta T_{mi} \\ \Delta \dot{\delta}_i = \omega_0 \cdot \Delta \omega_i \\ \Delta \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0}} \left[-\sum_{j=1}^n (K_{4ij} \Delta \delta_j) - \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{K_{3ij}} \Delta E'_{qi} \right) + \Delta E_{fdi} \right] \\ \Delta \dot{E}'_{fdi} = \frac{1}{T_{ai}} \left[-K_{ai} \sum_{j=1}^n (K_{5ij} \Delta \delta_j) - K_{ai} \sum_{j=1}^n (K_{6ij} \Delta E'_{qi}) - \Delta E_{fdi} \right] + \frac{K_{ai}}{T_{ai}} \Delta U_i \end{array} \right. \quad (\text{II.34})$$

Le système d'équations (II.34) est la représentation d'état de la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système multi machine. Pour un système électrique à n générateurs l'équation d'état s'écrit sous la forme :

$$\frac{d}{dt} X(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) + L \cdot P(t) \quad (\text{II.35})$$

Les vecteurs $X(t)$, $U(t)$ et $P(t)$ sont les vecteurs d'état, de commande et de perturbation respectivement, avec :

$$X(t) = [\Delta \omega_1 \Delta \omega_2 \dots \Delta \omega_n \Delta \delta_1 \Delta \delta_2 \dots \Delta \delta_n \Delta E'_{q1} \Delta E'_{q2} \dots \Delta E'_{qn} \Delta E_{fd1} \Delta E_{fd2} \dots \Delta E_{fdn}]^T$$

$$U(t) = [\Delta U_1 \Delta U_2 \dots \dots \Delta U_n]^T, P(t) = [\Delta P_{m1} \Delta P_{m2} \dots \dots \Delta P_{mn}]^T$$

En écrivant ces deux équations sous forme matricielle, nous obtenons le modèle d'état linéaire final suivant :

$$\Delta \dot{x} = A \cdot \Delta x + B \cdot \Delta u \quad (\text{II.36})$$

$$\Delta y = C \cdot \Delta x + D \cdot \Delta u \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Où :

A : matrice d'état ($n \times n$).

B : matrice d'entrée ($n \times r$).

C : matrice de sortie ($m \times n$).

D : matrice de contrôle ($m \times r$).

- Le nombre des variables d'état n définit la longueur du vecteur d'état Δx , le nombre de lignes et de colonnes de la matrice A , le nombre de lignes de la matrice B et le nombre des colonnes de la matrice C .
- Le nombre r des variables d'entrées choisies définit la longueur du vecteur d'entrée Δu et le nombre de colonnes des matrices B et D .
- Le nombre des variables de sorties choisies m définit la longueur du vecteur de sortie Δy et le nombre de lignes des matrices C et D .
- La matrice A est appelée matrice d'état ou matrice d'évolution, car elle contient la description du comportement dynamique du système. Elle rend compte aussi de l'évolution du système en régime libre, c.-à-d. à commande nulle.
- La matrice B est appelée matrice de commande ou matrice d'entrée. Elle rend compte du comportement dynamique du système en réponse à une commande.
- La matrice C est appelée matrice d'observation. Elle permet de relier la sortie à l'état.
- La matrice D est enfin appelée matrice d'action directe qui relie directement la commande à la sortie. Elle est en général nulle dans les systèmes physiques; le système est dit "strictement propre" [27].

Nous développerons un modèle linéaire du système électrique à partir des équations établies ci-dessus.

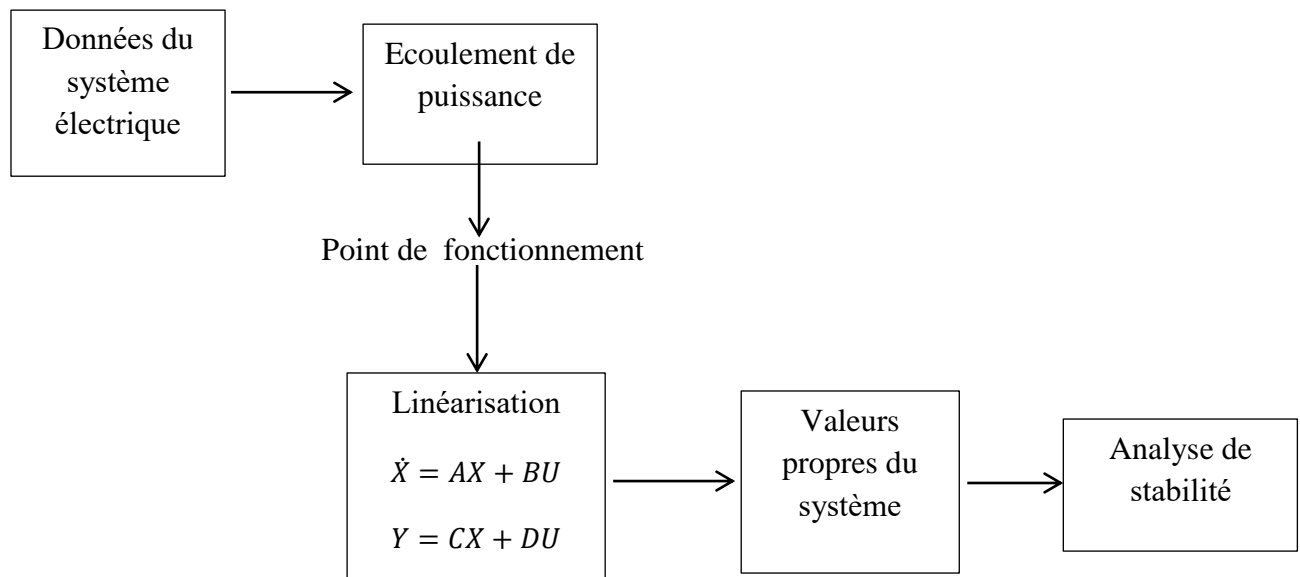


Figure III.8 Développerons un modèle linéaire du système électrique.

II.8 Modèle PSS à avance retard de phase (lead-lag PSS)

Ce type de *PSS* se compose des trois blocs essentiels suivants :

- un gain amplificateur K_{PSS} .
- un filtre passe-haut caractérisé par sa constante de temps T_w , dont le rôle est d'atténuer.

Les fréquences sont inférieures à (0.1Hz) du signal d'entrée, sa fonction de transfert est donnée par :

$$G_{\text{filtre}} = \frac{sT_w}{1 + sT_w} \quad (\text{II.40})$$

Des blocs de compensation de phase dont la fonction de transfert est donnée par :

$$G_e = \left[\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right]^k \quad (\text{II.41})$$

Où $k=1$ ou 2 et $T_1 > T_2$

Généralement on prend $k = 2$, on peut écrire alors :

$$G_C = \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \left(\frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \right) \quad (\text{II.42})$$

Donc, le schéma final de ce type des PSSs à avance retard de phase est le suivant :

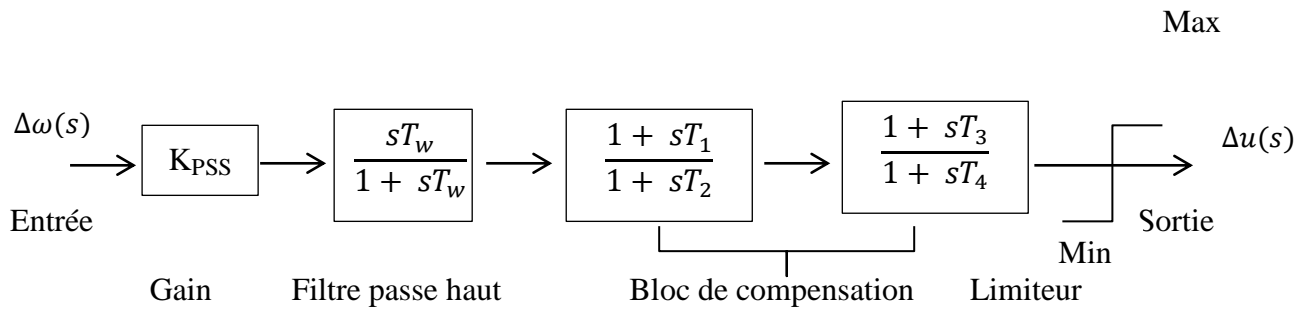


Figure II.9 Schéma bloc d'un PSS à avance-retard de phase [28].

II.8.2 Modèle du régulateur PID parallèle

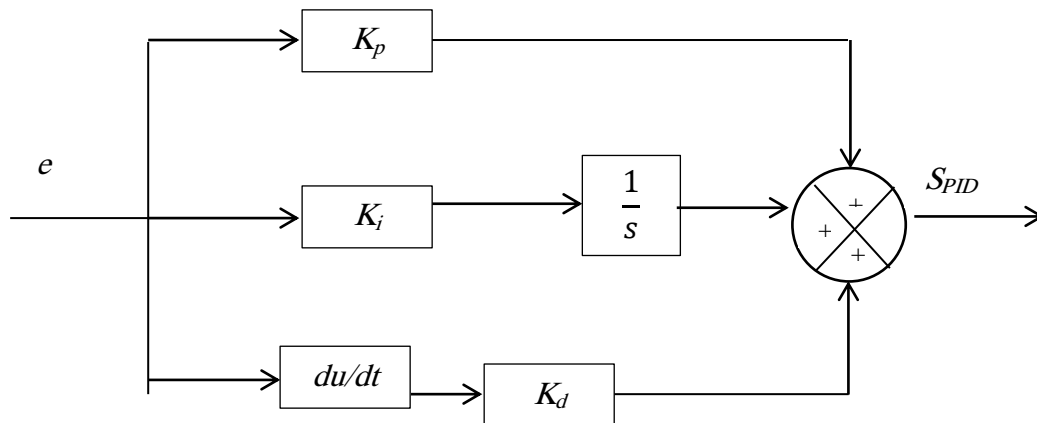


Figure II.10 Schéma bloc d'un régulateur PID parallèle.

La structure d'un régulateur PID peut être mise en équation comme suit :

$$\Delta U(t) = K_p \Delta\omega(t) + K_d \frac{d}{dt} \Delta\omega(t) + K_i \int \Delta\omega(t) dt \quad (II.43)$$

e : entrée

K_p : Gain proportionnelle.

K_i : Gain intégral.

K_d : Gain dérivé.

