



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique



MÉMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme
De master académique

MASTER EN ÉLECTROTECHNIQUE

Option : ÉLECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Par :

Benaïssa Nabila

Intitulé :

Etude du système de contrôle de la tension des alternateurs de grande puissance : application à l'alternateur de la centrale de Sonackter Est Mostaganem

Soutenu le 23//09//2025 devant le jury composé de :

Président :	A.CHAOUCH	Pr	Université de Mostaganem.
Examineur :	H.OMARI	MAA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	B.BEKKOUCHE	Pr	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025



REMERCIEMENT

Il est difficile en trouver les mots justes pour exprimer toute la gratitude que je ressens aujourd'hui. Ce travail est l'aboutissement d'un parcours jalonné de doutes, d'efforts, mais surtout de belle rencontre et de soutiens inestimables.

À mes parents, vous qui avez toujours cru en moi, même lorsque la fatigue prenait le dessus. Merci pour votre amour inconditionnel, vos encouragements silencieux et vos sacrifices que je mesure un peu plus chaque jour. Votre présence a été ma plus grande force.

*À Monsieur **BEKKOUCHE Benaïssa** et madame **BOUTLILIS Fatima**, je tiens à exprimer ma reconnaissance pour votre patience, votre écoute et vos conseils. Votre accompagnement bienveillant a été essentiel dans la réalisation de ce travail et m'a permis de grandir autant sur le plan académique que personnel.*

Mes remerciements particuliers aux membres du jury, M. A.CHAOUCH pour avoir accepté de présider ce jury et M. H.OMARI, pour l'honneur qu'ils ont fait accepter d'examiner notre travail et de fournir un avis, un commentaire ou des conseils à ce sujet.

Je remercie également ma famille et mes proches, pour leurs mots rassurants, leurs gestes réconfortants et leurs indéfectibles soutiens dans les moments de doute, vous avez su rendre ce parcours plus doux.

Enfin, une pensée sincère à toutes les personnes qui de près ou de loin, ont croisé mon chemin durant cette aventure. Chacun de vous a contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'accomplissement de ce projet.

Ce mémoire n'est pas seulement le fruit d'un travail personnel, mais aussi le reflet de tous l'amour, la confiance et l'accompagnement que j'ai reçus.

Merci, du fond de cœur



Je souhaite dédie ce travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de cette expérience de stage.

À mes chers parents, piliers de ma vie, pour leur amour inconditionnelle, leur patience infinie et leurs encouragements constants qui m'ont donné la force et la détermination d'avancer.

À ma famille, qui a toujours été un refuge de confiance et de soutien, m'accompagnant à chaque étage avec bienveillance.

À mes enseignants et encadrants, académiques et professionnels, pour leur expertise précieuse, leurs conseils avisés et l'opportunité qu'ils m'ont offerte de grandir dans un environnement stimulant.

À mes collègues et amis qui ont été à mes côtés, partageant les moments difficiles comme les réussites, et qui m'ont soutenue par leurs paroles et leurs gestes.

Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont encouragée, je vous adresse ma grande profonde gratitude.

« Le succès n'est jamais le fruit d'un effort solitaire, mais celui d'un parcours partagé avec ceux qui croient en nous »

في هذا العمل، نقدم تنظيمًا مفصلاً للمولد الكهربائي. نبدأ دراستنا بوصف لمحطة الدورة المركبة في مستغانم من حيث الخصائص والمكونات الرئيسية، ومبدأ التشغيل، وأنماط الإثارة المختلفة للمولد. الجزء الثاني مخصص لدراسة ربط المولد بمنظمات الجهد التلقائي (AVR) ومثبتات القدرة (PSS). الهدف من المحاكاة هو تحليل أداء أنظمة التنظيم في الظروف العادية وفي حالة حدوث عطل على شكل دائرة قصر ثلاثية الأطوار. قمنا بتحليل النتائج لثلاثة أنواع من تنظيم الجهد للإثارة (AVR+PSS) التقليدي، AVR+PSS باستخدام الشبكة العصبية، و AVR+PSS باستخدام المنطق الضبابي (لتحديد أفضل منظم. وفي النهاية، استنتجنا أن المنظم AVR+PSS باستخدام المنطق الضبابي هو الأسرع والأكثر كفاءة مقارنة بالأنواع الأخرى. تم تنفيذ المحاكاة باستخدام برنامج Matlab Simulink.

الكلمات المفتاحية: مولد كهربائي، مثبت القدرة، تنظيم الجهد والتردد، الطاقة الكهربائية، الشبكة العصبية، المنطق الضبابي، المنظم التقليدي، الإثارة.

Abstract

This dissertation falls within the framework of the study and monitoring of high-power alternators within a combined-cycle power plant, recently commissioned in Mostaganem. Combined-cycle power plants represent a modern and efficient technology that integrates a gas turbine and a steam turbine, thereby optimizing energy efficiency and reducing fuel consumption compared to conventional thermal power plants.

In this work, we present a detailed regulation study of the alternator. We begin our study by describing the combined cycle power plant in Mostaganem, including its characteristics, main components, operating principle, and the different excitation modes of its alternator. The second part is dedicated to studying the association of the alternator with Automatic Voltage Regulators (AVR) and Power System Stabilizers (PSS). The objective of our simulation is to analyze the performance of these regulations under normal operating conditions and in the case of a three-phase short-circuit fault. We interpret our results for three types of excitation voltage regulation (conventional AVR+PSS, neural AVR+PSS, and fuzzy logic-based AVR+PSS) to determine the most effective regulator. Finally, we concluded that the AVR+PSS based on fuzzy logic is faster and more efficient than the other regulators. The simulation was carried out using Matlab Simulink software.

Keywords: Alternator, power system stabilizer, voltage and frequency regulation, electrical energy, neural network, fuzzy logic, conventional regulator, excitation.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude et du contrôle des alternateurs de grande puissance au sein d'une centrale électrique en cycle combiné, récemment mise en service à Mostaganem. Les centrales à cycle combiné constituent une technologie moderne et performante qui associe une turbine à gaz et une turbine à vapeur, permettant ainsi d'optimiser l'efficacité énergétique et de réduire la consommation de carburant par rapport aux centrales thermiques classiques.

