

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie
Département : Électrotechnique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème :

Comparaison des contrôleurs intelligents d'un AVR.

Présentée par : *Gouasmia Khadidja*
Djendli Bariza

Encadrant : Benalia Nadia

Grade MCA

Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

| | | | |
|----------------|-----|---------------------------------|-----------|
| MELLOUKI HAMZA | MAB | Université Badji Mokhtar Annaba | Président |
| BENALIA NADIA | MCA | Université Badji Mokhtar Annaba | Encadrant |
| MESBAH TAREK | Pr | Université Badji Mokhtar Annaba | Examineur |

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Nous remercions, en premier lieu, ﷻ le tout puissant de nous avoir donné la volonté et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

*Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à notre Encadreur **Dr. BENALIA Nadia** pour le temps qu'elle nous a consacré et l'aide que nous a apportée malgré ses occupations, son encadrement et ses précieux conseils durant toute cette période qui nous ont offert la possibilité de réaliser ce travail, et qui nous ont permis d'élargir notre spectre de connaissances scientifiques.*

*Nous tenons à remercier professeur. **MESBAH Tarek** d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.*

*Nous présentons également notre profonde reconnaissance à **Dr. MELLOUKI Hamza** qui a accepté d'examiner notre travail.*

Nous adressons nos chaleureux remerciements à l'ensemble des enseignants du département de Génie Electrique qui ont contribué à notre formation.

Finalement, nous remercions l'ensemble de nos amis et collègues d'étude pour leurs soutiens, encouragements et les bons temps passés ensemble tout au long de notre cursus.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À nos chers parents qui n'ont cessé de m'aider et de m'encourager tout au long de mon parcours et qui m'ont permis d'être celle que je suis aujourd'hui,

*À ma sœur **Merime** qui m'a soutenu et encourage tout au long de ce période.*

*À mes amis et mes collègues {**Djihane** et **Ikram**}.*

*Et un merci spéciale à **Mr Antar**, qui a toujours pris soin de moi, m'a aidé, m'a encouragé et a toujours été à mes côtés.*

Gouasmia Khadidja

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse
exprimer mes sincères sentiments,*

*Pour leur patience illimitée, leur encouragement
continu, leur aide, en témoignage de mon profond
amour et respect pour leurs grands sacrifices,*

*À mes frères «**Haïtem et Achref et Dia eddine** ».*

*Et un merci spéciale à **Mr ADEL**, qui a toujours pris
soin de moi, m'a aidé, m'a encouragé et a toujours
été à mes côtés.*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
pour que ce travail soit Possible, je vous dis merci.*

Djendli Bariza

Sommaire

| | |
|------------------------------|--|
| <i>Remerciement</i> | |
| <i>Dédicace</i> | |
| <i>Liste des figures</i> | |
| <i>Liste des tableaux</i> | |
| <i>Résumé</i> | |
| <i>Introduction Générale</i> | |

Chapitre I : Machine Synchrone et AVR

| | |
|---|----|
| I.1 Introduction | 1 |
| I.2. Génératrices synchrones | 1 |
| I.3 Quelques applications des générateurs synchrones | 2 |
| I.4 Principe de fonctionnement | 2 |
| I.4.1 Fonctionnement en alternateur..... | 3 |
| I.4.2 Fonctionnement en moteur..... | 4 |
| I.5 Structure générateur de machine synchrone..... | 4 |
| I.6 Système AVR (Automatic Voltage Regulator)..... | 6 |
| I.6.1 Définition du système..... | 6 |
| I.6.2 Modèle du système AVR..... | 6 |
| I.6.3 Schéma fonctionnel de l'AVR | 7 |
| I.6.4 Principe de fonctionnement de l'AVR | 8 |
| I.7 Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone..... | 9 |
| I.8 Conclusion | 10 |

Chapitre II : Le Régulateur PID

| | |
|--------------------------------|----|
| II.1. Introduction..... | 11 |
| II.2 Notion de système..... | 11 |
| II.3 Les Contrôleurs PID | 12 |
| II.3.1 Définition | 12 |

| | | |
|--------|--|----|
| II.3.2 | Types de contrôleurs PID..... | 12 |
| II.3.3 | Correcteur proportionnel - intégrale – dérivée | 13 |
| II.4 | Les différentes structures d'un régulateur PID | 14 |
| II.4.1 | La structure série | 14 |
| II.4.2 | La structure parallèle | 15 |
| II.4.3 | La structure mixte..... | 15 |
| II.5 | Régulateurs PID | 15 |
| II.5.1 | Les actions PID..... | 15 |
| II.5.2 | Loi de commande du régulateur PID | 17 |
| II.6 | Conclusion | 18 |

Chapitre III : Les méthodes méta-heuristiques

| | | |
|-----------|---|----|
| III.1 | Introduction..... | 19 |
| III.2 | La logique floue (FLC) | 19 |
| III.2.1 | Définitions | 19 |
| III.2.2 | Concept de la logique floue | 20 |
| III.2.3 | Principe fondamental de la logique floue | 20 |
| III.2.4 | Structure d'un système flou..... | 20 |
| III.2.4.1 | La fuzzification | 21 |
| III.2.4.2 | Base de connaissance..... | 21 |
| III.2.4.3 | Mécanisme d'inférence | 22 |
| III.2.4.4 | La défuzzification | 22 |
| III.2.5 | Intérêt de la logique floue..... | 22 |
| III.2.6 | Régulation par la logique floue | 23 |
| III.3 | Les réseaux de neurones artificiels (ANN) | 24 |
| III.3.1 | Définition..... | 24 |
| III.3.2 | Fonctionnement..... | 24 |
| III.3.3 | Modèle Biologique..... | 25 |

| | |
|--|----|
| III.3.4. Neurone formel | 26 |
| III.3.5 Modélisation d'un RNA..... | 26 |
| III.4 Le système prédictif neuro-flous..... | 27 |
| III.4.1 Système ANFIS (Adaptative Neural Fuzzy Inference System) | 28 |
| III.4.2 Le Modèle ANFIS..... | 28 |
| III.4.2.1. Architecture de l'ANFIS | 28 |
| III.4.2.2 Fusion de données par ANFIS | 29 |
| IV.5 Conclusion | 30 |

Chapitre IV : Simulation et Résultats

| | |
|--|------------|
| IV.1. Introduction | 32 |
| IV.2 Problématique..... | 32 |
| IV.3 Modèle du régulateur de la tension AVV | 32 |
| IV.4 Résultats de simulation | 33 |
| IV.4.2 contrôle de tension avec AVR et régulateur PID | 34 |
| IV.4.3 contrôle de tension avec AVR et régulateur intelligent FLC | 36 |
| IV.4.4 contrôle de tension avec AVR et régulateur intelligent ANN..... | 40 |
| IV.4.5 contrôle de tension avec AVR et régulateur intelligent ANFIS..... | 42 |
| IV.5 Comparaison..... | 43 |
| IV.5.1 Comparaison Entre des variations du gain de l'amplificateur | 44 |
| IV.5.2 Comparaison Entre des variations du gain de l'excitateur | 45 |
| IV.5.3 Comparaison Entre des variations du gain de le généraeur..... | 45 |
| IV.5.4 Comparaison Entre des variations du gain de le capteur..... | 46 |
| IV.6 | Conclusion |
| 46..... | |

Conclusion Générale

Références Bibliographiques

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 Un générateur General Electric [Wikipédia]..... | 2 |
| Figure I.2. Caractéristique interne..... | 4 |
| Figure I.3 Représentation d’une machine synchrone bipolaire à aimants permanents | 5 |
| Figure I.4 Représentation simplifié d’une machine synchrone | 6 |
| Figure I.5 Principe de fonctionnement du système AVR. | 7 |
| Figure I.6 Schéma fonctionnel du système AVR. | 8 |
| Figure I.7 Régulation de la tension de sortie de la génératrice..... | 10 |
| Figure I.8 Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique..... | 10 |
| Figure I.9 Schéma de régulation de tension simplifié..... | 10 |
| Figure II.1 Modèle général d’un système..... | 11 |
| Figure II.2 Asservissement par un régulateur PI..... | 12 |
| Figure II.3 La Commande PID..... | 13 |
| Figure II.4 La structure série | 15 |
| Figure II.5 La structure parallèle..... | 15 |
| Figure II.6 La structure mixte..... | 15 |
| Figure II.7 Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique..... | 18 |
| Figure III.1 Exemple de fonction d’appartenance [24] | 20 |
| Figure III.2 (a) : Schéma synoptique d’un contrôleur (b) : configuration d’un..... | 21 |
| Contrôleur flou [25]. | 21 |
| Figure III. 3 Configuration interne d’un régulateur par la logique floue | 24 |
| Figure III.4 Modèle général d’un neurone | 25 |
| FigureIII.5 le neurone biologique | 26 |
| Figure III.6 neurone formel..... | 26 |
| Figure III.7 Correspondance neurone biologique et neurone artificiel | 27 |
| Figure III.8 L’architecteur de l’ANFIS [33]. | 29 |
| Figure III.9 Le bloc d’apprentissage..... | 30 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.1. Schéma fonctionnel du système AVR. | 33 |
| Figure .IV.2. La tension de sortie du système AVR sans régulateur. | 34 |
| Figure IV.3. Schéma fonctionnel du système AVR avec le régulateur PID | 34 |
| Figure IV.4. Fenêtre du régulateur PID | 34 |
| Figure IV.5 Réponse La tension du système AVR avec régulateur PID | 35 |
| Figure IV.6 : Schéma du régulateur de Mamdani sous Matlab/Simulink (FIC). | 36 |
| Figure IV.7. Fonctions d'appartenances de l'erreur..... | 37 |
| Figure IV.8. Fonctions d'appartenances de la commande de sortie..... | 37 |
| Figure IV.9. Tableau des règles de la logique floue sous Matlab/Simulink. | 38 |
| Figure IV.10. Schéma bloc du système AVR avec régulateur FLC. | 38 |
| Figure IV.11. La tension du système AVR avec régulateur FLC. | 39 |
| Figure IV.12. Partie script de la méthode ANN | 39 |
| Figure IV.13. Schéma bloc contrôleur ANN | 40 |
| Figure IV.14. Schéma bloc du système AVR avec régulateur ANN | 40 |
| Figure IV.15. La tension de l'AVR avec régulateur ANN | 41 |
| Figure IV.16. Schéma bloc du système AVR avec régulateur ANFIS | 41 |
| Figure IV.17 la fenêtre la structure ANFIS | 42 |
| Figure IV.18. La tension de l'AVR avec régulateur ANFIS | 42 |
| Figure IV.19 Comparaison des tensions de l'AVR avec (PID, FLC, ANN et ANFIS)..... | 43 |
| Figure IV.20 effet des variations du gain de l'amplificateur..... | 44 |
| Figure IV.21 effet des variations du gain de l'excitateur. | 44 |
| Figure IV.22 effet des variations du gain de le générateur..... | 45 |
| Figure IV.23 effet des variations du gain de le capteur. | 45 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau II.2 : Principaux composants du système AVR | 8 |
| Tableau II.1 : Résume les avantages et les limitations des actions de base des régulateurs PID | 16 |
| Tableau II.2 : Tableaud'influence des coefficients P, I et D | 17 |
| Tableau III.1 : Analogie entre le neurone biologique et le neurone artificiel..... | 27 |
| Tableau III.2 : Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurone..... | 28 |

Résumé :

L'objectif du mémoire est l'optimisation d'un système de régulation de tension (AVR) Cette étude a été introduite par une présentation de quelques généralités sur les génératrices synchrones. Une explication du principe de fonctionnement de l'AVR et tous ces principaux blocs pour la régulations de la tension. Ensuite, nous présentons le régulateur PID. Dans la troisième partie de ce travail ;on a appliqué les méthodes méta-heuristiques de l'intelligence artificielle : la logique floue FLC, Les réseaux de neurones ANN et Le neuro flou ANFIS. Enfin, nous présentons une analyse des résultats.

Mots clés : régulation de tension AVR, régulateur PID, méta-heuristiques, l'intelligence artificielle, La logique floue FLC, Les réseaux de neurones ANN, Le neuro flou ANFIS.

Introduction Générale

Les machines électriques sont utilisées dans un très grand nombre de procédés industriels notamment la fabrication, la traction électrique et la génération d'énergie. En fonction de ces applications, la machine synchrone peut s'avérer la plus adaptée surtout en matière de génération et de production d'énergie électrique, qui doit être stable en tension et répondre à un cahier des charges prédéfini.

Or, La tension électrique est d'abord affectée par des variations lentes et générales liées aux cycles d'évolution saisonnière, hebdomadaire et quotidienne de la consommation ; elle subit aussi des variations rapides liées à de multiples aléas : fluctuations aléatoires des charges, changements de topologie du réseau, déclenchements d'ouvrages de transport ou de groupes de production.

Il est donc nécessaire, pour que la tension soit maintenue dans la plage souhaitée. Dans les centrales, ce réglage est obtenu automatiquement à l'aide de régulateur de tension.

Le but de notre travail est d'étudier la régulation de tension d'une génératrice synchrone et d'optimiser les paramètres du régulateur PID à l'aide des méthodes méta-heuristiques de l'intelligence artificielle, et pour bien traiter le problème, nous avons opté pour la structure suivante de notre mémoire :

Le premier chapitre vise la familiarisation avec la machine synchrone. Nous présenterons le principe de fonctionnement du régulateur de la tension l'AVR.

Dans le deuxième chapitre nous étudions les types de contrôleurs PID et structures d'un régulateur PID.

Dans le troisième chapitre, on a présenté les méthodes méta-heuristiques de l'intelligence artificielle.

Le dernier chapitre est consacré à l'optimisation des paramètres du régulateur PID à l'aide de la méthode méta-heuristique La logique floue FLC, Les réseaux de neurones ANN et Le neuro flou ANFIS en utilisant le logiciel MATLAB. Une conclusion générale qui synthétise le travail et présente les résultats obtenus.

Chapitre I

Machine

Synchrone Et AVR

I.1 Introduction :

La machine synchrone est l'un des types des machines électriques les plus couramment utilisés dans les applications industrielles, notamment pour la production d'énergie électrique à grande échelle.

Cette machine peut fonctionner en tant que générateur ou en tant que moteur, utilisant l'énergie électrique pour générer un champ magnétique qui entraîne le mouvement des composants rotatifs.

Dans ce chapitre et dans un premier temps, nous introduisons notre travail par une présentation de quelques généralités sur les génératrices synchrones [1]. Dans un deuxième temps, nous présenterons les régulateurs de la tension AVR.

I.2. Génératrices synchrones :

Les génératrices synchrones sont les principaux générateurs de l'énergie électrique que nous consommons. Ces machines constituent les plus gros convertisseurs électromécaniques au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique dans une gamme de puissance très importante. La génératrice synchrone est une machine composée principalement de deux parties, à savoir un inducteur généralement au rotor et d'un induit au stator. Le bobinage inducteur, grâce à une alimentation appropriée, permet de générer un champ électromagnétique ayant pour conséquence d'induire dans le bobinage induit, une tension triphasée récupérable via les bornes de la machine. Plusieurs technologies d'alimentation de cet inducteur ont été développées depuis plusieurs années afin d'améliorer les performances des machines et le choix de l'une ou de l'autre des technologies dépend généralement de l'application que l'on souhaite faire des machines et surtout des contraintes de fonctionnement de ces dernières. La particularité de la génératrice synchrone, comme son nom l'indique, est de produire des tensions de sortie dont la fréquence est rigoureusement liée à celle du champ tournant (champ inducteur). Ainsi, il devient aisé de fixer cette fréquence grâce à une régulation adéquate de la vitesse de rotation de l'arbre d'entraînement de la génératrice [2].

Les génératrices synchrones peuvent être à pôles saillants ou à pôles lisses. Le nombre de pôles est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Dans les centrales électriques thermiques (nucléaires ou classiques), une turbine à vapeur ou une turbine à gaz tourne à grande vitesse à 3000 ou 1500 tr/min sur les réseaux à 50 Hz. Par conséquent, les alternateurs qu'elles entraînent comportent 2 ou 4 pôles. Dans les centrales

hydrauliques, les turbines tournent plus lentement. Comme les alternateurs sont raccordés directement aux turbines, on doit placer un grand nombre de pôles sur le rotor. Les alternateurs à basse vitesse ont donc toujours un grand diamètre, de façon à laisser l'espace nécessaire pour loger le nombre de pôles requis. Les alternateurs sont encore utilisés en tant que générateur d'énergie électrique autonome (groupes électrogènes). La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne un alternateur. Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes. Les grands groupes électrogènes utilisent généralement un moteur Diesel à faible vitesse de rotation. Dans ce cas, le rotor de l'alternateur ressemble beaucoup à celui d'un alternateur hydraulique, avec un nombre élevé de pôles, un grand diamètre et un grand moment d'inertie absorbant les variations de vitesse de rotation de l'arbre du moteur Diesel [3].

I.3 Quelques applications des générateurs synchrones :

Parmi les applications des alternateurs à charge séparée (sans couplage au réseau) on cite : les zones non couplées à un réseau d'énergie (îles, déserts, sites, etc.) ; les applications « secours ». (hôpitaux, industries, aéroports, centres informatiques, etc.) ; Les applications embarquées (navires, avions, véhicules électriques et hybrides, etc.).



Figure I.1 Un générateur General Electric [Wikipédia].

I.4 Principe de fonctionnement :

La machine synchrone est réversible, elle peut fonctionner en mode alternateur ou bien comme un moteur.