$\frac{1}{s}$: Intégrateur

S_{PID} : Sortie de PID.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation générale non-linéaire du système de puissance (générateurs, lignes de transmission, transformateurs, charges).

Nous avons aussi présenté la linéarisation du système décrite en général par un ensemble d'équations différentielles et algébriques (*EDA*). Dans la suite de ce chapitre, nous avons vu une brève description du modèle le modèle de *PSS* à avance-retard de phase.

CHAPITRE III : CONCEPTION OPTIMISEE
D'UN *PSS* A LA LOGIQUE FLOUE

III.1 Introduction

Aujourd'hui, la logique floue (*fuzzy logic*) est une technique de l'intelligence artificielle qui représente un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreux scientifiques.

La logique booléenne classique ne permet que deux états : VRAI ou FAUX. Tandis que la logique floue permet un degré de 'vérité' ou d'appartenance compris entre 0 et 1. Par exemple ; une personne est de grande taille, si elle mesure 170 cm, de très grande taille si elle mesure 190cm. Et si elle mesure 180 cm est-elle de grande ou de très grande taille ?

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux concepts de la logique floue et à son application à la conception d'un PSS flou de type *PID* dédié à l'amélioration de la stabilité angulaire d'un réseau électrique multi-machine.

III.2 Historique de la logique floue

La logique floue a été proposée par le professeur Lofti Zadeh de l'Université de Californie à Berkeley (USA) en 1965 même en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques.

En 1975, Ebrahim Mamdani expérimentait la théorie des ensembles flous énoncée par Zadeh sur un système de commande dans le but de commander une machine à vapeur et des chaudières, ce qui introduisait la commande floue dans la régulation des processus industriels [29].

Mamdani et Assilian ont publié les premiers résultats permettant une exploitation de cette théorie dans des systèmes de réglage. En utilisant une structure de contrôleur relativement simple, ils ont obtenu de meilleurs résultats lors de la commande de certains processus que ceux fournis par un régulateur standard de type *PID* [30].

A partir de 1985 environ, ce sont les japonais qui commencent à utiliser largement la logique floue dans des produits industriels et de consommation pour résoudre des problèmes de réglage et de commande [30].

À partir de 1990, les fabricants intègrent de plus en plus la technologie de la logique floue dans les appareils de grande consommation (appareils de photos, vidéo, ...). La mise en œuvre de cette technique est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement [29].

III.3 Principe de la logique floue

C'est une technique dédiée au traitement de connaissances imprécises et incertaines. Elle se base sur des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou des expressions du langage naturel, tels que faible, élevé, rapide, lent, grand, petit, ...etc [31].

Ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système. Ainsi, les éléments de base de la logique floue sont les suivants :

- les variables linguistiques et la théorie des sous-ensembles flous ;
- les fonctions d'appartenance ;
- les opérateurs flous ;
- la base de règles floues ;

III.3.1 Variables linguistiques et théorie des sous-ensembles flous

Une description imprécise d'une situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut être exprimée que par des expressions relatives ou floues. Ces différentes classes d'expressions floues, appelées ensembles flous, forment ce qu'on appelle des variables linguistiques.

Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques qui sont normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe (Voir figure III.1) [32].

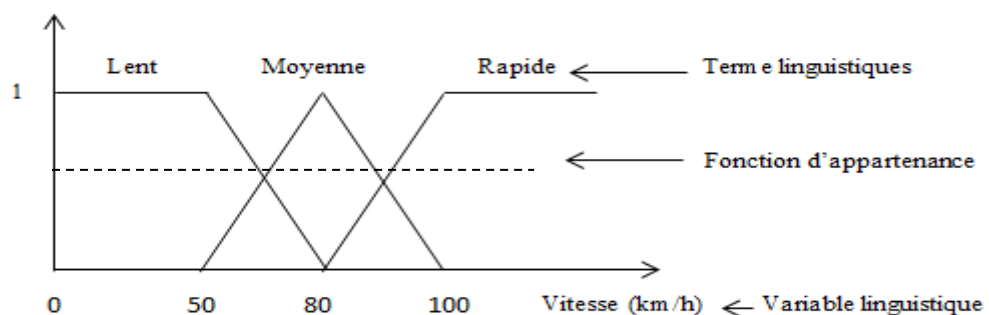


Figure III.1 Représentation d'une variable linguistique

III.3.2 Fonctions d'appartenance

Au lieu d'appartenir à un ensemble 'vrai' ou 'faux' (cas de la logique binaire traditionnelle), la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné. Le degré d'appartenance à un ensemble flou est matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée μ et appelée 'facteur d'appartenance'. Pour des raisons de simplicité, nous introduisons les fonctions d'appartenances suivantes qui sont généralement utilisées (voir figure III.2) [33] :

a) Fonction triangulaire :

Elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$, qui déterminent les abscisses des trois sommets du triangle. On peut écrire alors :

$$u(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{si } b < x \leq c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

b) Fonction trapézoïdale :

Elle est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$ qui représentent les abscisses des quatre sommets du trapèze. On a alors :

$$u(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a < x \leq b \\ 1 & \text{si } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c < x \leq d \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

c) Fonction d'appartenance gaussienne :

Elle est définie par deux paramètres $\{c, \sigma\}$ qui représentent respectivement son centre et son écart type. Elle est exprimée par :

$$u(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{III.3})$$

d) Fonction d'appartenance sigmoïde :

Elle est définie par deux paramètres $\{a, c\}$ et elle est exprimée par :

$$u(x) = \frac{1}{1+e^{-a(x-c)}} \quad (\text{III.4})$$

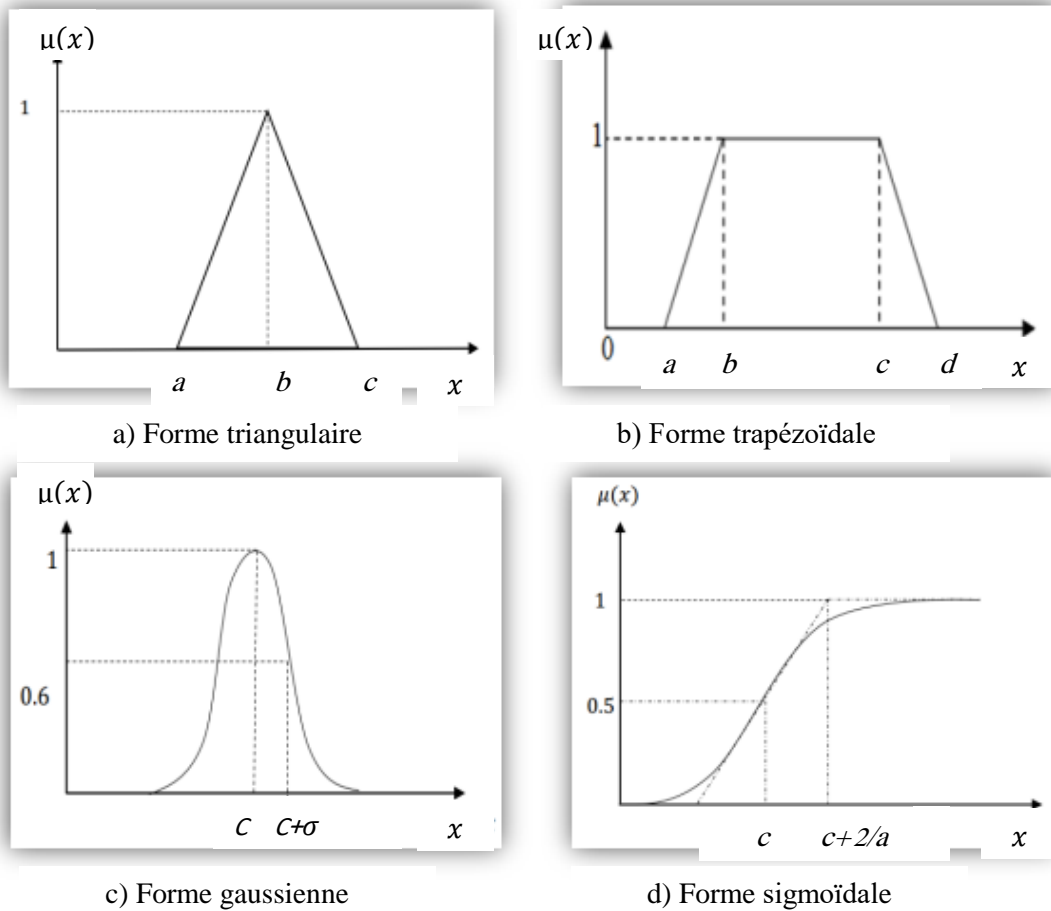


Figure III.2 Différentes formes de la fonction d'appartenance [34]

III.3.3 Opérateurs de la logique floue

Une fois les ensembles flous définis, des opérations mathématiques sur ces ensembles ont été développées. Les opérateurs mathématiques développés sont similaires à ceux associés à la théorie des ensembles conventionnels [35].

Les variables linguistiques sont liées entre elles par des opérateurs logiques 'ET', 'OU', 'NON' et 'ALORS'. Ce sont des opérateurs de logique floue qui opèrent sur des fonctions d'appartenance représentant des variables linguistiques. Ces opérateurs qui sont les plus importants sont : l'intersection, l'union, le complément et l'implication. Il existe de nombreuses méthodes de calcul pour ces opérations [36]. Nous nous limitons dans ce qui suit à l'approche la plus simple proposée par Zadeh.