Dans ce travail nous présentons la régulation détaillée de l'alternateur. On va commencer notre étude par la description de la centrale en cycle combiné à Mostaganem avec les caractéristiques, les principaux constituants, le principe de fonctionnement et les différents modes d'excitation de son alternateur. Ensuite la deuxième partie est consacrée à l'étude de l'association de l'alternateur à des régulateurs de tension automatique AVR et de stabilisateur de puissance PSS. Le but de notre simulation est d'analyser le fonctionnement des régulations dans le fonctionnement normal et dans le cas d'un défaut de court-circuit triphasé. Nous interprétons notre résultat pour trois types de régulation de tension d'excitation (AVR+PSS conventionnelle et AVR+PSS neuronal et AVR+PSS par logique floue) pour déterminer le meilleur régulateur. Enfin nous avons déduit que le régulateur AVR+PSS par logique floue est plus rapide et performant par les autres régulateurs. La simulation a été réalisée par le logiciel Matlab Simulink.

Mots clés : Alternateur, stabilisateur de puissance, régulation de tension et de fréquence, énergie électrique, le réseau de neurone, la logique floue, régulateur conventionnelle, l'excitation.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : plan d'utilisation de centrale [1].....	5
Figure I.2 : Organisation globale du projet [1].....	6
Figure I.3 : Position de la centrale donnée par google earth [1].....	7
Figure I.4 : le plan réel de la centrale électrique de Mostaganem [1]	8
Figure I.5 : schéma du principe du cycle combiné [1]	9
Figure I.6 : : turbine à gaz et le cycle de Brayton [4].....	10
Figure I.7 : turbine à vapeur et le cycle Rankine3]]	11
Figure I.8 : Le système turbo-alternateur [13].....	11
Figure I.9 : Rotor à Pôles lisses d'un alternateur haut tension [7].....	12
Figure I.10 : Stator d'un alternateur haut tension [7]	13
Figure I.11 : Représentation schématique de l'alternateur (une phase) [10].....	14
Figure I.12 : Diagramme de Fresnel de l'alternateur [13].....	15
Figure I.13 : caractéristiques à vide [13].....	15
Figure I.14 : Courbe de saturation de l'alternateur montrant la tension induite en fonction du courant d'excitation [13]	16
Figure I.15 : Caractéristique en charge de l'alternateur par différentes charges [13]	17
Figure I.16 : Caractéristiques d'un alternateur en charge [13].....	17
Figure I.17 : Caractéristique de réglage.	18
Figure I.18 : : modèle de Behn-Eschenburg pour modifier la puissance réactive [13]	19
Figure I.19 : Exemple de couplage des phases entre 2 alternateurs [13].....	20
Figure I.20 : Couplage d'une machine synchrone sur un réseau [13]	20
Figure I.21 : Diagramme de Behn-Eschenbourg de la variation de courant de charge [13].....	21
Figure I.22 : schéma d'excitation d'un alternateur [13].....	22
Figure I.23 : Synoptique du bilan [13]	26
Figure II.24 : Modèle électrique de la machine synchrone	31
Figure II.25 : Système d'excitation à redresseur contrôlé par source de potentiel [13].....	35
Figure III.1 : Schéma globale de simulation pour le rotor, un transformateur élévateur, des charges en parallèle.	57
Figure III.2 : Régulateur conventionnelle de tension d'excitation.....	58
Figure III.3 : La tension de sortie du réseau.....	58
Figure III.4 : La vitesse du rotor.....	59
Figure III.5 : La puissance électrique.....	59
Figure III.6 : La tension d'excitation.....	59
Figure III.7 : la sortie de régulateur PSS.....	60
Figure III.8 : le courant du réseau.....	60
Figure III.9 : la régulation d'excitation par la logique floue.....	61
Figure III.10 : régulateur de vitesse par logique flous.....	62
Figure III.11 : schéma du régulateur flou Mamdani	63
Figure III. 12: Fonction d'appartenances d'entrée E.....	63
Figure III.13: Fonction d'appartenances d'entrée DE.....	64
Figure III. 14: Fonction d'appartenances de sortie DU.....	64
Figure III. 15: la tension de sortie.....	65
Figure III. 16 : courant du réseau.....	65
Figure III. 17: la puissance électrique.....	66
Figure III. 18: la tension d'excitation.....	66
Figure III. 19: la sortie de régulateur PSS.....	66
Figure III. 20: schéma de la régulation d'excitation par le réseau de neurone.....	68
Figure III. 21 Schéma de la structure et le modèle du réseau de neurone.....	68
Figure III. 22 : les résultats obtenus pendant la phase d'entraînement du réseau de neurone.....	69
Figure III. 23: courbe de performance d'un réseau de neurone.....	69
Figure III. 24: graphique de régression.....	70
Figure III. 25: la tension de sortie.....	70

Figure III. 26: courant du réseau.....	71
Figure III.27: la vitesse de rotor.....	71
Figure III. 28 : la puissance électrique.....	72
Figure III.29 : la tension d'excitation.....	72
Figure 30 : la sortie de régulateur PSS.....	73
Figure III.31 : la tension de sortie de trois régulateurs.....	74
Figure III. 32 : courant du réseau de trois régulateurs.....	74
Figure III.33: la vitesse de rotor de trois régulateurs.....	75
Figure III.34 : la puissance électrique de trois régulateurs.....	75
Figure III.35 : la tension d'excitation de trois régulateurs.....	76
Figure III.36 : la sortie de régulateur PSS de trois régulateurs.....	76
Figure III.37: schémas globaux de simulation avec un défaut triphasé.....	77
Figure III 38 : la sortie de régulateur PSS de trois régulateurs.....	78
Figure III 39 : la tension de sortie de trois régulateurs.....	78
Figure III. 40 : courant du réseau de trois régulateurs.....	78
Figure III. 41 : la tension d'excitation de trois régulateurs.....	79
Figure III.42 : la puissance électrique de trois régulateurs	79
Figure 43 : la vitesse de rotor de trois régulateurs.....	79