I.4.1 Fonctionnement en alternateur :

Le rotor est entraîné par une turbine ou un moteur diesel à la vitesse n . L'enroulement inducteur qu'il transporte est véhiculé par un courant continu (appelé courant d'excitation), qui produit une tension magnétique tournante dans l'entrefer à une fréquence de rotation n . Le champ magnétique tournant qui en résulte induit un système de force électromotrice triphasée équilibré dans les enroulements du stator avec une fréquence de : pour les machines à contre-pôles P :

$$f_s = P \cdot n \quad \text{[I.1]}$$

La vitesse de synchronisation, également appelée vitesse de rotation Ω_s , est identique pour le rotor et le champ tournant. Les forces électromotrices à vide ont une amplitude directement proportionnelle au flux utile par pôle Φ , à la fréquence (ou fréquence de rotation n) et au nombre de conducteurs actifs N dans une phase.

$$E_v = K \cdot N \cdot f \cdot \Phi \quad \text{[I.2]}$$

Le coefficient K , appelé constante K , reste inchangé pour un alternateur spécifique. Cependant, la relation entre le flux et le courant d'excitation est non linéaire en raison de la saturation du circuit magnétique. La caractéristique interne de la machine est représentée par une courbe qui représente la valeur efficace E_s des forces électromotrices à vide en relation avec l'intensité i_f du courant d'excitation. Il est important de noter que cette caractéristique n'est linéaire que dans une plage restreinte. Le phénomène de réaction d'induit se produit lorsque l'alternateur est sous charge, provoquant la circulation des courants dans l'induit et créant une tension magnétique entrefer rotatif. La tension magnétique tournante d'entrefer créée par l'induit et celle créée par l'inducteur. Il faut alors décomposer la réaction magnétique d'induit en une composante longitudinale et une composante transversale.

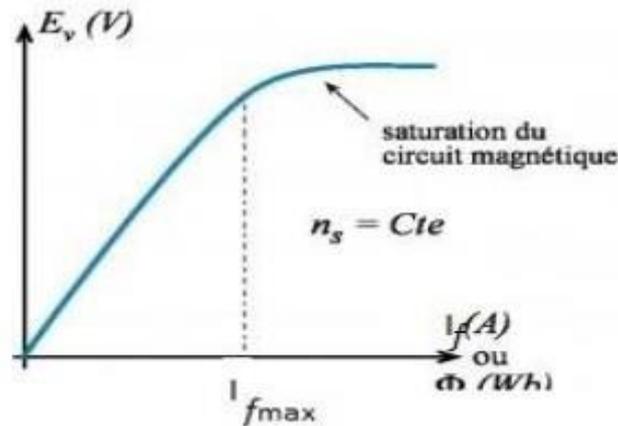


Figure I.2. Caractéristique interne

I.4.2 Fonctionnement en moteur :

L'enroulement statorique, parcouru par un système triphasé équilibré de courants de pulsation ω_s , crée une tension magnétique tournante d'entrefer à la vitesse synchrone Ω_s , soit avec P paires de pôles :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} \quad [I.3]$$

Le rotor d'un moteur synchrone reste immobile par rapport au champ magnétique généré par le bobinage de champ ou les aimants. Cette interaction entre le champ tournant et le champ fixe du rotor se traduit par un couple de moment moyen nul. Contrairement aux autres moteurs, le moteur synchrone ne démarre pas tout seul. Cependant, si le rotor est entraîné à vitesse synchrone, l'interaction entre les champs tournants du stator et du rotor génère un couple de moment moyen non nul. La vitesse d'un moteur synchrone est déterminée par la fréquence de son alimentation et reste indépendante de la charge mécanique qu'il supporte [1].

I.5 Structure générateur de machine synchrone :

La machine que nous allons étudier par la mise en équations correspond à la structure représentée par la figure I.3. C'est une machine synchrone triphasée, équilibrée dont le rotor est muni d'un système d'aimants permanents, assurant une répartition d'induction sinusoïdale dans l'entrefer. Ce rotor ne comporte ni amortisseurs, ni pièces polaires. L'absence de pièces polaires donne à la machine la structure d'une machine à pôles lisses. Le stator comporte trois axes a, b, c identiques et décalées entre eux d'un angle électrique de $2\pi/3$. [4]

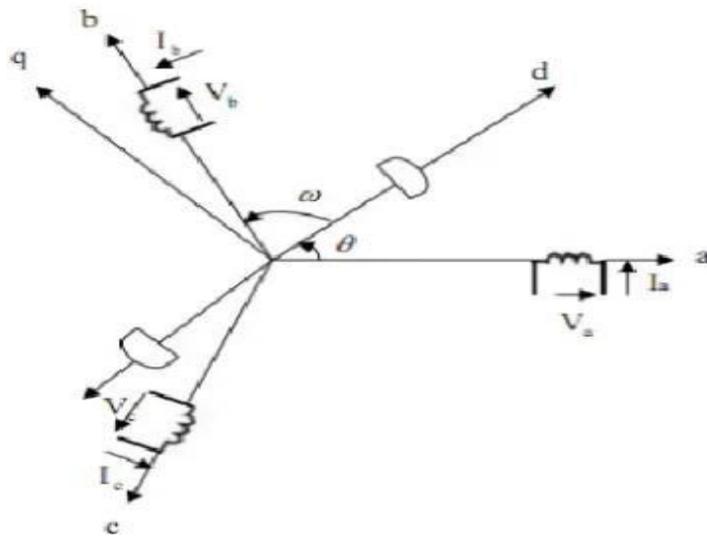


Figure I.3 Représentation d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents.

La modélisation des machines électrique en vue de leur commande exige la prise en compte de certaines hypothèses simplificatrices, et se base sur 3 types d'équations :

La f.é.m. de la machine synchrone est donnée par la relation suivante : [5]

$$\mathbf{E} = \mathbf{V}_s + \mathbf{r} \cdot \mathbf{I}_s + \mathbf{j} \mathbf{X}_d \cdot \mathbf{I}_s \quad [\text{I.4}]$$

\mathbf{E} : F.é.m. transitoire de la machine synchrone.

\mathbf{V}_s : Tension aux bornes de la machine.

\mathbf{I}_s : Courant de la machine.

\mathbf{r}_a : Résistances statorique de la machine.

\mathbf{X}_d : Réactances transitoire de la machine.

La représentation de la machine synchrone utilisée pour la solution du réseau et le diagramme de phase sont schématisés dans la figure suivante :

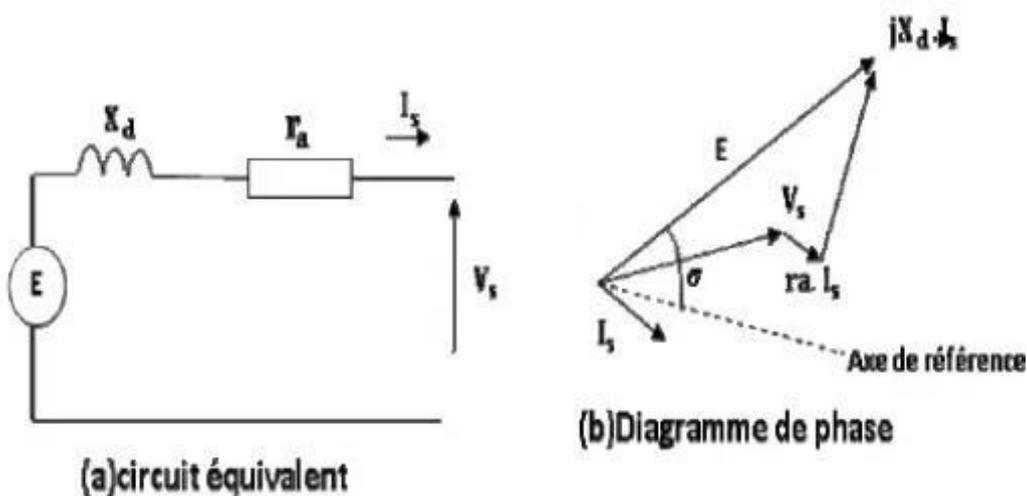


Figure I.4 Représentation simplifié d'une machine synchrone.

I.6 Système AVR (Automatic Voltage Regulator) :

I.6.1 Définition du système :

La stabilité et la constance du niveau de tension nominale dans un réseau de l'énergie électrique sont les principaux problèmes dans la commande du système d'alimentation électrique, puisque tous les équipements connectés à ce réseau électrique sont conçu pour un certain niveau de tension appelée tension nominale. Si la tension de fonctionnement est différente de la tension nominale, les performances des équipements électriques seront affectées et leur espérance de vie diminue. De plus, l'autre raison importante pour contrôler la valeur nominale de tension est la perte de ligne réelle. Il est possible de minimiser les pertes de ligne réelles en contrôlant le niveau de tension nominale.

Pour résoudre ces problèmes de commande, un système de régulation automatique de tension (AVR) est appliqué aux unités de production d'énergie [6].

Malgré le potentiel des techniques de commande moderne, le correcteur PID classique est encore largement utilisé dans la commande du système AVR parce qu'il offre une performance robuste pour une large gamme de conditions de fonctionnement et une implémentation facile. Différentes approches de réglage du correcteur PID du système AVR ont été proposées dans la littérature. Dans les dernières décennies, les techniques d'optimisation telles que les réseaux de neurones, la logique floue, les algorithmes génétiques (GA), les algorithmes d'optimisation par essaims particulaires (PSO) ainsi que les algorithmes d'optimisation par colonie d'abeilles (BCO) et colonie de fourmis (ACO) ont été largement utilisées dans le réglage des paramètres du correcteur PID du système AVR [7]-[8].

I.6.2 Modèle du système AVR :

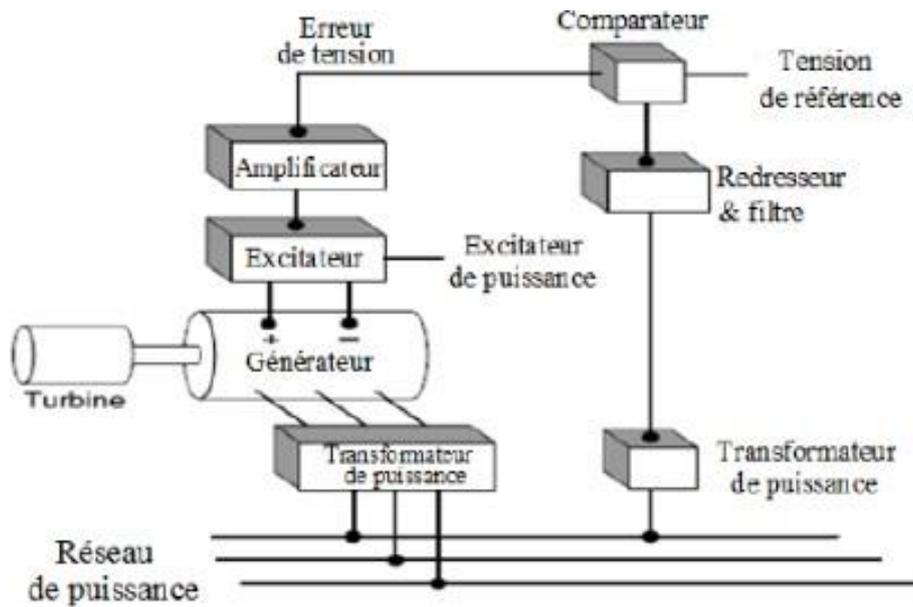


Figure I.5 Principe de fonctionnement du système AVR.

La boucle du système AVR fournit la constance et la stabilité de la tension de sortie dans un système d'alimentation électrique. Le système AVR est représenté dans la figure I.5.

La variation de charges dans le réseau électrique peut provoquer des oscillations de la force électromotrice d'un générateur électrique. En effet, le système AVR est un dispositif qui peut réguler automatiquement la tension d'excitation du générateur dans le réseau électrique afin qu'il puisse garantir une stabilité et une constance du niveau de tension du régime nominale du réseau de l'énergie électrique.

La tension de sortie du générateur vers le réseau électrique est continuellement surveillée par un capteur de niveau de tension. Cette dernière est rectifiée et lissée afin d'être comparée au signal de référence DC. L'erreur entre les tensions DC de référence et du réseau électrique obtenue à la sortie du comparateur est amplifiée pour générer la tension d'excitation adéquate du générateur pour son bon fonctionnement.

I.6.3 Schéma fonctionnel de l'AVR :

Le système AVR comprend quatre composantes : l'amplificateur, l'excitateur, le générateur et le capteur. Le schéma fonctionnel du modèle du système AVR avec les fonctions de transfert de ses différentes composantes est donné dans la figure (I.6).

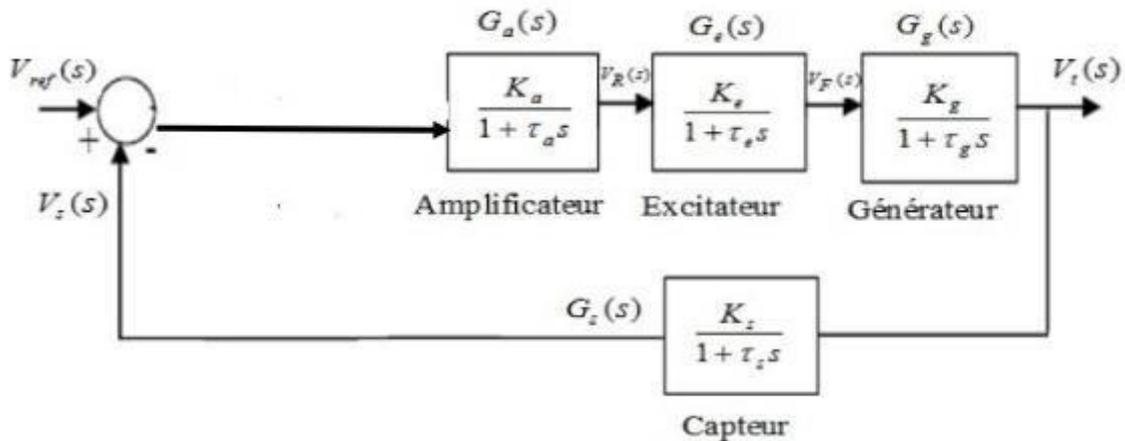


Figure I.6 Schéma fonctionnel du système AVR.

Les fonctions de transfert des composantes du modèle du système AVR ainsi que les limites des valeurs numériques de leurs paramètres sont données par le tableau suivant :

| Composant | Fonction de transfert | Plages de variation du gain | Plages de variations du temps | Valeurs nominales des Gains et des constantes du temps |
|---------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|
| Amplificateur | $\frac{K_a}{1 + T_a p}$ | $10 \leq K_a \leq 40$ | $0.02 \leq T_a \leq 0.1$ | $K_a = 10$ $T_a = 0.1$ |
| Excitateur | $\frac{K_e}{1 + T_e p}$ | $1 \leq K_e \leq 10$ | $0.4 \leq T_e \leq 1$ | $K_e = 1$ $T_e = 0.4$ |
| Générateur | $\frac{K_g}{1 + T_g p}$ | $0.7 \leq K_g \leq 1$ | $1 \leq T_g \leq 2$ | $K_g = 1$ $T_g = 1$ |
| Capteur | $\frac{K_s}{1 + T_s p}$ | $0.7 \leq K_s \leq 1$ | $0.001 \leq T_s \leq 0.06$ | $K_s = 1$ $T_s = 0.01$ |

Tableau I.1 Principaux composants du système AVR.

I.6.4 Principe de fonctionnement de l'AVR :

Initialement, le régulateur surveille la tension de sortie et ajuste la tension d'entrée de l'excitatrice de l'alternateur. En modulant la tension de commande du générateur, la tension de sortie du générateur s'ajuste en conséquence. Le régulateur effectue des calculs multiples par

La tension de sortie corrigée est donnée par :

$$V_c(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad [\text{I.5}]$$

Tel que $e(t)$ représente l'écart, K_p le gain proportionnel, T_I la constante intégrale de temps et T_D la constante dérivée du temps.

La fonction de transfert du correcteur PID s'écrit alors comme suit :

$$G_{PID}(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] \quad [\text{I.6}]$$

- Synthèse des paramètres des correcteurs :

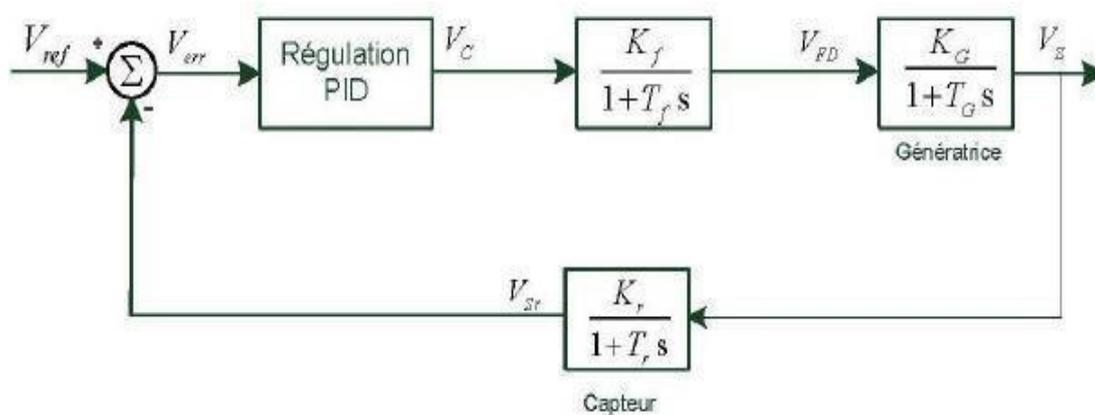


Figure I.9 Schéma de régulation de tension simplifié.