III.3.3.1 Opérateur OU

La fonction d'appartenance de l'opérateur d'union $\mu_{A \cup B}$, correspondant à l'ensemble flou $A \cup B$, est définie comme suit:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (\text{III.5})$$

III.3.3.2 Opérateur ET

La fonction d'appartenance de cet opérateur d'intersections $\mu_{A \cap B}$ correspondant à l'ensemble flou $A \cap B$, elle est définie comme suit:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (\text{III.6})$$

III.3.3.3 Opérateurs NON

On définit la fonction d'appartenance de cet opérateur 'complément' $\mu_{\bar{A}}$ correspondant à l'ensemble flou \bar{A} par:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III.7})$$

III.3.3.4 Opérateur ALORS

La fonction d'appartenance de cet opérateur d'implication $\mu_{A/B}$ correspondant à la proposition $(A \Rightarrow B)$ est définie comme suit :

$$\mu_{A/B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (\text{III.8})$$

III.3.4 Base de règles floues

La base de règles est un ensemble de règles conditionnelles floues de type « **Si** (condition) **Alors** (conclusion) », qui se compose de deux parties : prémisse et conclusion. Selon leur conclusion, ces règles peuvent être divisées en trois types :

- Type 1 Règle floue dont la conclusion est une constante, elle est de la forme :

$$R_i : \text{Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ ET } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{ ET } X_n \text{ est } A_n \text{ Alors } Y \text{ est } W_i$$

- Type 2 Règle floue dont la conclusion est une fonction linéaire de premier ordre, elle peut être exprimée ainsi :

$$R_i : \text{Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ ET } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{ ET } X_n \text{ est } A_n \text{ Alors } Y \text{ est } g(X_1, \dots, X_n)$$

- Type 3 Règle floue dont la conclusion est un ensemble flou, elle est de la forme :

$$R_i : \text{Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ ET } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{ ET } X_n \text{ est } A_n \text{ Alors } Y \text{ est } B_k$$

Où R_i est la $i^{\text{ème}}$ règle X_n et Y_n sont respectivement les variables d'entrée et de sortie, A_n et B_k sont des sous-ensembles flous et W_i est une constante [37].

III.4 Commande par logique floue

La commande par la logique floue est une application directe des règles d'inférence Etablie par un expert pour contrôler un processus donné. Typiquement, un système de commande floue se décompose en trois étapes successives de calcul représentées sur la figure III.3.

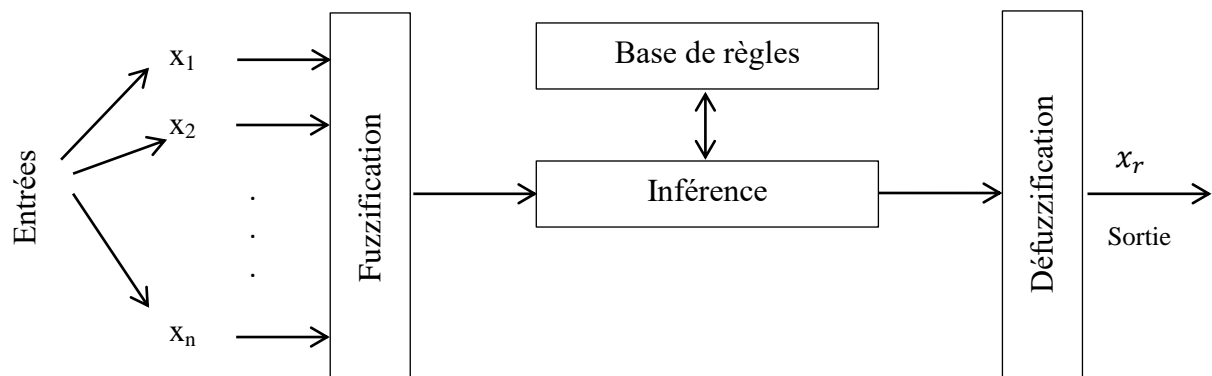


Figure III.3 Différentes étapes de calcul d'une commande floue

Dans le cas d'un réglage flou d'une seule grandeur, on dispose de deux entrées $x_1 = e$ (qui est l'erreur de réglage) et $x_2 = \Delta e$ (qui est la variation de cette erreur ou sa dérivée).

III.4.1 Fuzzification

C'est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisés par des valeurs linguistiques que prennent ces variables. Deux cas peuvent se présenter selon que la mesure d'une variable physique réelle est précise (valeur numérique) ou pas [38].

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, ...) est arbitraire. Quant au nombre des fonctions d'appartenance, il est variable. En général, une variable x_n introduit trois, cinq ou sept ensembles, représentés par des fonctions d'appartenance, comme le montre la figure III.4 à titre d'exemple. Le nombre des ensembles dépend de la résolution et de l'intervention qu'on désire du réglage. Une subdivision plus fine, c'est à dire plus de sept ensembles, n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique des ajustements effectués par la logique floue. Par contre, un tel choix compliquerait la formulation des règles d'inférence.

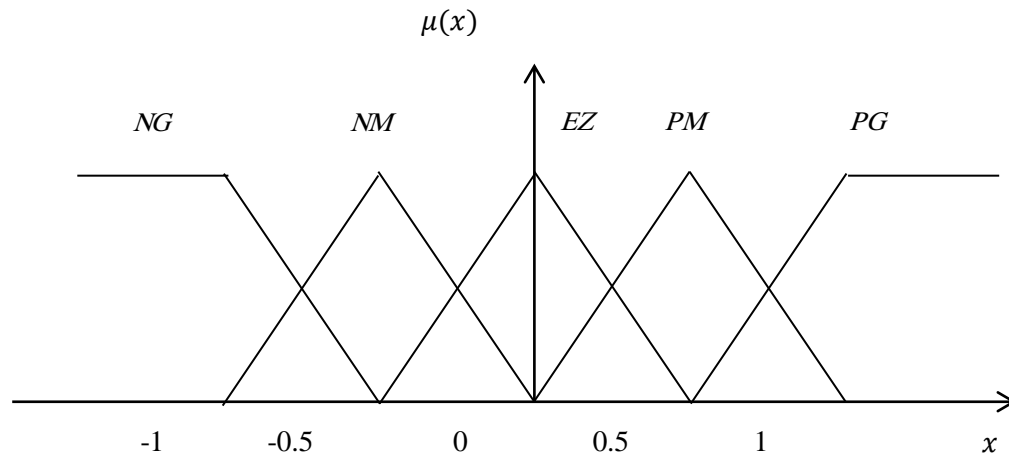


Figure III.4 Fuzzification d'une variation linguistique avec cinq fonctions d'appartenance

Les différents ensembles flous sont caractérisés par des désignations standards :

NG : Négatif Grand

NM : Négatif Moyen

EZ : Environ Zéro

MP : Positif Moyen

PG : Positif Grand

III.4.2 Inférence

Pour exprimer les inférences, il existe plusieurs possibilités, à savoir la description linguistique et symbolique ou l'utilisation des tableaux et matrices d'inférence.

Dans le cas d'une description linguistique, les règles de l'inférence floue sont exprimées ainsi :

Si (*e* est Environ Zéro **ET** Δe est Environ Zéro), **ALORS** (x_r est Environ Zéro),

OU

Si (*e* est Négatif Grand **ET** Δe est Négatif Grand), **ALORS** (x_r est Négatif Moyen), ...

A tandis dès que dans le cas d'une description symbolique, ces mêmes règles sont écrites ainsi :

Si $e = EZ$ **ET** $\Delta e = EZ$ **alors** $x_r = EZ$

OU

Si $e = NG$ ET $\Delta e = NG$ alors $x_r = NM, \dots$

On peut également résumer les règles floues dans une matrice d'inférence.

Voici l'exemple d'une matrice d'inférence floue permettant de générer une action Proportionnelle Dérivatrice 'PD'.

Tableau III.1 Matrice d'inférence d'un régulateur floue de type PD [30]

x_r		$x_1 = e$				
		<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>EZ</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>
$x_2 = \Delta e$	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>EZ</i>
	<i>NM</i>	<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>EZ</i>	<i>PM</i>
	<i>EZ</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>EZ</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>
	<i>PM</i>	<i>NM</i>	<i>EZ</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>
	<i>PG</i>	<i>EZ</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>

Ces règles floues incluent des opérateurs flous 'ET' et 'OU' et 'ALORS'. L'opérateur 'ET' s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur 'OU' lie les différentes règles. En outre, l'opérateur 'ALORS' permet de lier la prémisse à la conclusion de chaque règle. Il existe plusieurs possibilités pour interpréter ces opérateurs. Pour le réglage de la logique floue, l'une des méthodes suivantes est généralement utilisée [36] :

- Méthode d'inférence max-min où $\{ET, OU, ALORS\} = \{\text{Min}, \text{Max}, \text{Min}\}$
- Méthode d'inférence max-produit où $\{ET, OU, ALORS\} = \{\text{Produit}, \text{Max}, \text{Produit}\}$
- Méthode d'inférence somme-produit où $\{ET, OU, ALORS\} = \{\text{Produit}, \text{Somme (Moyenne arithmétique)}, \text{Produit}\}$.

III.4.3 Défuzzification

A la sortie du bloc d'inférence, on obtient un ensemble flou qui ne peut pas être utilisé directement pour fournir des informations précises aux opérateurs ou pour commander des actionneurs. Il faut transformer cette variable floue en une variable réelle, c'est ce qu'on appelle 'défuzzification' [38]. Il existe trois méthodes fondamentales de défuzzification (maximum,

moyenne des maximums, centre de gravité) [39]. Le plus souvent, on utilise la méthode du centre de gravité de l'ensemble flou [38].

Cette méthode est très utilisée grâce à la haute précision qu'elle offre. Dans ce cas, la sortie du régulateur flou est exprimée ainsi :

$$x_r^* = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} U_i(e)U_i(\Delta e)x_{Gi}S_i}{\sum_{i=1}^{n_r} U_i(e)U_i(\Delta e)S_i} \quad (\text{III.9})$$

Ou $U_i(e)$ et $U_i(\Delta e)$ sont respectivement les degrés d'appartenance des deux entrées du régulateur flou correspondant à la $i^{\text{ème}}$ règle ;

x_{Gi} et S_i sont respectivement l'abscisse du centre de gravité et la surface des sous-ensembles flous de la sortie x_r du régulateur correspondant à la $i^{\text{ème}}$ règle ;

n_r est le nombre des règles.

III.5 Différents régulateurs flous

Il existe plusieurs types régulateurs flous qu'on peut réaliser en partant d'un régulateur 'PD' flou dont la matrice d'inférence est résumée dans le tableau III.1. La figure suivante illustre le schéma bloc d'un régulateur flou de type PD.