Sommaire

Introduction générale :	1
Chapitre I : Présentation de la centrale électrique de la plage Sonackter	3
I.1 Introduction :	4
I.2. Présentation de la centrale de Sonackter à Mostaganem	4
I.2. 1 : Objective de la centrale	4
I.2.5. Description de la centrale	7
I.4. Les turbines	10
I.4.3 Le turbo alternateur :	11
I.4.4 Alternateur :	11
I.4.5 Principaux éléments de l'alternateur :	12
I.5 Les Types d'alternateur :	13
I.6. Principe de fonctionnement	13
I.6.1. Représentation vectorielle :	14
I.6.2 Caractéristique vectorielle de Fresnel :	14
I.7. Analyse de fonctionnement d'un alternateur	15
I.8. Couplage des Alternateurs :	18
I.8.1. Conditions de couplage	18
I.9. Réaction magnétique d'induit :	21
I.10. Influence d'une variation du courant de charge I :	21
I.11. Excitation d'alternateur	22
I.12. Stabilité des alternateurs de puissance	23
I.13. Différents types de stabilité :	23
I.14. Les Système de régulation	24
I.14.1. Système de régulation Automatique de tension (AVR)	24
I.15. Bilan des puissances d'un alternateur	25
✓ Puissance absorbée :	25
✓ Puissance utile	25
✓ Bilan des pertes :	25
✓ Rendement :	26
I.16. Les types de transformateurs utilisés au niveau de la centrale	26
❖ Transformateurs élévateurs	26
- Transformateurs de mesure	27
I.17. Conclusion :	27
Chapitre II : Modèle d'alternateur ce forme des blocs	28
II.1 Introduction	29
II.2. Structure d'un système de production de puissance	29

II.2.2. La modélisation des alternateurs :	30
II.2.3 Modèle électrique de la machine synchrone	30
II.2.4. Le système d'excitation de l'alternateur :	32
II.2.5. Les caractéristiques du système d'excitation	32
II.3. Les type d'excitation :	33
II.3.1. Systèmes d'excitation CC :	33
II.3.2. Systèmes d'excitation CA :	34
II.3.3. Systèmes redresseurs stationnaires :	34
II.3.4. Systèmes d'excitation statique :	35
II.3.5. Système redresseur à source de potentiel contrôlée :	35
II.3.6. Système redresseur à source composée :	36
II.3.7. Système redresseur à commande composée :	36
II.4.1 Circuits de stabilisation du système d'excitation :	38
II.4.2 Stabilisateur de système d'alimentation (PSS) :	38
II.4.3 Compensateur de charge :	38
II.5. Introduction sur la régulation :	39
II.5.1.1. Description de régulation de l'alternateur :	40
II.5.1.2. La régulation de la tension :	41
II.5.1.3 .Le régulateur de la fréquence	44
II.5.1.4. Les régulateurs de puissance PSS :	45
II.6. 2. Principe de régulation :	47
➤ Action PID :	48
II.7. Régulation à l'aide des méthodes d'intelligence artificielle	48
II.8 : Conclusion	51
Chapitre III : Simulation de régulation de l'alternateur (AVR + PSS)	52
III.1 Introduction	53
III.2. Simulation de régulation AVR et PSS :	53
III.2.1. Simulation avec une régulation conventionnelle PI:	53
III.2.1.1 Modèle globale de simulation :	53
III .2.1.2 . Simulation avec un fonctionnement normal :	55
III.2.1.3 Interprétation des résultats de fonctionnement normal :	57
III.2.2. Simulation avec un régulateur flou	58
III.2.2.1. Modèle de simulation :	58
III.2.2.2. Schéma du régulateur Mamdani :	59
III.2.2.3 Fonction d'appartenances :	60
Figure III.13: Fonction d'appartenances d'entrée DE	61
III.2.2.4. Les résultats de la simulation floue	62
III.2.2.5. Interprétation des résultats de fonctionnement normal :	64

III.2.3. Simulation avec un régulateur neurone :	65
III.2.3.1. Modèle de simulation :	65
III.2.3.2. Les résultats de simulation :	67
III.2.3.3. Interprétation des résultats de fonctionnement normal :	70
III.3 : La comparaison entre les trois contrôleurs :	71
III.4.1 Simulation avec un court-circuit triphasé :	74
III.5. Conclusion	77
Conclusion Générale	78
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	80



Introduction Générale

Introduction générale

Introduction générale :

En Algérie, malgré les progrès réalisés dans la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, nous dépendons encore largement de la production d'électricité issue de centrales thermiques fonctionnant au gaz ou au fioul. Pour répondre à la demande nationale croissante d'électricité, le gouvernement a lancé ces dernières années un projet de construction de six (06) centrales à cycle combiné, dont une à Mostaganem, d'une capacité de 1 450 mégawatts.

Les centrales thermiques à cycle combiné occupent progressivement une place prépondérante dans le système énergétique. Elles reposent sur le principe de récupération de la chaleur émise par les turbines à gaz pour produire de la vapeur destinée à alimenter une turbine à vapeur. Ces centrales comprennent des groupes turbo-alternateurs à turbine à gaz et d'autres groupes turbo-alternateurs à turbine à vapeur. Elles sont constituées d'un ensemble complexe de composants fonctionnant au sein de systèmes interconnectés. La moindre défaillance de l'un de ces sous-systèmes peut entraîner des perturbations importantes, voire des pannes de production. Il est donc nécessaire d'améliorer ces dispositifs, notamment ceux liés à la régulation de la puissance active et réactive des générateurs synchrones, qui jouent un rôle crucial dans la stabilité dynamique du réseau électrique.

Cependant pour plus d'informations, nous avons choisi d'effectuer notre stage de fin d'études au sein de la centrale thermique à cycle combiné de plage de sonackter à Mostaganem afin de participer à la mise en place de ces nouvelles technologiques. Cette expérience nous a permis de développer nos compétences techniques tout en nous familiarisant avec les différents composants de la centrale et les problématiques liées à la régulation de l'énergie électrique.