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu les généralités sur les machines synchrones, principe de fonctionnement et sa constitution, un régulateur de tension automatique (AVR) est utilisé pour ajuster et contrôler la tension de sortie afin de la maintenir constante, indépendamment des variations de charge ou de vitesse de rotation. Ce système assure la stabilité de la tension électrique produite par la machine synchrone, garantissant ainsi la stabilité du système électrique dans son ensemble.

Chapitre II

Le Régulateur

PID

II.1. Introduction :

Le terme "régulation" est utilisé pour désigner le processus de lutte contre les perturbations afin de maintenir une valeur constante, comme la température, la pression, le débit ou l'hygrométrie, par exemple.

Ce processus implique la mesure continue du système à réguler par des capteurs, puis la transmission de ces données au régulateur. Ce dernier compare la mesure à la valeur souhaitée (la consigne) et, en fonction de son algorithme, envoie des commandes aux actionneurs (vannes, volets, moteurs, etc.) pour corriger les erreurs et ramener la sortie du système vers la consigne.

Dans le domaine industriel, les régulateurs PID répondent à plus de 90 % de ces besoins. Par exemple, les usines industrielles installent des milliers de régulateurs.

II.2 Notion de système :

Un système peut être défini comme un ensemble d'éléments exerçant collectivement une fonction déterminée. Un système communique avec l'extérieur par l'intermédiaire de grandeurs, fonctions du temps, appelées signaux.

Un système peut être représenté schématiquement de la manière suivante (figure II.1) :



Figure II.1 Modèle général d'un système.

Où $e(t)$ est un ou plusieurs signaux d'entrée (excitation, cause ou sollicitation) et $s(t)$ est un ou plusieurs signaux de sortie (ou réponses), t étant la variable temps. En général, ces signaux (d'entrée et de sortie) ne sont pas de même nature.

Les grandeurs d'entrée sont les grandeurs qui agissent sur le système. Il en existe deux types :

- Commandes : Celles que l'on peut maîtriser.
- Perturbations : Celles que l'on ne peut pas maîtriser.

Les signaux de sortie d'un système sont aussi appelés réponses du système. Pour observer les grandeurs de sortie, on utilise des capteurs. Les informations issues de ces capteurs va permettre d'élaborer la commande du système [13].

II.3 Les Contrôleurs PID :

II.3.1 Définition :

Le Contrôleur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) est un système de régulation en boucle fermée qui calcule la commande en fonction de l'écart entre la consigne et la sortie [14]. Son objectif est d'assurer que la réponse du système présente des caractéristiques dynamiques et stationnaires appropriées [15].

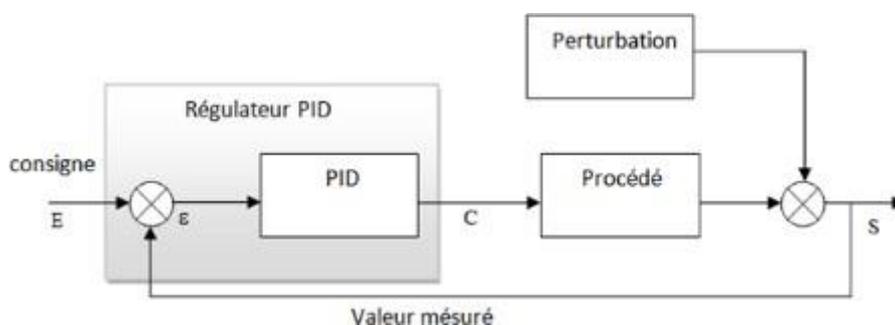


Figure.II.2 Asservissement par un régulateur PID.

On peut juger le contrôleur selon les critères suivants :

- ❖ Le contrôleur doit être capable de maintenir la variable commandée à sa consigne.
- ❖ Le système en boucle fermée doit être asymptotiquement stable.
- ❖ L'influence des perturbations doit être minimale.
- ❖ Les réponses à des variations de consigne doivent être rapides et douces.
- ❖ Une action de commande excessive doit être évitée.
- ❖ Le système de commande doit être robuste : il doit être insensible aux variations du procédé et aux erreurs du modèle du procédé.

II.3.2 Types de contrôleurs PID [16] :

Les régulateurs standards les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de la famille PID (proportionnel, intégral, dérivé), car ils permettent de régler à l'aide de ses paramètres les performances (précision, rapidité, dépassement...) du système commandé.

L'adaptation d'un régulateur PID aux différents systèmes s'effectue par le réglage de ses paramètres :

- ❖ Paramètre k_p pour le réglage de l'action intégrale.
- ❖ Paramètre k_i pour le réglage de l'action intégrale.
- ❖ Paramètre k_d pour le réglage de l'action dérivée.

II.3.3 Correcteur proportionnel - intégrale – dérivée [16] :

Les termes proportionnel et intégral peuvent amener un dépassement de la consigne et des oscillations. Cela implique pour le moteur par exemple des inversions de polarité, ce qui est loin d'être idéal. Pour limiter ce phénomène indésirable, on introduit un troisième élément qui est le terme dérivé. Son action va dépendre du signe et de la vitesse de variation de l'erreur, et sera opposée à l'action proportionnelle. Elle devient prépondérante aux abords de la valeur demandée lorsque l'erreur devient faible, que l'action du terme proportionnel faiblit et que l'intégrale varie peu : elle freine alors le système, limitant le dépassement et diminuant le temps de stabilisation [17].

Le schéma général de la boucle fermée est donné par :

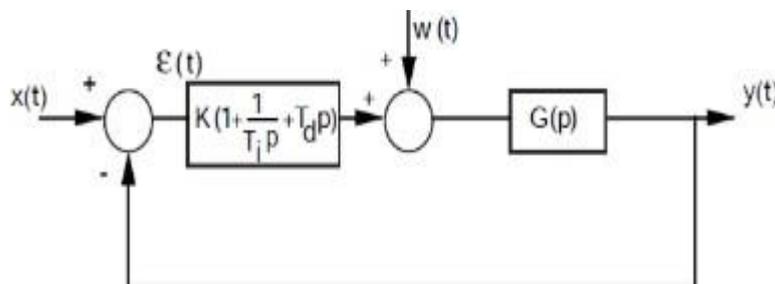


Figure II.3 : La Commande PID.

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. La détermination des coefficients k_p, k_i, k_d du correcteur PID permet d'améliorer à la fois la précision (k_p et k_d), la stabilité (k_d) et la rapidité (k_p, k_d). Le réglage d'un PID est en général assez complexe, des méthodes pratiques de réglages permettent d'obtenir des bons résultats [18].

Il est régi par la relation suivante :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad [\text{II. 1}]$$

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = k_p + \frac{k_i}{p} + k_d p = k_p \left(1 + T_d p + \frac{1}{T_i p} \right) \quad [\text{II.2}]$$

En général, on a les qualités suivantes du correcteur PID :

- ❖ L'action proportionnelle est souvent utilisée pour la rapidité du système bouclé.
- ❖ L'action intégrale est employée pour améliorer l'erreur en régime permanent.
- ❖ L'action dérivée assure l'amélioration de la stabilité.

II.4 Les différentes structures d'un régulateur PID [18] :

L'idée fondamentale d'un contrôleur PID consiste à lire les données d'un capteur, puis à calculer la sortie désirée de l'actionneur en appliquant les composantes proportionnelle, intégrale et dérivée, et enfin en combinant ces trois éléments pour obtenir la sortie finale. Ceci est réalisé avant de définir les paramètres spécifiques du contrôleur PID.

Les trois configurations les plus utilisées sont :

- La structure série
- La structure parallèle
- La structure mixte

II.4.1 La structure série :

La transformée de Laplace de la loi de commande est de la forme :

$$C(p) = e(p) \cdot k_p \cdot \left[k_i \cdot \frac{1}{p} \right] \cdot [k_d \cdot p]$$



Figure II.4 La structure série.

II.4.2 La structure parallèle :

La loi de commande est de la forme :

$$C(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(r) dr + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad [\text{II.3}]$$

$$C(p) = k_p e(p) + k_i \frac{e(p)}{p} + k_d p \cdot e(p) \quad [\text{II.4}]$$

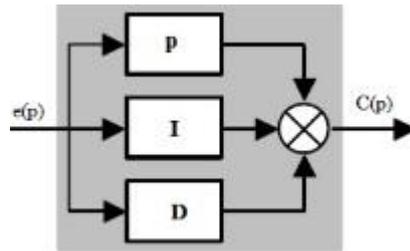


Figure II.5 La structure parallèle.

II.4.3 La structure mixte :

D'après la transformée de Laplace, La loi de commande est de la forme :

$$C(p) = k_p e(p) \cdot \left[k_i \frac{1}{p} + k_d p \right] \quad [\text{II.5}]$$

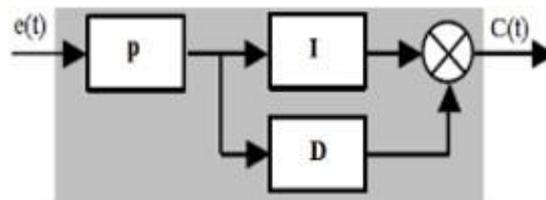


Figure II.6 La structure mixte.

II.5 Régulateurs PID :

II.5.1 Les actions PID :

Dans la réalité, chaque catégorie spécifique de systèmes à asservir est associée à un type de régulateur spécifique. Afin de faire un choix éclairé, il est essentiel d'avoir une compréhension des effets des différentes actions : proportionnel, intégrale et dérivée [19].

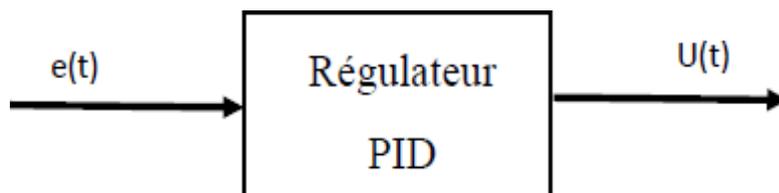


Figure II.6 Schéma synoptique d'un régulateur PID.

L'obtention d'un régulateur PID résulte de la combinaison de trois actions distinctes, et il accomplit principalement les trois fonctions suivantes [19] :

- Il génère un signal de commande en prenant en considération l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.
- Il éradique l'erreur statique grâce à la contribution du terme intégrateur.
- Il prévoit les variations de la sortie en se basant sur le terme dérivateur.

Un régulateur PID est la somme de trois termes :

➤ Le terme proportionnel :

$$P = K_p \cdot (t)_p \quad [\text{II.6}]$$

➤ Le terme intégral :

$$I = K_i \cdot \int_0^t e(t) dt \quad [\text{II.7}]$$

➤ Le terme dérivatif :

$$D = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad [\text{II.8}]$$

Les paramètres du régulateur PID sont le gain proportionnel K_p , le gain intégral K_i et le gain dérivatif K_d , les temps étant exprimés en secondes. Le tableau II.1 résume les avantages et les limitations des actions de base des régulateurs PID :

| Action | Points forts | Points faibles |
|--------|---|---|
| P | Action instantanée | Ne permet pas d'annuler une erreur statique mais permet de la réduire |
| I | Annule l'erreur statique | Action lente Ralentit le système (effet déstabilisant) |
| D | Action très dynamique Améliore la rapidité Apporte un effet stabilisant | Sensibilité aux bruits Forte sollicitation de l'organe de commande |

Tableau II.1. Résume les avantages et les limitations des actions de base des régulateurs PID.

| Augmentation de | Stabilité | Précision | Rapidité |
|-----------------|-----------|-----------|----------|
| K_p | Diminue | Augmente | Augmente |
| K_i | Diminue | Augmente | Diminue |
| K_d | Augmente | Diminue | Augmente |

Tableau II.2.Tableaud'influence des coefficients P, I et D.

II.5.2 Loi de commande du régulateur PID :

Le régulateur PID classique relie directement le signal de commande $u(t)$ au signal d'écarte $e(t)$. Sa description temporelle est la suivante :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad [\text{II.9}]$$

Autrement exprimée :

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad [\text{II.10}]$$

Où :

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} ; T_d = \frac{K_p}{K_d} \quad [\text{II.11}]$$

Avec l'écart défini comme suit :

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad [\text{II.12}]$$

Sa fonction de transfert s'écrit :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i} + T_d \right) \quad [\text{II.13}]$$

La fusion des termes P, I et D est également appelée forme parallèle ou non interactive. Le schéma opérationnel d'un processus réglé à l'aide de ce régulateur est illustré dans la figure II.7.

En plus des signaux mentionnés précédemment, on y identifie la perturbation $v(t)$, le bruit de mesure $n(t)$ et le signal de sortie non perturbé $x(t)$.

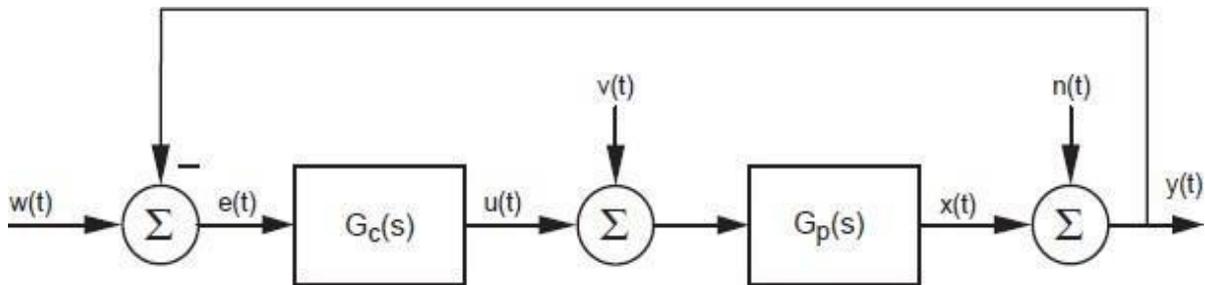


Figure II.7 Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons défini la notion système ainsi que les types de contrôleurs PID. Après on a présente les différentes structures d'un régulateur PID et synthèse des paramètres.

En conclusion, on peut dire que la régulation PID est un outil très puissant pour contrôler de manière efficace les systèmes dynamiques. Elle permet de maintenir une variable de sortie à sa valeur souhaitée en prenant en compte les variations de la variable d'entrée et les perturbations du système. La régulation PID est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'automatisation industrielle, le contrôle de processus et la robotique. Elle est également adaptable à de nombreux types de systèmes et peut être optimisée pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application.

Chapitre III

Les méthodes méta- heuristiques

III.1 Introduction :

Les méthodes méta-heuristiques ont vu le jour en réponse aux limites des méthodes exactes des résolutions de problèmes complexes en optimisation. Elles sont des techniques de recherche heuristique qui visent à trouver des solutions approchées de haute qualité dans un temps raisonnable.

Les méthodes méta-heuristiques sont devenues populaires dans de nombreux domaines, notamment en intelligence artificielle, en recherche opérationnelle, en informatique et en génie industriel. Cette méthode offre une combinaison de techniques de recherche et d'optimisation qui permettent de résoudre des problèmes complexes dans de nombreux domaines différents. Cette méthode est très utile pour les problèmes qui ne peuvent pas être résolus par les approches classiques en raison de la complexité, de la taille ou des contraintes du problème.

Dans ce chapitre on va essayer en appliquant les méthodes méta-heuristiques de l'intelligence artificielle qui sont :

- ✓ La logique floue (Fuzzy Logic Control FLC).
- ✓ Les réseaux de neurones (Artificial Neural Network ANN).
- ✓ Le neuro flou (Adaptive neuro fuzzy inference system ANFIS).

III.2 La logique floue (FLC) :

III.2.1 Définitions :

La logique floue étend la logique classique en permettant la modélisation des imperfections des données, ce qui la rapproche, dans une certaine mesure, de la flexibilité du raisonnement humain.

Contrairement à la logique classique, la logique floue autorise des définitions partielles ou "floues" des règles de contrôle.

Il s'agit d'une branche des mathématiques qui permet à un ordinateur de modéliser le monde réel de manière similaire à celle des êtres humains. La logique floue se concentre sur la quantification et le raisonnement à l'aide d'un langage permettant des définitions ambiguës telles que "beaucoup", "peu", "petit", "grand", "dangereux", etc. Elle traite des situations où les questions posées et les réponses obtenues contiennent des concepts vagues. [22]

III.2.2 Concept de la logique floue :

L'être humain fait appel à la fois à la logique et à l'imagination lorsqu'il accomplit des tâches, combinant ainsi rigueur et intuition, que ce soit de manière simultanée ou distincte. La pensée humaine, fondée sur la logique, consiste en un enchaînement d'idées et de concepts conduisant à des conclusions qui orientent les décisions.

La nature floue de la pensée humaine se manifeste par sa capacité à synthétiser les informations afin d'aboutir à des conclusions pertinentes en lien avec la tâche en question. Plus formellement, la logique floue s'efforce de modéliser les aspects qualitatifs imprécis et incertains. [23]

III.2.3 Principe fondamental de la logique floue :

La logique floue, basée sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh, étend la logique classique associée aux variables booléennes, qui ne prennent que les valeurs 0 et 1, pour prendre en compte des variables dont les valeurs sont des sous-ensembles flous dans l'intervalle $[0, 1]$.

Ainsi, l'univers de discours d'une variable donnée, c'est-à-dire son domaine de variation, peut être subdivisé en plusieurs sous-ensembles à l'aide de fonctions d'appartenance.

La figure (III-1) illustre un univers de discours subdivisé en trois valeurs floues, représentées par des fonctions d'appartenance triangulaires [24].