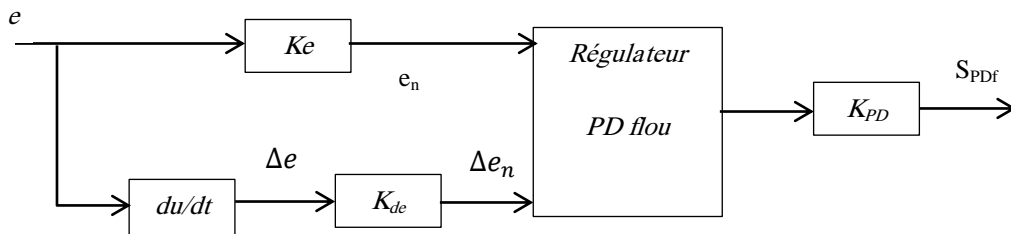


Figure III.5 Schéma bloc d'un régulateur PD flou

Où :

e et Δe sont les deux entrées du régulateur flou,

S_{PDF} est la sortie du régulateur PD flou,

K_e est le gain de l'erreur de réglage,

K_{de} est le gain de la variation de cette erreur,

K_{PD} est le gain de la sortie du régulateur *PD* flou.

A partir ce régulateur, on peut élaborer des régulateurs flous de type *PI* et *PID*. Voici le schéma d'un régulateur flou à action *PI* :

L'intégrateur ajouté à la sortie du régulateur permet de générer cette action *PI*.

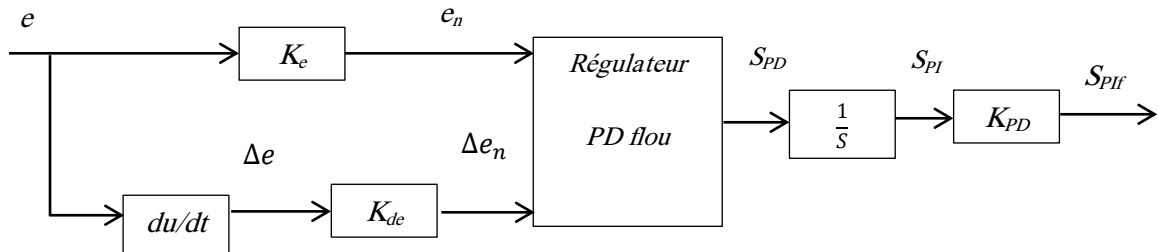


Figure III.6 Schéma bloc d'un régulateur *PI* flou

Où S_{PIf} est la sortie du régulateur flou de type *PI*.

Par ailleurs, le schéma suivant montre le schéma d'un régulateur *PID*. Notons qu'il additionne les deux actions *PD* et *PI* pour générer une action *PID*.

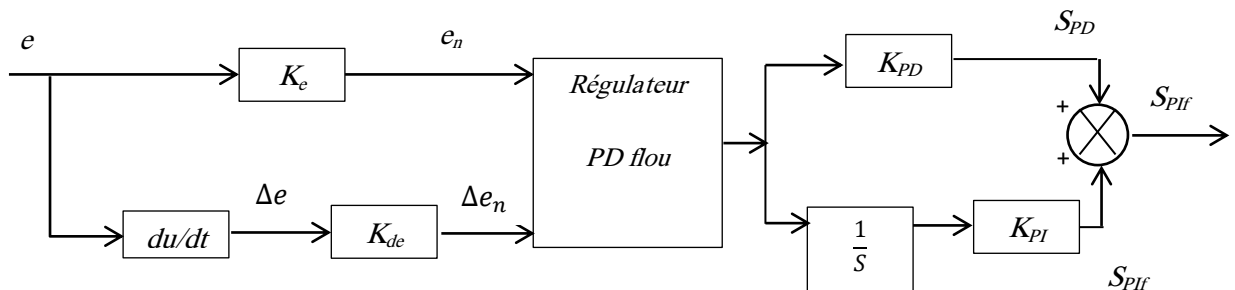


Figure III.7 Schéma bloc d'un régulateur *PID* flou.

Où

K_{PD} est le gain de l'action proportionnelle et dérivatrice,

K_{PI} est le gain de la sortie proportionnelle et intégrale,

S_{PIDf} est la sortie du régulateur *PID* flou.

III.6 Application de la logique floue à la conception d'un PSS

Dans ce travail, nous allons concevoir un stabilisateur de puissance (*PSS*) de type *PID* flou dédié à l'amélioration de la stabilité angulaire d'un réseau multi-machine. Pour dimensionner ce régulateur *PID* flou, nous allons d'abord formuler, ce problème sous forme d'un problème d'optimisation.

Nous avons choisi comme fonction objective à optimiser (minimiser) la somme de l'intégrale des déviations des vitesses des générateurs du système étudié :

$$f_{obj} = ISE = \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^{NG} (\Delta\omega_i)^2 dt \quad (III.10)$$

Cette fonction objective est soumise aux contraintes suivantes :

$$K_{ei\ min} \leq K_{ei} \leq K_{ei\ max} \quad (III.11)$$

$$K_{dei\ min} \leq K_{dei} \leq K_{dei\ max} \quad (III.12)$$

$$K_{PDi\ min} \leq K_{PDi} \leq K_{PDi\ max} \quad (III.13)$$

$$K_{PIi\ min} \leq K_{PIi} \leq K_{PIi\ max} \quad (III.14)$$

Où

NG est le nombre des générateurs du réseau,

$\Delta\omega_i$ est la déviation de la vitesse du $i^{\text{ème}}$ générateur par rapport au synchronisme,

t_f est le temps de simulation,

K_{ei} , K_{dei} , K_{PDi} , K_{PIi} sont les gains du *PSS* flou du $i^{\text{ème}}$ générateur.

Maintenant pour résoudre ce problème d'optimisation, nous allons utiliser l'outil d'optimisation 'OPTIMTOOL' de MATLAB dont l'interface graphique est illustrée par la figure III. 8.

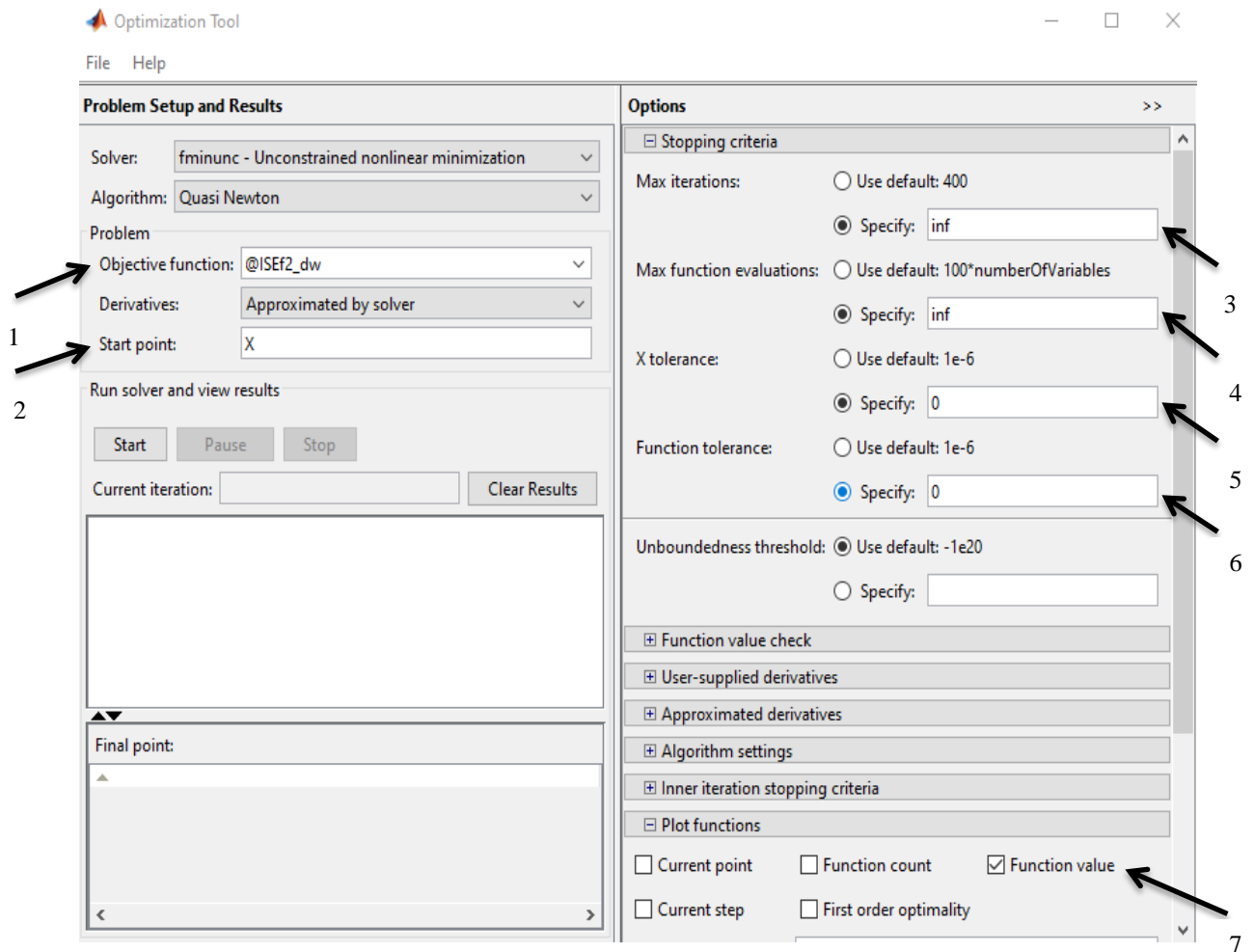


Figure III.8 Interface graphique de l'outil d'optimisation 'OPTIMTOOL' de MATLAB

Le paramétrage de cet outil d'optimisation se fait selon les étapes suivantes :

- 1) Définir la fonction objective à minimiser dans la rubrique ' *Objective function* ',
- 2) Définir une solution initiale dans la rubrique ' *Start point* ',
- 3) Saisir le nombre d'itérations maximal dans la case, 'Maxiterations'
- 4) Saisir le nombre maximal d'évaluations de la fonction objective dans la case ' *Max function evaluations* '.
- 5) & 6) Définir les critères d'arrêt sur la solution en cours ' *X tolerance* ' et sur la valeur de la fonction ' *Function Tolerance* ',
- 7) Coché la case ' *Function Value* ' de ' *Plot functions* ' pour tracer l'évolution de f_{obj} ,

Il existe plusieurs méthodes et algorithmes d'optimisation des fonctions multi-variables que nous pouvons choisir dans les rubriques ' *Solver* ' et ' *Algorithme* '. Nous avons choisi une méthode de descente par gradient de type ' *Quasi Newton* '.