Pour approfondir cette démarche dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, nous avons décidé d'étudier le système de régulation de l'alternateur utilisé pour la production dans cette dernière. Le circuit de réglage de la tension d'excitation et le circuit de la puissance mécanique, sont les plus importants pour le fonctionnement de l'alternateur. Pour approfondir nos connaissances, nous avons décidé de nous consacrer à l'étude des systèmes de régulation intelligente, visant à améliorer la stabilité de tension et de puissance d'alternateur.

Le travail présenté dans ce mémoire sera structuré en trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre sera consacré à la présentation de la centrale thermique à cycle combiné de sonackter, de ses principales composantes, ainsi que du cycle de production

Introduction générale

et de distribution de l'électricité. Une attention particulière sera portée à l'alternateur, à son rôle, ainsi que l'explication de stabilité de réseaux

- ✓ Le deuxième chapitre portera sur l'analyse de la stabilité de l'alternateur. Nous comparerons la régulation par l'intelligence artificielle aux dispositifs de régulation existants : l'AVR (Automatic Voltage Regulator) et le PSS (Power System Stabilizer) utilisée actuellement à une approche intelligente par réseaux de neurones et la logique flous, Les schémas fonctionnels des régulateurs de tension et de fréquence utilisés dans les simulations y seront également détaillés.
- ✓ Enfin, Le troisième chapitre présentera les résultats des simulations réalisées pour évaluer le comportement du système dans différents scénarios (fonctionnement normal et apparition de défauts transitoires). Une comparaison sera effectuée entre les performances du régulateur intelligent, en termes de rapidité, d'efficacité et de stabilité.

Le travail sera achevé par une conclusion générale.

Chapitre I : Présentation de la centrale électrique de la plage Sonackter

I.1 Introduction :

Le stage à la centrale électrique de Sonackter plage Est de la ville de Mostaganem m'a permis d'acquérir de nombreuses compétences pratiques et de me familiariser avec les équipements de cette installation. Une centrale thermique à cycle combiné est un complexe industriel important de production d'énergie électrique. Il s'agit d'une grande structure contenant plusieurs systèmes avec différentes spécialisations.

C'est pourquoi de nombreux ingénieurs de diverses disciplines supervisent le fonctionnement de ces systèmes interconnectés et intégrés. Cependant, les équipements turbo-alternateur de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, leurs accessoires de conversion et de régulation présentent le maillon le plus important de la chaîne de production d'électricité.

Ainsi, pour compléter nos connaissances sur ces systèmes industriels, j'ai choisi de réaliser mon projet de fin d'études sur le fonctionnement des alternateurs.

Dans ce chapitre, nous fournirons des informations générales sur le cycle de production d'énergie électrique par une centrale électrique à cycle combiné. Une description des différents sous-systèmes de l'installation sera décrite.

I.2. Présentation de la centrale de Sonackter à Mostaganem**I.2. 1 : Objective de la centrale**

Afin de satisfaire à la demande nationale, pour l'énergie électrique et d'éliminer les anciennes centrales thermiques défaillantes, la société Algérienne de production de l'électricité (SPE) Sonelgaz a lancé un projet consistant à la réalisation de six (06) centrales électriques à cycle combiné sur le territoire national. Le 19 février 2014, Samsung C&T a signé un contrat afin de construire en Ouest de l'Algérie deux centrales électriques l'une à Naama et l'autre à Mostaganem.

En ce qui concerne notre étude, elle sera effectuée sur la réalisation de la centrale électrique située à Mostaganem, qui aura une capacité de production d'électricité de **1450,356 MW** dont la fiche technique est détaillée dans le tableau (I.1) [1]

Tableau I.1 : présente les paramètres du projet [1]

PROJET	Réalisation d'une centrale électrique en cycle combiné à Mostaganem
NOM DU PROJET	Mostaganem CCPP projet
CLIENT	Ouest d'Alger, près de Mostaganem, plage de Sonackter
MAITRE D'OUVRAGE	Société Algérienne de Production de l'Electricité "SPE"
CAPACITE DU PROJET	Production nette 1.450,356 MW
CONSTRUCTEUR	Samsung C&T
SURFACE	38 hectares
PLANNING DU PROJET	Date du Contrat : 19. Feb. 2014 Date fin du contrat : Aout 2027

I.2.2 Plan d'utilisation de la centrale

La centrale couvre une superficie de **79,11** hectares, divisée en quatre zones adjacentes. Une superficie de **9,85** hectares a été allouée à des bureaux et à une base résidentielle.

Deux zones de stockage, l'une d'une superficie de **10,11** hectares et l'autre d'une superficie de **11,78** hectares, la dernière zone représente le site du projet avec une superficie de **39,60** hectares comme le montre la figure (I.1) [1]