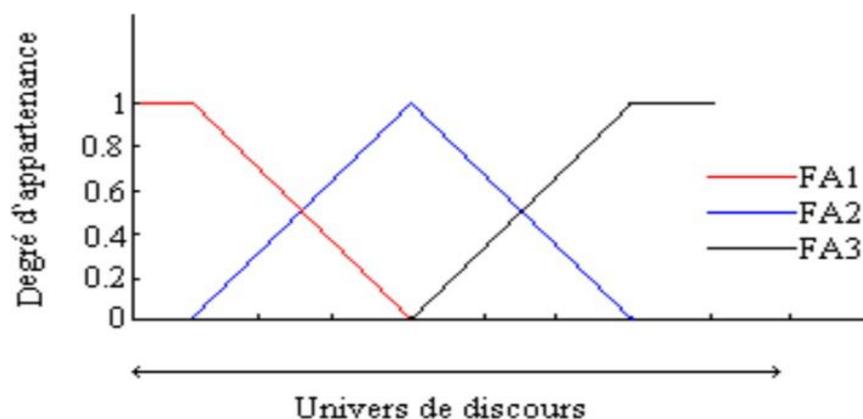


Figure III.1 : Exemple de fonction d'appartenance [24]

III.2.4 Structure d'un système flou :

Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté dans la figure suivante :

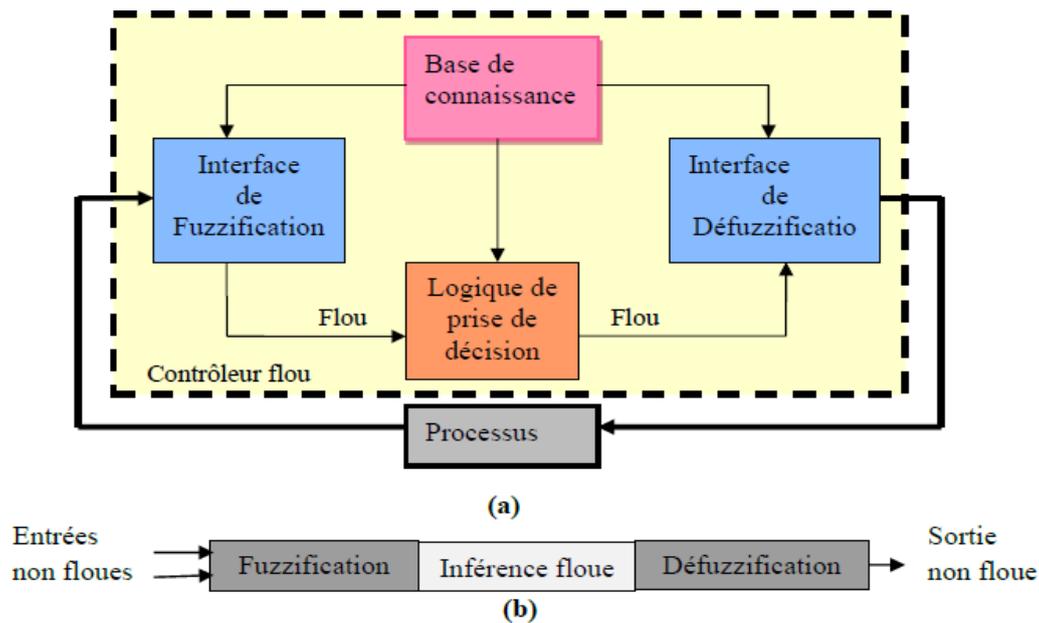


Figure III.2 (a) : Schéma synoptique d'un contrôleur **(b) :** configuration d'un Contrôleur flou [25].

III.2.4.1 La fuzzification :

La fuzzification constitue la première étape dans le processus de contrôle basé sur la logique floue. Pendant cette phase, les données provenant du système sont d'abord normalisées pour faciliter leur traitement. Ensuite, ces données normalisées sont converties en termes linguistiques pour être utilisées dans le système flou.

Les entrées dans un système flou sont généralement mesurées à l'aide de capteurs analogiques. Étant donné que la mise en œuvre du système flou se fait toujours en numérique, il est nécessaire de convertir d'abord les entrées analogiques en valeurs numériques avant de les soumettre à la fuzzification. Cette adaptation des entrées garantit qu'elles appartiennent à l'univers de discours défini.

La dernière étape de la fuzzification implique la génération des degrés d'appartenance à chaque valeur linguistique définie par sa fonction d'appartenance.

III.2.4.2 Base de connaissance :

Elle comprend les définitions des fonctions d'appartenance, comprenant les formes et les paramètres, associées aux variables d'entrée/sortie, ainsi que l'ensemble des règles floues. Le problème initial est ensuite décomposé en un ensemble de règles de la forme :

"SI la variable EST de la propriété, ALORS effectuer l'action"

Définissant ainsi la réponse souhaitée du système en sortie pour les conditions d'entrée données.

Le nombre et la complexité des règles dépendent du nombre de paramètres d'entrée à utiliser et du nombre de variables floues associées à chaque paramètre.

Si x_1 est A1 ET x_2 est A2 alors y est B

Si x_1 est A1 OU x_2 est A2 alors y est B

Où x_1 , x_2 et y sont les grandeurs physiques caractéristiques du système, A1, A2 et B sont les termes linguistiques, « OU » et « ET » les opérateurs de liaison des fonctions d'entrée.

III.2.4.3 Mécanisme d'inférence :

Étant considéré comme le "centre névralgique" du contrôleur, il sert à connecter les degrés d'appartenance des fonctions d'entrée aux fonctions de sortie. Le degré d'appartenance de la fonction de sortie peut être déterminé à l'aide de diverses méthodes :

- La méthode d'inférence min-max.
- La méthode d'inférence max-prod.
- La méthode d'inférence somme-prod.

III.2.4.4 La défuzzification :

La défuzzification vise à convertir l'ensemble flou de sortie résultant de l'agrégation des règles en une valeur de commande déterministe et précise à appliquer au processus. Dans la littérature, il existe plusieurs stratégies pour réaliser cette opération telles que :

- Défuzzification par calcul du centre de gravité (barycentre).
- Défuzzification par calcul du maximum.

La méthode de défuzzification par le centre de gravité. Cette méthode est largement utilisée en commande floue car elle offre intuitivement la valeur la plus représentative de l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles [26].

III.2.5 Intérêt de la logique floue :

La logique floue, également appelée traitement des incertitudes, vise à représenter les connaissances imprécises et à permettre un raisonnement proche du langage humain quotidien. Elle offre également l'avantage d'incorporer les connaissances linguistiques sur la manière de piloter un processus complexe, en tenant compte des expériences des utilisateurs et des opérateurs du processus à contrôler. Cette approche permet d'exploiter les informations

linguistiques des experts humains pour décrire le comportement dynamique d'un processus ou la stratégie de commande.

Les connaissances que possèdent les êtres humains sur le monde sont rarement parfaites, présentant des imperfections qui peuvent être classées en deux catégories :

Incertitudes : Pour désigner les connaissances dont la validité est sujette à question.

Imprécisions : Pour désigner les connaissances qui ne sont pas perçues ou nettement définies. [22]

III.2.6 Régulation par la logique floue :

Dans la commande floue d'un système, on peut distinguer trois parties principales [27] :

Fuzzification:

On définit pour chaque entrée du système un univers de discours et un partitionnement de cet univers en ensembles flous. La fuzzification consiste à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, au temps t , sa fonction d'appartenance à chacune des ensembles flous définies préalablement, et donc transformer l'entrée réelle en un sous ensemble flou.

Inférence :

A partir de la base de règles donnée par l'expert et des sous-ensembles flous correspondants à la fuzzification des entrées, le mécanisme d'inférence calcule le sous ensemble flou Y relatif à la commande du système. La base de règles floues est constituée par une collection des règles linguistiques de la forme :

$R(i) : \text{SI } x_1 \text{ est } F_1 \text{ et } x_2 \text{ est } F_2 \dots \text{et } x_n \text{ est } F_n, \text{ ALORS } Y \text{ est } G(i), i = 1, \dots, M$ où : (x_1, x_2, \dots, x_n) est le vecteur des variables des entrées, Y est la commande, M est le nombre de règles, n est le nombre de variables floues, (F_1, F_2, \dots, F_n) sont les ensembles flous.

Défuzzification :

La défuzzification a pour objectif de transformer le sous ensemble flou défini par le mécanisme d'inférence en une valeur non floue permettant ainsi la commande effective du système.

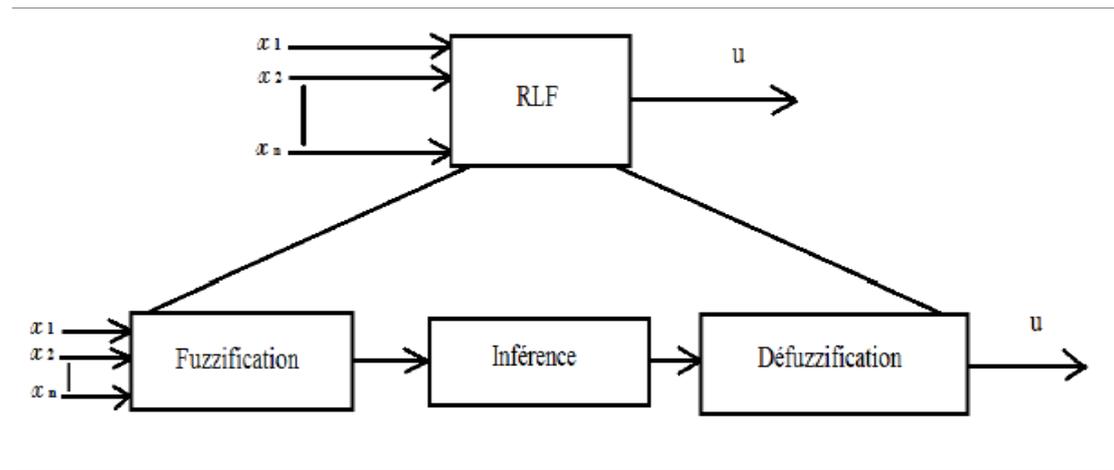


Figure III.3 : Configuration interne d'un régulateur par la logique floue.

III.3 Les réseaux de neurones artificiels (ANN) :

III.3.1 Définition :

Un réseau de neurones se compose d'un ensemble de neurones interconnectés par des connexions pondérées. Sa structure est principalement caractérisée par les types d'unités utilisées et sa topologie. Traditionnellement, on identifie deux types de neurones spécifiques dans un réseau : les neurones d'entrée, qui reçoivent les données provenant de l'environnement externe, et les neurones de sortie, qui produisent les résultats du traitement effectué. Les autres unités sont généralement désignées comme des neurones cachés.

Cependant, cette distinction n'est pas strictement nécessaire, car tous les neurones peuvent potentiellement communiquer dans les deux sens avec l'environnement externe [28].

III.3.2 Fonctionnement :

Un modèle de neurone formel est une règle de calcul permettant d'associer à chaque ensemble d'entrées x une sortie, formant ainsi une fonction à x variables et à valeurs réelles. Chaque entrée x est affectée d'un poids synaptique, représenté par une valeur numérique notée w_1 pour l'entrée 1 jusqu'à w_x pour l'entrée x . La première étape effectuée par le neurone formel consiste à calculer la somme des valeurs d'entrée pondérées par les poids synaptiques, soit la somme :

$$w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_mx_m = \sum_j^i w_jx_j \quad \text{[III.1]}$$

Cette grandeur est comparée à un seuil θ . Le résultat est alors transformé par une fonction d'activation non linéaire F . La sortie associée aux entrées x_1 à x_m est ainsi donnée par : [29]

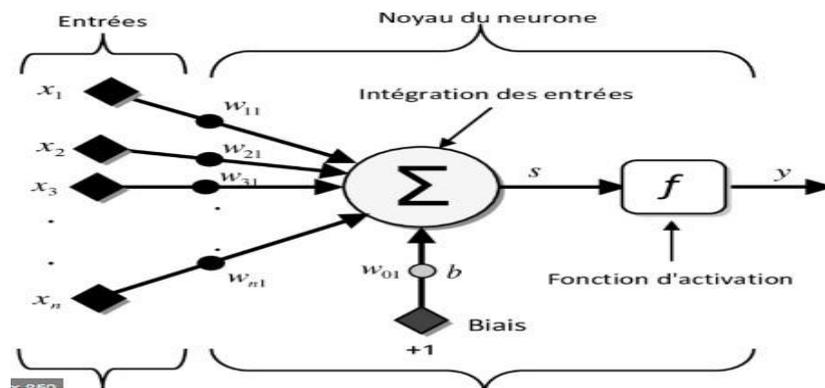


Figure III.4 : Modèle général d'un neurone.

III.3.3 Modèle Biologique :

Un neurone est une unité de base du système nerveux chargée de transmettre un signal électrique dans des conditions spécifiques. Il agit comme un intermédiaire entre une couche de neurones et celle qui la suit, et sa structure se compose de quatre principales régions :

❖ Le corps cellulaire :

Abrite le noyau de la cellule nerveuse, où l'influx nerveux prend naissance, reflétant l'état d'activité du neurone.

❖ Les dendrites :

Des ramifications tubulaires courtes, forment une sorte d'arborescence autour du corps Cellulaire. Elles servent de principales entrées du neurone, captant les informations provenant d'autres neurones.

❖ L'axone :

Une longue fibre nerveuse qui se ramifie à son extrémité, représente la sortie du neurone et le moyen par lequel l'information est transmise à d'autres neurones.

❖ La synapse :

Joue un rôle crucial dans le fonctionnement du système nerveux en transmettant l'information à un autre neurone tout en la pondérant par un poids synaptique.

Chaque neurone effectue une opération simple, consistant en une somme pondérée de ses entrées. Le résultat est comparé à un seuil, et le neurone s'active s'il est dépassé. Ainsi, les informations dans le cerveau sont représentées par les poids attribués aux différentes entrées de chaque neurone [30].

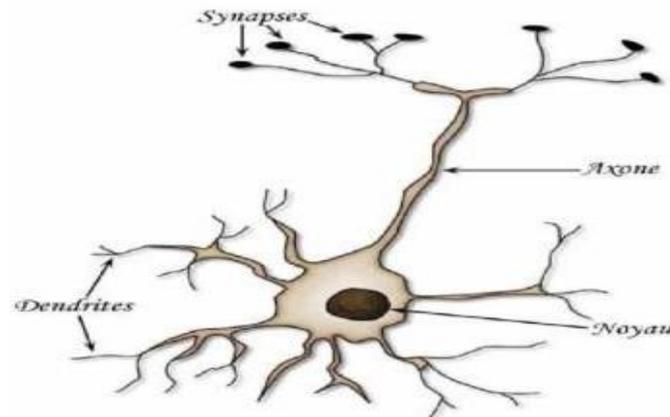


Figure III.5 : le neurone biologique.

III.3.4 Neurone formel :

Le neurone formel est un modèle de traitement d'information relativement rudimentaire qui imite de manière simplifiée la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique. La première version, conçue par Mc.Culloch et Pitts, est largement adoptée. [31]

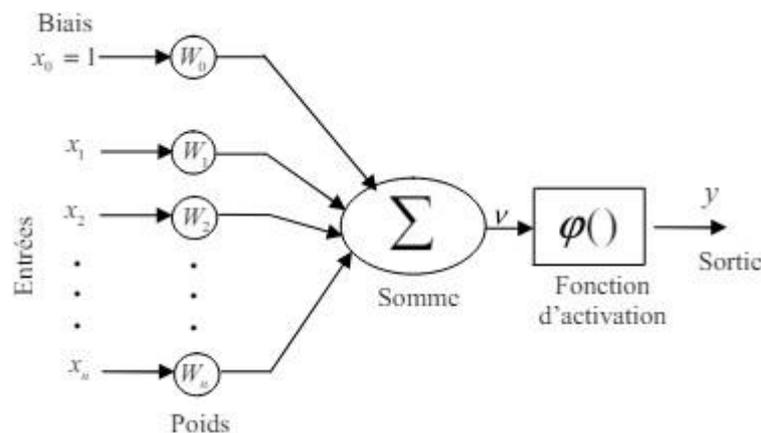


Figure III.6 : neurone formel.

III.3.5 Modélisation d'un RNA :

La modélisation implique de synthétiser les connaissances sur le comportement dynamique d'un processus en analysant physiquement les phénomènes impliqués ainsi que les données expérimentales disponibles. Ces analyses permettent de définir les grandeurs caractérisant le processus, à savoir ses entrées, ses variables d'état et ses sorties.

Dans le cadre de la modélisation de réseaux de neurones, l'approche consiste à mettre en place un système de neurones artificiels qui ne reproduit pas directement le fonctionnement biologique. Chaque élément constituant le neurone biologique est ainsi modélisé individuellement pour créer une correspondance avec le système de neurones artificiels. [32]

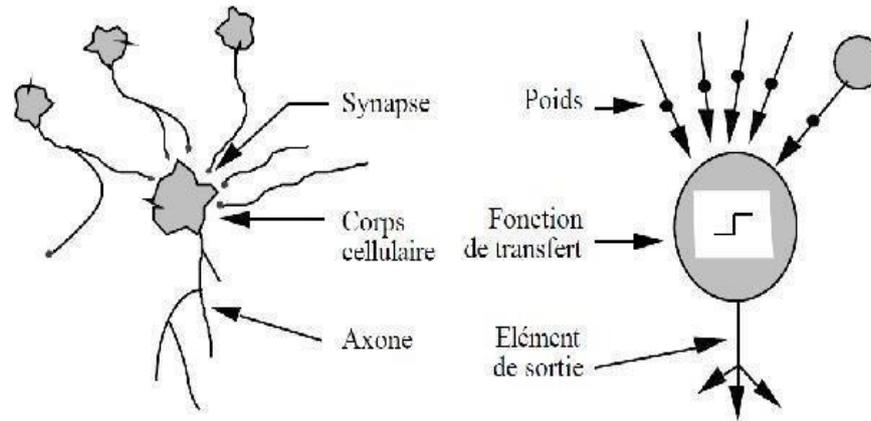


Figure III.7 : Correspondance neurone biologique et neurone artificiel.