Une fois cet outil est bien paramétré, on peut lancer l'opération d'optimisation en cliquant sur le bouton '*Start*'. A la fin de simulation, on obtient le nombre d'itérations dans le champ '*Current iteration*' et la solution dans la case '*Final point*'.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de la logique floue, puis nous avons décrit la structure d'un régulateur à base la logique floue de type *PID*.

Ensuite, pour utiliser ce régulateur flou pour améliorer la stabilité angulaire d'un réseau multi-machine, nous avons formulé le dimensionnement de ce *PSS-PID* flou sous forme d'un problème d'optimisation. Et enfin, nous avons montré comment résoudre ce problème à l'aide de l'outil d'optimisation '*OPTIMTOOL*' de MATLAB.

**CHAPITRE IV : PRESENTATION ET
DISCUSSION DES RESULTATS DE LA
SIMULATION**

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, les performances du *PSS_PID* flou sont étudiées. L'objectif d'améliorer la stabilité angulaire d'un réseau multi-machine en générant un signal de commande efficace qui augmente le taux d'amortissement des oscillations rotoriques. Nous avons choisi la conception du *PSS_PID* flou pour surmonter les lacunes du mécanisme *PID* classique, dans lequel les déviations et les oscillations se produisant au niveau de l'angle et de la vitesse du rotor ne sont pas suffisamment amorties. Les simulations sont réalisées dans l'environnement MATLAB. La variation de la vitesse du générateur est détectée puis utilisée comme signal d'entrée du *PSS*, et sa sortie est ajoutée à la référence de tension de référence au niveau de l'*AVR*.

Des résultats de simulation d'un réseau à deux machines, muni de *PSS_PID* flous seront présentés, discutés et comparés à ceux d'un *PSS* classique (à avance retard de phase) et ceux d'un *PSS_PID* classique.

IV.2 Présentation de réseau étudié

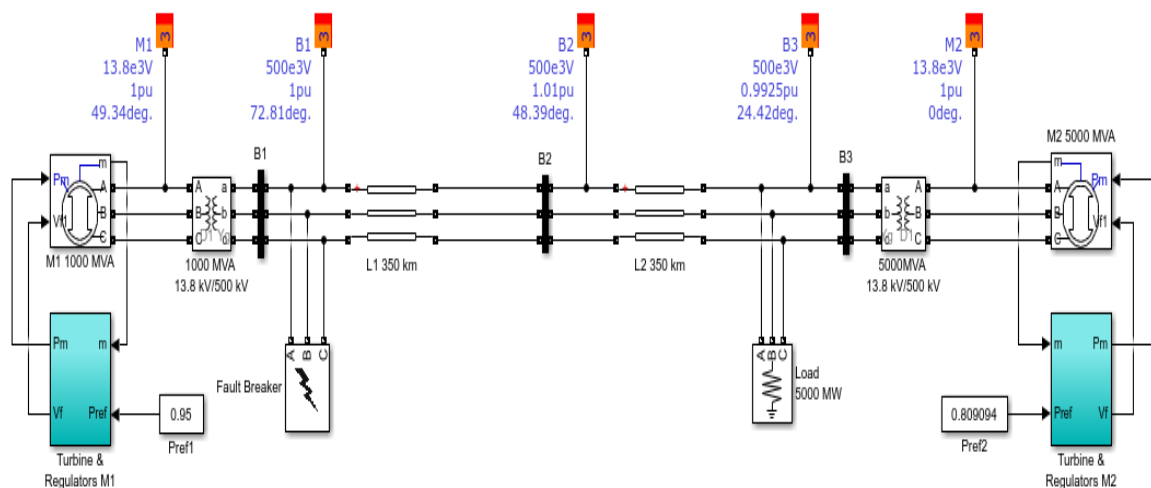


Figure IV.1 Représentation du réseau étudié sous MATLAB/Simulink [40]

Nous avons considéré un système électrique multi-machine composé de deux générateurs, pour étudier les oscillations électromécaniques de basse fréquence dans les grands systèmes interconnectés. Malgré sa petite taille, il imite très étroitement le comportement des systèmes en opération actuelle. Le nombre des générateurs est de 2 unités et 5 nœuds. Comme le montre la figure (IV.1). Ce système multi-machine est relié à deux lignes de transport d'énergie de 350 km. La tension nominale de système étudié est de 230 KV. Les deux générateurs synchrones ont des puissances de générateur 1 égale à 1000 MVA et pour le générateur deux 5000 MVA.

Les paramètres détaillés des différents éléments de ce réseau électrique (Générateurs, transformateurs, lignes, ...) sont récapitulés dans les tableaux (Voir Annexe B).

IV.3 Optimisation des paramètres de PSSs

Pour une meilleure optimisation des paramètres des *PSS_PID* floue et des *PSS_PID* classique, nous avons utilisé 'OPTIMTOOL' de MATLAB afin d'optimiser (minimiser) l'erreur (déviations de vitesse) quadratique intégrale par la méthode de gradient.

Pour calculer la fonction objective à minimiser, nous avons simulé le comportement dynamique du réseau étudié sur 10s, tous en provoquant un court-circuit triphasé au nœud B_1 à l'instant $t=1s$.

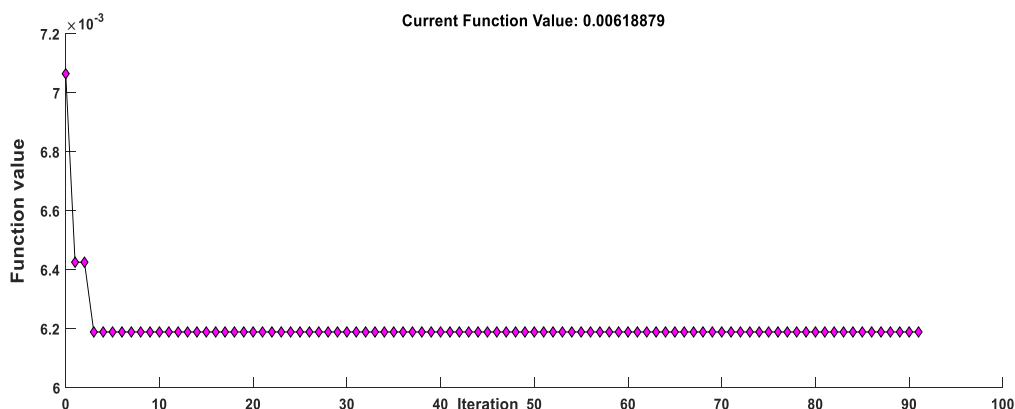
Ensuite, nous avons lancé l'opération d'optimisation. Les valeurs des paramètres des *PSSs* après optimisation de la fonction objective sont résumées dans les tableaux (IV.1, et IV. 2) :

Tableau IV.1 Paramètres optimisés des *PSS_PID* classiques.

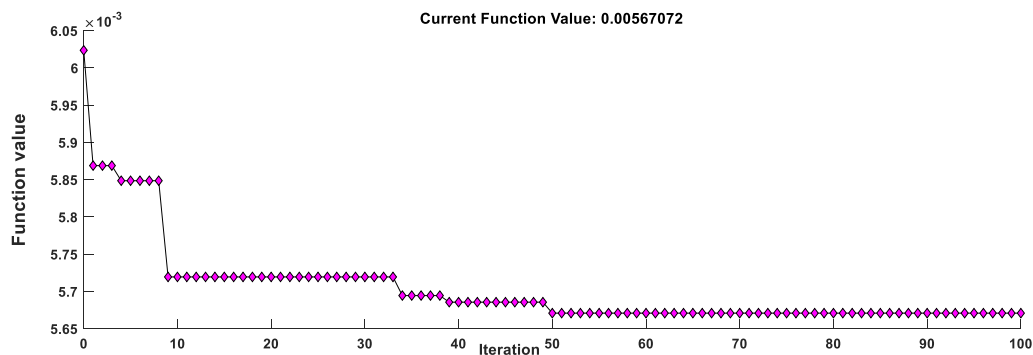
Paramètres du <i>PSS_PID</i>	k_p	k_i	k_d
G1	122.16	1.01	25.20
G2	203.61	0.001	25.45

Tableau IV.2 Paramètres optimisés des *PSS_PID* flous.

Paramètres du <i>PSS_PIDF</i>	K_e	K_{de}	K_{pi}	K_{di}
G1	45	15	25	0.5
G2	155	35	35	0.5



(a)



(b)

Figure IV.2 Optimisation des paramètres des *PSS_PID* et des *PSS_PID* flous.

IV.4 Présentation et discussion des scénarios utilisés

Pour le réseau multi-machine étudié, nous avons simulé son comportement transitoire sans et avec *PSSs* (*PID* flous ou *PID* classiques) placés au niveau de chaque générateur (figure IV.1). Dans ce cas aussi nous avons provoqué un défaut symétrique (court-circuit triphasé) fugitif car s'il ya ouverture de la ligne, de l'instant ($t = 1s$) au nœud B_I jusqu'à l'instant $t = 1.1s$ pour discuter les performances des *PSSs* étudiés.

IV.4.1 Cas du système sans *PSS*

Le temps de simulation est de 10s. Nous avons remarqué que le système est instable (voir figure IV.2). D'où la nécessité d'une commande stabilisante.

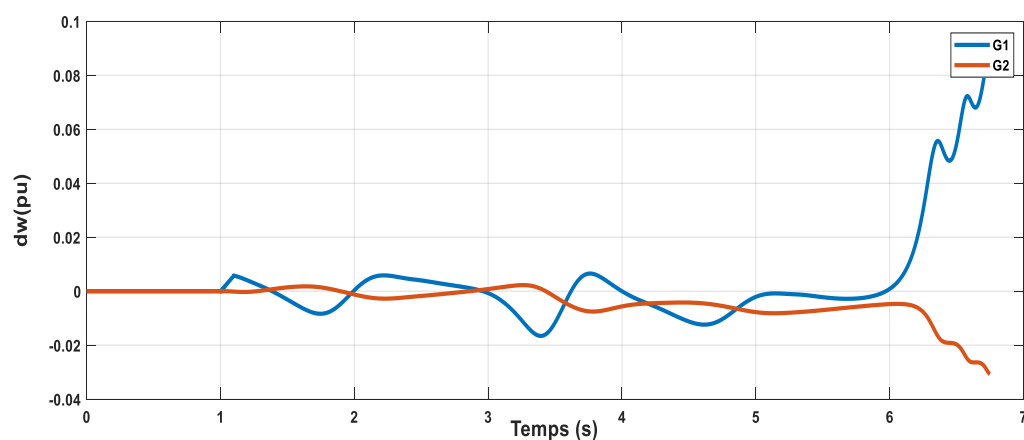


Figure IV.3 Déviation de vitesse des deux générateurs sans *PSS* du système étudié sans *PSS*

IV.4.2 Cas du système avec PSS à avance-retard de phase

Nous avons équipé les deux générateurs du réseau étudié de deux PSSs à avance-retard de phase, puis nous avons refait la simulation dans les mêmes conditions de fonctionnement.