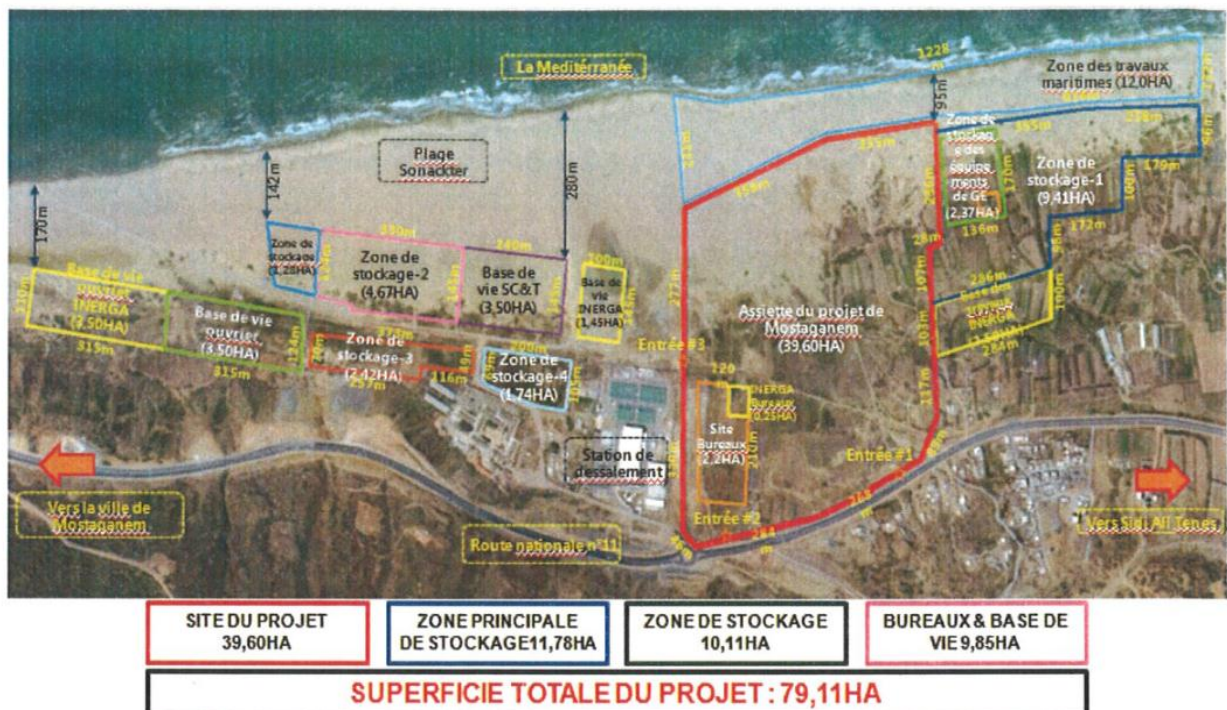


Figure I.1 : plan d'utilisation de centrale [1]

I.2.3 : Organisation globale du projet :

L'organigramme de la figure (I.2) illustre la structure organisationnelle du projet industriel de la centrale à cycle combiné, piloté par Sonelgaz via sa filiale SPE (Société Algérienne de Production de l'Électricité) et géré techniquement par Sonelgaz Engineering (SE).

Ce dernier assure la coordination globale du projet à travers un contrat EPC (Engineering, Procurement and Construction) passé avec Samsung C&T, l'entreprise principale chargée de la réalisation. Samsung C&T, en tant qu'entreprise EPCiste, collabore avec plusieurs sous-traitants locaux pour l'exécution des travaux spécifiques : Hadidi est responsable des travaux de génie civil, tandis que Bouhadjela assure la supervision de ces travaux. Par ailleurs, un contrat de novation lie Samsung C&T à GE (General Electric), qui intervient en tant que fournisseur majeur d'équipements via un contrat de fourniture, tout en participant au contrôle et à l'examen des travaux. En complément, Samsung C&T s'appuie sur un large réseau de sous-traitants spécialisés tels que SAH & Vigilante, TML, LEM, ENCC, All Nations, INERKIB, MIRO, IRMA, EPSS, Sonelgaz services, Mehiri, et Rana Fort pour mener à bien les différentes phases du projet. Cette organisation permet une distribution claire des responsabilités, assurant une exécution efficace et conforme aux exigences techniques du projet [1]

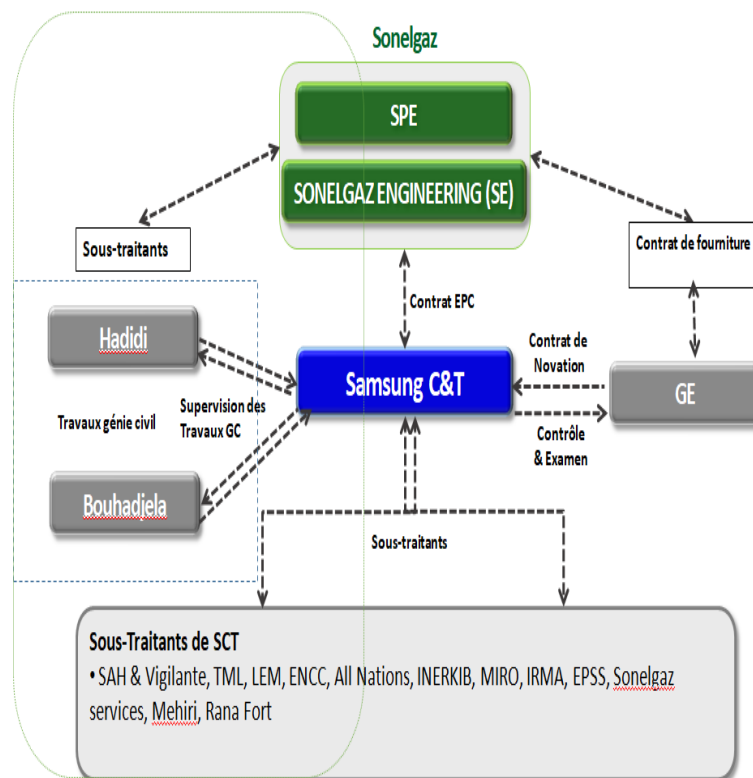


Figure I.2 : Organisation globale du projet [1]

I.2.4 Situation géographique :

La centrale est située dans la région côtière sur l’Est de la ville de Mostaganem avec les coordonnées suivantes

La latitude : "36 ° 01 07'. 2 N ; Longitude : "0 .° 07 ' 36. 2 E ; L’altitude : 10 m

La figure (I.3), montre aussi l’interconnexion du transport d’énergies électriques possibles qui peuvent être réalisé après la réception des projets (Naâma-Mostaganem – Alger)[1]