On pourra résumer cette modélisation par (tableau III.1), qui montre la transmission entre le neurone biologique et le neurone artificiel.

| <i>Neurone biologique</i> | <i>Neurone artificiel</i> |
|---------------------------|---------------------------|
| Dendrite | Signal d'entrée |
| Synapses | Poids de connexions |
| Corps cellulaire | Fonction d'activation |
| axones | Signal de sortie |

Tableau III.1 : Analogie entre le neurone biologique et le neurone artificiel.

III.4 Le système prédictif neuro-flous :

La logique floue et les réseaux de neurones artificiels sont des technologies complémentaires, ces techniques ont chacune leurs forces et leurs faiblesses. La combinaison de ces deux approches dans un système intégré semble plus prometteuse pour le développement des systèmes intelligents.

| | <i>Avantage</i> | <i>Inconvénient</i> |
|---------------------------|---|---|
| <i>La logique floue</i> | <ul style="list-style-type: none"> - Représentation des connaissances incertaines. -Facilité d'interaction. -Facilité d'interprétation des résultats. -facilité d'extension de la base de connaissance. | -Incapacité de généralisation. - dépend de l'exigence d'un expert pour déterminer les règles d'inférence. |
| <i>Réseau de neurones</i> | <ul style="list-style-type: none"> - capacité d'apprentissage. - capacité de génération. - Robustesse | -Difficulté de déterminer le nombre de couches / neurones. |

Tableau III.2 : Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurone [33].

Afin de résumer l'apport des approches neuro-floues, le tableau regroupe les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones et de la logique floue. Cette table montre clairement que la combinaison de ces deux techniques permet de tirer profits des avantages de chacune des deux approches. D'un côté, les réseaux de neurones peuvent améliorer leur transparence ce qui les rend proche des systèmes flous. D'un autre coté les systèmes flous s'auto-adaptent (réglage automatiques des paramètres), ce qui les rendra plus proche des réseaux connexionnistes [33].

III.4.1 Système ANFIS (Adaptative Neural Fuzzy Inference System) :

Le système Neuro-Flous se reporte à la manière d'appliquer de divers techniques d'apprentissage développer à la littérature de réseau de neurone au système d'inférence flou.

III.4.2 Le Modèle ANFIS :

III.4.2.1. Architecture de l'ANFIS :

ANFIS c'est un système d'inférence adaptatif neuro-flou qui consiste à utiliser un réseau neurone de type MLP (Multi-Layer perceptron) à 5 couches pour lequel chaque couche correspond à la réalisation d'une étape d'un système d'inférence floue de type TakagiSugeno. Pour la simplicité, nous supposons que le système d'inférence flou à deux entrées x et y , et à

comme une sortie f . Supposer que la base de règle contient deux règles floues de type Takagi-Sugeno.

Règle 1 : SI x est A_1 et y est B_1 Alors $\square_1 = p_1x + q_1y + c_1$

Règle 2 : SI x est A_2 et y est B_2 Alors $\square_2 = p_2x + q_2y + c_2$

L'ANFIS à une architecture posée par cinq couches comme représenté sur la figure III.8 [34]

- ❖ **Couche 1 :** Agit comme un tampon qui transmet simplement les données d'entrée à la couche de fuzzification.
- ❖ **Couche 2 :** Les neurones de cette couche réalisent chacun un ensemble flou qui servira dans les antécédents des règles. Chaque neurone reçoit une valeur d'entrée précise et génère son degré d'appartenance à l'ensemble flou représenté par le neurone. Dans le cas d'ensembles flous triangulaires, on peut utiliser des fonctions d'appartenance de même forme.
- ❖ **Couche 3 :** Elle réalise les conjonctions des antécédents de règles floues. Chaque neurone dans la couche reçoit comme entrée les degrés d'appartenance définis dans la couche 2.
- ❖ **Couche 4 :** Elle réalise les disjonctions des antécédents de règles floues. Chaque neurone dans cette couche reçoit comme entrée les degrés d'appartenance définis dans la couche 3.
- ❖ **Couche 5 :** Chaque neurone dans cette couche prend les ensembles flous précédents, écrêtés par la force des règles correspondantes, et les combine en un seul ensemble flou. Ce dernier est alors défuzzifié par une méthode standard.

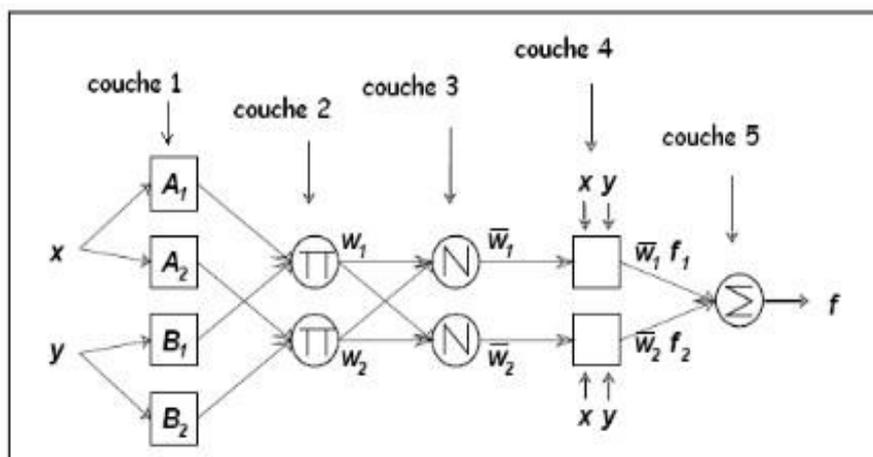


Figure III.8 : L'architecture de l'ANFIS [33].

Ce système d'inférence adaptatif est très performant et largement utilisé dans les réalisations pratiques, présente un grand choix d'usage des fonctions d'appartenance ainsi l'apprentissage des réseaux neurone sur des techniques d'inférence floues.

III.4.2.2 Fusion de données par ANFIS :

L'architecture d'un system de fusion de données à base de l'ANFIS est le même qu'un système FIS sauf la manière par laquelle on réalise le bloc FIS qui diffère. Le bloc FIS dans ce cas sera générer par deux étapes :

- ❖ **Etape d'apprentissage ou d'entraînement (Training) :** Lors de cette étape, le système ANFIS à besoin d'un ensemble de données qui lui permettra d'en sortir une règle générale. Le système boucle sur lui-même jusqu'à obtenir une erreur minimale.
- ❖ **Etape de test :** Encore un ensemble de données différant aux autres pour, après tout apprentissage, tester et analyser la réponse du système créé.

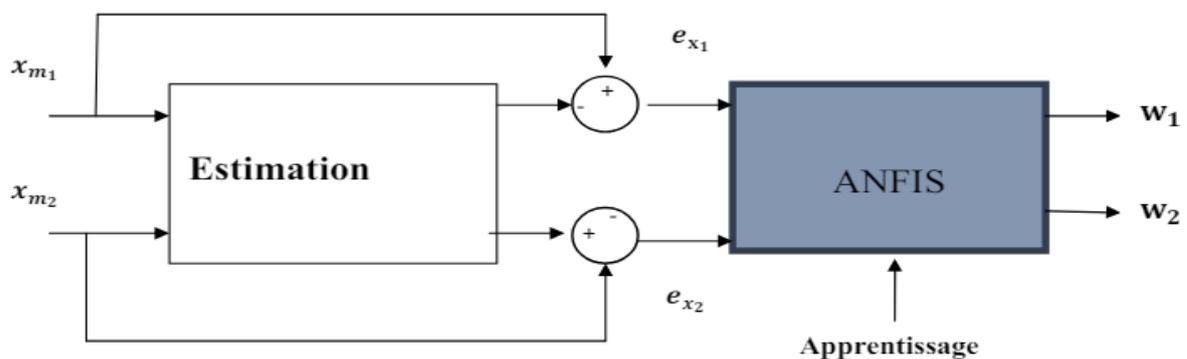


Figure III.9 : Le bloc d'apprentissage.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités et les bases nécessaires à la compréhension de la logique floue dans le développement des systèmes intelligents. En effet, la logique floue permet la représentation et le traitement de connaissances imprécises et incertaines. Ce genre de connaissance est omniprésent dans les problèmes de commande auxquels l'intelligence artificielle est sollicitée pour apporter des solutions satisfaisantes. Ainsi, l'utilisation de la logique floue dans la résolution de ce type de problème de commande s'avère essentielle.

Dans une autre partie, nous avons présenté la contribution des réseaux de neurones, les différentes formes des fonctions d'appartenance, les structure de neurones biologiques et

neurones artificiels et les types des réseaux de neurones artificiels pour démontrer comment créé un réseau de neurone; nous avons cité les principaux opérateurs de réseaux de neurones et aussi les domaines d'application des réseaux de neurones.

Et aussi, nous avons présenté le système d'inférence neuro-flou adaptatif est un outil précieux pour la modélisation et la résolution de problèmes complexes dans de nombreux domaines.

Chapitre IV

Simulation et Résultats

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons optimiser le fonctionnement de l'AVR par différentes méthodes méta-heuristiques qui sont :

- ✓ La logique floue (Fuzzy Logic Control FLC).
- ✓ Les réseaux de neurones (Artificial Neural Network ANN).
- ✓ Le neuro flou (Adaptive neuro fuzzy inference system ANFIS).

Puis on a effectué la comparaison entre ces méthodes.

IV.2 Problématique :

La tension et la fréquence sont des paramètres très importants dans le réseau électrique, c'est pour cette raison qu'on a effectué différents réglages pour maintenir cette tension dans les limites admissibles. Dans notre travail, on examine l'impact de l'AVR sur la tension avec différentes méthodes d'optimisation,

C'est pour cela qu'on a proposé plusieurs scénarios :

- 1ère cas : contrôle de tension avec AVR.
- 2ème cas : contrôle de tension avec AVR et régulateur PID.
- 3ème cas : contrôle de tension avec AVR et régulateur intelligent FLC.
- 4ème cas : contrôle de tension avec AVR régulateur intelligent ANN.
- 5ème cas : contrôle de tension avec AVR régulateur intelligent ANFIS.

IV.3 Modèle du régulateur de la tension AVR :

Le système AVR comprend quatre blocs : l'amplificateur, l'excitateur, le générateur et le capteur.

L'amplificateur :

Sa fonction de transfert :

$$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + c_a s}$$

L'excitateur :

Sa fonction de transfert :

$$G_e(s) = \frac{K_e}{1 + c_e s}$$

Le générateur :

Sa fonction de transfert :

$$G_g(s) = \frac{K_g}{1 + c_g s}$$

Le capteur :

Sa fonction de transfert :

$$G_c(s) = \frac{K_c}{1 + c_c s}$$

IV.4 Résultats de simulation :**IV.4.1 contrôle de la tension avec l'AVR :**

Le modèle figure (IV.1) présente l'AVR sans régulateur.

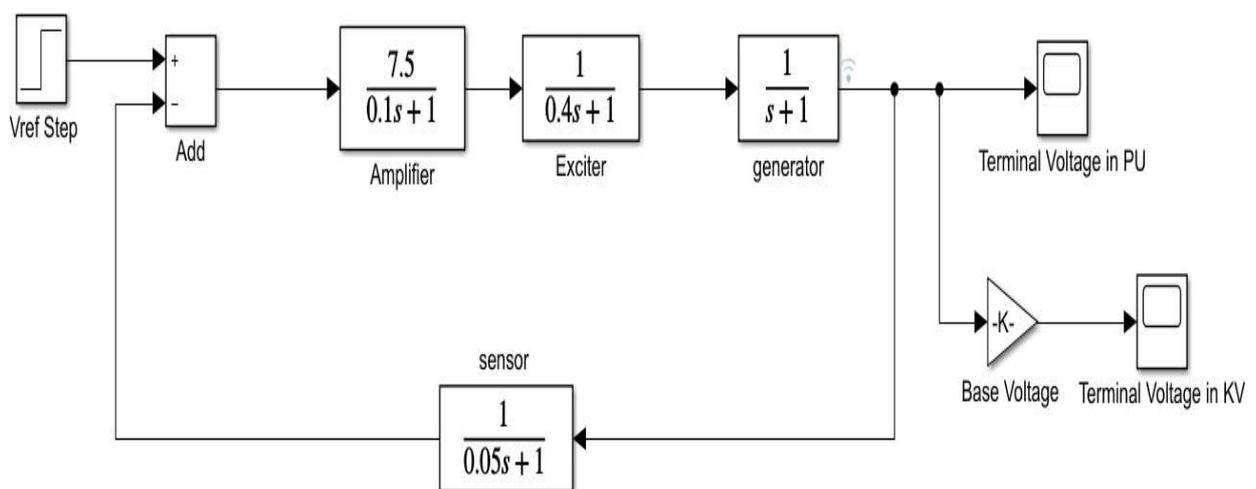


Figure IV.1. Schéma fonctionnel du système AVR.

Après la simulation, le résultat obtenu est présenté ci-dessous :

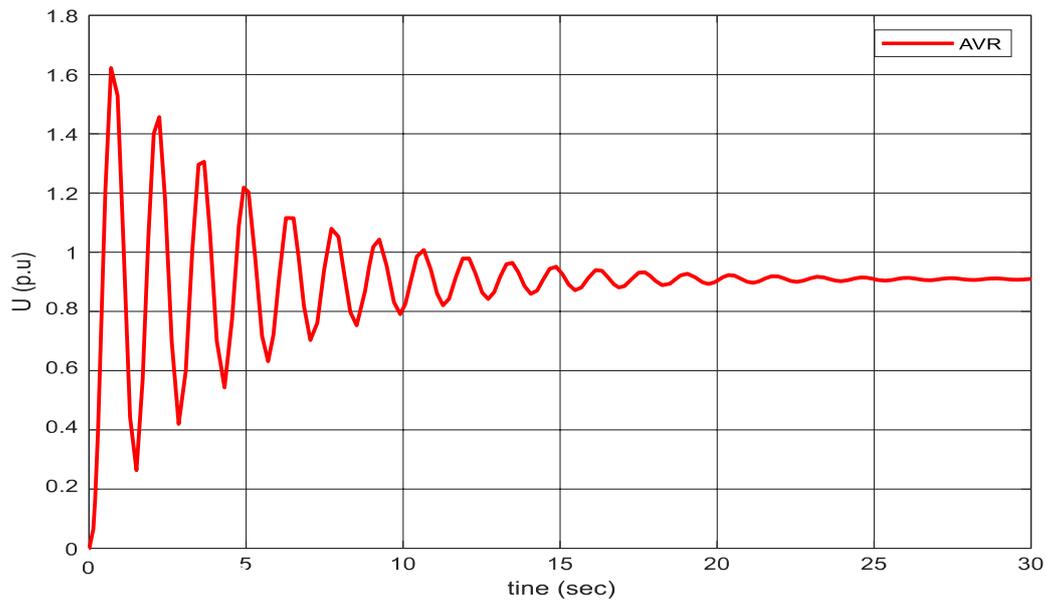


Figure IV.2. La tension de sortie du système AVR sans régulateur.

Fluctuations de la valeur de tension et début de sa stabilité après un temps de 27sec.

IV.4.2 contrôle de tension avec AVR et régulateur PID :

Le modèle figure IV.3 montre le control de la tension avec PID dont les coefficients sont :

$$K_p = 1$$

$$K_i = 0.25$$

$$K_d = 0.28$$

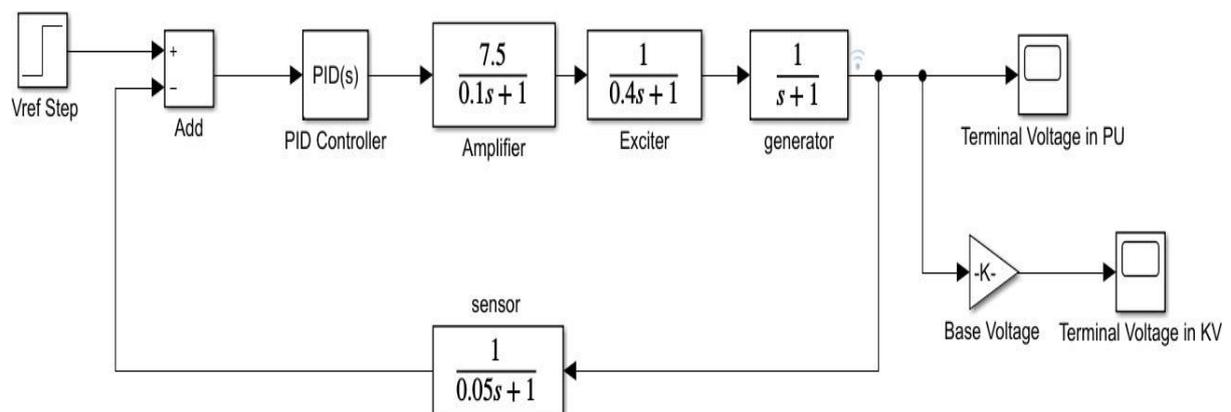


Figure IV.3. Schéma fonctionnel du système AVR avec le régulateur PID.