La figure suivante illustre les résultats de simulation obtenus

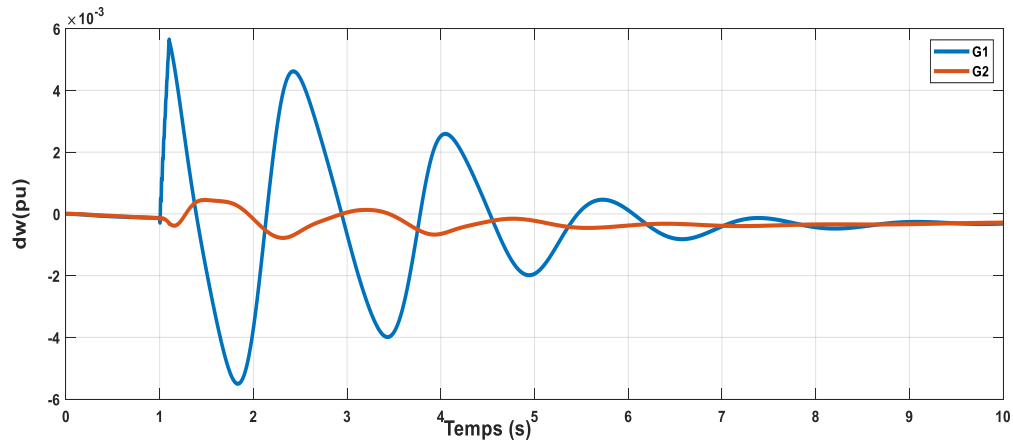


Figure IV.4 Déviations des vitesses des deux générateurs du système étudié, munis de PSSs à avance-retard de phase.

Nous avons remarqués que la stabilité du système est rétablie au bout de 7s environ. En effet, la mise en service de PSSs à avance-retard de phase, à revoir un amortissement des oscillations de la vitesse. On peut dire qu'il y a une amélioration de la stabilité angulaire du réseau étudié.

IV.4.3 Cas du système avec PSS multi-bande

Dans ce cas, nous avons équipé les deux générateurs du système étudié de deux PSSs multi-bande. Ensuite, nous avons simulé de nouveau la dynamique du système selon le scénario précédent.

La figure suivante illustre les déviations des vitesses des deux générateurs.

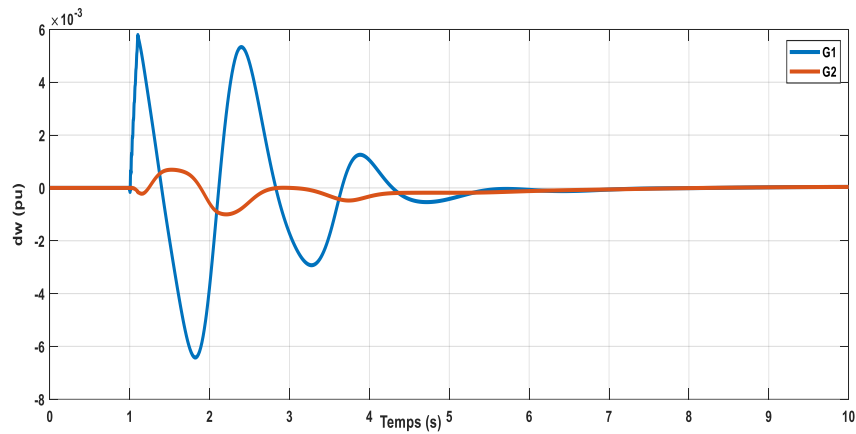


Figure IV.5 Déviation des vitesses de deux générateurs du réseau étudié munis de deux *PSSs* multi-bandes

Les résultats de simulation montrent que l'amortissement des oscillations de vitesse en présence d'un *PSS* multi-bande est mieux que le *PSS* à cause de ses multiples bandes et ses multiples fonctions. En effet, ses oscillations rotoriques ont été bien amorties au bout de 5s environ.

IV.4.4 Cas du système avec *PSS_PID*

Dans ce cas, nous avons équipé les deux générateurs de système étudié de deux *PSSs* type *PID* et nous avons obtenu les résultats de simulation concernant les déviations des vitesses illustrés par les figures suivantes :

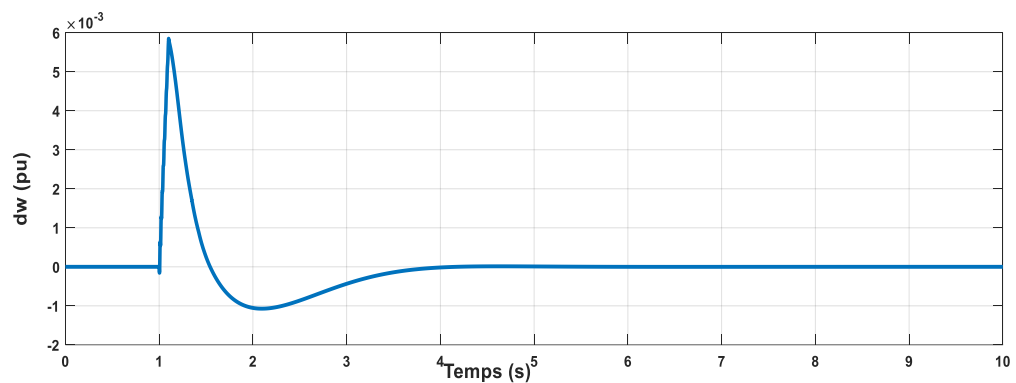


Figure IV.6 Déviation de vitesse du générateur M1 du système étudié, équipé de *PSSs_PID*

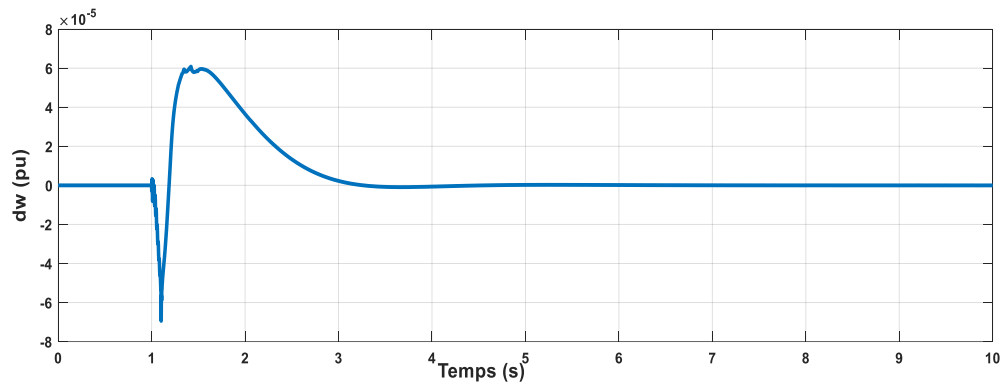


Figure IV.7 Déviation de vitesse du générateur M2 du système étudié, équipé de *PSSs_PID*

D'après la figure précédente, nous remarquons que les oscillations rotoriques sont bien amorties au bout de 4s. On peut dire alors que le système est bien stable dans ce cas, et il y a une amélioration nette de la stabilité angulaire.

IV.4.5 Cas du système avec *PSSs_PID* Flous

Dans ce cas, nous avons équipé les générateurs du système étudié de deux *PSSs* de type *PID* flous.

La figure suivante illustre les déviations des vitesses des deux générateurs.

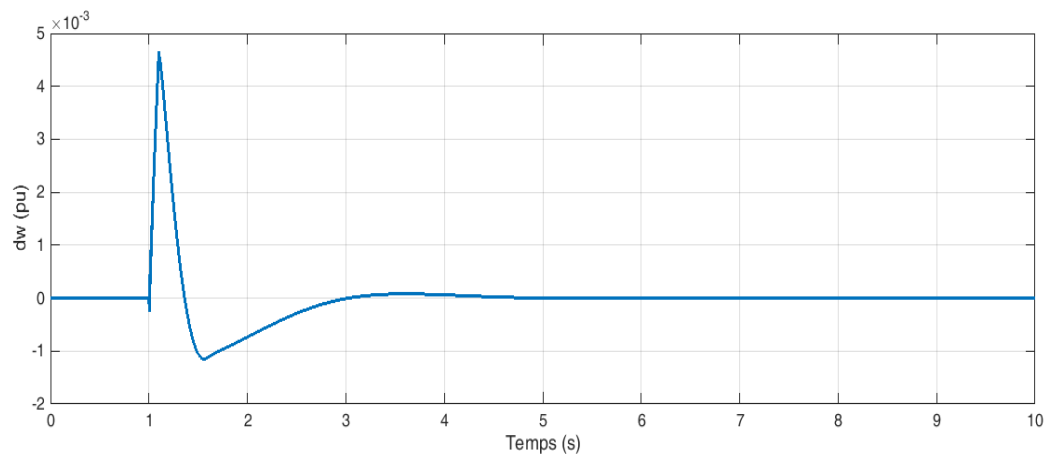


Figure IV.8 Déviation de vitesse du générateur M1 du système étudié équipé de *PSS* de type *PID* flou.

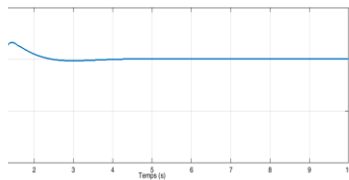


Figure IV.9 Déviation de vitesse du générateur M2 du système étudié équipé de *PSS* de type *PID* flou.

D'après la figure précédente, nous remarquons que l'amortissement des oscillations de la vitesse en présence de *PSS* de type *PID* flou est meilleur les autres *PSS* avec un temps d'amortissement de 2,6s.