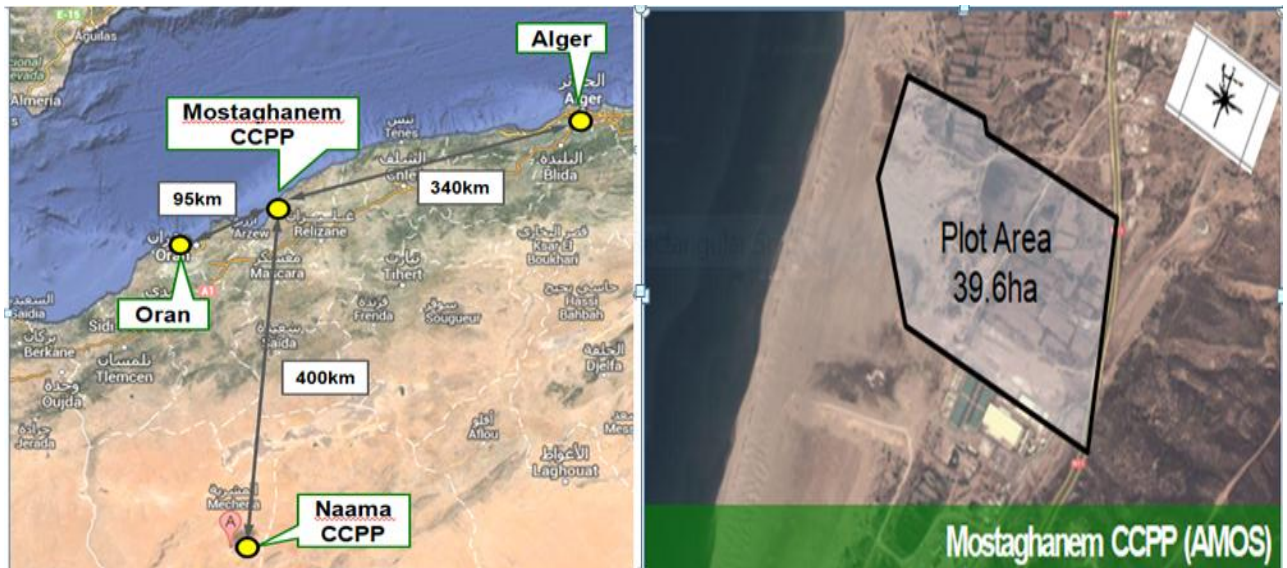


Figure I.3 : Position de la centrale donnée par google earth [1]

I.2.5. Description de la centrale

La centrale électrique est une installation industrielle utilisée pour la production d’énergie électrique à partir d’une source d’énergie primaire (le charbon, le gaz, l’eau, le soleil, le nucléaire.). Dont la plupart des centrales électriques contiennent un ou plusieurs générateurs, une machine tournante (turbine). Qui convertit l’énergie. Mécanique en énergie électrique (alternateur). Le mouvement relatif entre un champ magnétique et un conducteur crée un courant électrique. La source d’énergie exploitée pour tourner le générateur varie considérablement. La majorité des centrales électriques dans le monde brûlent des combustibles fossiles tels que le Charbon, le pétrole et le gaz naturel pour produire de l’électricité. D’autres utilisent l’énergie nucléaire, mais il y a une utilisation croissante des propres sources renouvelables telles que l’énergie Solaire, le vent, l’eau, vagues et hydroélectrique.

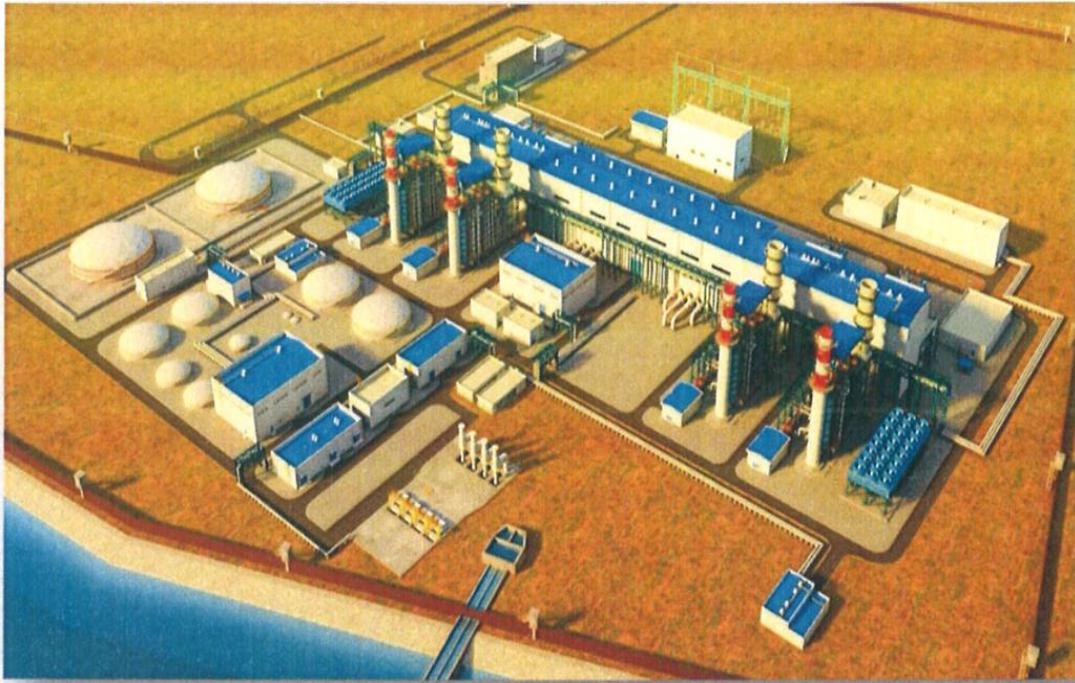


Figure I.4 : le plan réel de la centrale électrique de Mostaganem [1]

De nos jours, le cycle combiné est l'un des systèmes les plus utilisés dans les centrales Electriques. Cette nouvelle centrale est composée de « quatre turbines à gaz » et « deux turbines à vapeur » fabriquées par « **General Electric de type 9FA** ».