Pour appliquer la méthode de l’algorithme génétique il faut premièrement donner une valeur à chaque coefficient du régulateur PID :

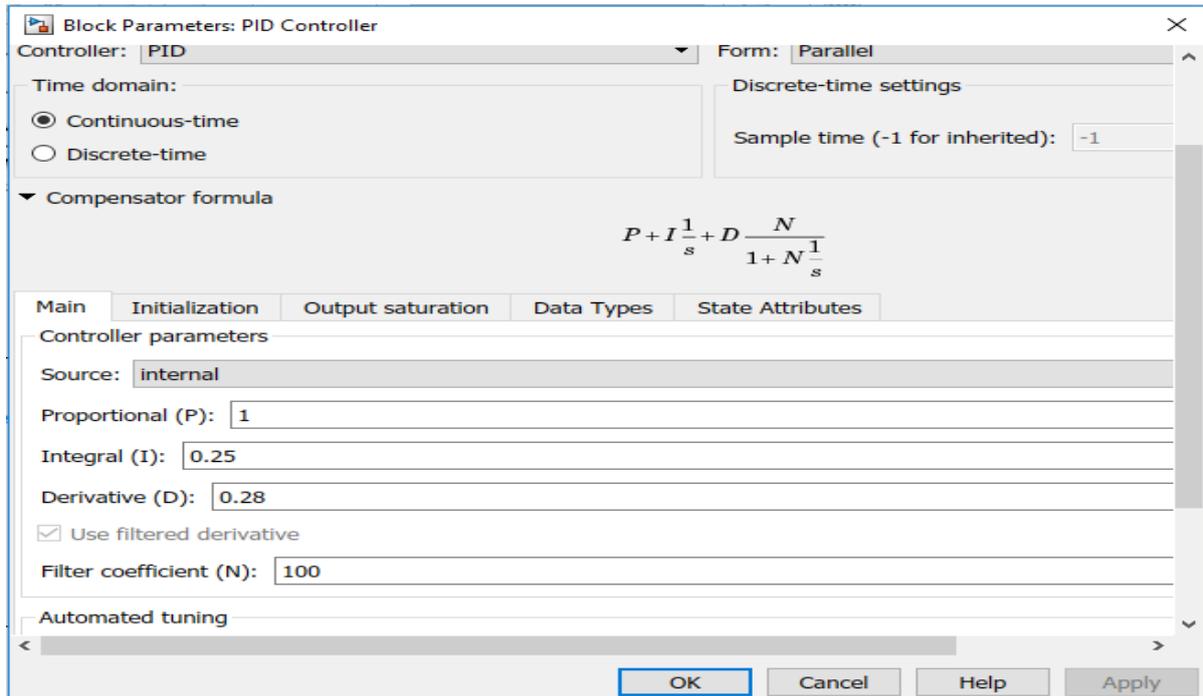


Figure IV.4. Fenêtre du régulateur PID.

On remplace le résultat obtenu dans le correcteur et on fait la simulation :

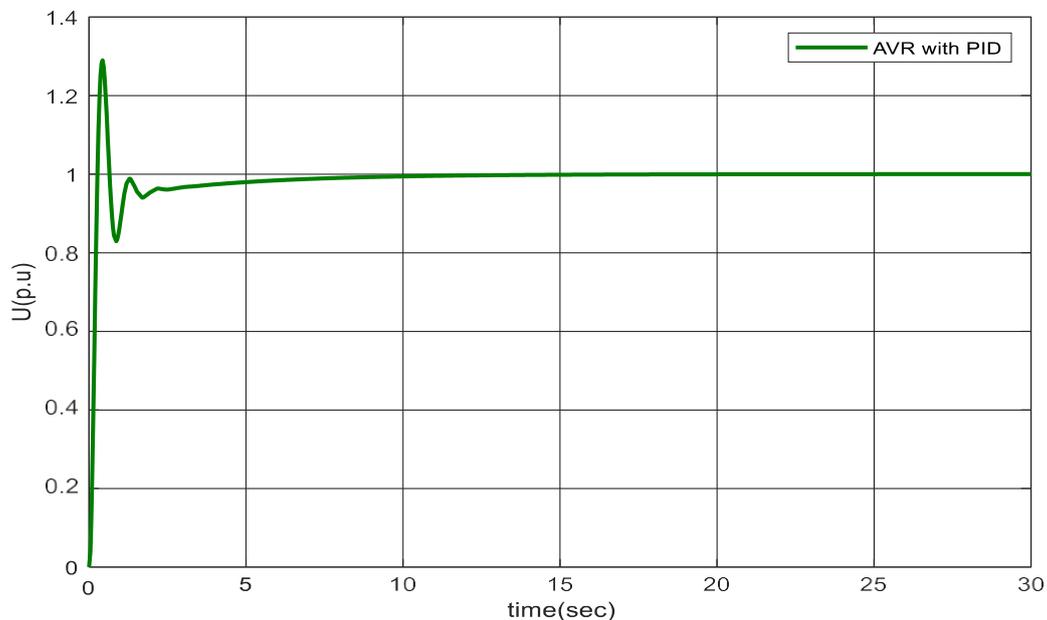


Figure IV.5 Réponse La tension du système AVR avec régulateur PID.

Les oscillations sont amorties à $t=8$ sec le système reprend sa stabilité.

IV.4.3 contrôle de tension avec AVR et régulateur intelligent FLC :

A. Schéma du régulateur Mamdani :

Dans cette partie, nous allons concevoir un régulateur à base de la logique floue. On obtient alors la fenêtre FLC Editor de Matlab/Simulink, comme illustrée à la figure (IV.6).

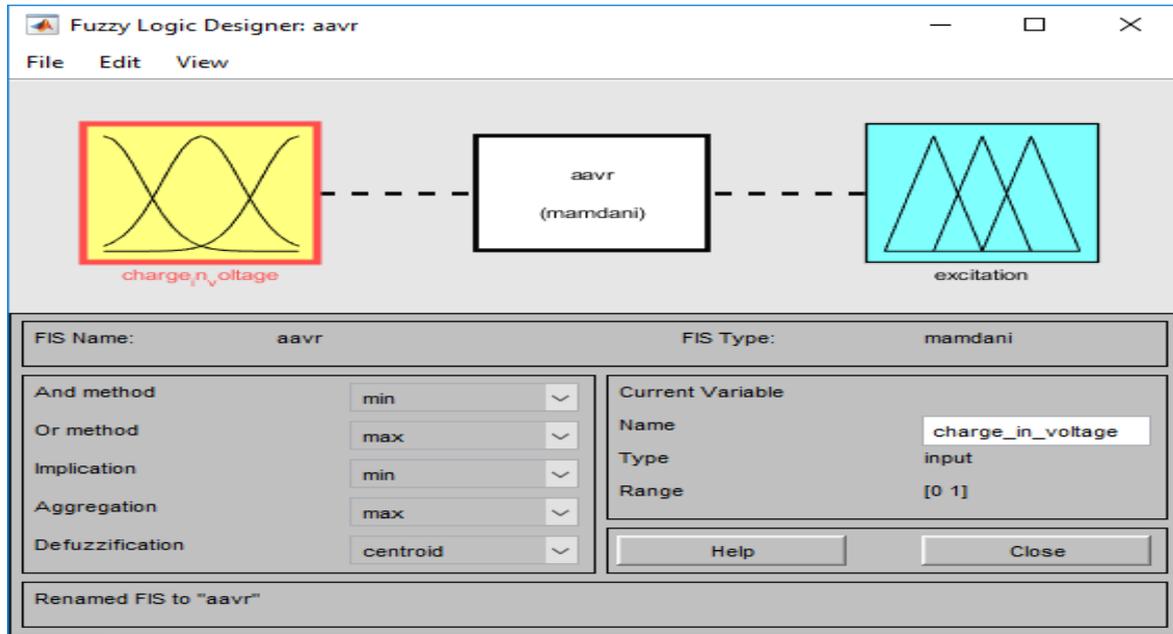


Figure IV.6 : Schéma du régulateur de Mamdani sous Matlab/Simulink (FLC).

B. Fonctions d'appartenances :

Pour la conception de notre régulateur flou, on va exploiter trois variables, l'erreur (charge-in-voltage), l'entrée du régulateur flou (AVR), et la sortie (excitation).

Les fonctions d'appartenances pour les entrées et la sortie du régulateur flou sont présentées dans les figures (IV.7).

L'erreur (charge-in-voltage) du régulateur flou a été partitionnée en 7 valeurs linguistiques dans un intervalle de $[0 : 1]$.

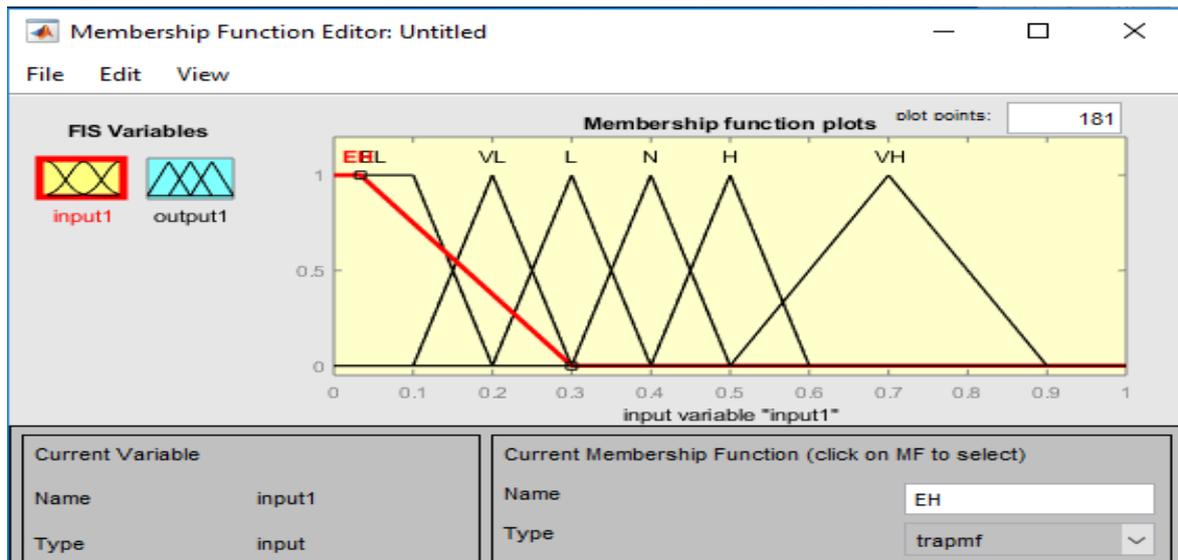


Figure IV.7. Fonctions d'appartenances de l'erreur.

La sortie (excitation) du régulateur flou a été également partitionnée en 7 valeurs linguistiques dans un intervalle de [0 : 0.4] comme illustrée la figure (IV.8).

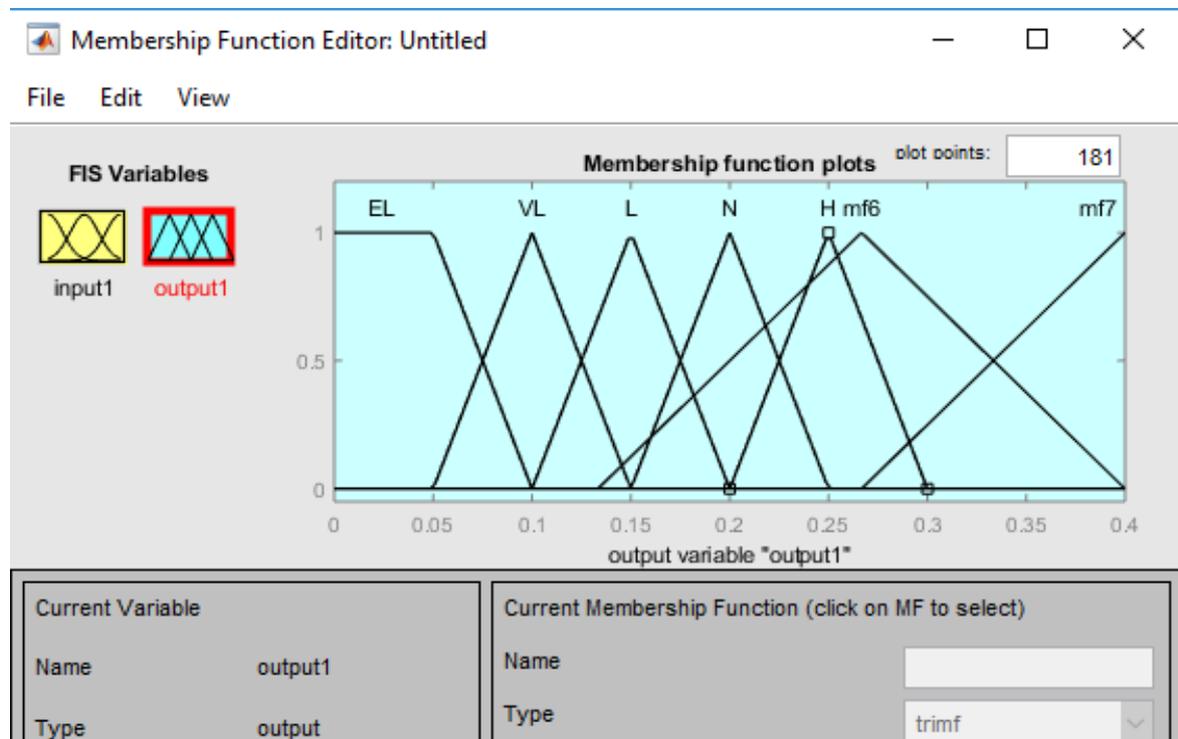


Figure IV.8. Fonctions d'appartenances de la commande de sortie.

La figure (IV.9) présente l'interface d'insertion du tableau des règles de la logique floue sous l'environnement Matlab/Simulink.

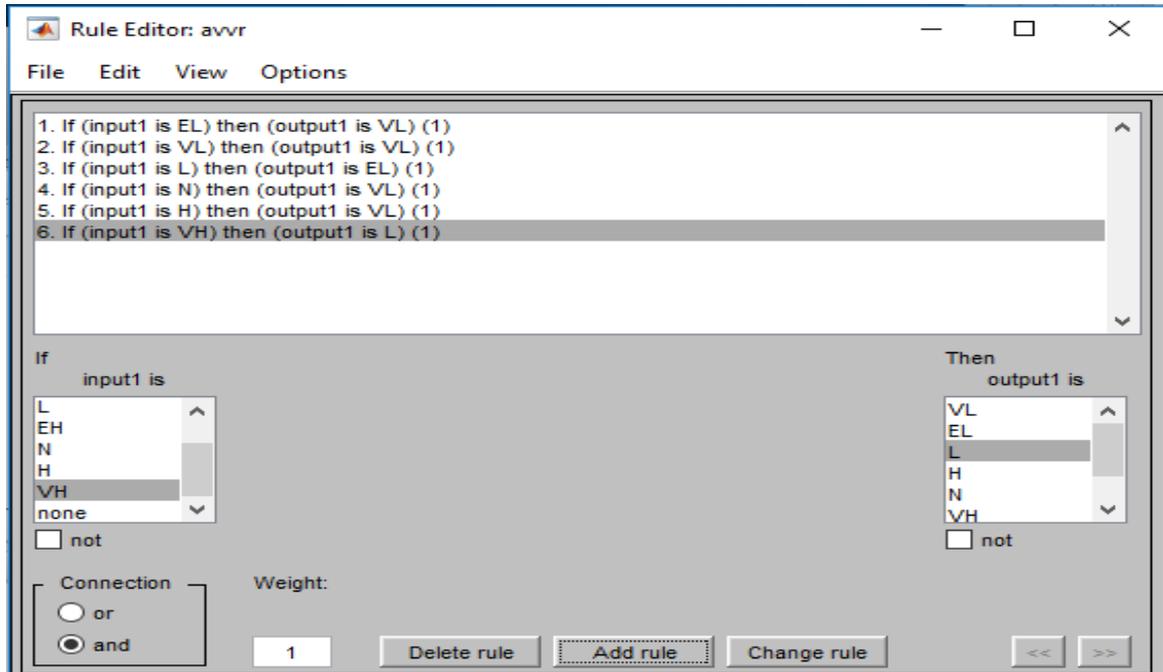


Figure IV.9. Tableau des règles de la logique floue sous Matlab/Simulink.

C. La régulation de la tension avec le régulateur flou :

Après avoir conçu le régulateur flou, nous avons réalisé par Matlab/Simulink le schéma block de la boucle de régulation en insérant notre régulateur flou comme le montre sur la figure (IV.10).

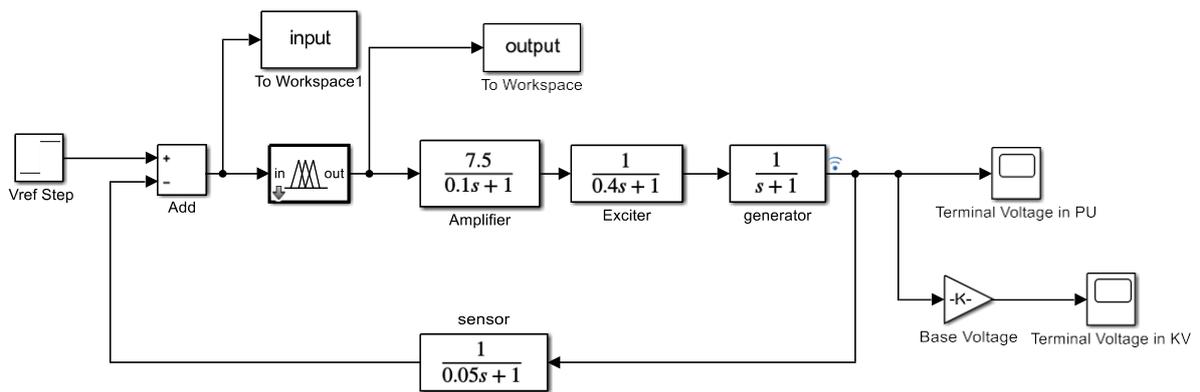


Figure IV.10. Schéma bloc du système AVR avec régulateur FLC.