IV.5 Comparaison des résultats obtenus

D'après les résultats obtenus, il est clair que le système mini de *PSS* de type *PID* flou est meilleure comparativement aux autres *PSS* en termes de temps de réponse (temps d'amortissement des oscillations) (voir la figure IV.10 et IV.11).

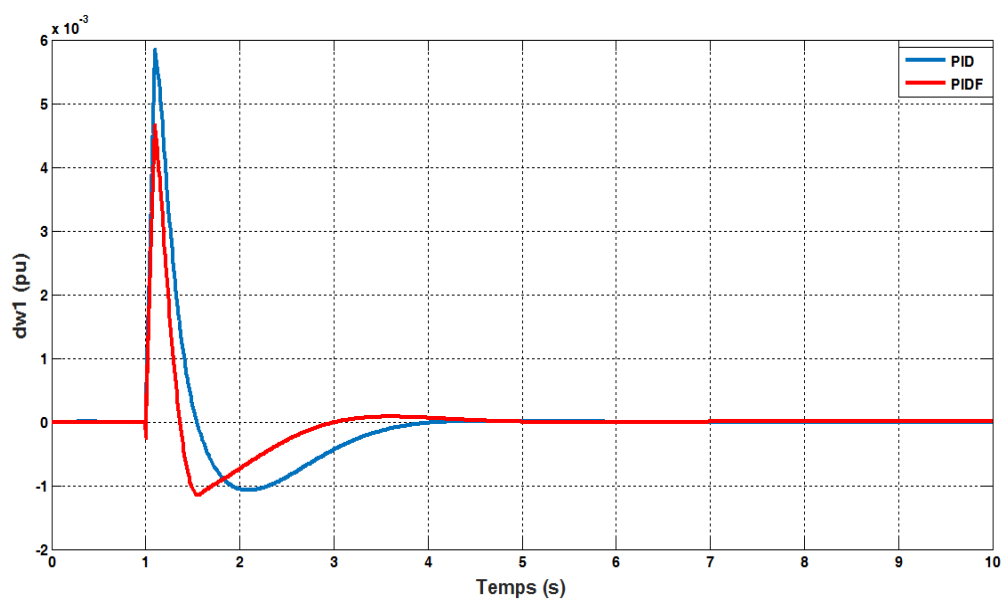


Figure IV.10 Déviation de vitesse de générateur M1 du système étudié équipé de PSSs de type *PID* et *PID* flous.

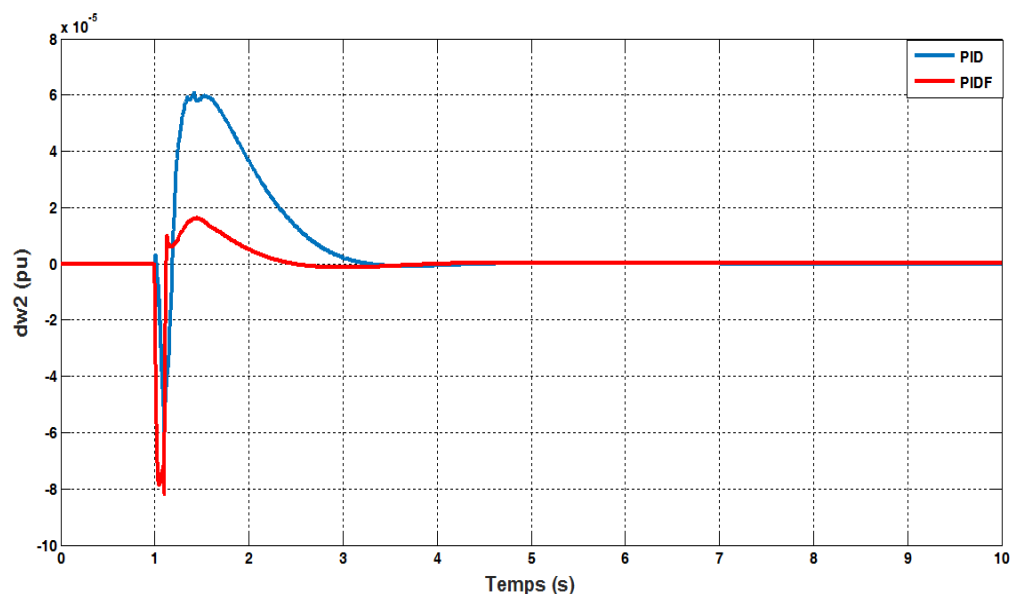


Figure IV.11 Déviation de vitesse de générateur M2 du système étudié équipé de PSSs de type *PID* et *PID* flous.

Tableau IV.3 Performances des différents types de *PSS-PID* et *PIDF* de générateur M1

Machine1	PID	PIDF
Temps de réponse (s)	4	2.9
1 ^{er} Pics positif	$5.9 \cdot 10^{-3}$	$4.75 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV.4 Performances des différents types de *PSS-PID* et *PIDF* de générateur M2

Machine2	PID	PIDF
Temps de réponse (s)	3.5	2.2
1 ^{er} Pics positif	$6 \cdot 10^{-5}$	$1.85 \cdot 10^{-5}$

Les résultats d'optimisation pour chacun régulateur montré au le tableau suivant :

Tableau IV.5 Performances des différents types de *PSSs*

Types de <i>PSSs</i>	$t_1 (s)$	$t_2 (s)$	<i>ISE</i>
Système sans <i>PSS</i>	∞	∞	0.7020
<i>PSS</i> a avancé retard de phase	8	6	0.065
<i>PSS_MB</i>	5.5	4.5	0.069
<i>PID</i>	4	3.5	0.0062
<i>PID floue</i>	2.9	2.2	0.0058

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué une méthode d'optimisation non linéaire pour la conception d'un stabilisateur d'un système de puissance multi-machine pour l'amortissement des oscillations électromécaniques de faible fréquence, basé sur la commande par logique floue.

Les résultats de simulations ont montré que le *PSS* de type *PID* flou permet efficacement d'améliorer l'amortissement et assurer la stabilité du système étudié comparativement au *PSS* de type *PID* au *PSS* à avance retard de phase et au *PSS* multi-bande.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire concerne un problème très important dans l'état actuel lié à l'amélioration de la stabilité angulaire aux petites perturbations, des systèmes de puissance (*R.E*) ; nous avons modélisé les éléments du réseau qui nous ont permis de faire l'étude dynamique du système et la simulation afin d'obtenir des résultats proches de la réalité. Nous avons effectué une linéarisation des équations du système autour d'un point de fonctionnement afin d'obtenir la représentation d'état du système.

Dans ce mémoire, nous avons fait la simulation de notre système sous environnement MATLAB/SIMULINK, en dégageant et en interprétant les courbes de déviation de la vitesse, utilisation comme *PSS_S* :

- Avance-retard de phase.
- *PID*.
- *PIDF*.

Nous avons montré l'efficacité des dispositifs *PSS_S*, *PID* et *PIDF* pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux électriques. Les deux contrôleurs (*PID* et *PIDF*) ont été proposés pour assurer un meilleur amortissement des oscillations électromécaniques présentes lors d'une perturbation telle que le court-circuit. Ensuite, les paramètres des contrôleurs *PID* et *PIDF* sont optimisés par la méthode gradient qui nous a permis d'obtenir les paramètres idéaux pour un meilleur amortissement des oscillations électromécaniques du système de puissance.

Ce travail a été validé par l'utilisation des contrôleurs *PSS* classique (lead-lag), *PID* classique et *PIDF*.

Les résultats obtenus après application de défaut (C-C) montrent que l'action du contrôleur *PIDF* dans le système d'énergie assure un bon amortissement et une efficacité en termes de temps de réponse par rapport à celui du *PID*.

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

- Appliquer d'autres méthodes d'optimisation et comparer les résultats pour affiner la recherche des solutions optimales.
- Appliquer notre approche au grand réseau (4 machines).

Bibliographie

- [1] (IEEE/CIGRE, 2004) IEEE/CIGRE joint Task force on Stability Terms and Definitions, «Definition and Classification of Power System Stability», IEEE Trans on power systems, vol.19, n.2, pp 1387-1401, 2004.
- [2] Hasan Alkhatib, 2008 «Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques» Doctorat de l'université Paul-Cézanne D'Aix Marseille.
- [3] Kundur P., Power System Stability and Control. The EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill. Inc.1994.
- [4] Oualid Ben Abdelhamid, 2015 «Etude de la stabilité d'un système électro-énergétique par différentes techniques avancées», Master académique, Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued.
- [5] Touafek Mohamed Yaakoub, «Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS», Mémoire de Magister à Université Ferhat Abbas_ Sétif, 2012.
- [6] Harkat Said, «Amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant les systèmes PIID et PSS réglés avec l'algorithme PSO», Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2018.
- [7] Custem T.V. Systèmes électriques de Puissance II. Cours ELEC 047, Département D'Electricité, Electronique et Informatique : Institut Montefiore, Université de Liège, 2002
- [8] H. Hussain AL Marhoon, A Practical Method for Power System Transient Stability And Security, Thèse de Magister, University Of New Orleans, May 2010 .
- [9] Kamel Saoudi, 2014, «Stabilisateur intelligents des systèmes électro-énergétique», Doctorat en science de Université Ferhat Abbas-Setif UFAS(ALGERIE).
- [10] Guelloula Ahmed, Lahdeb Mohamed Amine, «choix et emplacement des PSSs pour l'étude de la stabilité d'un réseau électrique multi-machine», Mémoire de Master, Université Amar Telidgi-Laghout, 2018-2019.
- [11] Yagoub Maroua, 2019, «Amélioration de la stabilité dynamique d'un réseau électrique», Mémoire de Master d'Université Mohamed Khider de Biskra.