Chaque turbine utilise des brûleurs à faible teneur en oxyde d'azote (*Dry LowNox*) et entrainé un alternateur refroidi à l'hydrogène qui produit 294 MVA équivalent à 264,6 MW en marche au gaz et 165 MW lors du fonctionnement au fioul. L'énergie provenant des alternateurs est distribuée vers le réseau électrique algérien et vers l'alimentation électrique de la centrale. L'énergie thermique libérée par les turbines à gaz est dirigée vers des chaudières de récupération de chaleur (HRSG) pour produire de la vapeur. Cette vapeur est ensuite utilisée par une turbine vapeur entrainé par alternateur qui produit 330MVA équivalent 297MW, la tension des alternateurs est 15 kV comme il est illustré sur les annexes A1et A2. La figure (I.4) donne une vue spatiale de la centrale [1]

I. 3. Fonctionnement de la centrale à Cycle combiné

I. 3.1 La turbine à gaz : Une turbine à gaz à cycle combiné (TGCC) est une technologie avancée utilisée dans les centrales électriques pour maximiser le rendement énergétique. Elle combine une turbine à gaz et une turbine à vapeur, exploitant au mieux l'énergie des gaz d'échappement. *Première phase : Turbine à gaz*

- L'air est aspiré et comprimé dans un compresseur.
- Il est ensuite mélangé avec du combustible (gaz naturel, fioul, etc.) dans la chambre de combustion, où la combustion produit des gaz chauds sous haute

pression. • Ces gaz font tourner la turbine à gaz, qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité.

- Les gaz d'échappement, encore très chauds, sont ensuite dirigés vers la deuxième phase.

Seconde phase : Turbine à vapeur • Les gaz issus de la turbine à gaz passent dans un récupérateur de chaleur (HRSG – Heat Recovery Steam Generator), où ils chauffent de l'eau pour produire de la vapeur haute pression.

- Cette vapeur est envoyée dans une turbine à vapeur, où elle se détend et entraîne un alternateur supplémentaire.
- Après expansion, la vapeur est condensée dans un condenseur et renvoyée vers le circuit d'eau de la centrale [1]

I. 3.2 : Le principe d'un cycle combiné

C'est une technologie hybride utilisée dans certaines centrales électriques qui comprend un Cycle de « **Brayton** » sur la partie de production de l'énergie électrique et un Cycle de « **Rankine** » sur le côté de production de l'énergie thermique. Le gaz d'échappement à haute température qui sort d'une turbine à gaz est réutilisé pour Générer une vapeur à haute pression qui passe ensuite par une turbine à vapeur pour générer plus d'électricité. Il est clair que cette combinaison fournit des efficacités plus élevées que celles des cycles uniques, jusqu'à 60%, et généralement utilisée dans la production de l'électricité à grande échelle. La chaleur peut toujours être récupérée du cycle de la turbine à vapeur pour des applications supplémentaires, exactement comme dans les installations à simple turbine à vapeur. Pour une efficacité plus élevée et plus d'électricité générée, il est évident que les cycles combinés sont plus intéressants du point de vue économique.

En effet, au cours des quarante dernières années, les centrales à cycle combiné ont eu un grand succès dans l'industrie de la génération de l'électricité. Le schéma du principe du cycle combiné est illustré la sur la figure (I.5) [2]

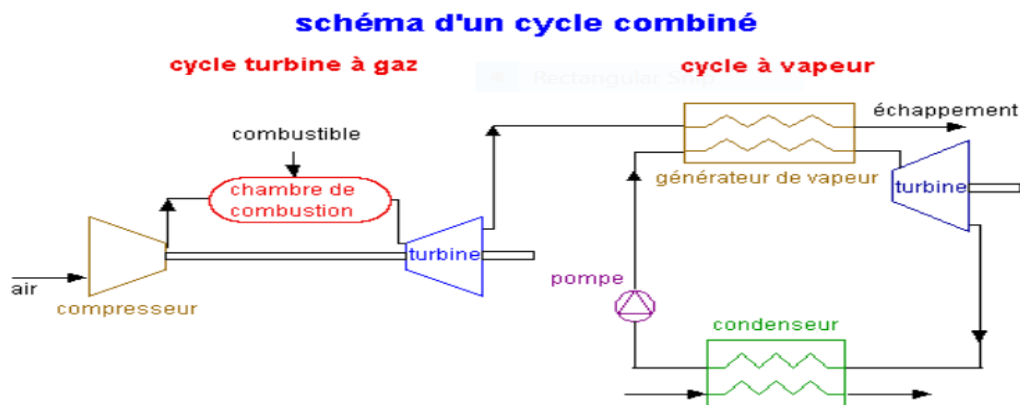


Figure I.5 : schéma du principe du cycle combiné [1]

I.3.3 Le but de cycle combiné :

Le but d'un cycle combiné consiste à faire fonctionner en cascade une ou plusieurs **turbines à gaz**, suivies d'une **centrale à vapeur** dont la source chaude est la source froide des turbines à gaz pour objectif d'augmenter le rendement global et la puissance utile d'une centrale thermique [2]

I.3.4 Avantages du cycle combiné :

- ✓ Rendement élevé : Jusqu'à 60%, bien supérieur aux centrales à cycle simple (~35%).
- ✓ Réduction des pertes thermiques : L'énergie des gaz d'échappement est exploitée, évitant un gaspillage thermique.
- ✓ Flexibilité et réactivité : Adapté aux fluctuations de la demande énergétique.
- ✓ Réduction des émissions : Moins polluant que les centrales au charbon, grâce à une meilleure efficacité énergétique [2]

I.4. Les turbines

I.4.1 Les turbine à gaz :

Une turbine à gaz est un moteur à combustion interne utilisant des gaz tels que l'air comme fluide de travail. L'aspect thermodynamique du fonctionnement de la turbine à gaz est idéalement modélisé par le cycle de Brayton. La figure (I.6) montre les différentes étapes thermodynamiques d'une turbine à gaz et son cycle5]]