Le résultat de simulation est présenté ci-dessous :

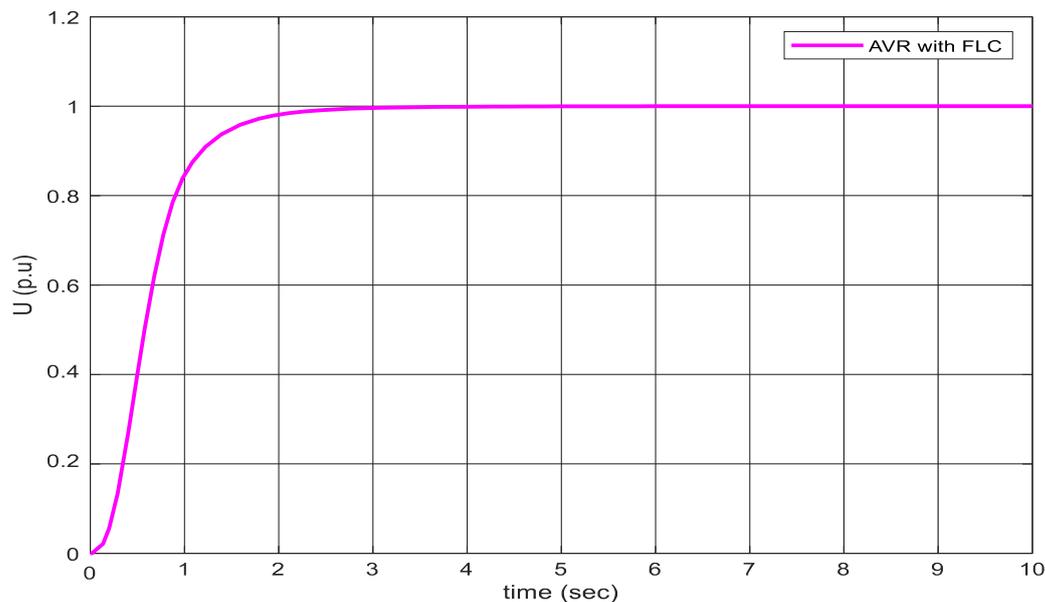


Figure IV.11. La tension du système AVR avec régulateur FLC.

Le contrôle de la tension est presque parfait.

IV.4.4 contrôle de tension avec AVR et régulateur intelligent ANN :

Pour commencer la méthode des réseaux neurones 'Artificial Neural Network' on doit écrire un script :

```
Editor - D:\Matlab R2018b\bin\annt.m
annt.m X +
1 - I= input';
2 - T= output';
3 - net=newff(minmax(I),[3,5,1],{'logsig', 'tansig', 'purelin'}, 'trainlm');
4 - net = init(net); %Used to initialize the network(weight and biases)
5 - net.trainParam.show =1; % The result of error (mse) is shown at each iteration (epoch)
6 - net.trainParam.epochs = 1000; % Maximum limit of the network training iteration process(epoch)
7 - net.trainParam.goal = 1e-12; %Stopping criterion based on error (mse) goal
8 - net=train(net,I,T); % Start training the network
9
```

Figure IV.12. Partie du script de la méthode ANN.

Le schéma bloc du contrôleur ANN est présentée ci-dessous :

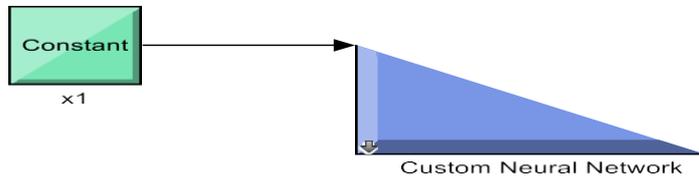


Figure IV.13. Schéma bloc contrôleur ANN.

Dans le modèle suivant, de régulateur de tension automatique du système électrique utilisant un contrôleur intelligent basé sur ANN.

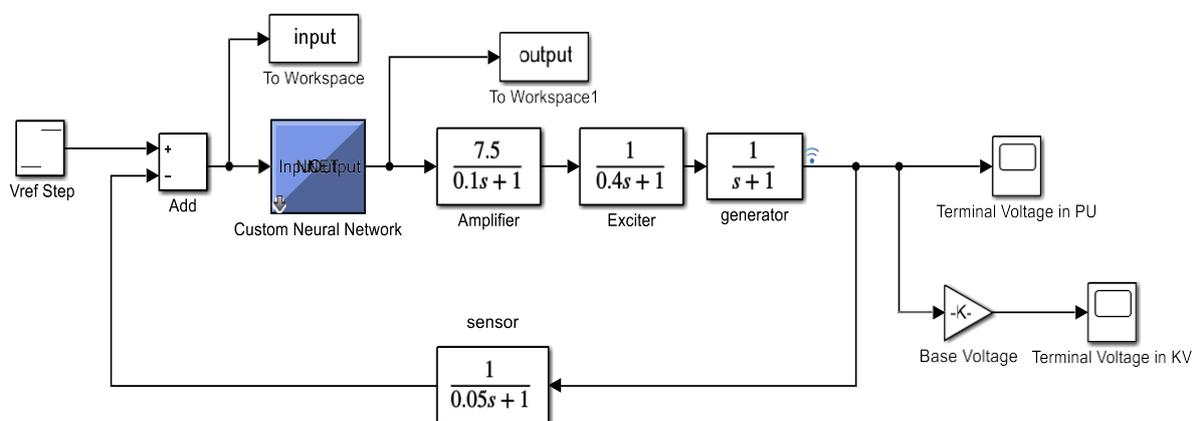


Figure IV.14. Schéma bloc du système AVR avec régulateur ANN.

Après la simulation de ce modèle le résultat obtenu est présenté ci-dessous :

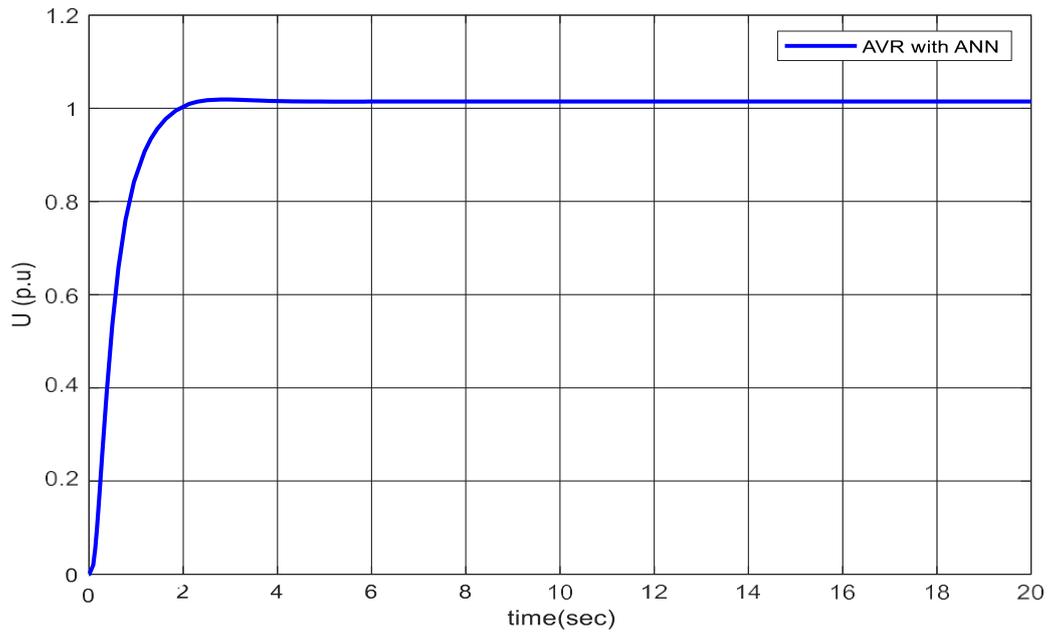


Figure IV.15. La tension de l'AVR avec régulateur ANN.

Le contrôleur basé sur le réseau neuronal artificiel a fourni une tension de sortie souhaitée.

IV.4.5 contrôle de tension avec AVR et régulateur intelligent ANFIS :

Dans ce modèle, le régulateur utilisé est basé sur un système d'inférence neuro-flou adaptative.

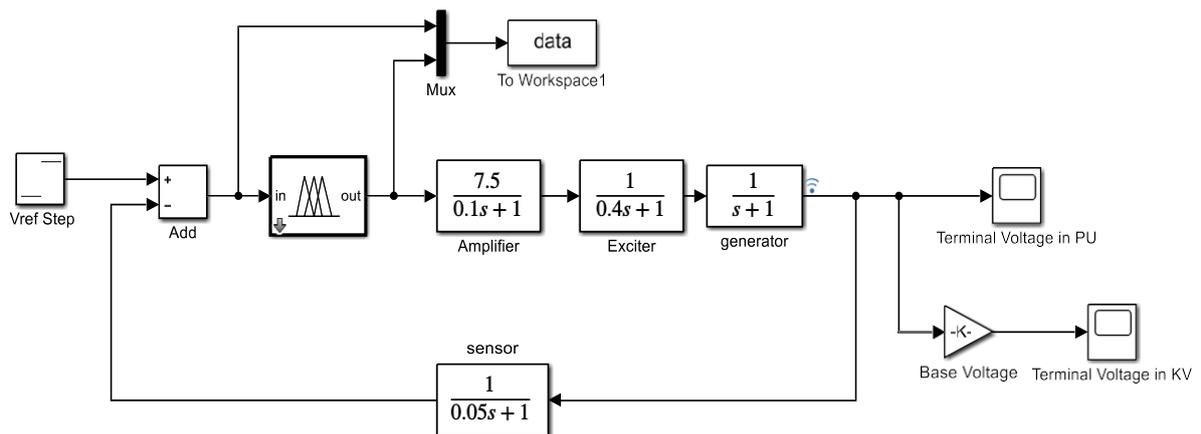


Figure IV.16. Schéma bloc du système AVR avec régulateur ANFIS.

Cette fenêtre affiche la structure ANFIS représentant le nombre d'entrées, ses fonctions d'adhésion, ses règles et sa sortie.

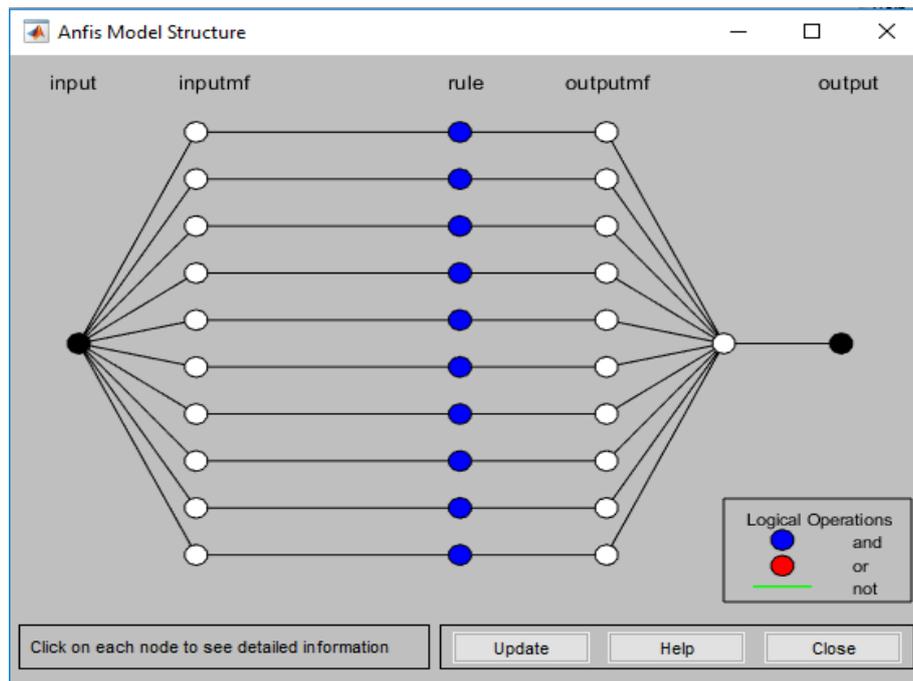


Figure IV.17 la fenêtre la structure ANFIS.

Après la simulation de ce modèle le résultat obtenu est présentée ci-dessous :

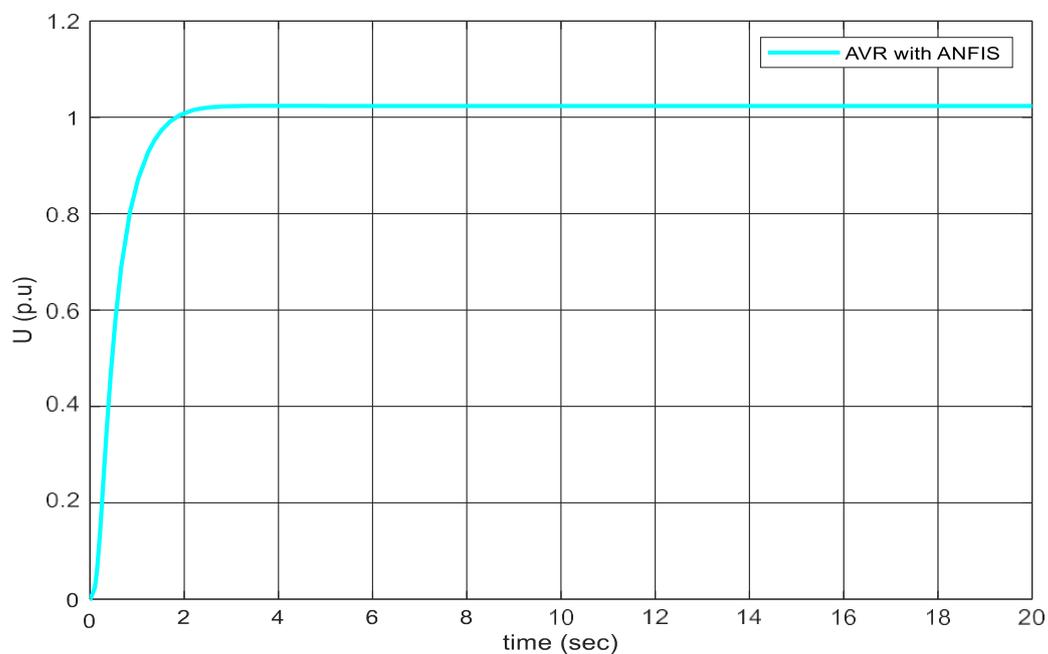


Figure IV.18. La tension de l'AVR avec régulateur ANFIS.

La réponse du contrôleur ANFIS montre un dépassement léger de la tension par rapport à la tension de référence.

IV.5 Comparaison :

La figure ci-dessous représente la comparaison des tensions des différents régulateurs étudiés (FLC, ANN et ANFIS).

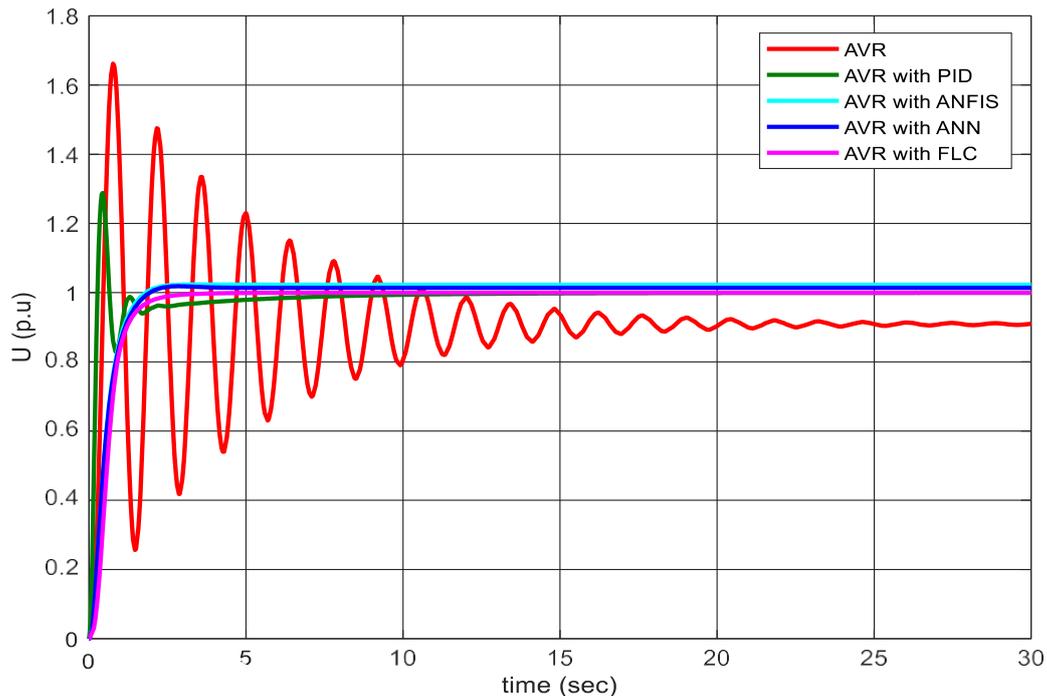


Figure IV.19 Comparaison des tensions de l'AVR avec (PID, FLC, ANN et ANFIS).

D'après les résultats obtenus dans l'étude de contrôle de la tension AVR, on a constaté que les tensions avec FLC, ANN et ANFIS sont comparables.