Bibliographie

- [12] Kundur P., Klein M., Rogers G.J. and Zywno M.S, «Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability», IEEE Transaction on Power System, vol. 4, n°.2, pp. 614-626. May, 1989.
- [13] Djamel Eddine Ghouraf and Abdellatif Naceri, «Commande par PSS Pour améliorer la stabilité du système électro-énergétique», Acta électrotechnique, Volume 54, Number 1, 2013.
- [14] Pal B. and Chaudhuri B., Robust Control in Power Systems, Springer Science + Business Media, Inc, 2005.
- [15] Fleming R.J., Mohan M.A. and Parvatisam K, «Selection of parameters of Stabilizers in multimachine power systems», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 2329-2333, 1981.
- [16] Larsen E.V. and Swann D.A, «Applying power system stabilizers part-I: General Concepts», IEEE Trans. Power App. Sys., vol.100, n°. 6, pp. 3017-3024, Jun. 1981.
- [17] Yu Yao-Nan, Electric Power System Dynamics, Academic Press 1983.
- [18] B- Doudi, «Modélisation et stabilité en petit mouvement d'un réseau électrique multi-machines», Mémoire de Magister, Université Amar Téliidji Laghouat, 2009.
- [19] Jean-François Canard, «Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de Distribution», thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, Décembre 2000.
- [20] Malek Mounia, Bali Mohand Said, 2016 «Etude Comparative sur les Méthodes d'analyse de la Stabilité des Réseaux Electriques», Mémoire de Fin de Cycle en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique Option : Réseaux Electriques, Université A. MIRA – Bejaia.
- [21] (IEEE, 2005) IEEE, IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. USA, Std.421.5, 2005.
- [22] Neeraj Gupta, 2008 «Fuzzy Logic Based Power System Stabilizer», Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Drives University Patiala-14704.
- [23] DeMello F.P. and Concordia C., «Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control », IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-88, pp. 316–329, 1969.

Bibliographie

- [24] Berka Amine, Chinoune A. Hakime Baara, A.Ghani, «Analyse de la Stabilité des Systèmes d'énergie Electriques par les Réseaux de Neurones», Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingenieur, Université de M'sila Mohamed Boudiaf, 2007.
- [25] S.Arif, Notes de Cours «Conduite des Réseaux Electriques Power System Control», Université Amar Telidji- Laghouat, Département d'Electrotechnique, Master : Réseaux Electriques, 2022, p04.
- [26] Yvon Besanger Agrégé de Génie Electrique, ancien élève de l'ENS de CACHAN, pour obtenir le grade de docteur, Etude des FACTS (Flexible AC Transmission System) et de leur comportement dans les réseaux de transport et d'interconnexion, 1996,
- [27] L. Boufenneche, Cour Modélisation des transformateurs électriques, Réseaux Electriques (3ème Licence ELT), p1.
- [28] Sarra Bouallaghi, «techniques l'optimisation déterministe et stochastique pour la résolution de problèmes», Mémoire de Magister 2010.
- [29] Z. Tir, «Contribution à l'étude d'une machine asynchrone a double alimentation sans balais en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne», Thèse de doctorat, Université de Batna, 2014.
- [30] Mokrani Lakhdar, «Chapitre 1 Logique Floue et ses Applications», Cours de 'Techniques de l'Intelligence Artificielle', Université Amar Telidji- Laghouat, 2021.
- [31] L.Zadeh, «Fuzzy sets information and control», information and control pp.338-353, 1965.
- [32] H. Mohammed, «Commande directe du couple d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique par les techniques de l'intelligence artificielle», Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [33] A. Bounemour, «Commande Adaptative Floue Des Systèmes Non Linéaires», Mémoire Magister, Université Constantine 1, 2014.
- [34] Saidi Zoubeyda, «Commande Floue Adaptative appliqué à un moteur Synchrone à aimant permanent», Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf du M'sila, 2020.
- [35] M. T. Cao, «Commande Numérique de Machines Asynchrones par Logique Floue», Thèse de Philosophiae Doctor, Université de Laval, Québec, Canada, 1997.

Bibliographie

- [36] Kichene Youcef, Zaouali Bouchra, «Commande intelligente floue d'une machine asynchrone double étoile», Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2020.
- [37] Belkacemi Othman, Djebali Abderrahmane, «Etude de la stabilité aux petites perturbations dans grands réseaux électriques par méthodes métaheuristiques», Mémoire de Master, 2017.
- [38] M.A. Ben Brahim et A. Abdelkarim, «Etude d'un régulateur *PID* à action intégrale floue de systèmes Dynamiques», LA.R.A Automatique, Université Tunis El Manar Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis, Article. 2015.
- [39] Fridjat Hocine et Gherbi Ilies et Hachefa Mokhtar, «Performance de système électro-énergétique par différentes techniques avancées», Mémoire de Master, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2021.
- [40] Gilbert Sybille (Hydro-Quebec), « The use of phasor solution for transient stability analysis of multi-machine systemes », Simulink, help, 2018.

Annexe A : Les Equations mathématiques pour un système linéaire

Comme nous l'avons vu précédemment, le point de fonctionnement normal du système se définit comme un point d'équilibre ou une condition initiale. Les dérivées des variables d'état en ce point sont donc égales à zéro.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x_0, u_0) \\ \dot{x}_0 &= f(x_0, u_0) = 0\end{aligned}\tag{A.1}$$

Où: \dot{x}_0 est le vecteur des variables d'état correspondantes au point d'équilibre. u_0 est le vecteur d'entrée correspondant au point d'équilibre.

Si une petite perturbation se superpose aux valeurs d'équilibre, l'équation (A.1) s'écrit :

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta\dot{x} = f(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u)\tag{A.2}$$

Puisque ces perturbations sont petites, l'équation (A.2) peut être développée en série de Taylor limitée aux termes de premier ordre.

Alors, nous obtenons pour chaque variable d'état :

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{i0} + \Delta\dot{x}_i = f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \cdot \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \cdot \Delta u_r\tag{A.3}$$

Avec : $i = 1, 2, \dots, n$.

Etant donné que, $\dot{x}_{i0} = f_i(x_0, u_0 = 0)$, l'équation précédente peut être mise sous la forme suivante :

$$\Delta\dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \cdot \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \cdot \Delta u_r\tag{A.4}$$

Nous pouvons appliquer les mêmes étapes de linéarisation sur l'équation de la sortie :

$y = g(x, u)$:

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \cdot \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \cdot \Delta u_r\tag{A.5}$$

Avec : $j = 1, 2, \dots, m$.

ANNEXES

Si le système fonctionne avec de petites perturbations au voisinage du point d'équilibre, nous pouvons supposer que toutes les dérivées premières ($\frac{\partial f_i}{\partial x_i}, \dots$) sont constantes dans le domaine de fonctionnement.

Par conséquent, le système linéarisé peut être représenté par les deux équations suivantes:

$$\Delta \dot{x}_i = a_{i1} \cdot \Delta x_1 + \dots + a_{in} \cdot \Delta x_n + b_{i1} \cdot \Delta u_1 + \dots + b_{ir} \cdot \Delta u_r \quad , i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.6})$$

$$\Delta \dot{x}_j = c_{j1} \cdot \Delta x_1 + \dots + c_{jn} \cdot \Delta x_n + d_{j1} \cdot \Delta u_1 + \dots + d_{jr} \cdot \Delta u_r \quad , j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{A.7})$$

Annexe B : Paramètres des différents éléments de système

Tableau B.1 : Paramètres des générateurs

Paramètres	<i>G1</i>	<i>G2</i>
Puissance active <i>P</i> (W)	9.5e+008	/
<i>Q</i> min VAR	-INF	/
<i>Q</i> max VAR	+ INF	/
Puissance nominale	1000E6	5000E6
Tension composée	13800	13800
Fréquence	60	60
Résistivité du Stator	2.8544e-3	2.8544e-3
Coefficient d'inertie <i>H(S)</i>	3.7	3.7
Facteur de frottement <i>F</i> (<i>PU</i>)	0	0
Nombre de paires de pôles	32	32
<i>dω</i> (%)	0	0
th(deg)	-16.6861	-69.7487
<i>i_a</i> (pu)	0.950218	0.812764
<i>i_b</i> (pu)	0.950218	0.812764

ANNEXES

$i_c(\text{pu})$	0.950218	0.812764
$\text{ph}_a \text{ (deg)}$	48.1093	-5.44703
$\text{ph}_b \text{ (deg)}$	-71.8907	-125.447
$\text{ph}_c \text{ (deg)}$	168.109	114.553
$V_f(\text{pu})$	1.44424	1.40021
Réactance $X_d \text{ (}\Omega\text{)}$	1.305	1.305
Réactance $X_{d'} \text{ (}\Omega\text{)}$	0.296	0.296
Réactance $X_{d''} \text{ (}\Omega\text{)}$	0.252	0.252
Réactance $X_q \text{ (}\Omega\text{)}$	0.474	0.474
Réactance $X_{q''} \text{ (}\Omega\text{)}$	0.243	0.243
Réactance $X_L \text{ (}\Omega\text{)}$	0.18	0.18

Tableau B.2 : Paramètres des transformateurs

Paramètres	<i>T1</i>	<i>T2</i>
Puissance Nominale $P_n(\text{VA})$	1000e6	5000e6
Fréquence Nominale $f_n(\text{Hz})$	60	60
$V_1 \text{ Ph-Ph}(V_{rms})$	13.8e3	13.8e3
$R_1(\text{pu})$	0.002	0.002
$L_1(\text{pu})$	0.0	0.0
$V_2 \text{ Ph-Ph}(V_{rms})$	500e3	500e3
$R_2(\text{pu})$	0.002	0.002
$L_2(\text{pu})$	0.12	0.12
Résistance de magnétisation $R_m \text{ (pu)}$	500	500
Inductance de magnétisation $L_m \text{ (pu)}$	500	500

ANNEXES

Couplage	<i>YG</i>	<i>YG</i>
----------	-----------	-----------

Tableau B.3: Paramètres des lignes

Paramètres	<i>L1</i>	<i>L2</i>
Nombre de phases [<i>N</i>]	3	3
Fréquence utilisée pour la spécification rlc (<i>Hz</i>)	60	60
Resistance par unité longueur (<i>Ohms/km</i>) [Matrice $N \times N$] or [r_1 r_0 r_{0m}]	[0.01755 0.2758]	[0.01755 0.2758]
Inductance par unité longueur (<i>H/km</i>) [Matrice $N \times N$] or [l_1 l_0 l_{0m}]	[0.8737e-3 3.220e-3]	[0.01755 0.2758]
Capacitance par unité longueur (<i>F/km</i>) [Matrice $N \times N$] or [c_1 c_0 c_{0m}]	[13.33e-9 8.297e-9]	[0.01755 0.2758]
longueur de ligne (<i>km</i>)	350	350

Paramètres de la charge :

Tension composée nominale V_n (V_{rms}) 500e3 V

Fréquence nominale f_n (*Hz*) 60

Puissance active P (*W*) 5e+009