IV.5.1 Comparaison Entre des variations du gain de l'amplificateur :

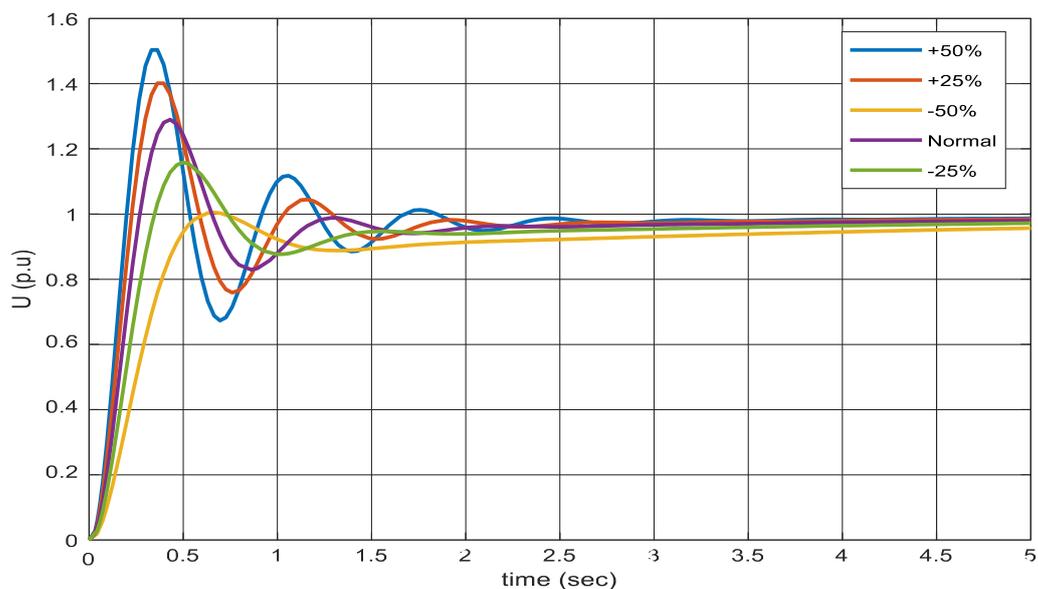


Figure IV.20 effet des variations du gain de l'amplificateur.

Le gain de l'amplificateur influe sur le dépassement et le temps de réponse.

IV.5.2 Comparaison Entre des variations du gain de l'excitateur :

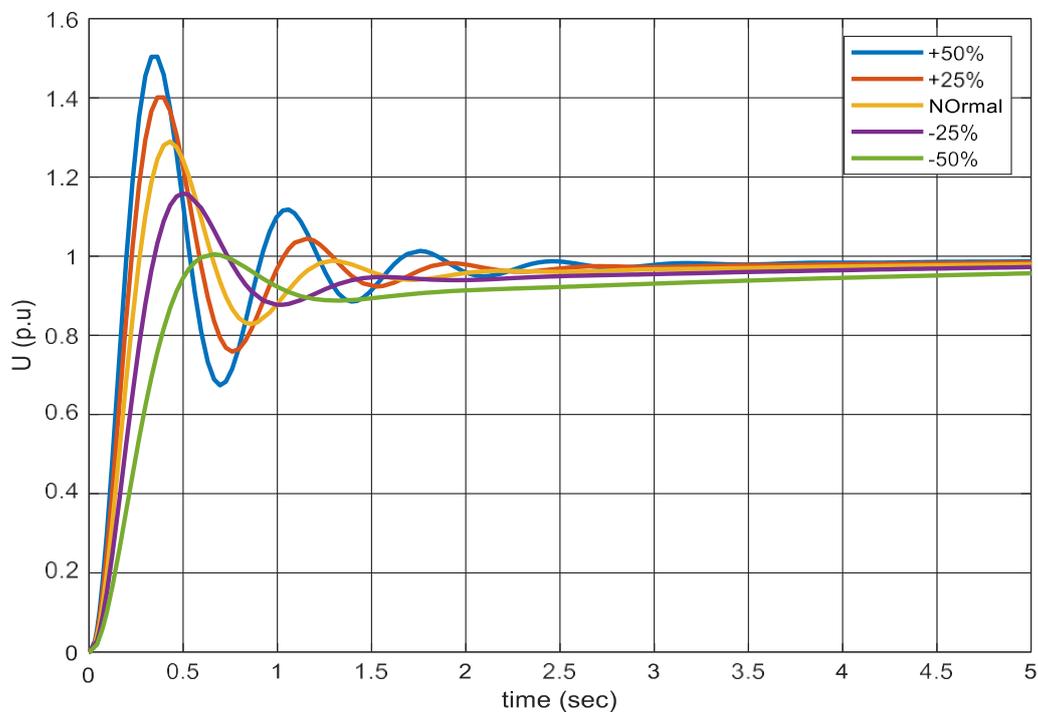


Figure IV.21 effet des variations du gain de l'excitateur.

IV.5.3 Comparaison Entre des variations du gain de le générateur :

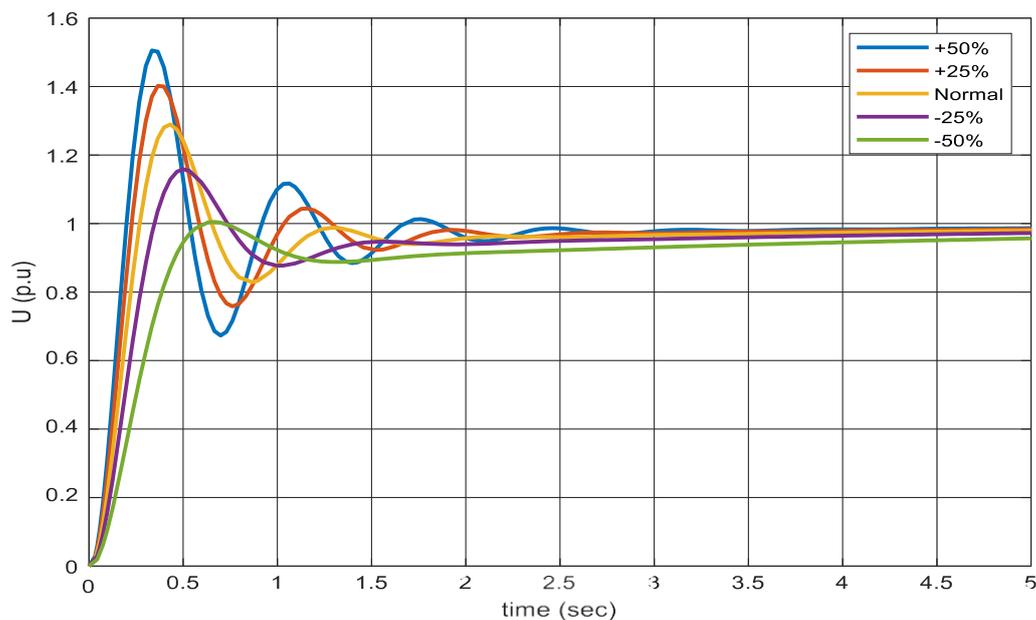


Figure IV.22 effet des variations du gain de le générateur.

La variation du gain de -50% à +50% pour l’amplificateur, l’excitateur et le générateur est pratiquement comparable du point de vue dépassement et le temps de réponse.

IV.5.4 Comparaison Entre des variations du gain de le capteur :

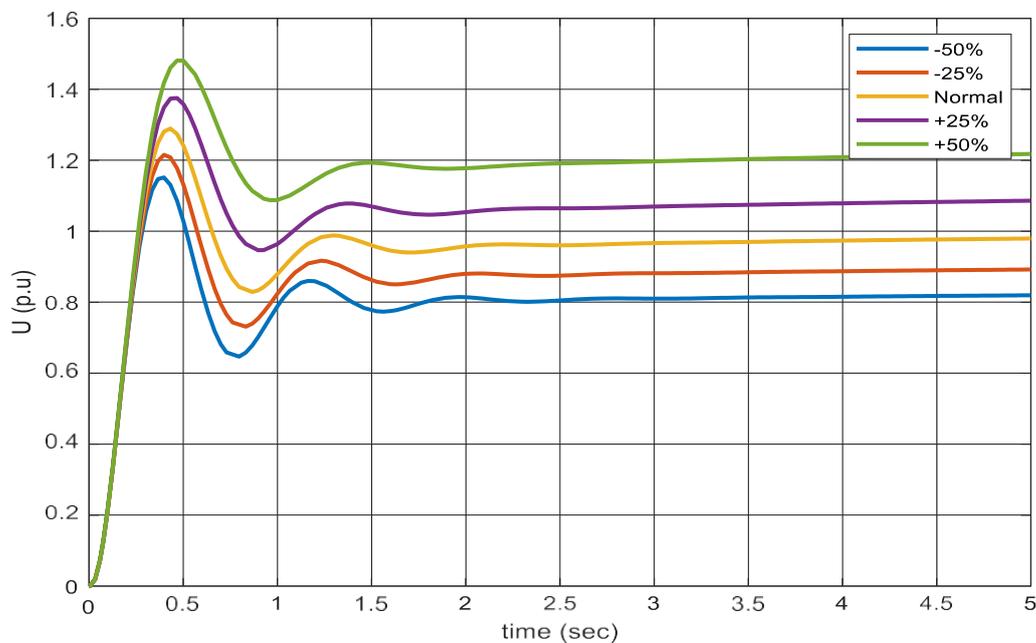


Figure IV.23 effet des variations du gain de le capteur.

La variation du gain du régulateur influe seulement sur le paramètre dépassement.

La variation du gain régulateur présente une grande influence sur le modèle de tension sous +25% -25% de variation est tolérable et la tension ne dépasse pas les limites admissibles.

IV.6 Conclusion :

La simulation dans ce chapitre montre l'impact du régulateur PID sur le réglage de la tension. L'optimisation par les différentes méthodes méta-heuristique des gains du PID dans les résultats presque idéaux du réglage de la tension.

Conclusion Générale

Ce projet d'étude vise particulièrement un élément primordial dans le bon fonctionnement d'un régulateur de tension et son utilisation. Entre assurance de la protection des éléments du contrôleur et amélioration des performances dynamiques de l'ensemble. Notre travail a visé cet important élément, traitant alors sa modélisation, et l'optimisation des paramètres qui interviennent à ce niveau.

En premier lieu, au chapitre 1, nous avons abordé les motivations de ce travail d'un point de vue éducatif tout en justifiant les objectifs et l'importance d'une étude portée sur le régulateur de tension, l'état de machine synchrone est présenté.

Dans le chapitre 2, nous avons introduit les types de contrôleurs PID et structures d'un régulateur PID.

Dans le chapitre 3, on a présente les méthodes méta-heuristiques de l'intelligence artificielle.

Le dernier chapitre, on a opté pour 3 méthodes méthode méta-heuristique La logique floue FLC, Les réseaux de neurones ANN et Le neuro flou ANFIS pour optimiser les paramètres du PID (K_p , K_i et K_d) . Les résultats des simulations montrent que les méthodes proposées était robustes, flexibles et efficace en termes de performances dynamiques comme la réduction du dépassement maximal, le temps de montée, le temps de réponse. Puis on a terminé par l'étude de l'influence de la variation du gain des différents blocs sur la tension. L'augmentation du gain ou sa diminution a un impact direct sur le dépassement et le temps de réponse. En effet la comparaison entre ces méthodes reste comparable sur leurs effets du réglage de tension.

Références Bibliographiques

- [1] Anis OTMANE-CHERIF « Observation de la Machine Synchrone à Rotor Bobiné Sans Capteurs (Sensorless) », Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2016.
- [2] E. Mouni. Contribution à l'amélioration des performances des génératrices synchrones : nouvelle structure d'excitation basée sur une machine à aimants et combinée à des lois de commande avancées. Thèse de Doctorat, université de Poitiers, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 2008.
- [3] A. Barakat, Contribution à l'amélioration de la régulation de tension des générateurs synchrones : nouvelles structures d'excitation associées à des lois de commande H_∞ . Thèse de Doctorat, université de Poitiers, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 2011.
- [4] Bapio BAYALA, *la machine électrique*, Formation Continue – Techniciens Supérieurs – Ingénieurs Electrotechniciens La dernière modification de cette page a été faite le 11 avril 2018 à 09:58
- [5] Amari Mansour, *Cours d'électrotechnique*, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, Janvier 2014.
- [6] Ibtissem chiha, Noureddine Liouane and pierre Borne, "Tuning PID Controller Using Multi objective Ant Colony Optimization", Hindawi Publishing Corporation, Volume 2012, Article ID 536326, 7 pages.
- [7] Ilhem Boussaid, "perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue, thèse de doctorat, Ecole Doctorale (ED32) Mathématiques et sciences et technologies de l'information et de la communication (MSTIC) paris, France, juin 2013.
- [8] Christophe Rapine et denis Trystram, 2002, Théorie de Complexité, Notes de cours, ENSGI – INP, Grenoble.
- [9] Chafa Aliane, Aziz Zerioul, Etude d'un groupe électrogène par simulation numérique, Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2016.
- [10] P. Kundur. "Power System Stability and Control", New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [11] Anant Oonsivilai and Padej Pao-La-Or. "Application of Adaptive Tabu Search for Optimum PID Controller tuning AVR System". Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, vol. 3, june 2008.

- [12] Cao Yuan, Ma Jin, "Research on PID Parameters Optimization of Synchronous Generator Excitation Control System", Critical infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference. 20-22 Sept. 2010.
- [13] O. Ben Kherif, "Étude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID Classique et un Régulateur PID Intelligent," Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf- M'SILA, Algérie, 2016.
- [14] Jean Pierre Corriou, "Commande des procédés" Edition Lavoisier, Paris, 1996.
- [15] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems », Springer, 2005.
- [16] Jean Pierre Corriou, "Commande des procédés" Edition Lavoisier, Paris, 1996. [14] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems », Springer, 2005.
- [17] W.Boutana, N.Ykhaloune, Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID et un Régulateur flou, mémoire de master en Electronique des systèmes embarqués, université de Jijel, Algérie, 2019.
- [18] Vrancic D. et al., A new tuning method for PID Controllers, 4th IFAC conference on system structure and control, Bucharest, october 23-25, 1997.
- [19] Sakli MOUADH, Régulation Industrielle de Processus, projet fin d'études projet automatisme- 2007.
- [20] C. Jacobina, R. Miranda, M. D. R. Correa and A. Lima, « Disturbance-free operation of six-phase AC motordrive system » in power electronics specialists conference.
- [21] J.C.Maun. " Machines Electriques : Compléments et Dynamique ». Bruxelles : ULB, 2000-2001.
- [22] Dr Meriem Benbrahim Logique Floue MI2022.
- [23] A. Debouze, A. Kelaiaia, " Commande floue des machines électrique," Mémoire de Master, Université des Science et de la Technologie 8Mai 1945 - Guelma, 2019.
- [24] Zebblah Rebiha, « Synthèse des stabilisateurs de puissance (PSS) en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle » mémoire fin d'étude.
- [25] S. Belhouane, "Étude et simulation d'une régulation thermique par la logique floue," Mémoire de Master en électronique, Université Abderrahmane Mira – Bejaia 2014.
- [26] Lahmar oussama, Djeddi seif eddine, «Étude comparative entre la commande par logique floue Et régulateur PI d'un MCC » Juin2019.

[27] Abdel Ghani Aissaoui, Hamza Abid, Mohamed Abid , Ahmed TAHOUR, « Commande Par La Logique Floue Et Mode Glissant D'une Machine Synchrone Autopiloté ».

[28] B. Orsier. Etude et application de systèmes hybrides neurosymbolique. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, 1995.

[29] H.Mezaache, "Les réseaux de Neurones formels Et Les systèmes Neuro-Flous Pour l'apprentissage par renforcement", Mémoire soumis en vue de l'obtention du Diplôme de Magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2008.

[30] Christophe LAMBERT : « Développement d'une méthode automatique fiable de modélisation de la structure tridimensionnelle des protéines par homologie et application au protéome de brucella multensis » facultés universitaires notre- dame de paix .2013

[31] Gérard D. « Reducing the complexity of neural nets for industrial applications and biological models » Neuronal Information Processing - From Biological Data to Modelling and Applications (World Scientific, 1998).

[32] J.F. Jodouin, LES réseaux de neurones. Principes et définitions, édition Hermis, Paris 1994.

[33] M.SAHRAOUI, «Contrôle robuste des système non linéaires par les approches de l'intelligence artificielle», thèse de Doctorat en science, ORAN, Faculté des sciences exactes et appliquées, Département d'informatique.

[34] Y.BENFATMA et MS.MANAA, «Commande d'un simulateur d'hélicoptère (TRMS) par une approche hybride (Neuro-Floue)», thèse de mastère, Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Electrique, Filière : automatique, Option : Automatique Avancée, 04 Juin 2012.

[35] David E.Goldberg. "Algorithmes génétiques Exploitation, optimisation et apprentissage automatique". Addison-Wesley, France, SA, 1994.

[36] Jean-Michel Renders. "Algorithmes génétiques et réseaux de neurones". Hermes, 1995.

[37] Blaise Madeline. "Algorithmes évolutionnaires et résolution de problèmes de satisfaction de contraintes en domaines finis". Thèse de Doctorat en sciences, Université de Nice-Sophia antipolis, 2002.

[38] Youssef Harrat. “Contribution à l’ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance : Application au cas d’un job Shop”. Thèse de Doctorat, L’U.F.R des Sciences et Techniques, Université de Franche-comté, 2003.

[39] Pascal Rebreyend. “Algorithmes génétiques hybrides en optimisation combinatoire”. Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Lyon, 1999.