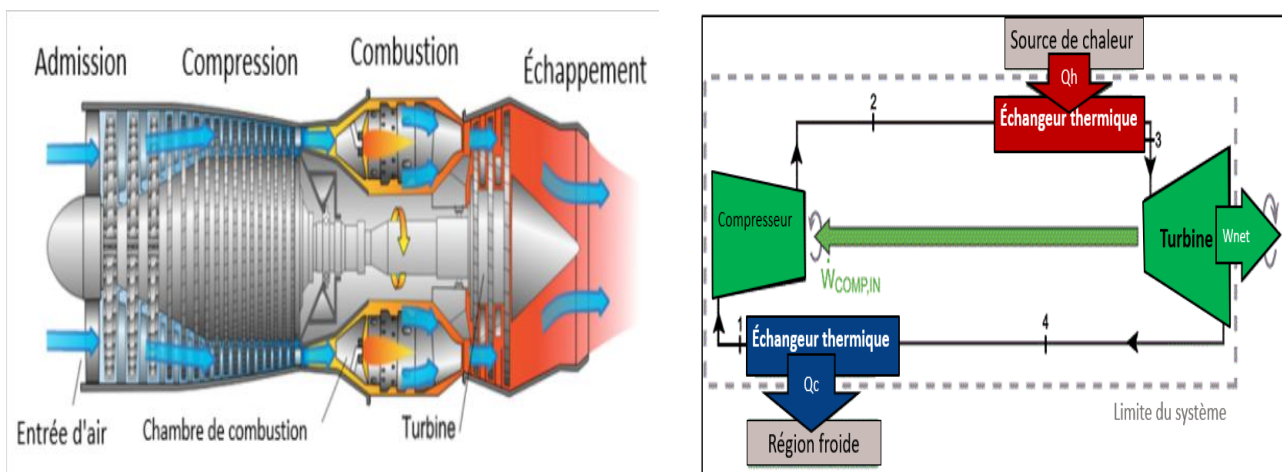


Figure I.6 : : turbine à gaz et le cycle de Brayton [4]

I.4.2 Les turbines à vapeur

La turbine à vapeur utilise la vapeur sous pression d'une chaudière comme fluide de travail. La vapeur surchauffée qui entre dans la turbine perd sa pression (enthalpie) en se déplaçant à

travers les pales des rotors, qui déplacent l'arbre auquel ils sont connectés. Les turbines à vapeur fournissent de l'énergie à un taux constant et constant, et le rendement thermique d'une turbine à vapeur est supérieur à celui d'un moteur alternatif. Le fonctionnement de la turbine à vapeur est optimal à des états de régime plus élevés à base de cycle Rankine. La figure (I.7) montre les différentes étapes de fonctionnement d'une turbine à vapeur et son cycle [6]

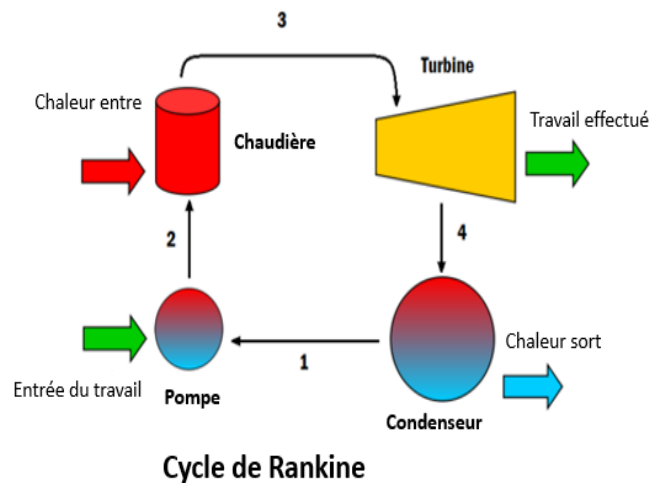


Figure I.7 : turbine à vapeur et le cycle Rankine [3]

I.4.3 Le turbo alternateur :

Les alternateurs de grande puissance ou Turbo alternateur (Appellation donnée généralement aux alternateurs entraînés par des turbines à vapeur ou à gaz) [13]

La figure (I.8), présente le système d'un turbo-alternateur :

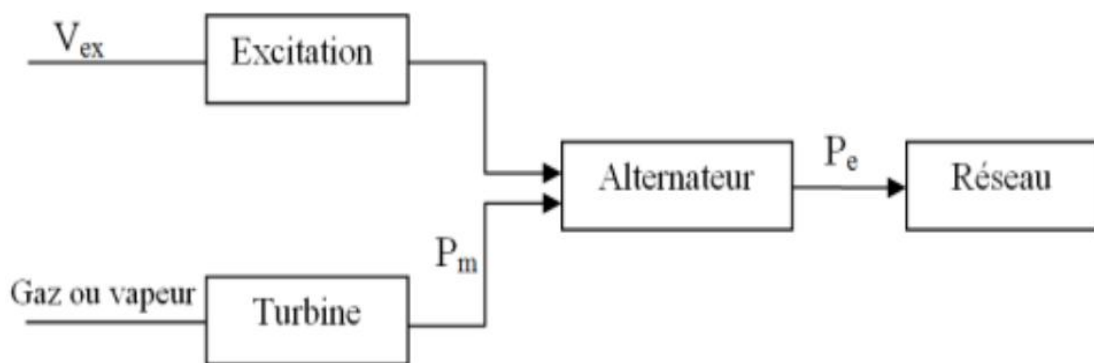


Figure I.8 : Le système turbo-alternateur [13]

I.4.4 Alternateur :

L'alternateur est l'élément qui permet la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique fournie au réseau, il est constitué d'un rotor, solidaire du rotor de la turbine,

d'un stator qui porte les bobinages induits produisant le courant triphasé vers la charge et le dispositif d'excitation du rotor [11]

I.4.5 Principaux éléments de l'alternateur :

○ Le Rotor :

C'est la partie tournante (pour des machines de faible puissance, c'est un aimant permanent), sinon c'est un électroaimant qui est alimenté (excité) en courant continue, génère P paires de pôles. Il existe des rotors à pôle saillantes avec un nombre de pôle élevé (c'est pour des machines tournantes à faible vitesse), on a aussi des pôles lisse ou entrefer constant, qui sont adopté pour les alternateurs de forte puissance donc la fréquence de rotation est élevée (turbo alternateur), En extrémité de fût du rotor, un dispositif de frettes permet de maintenir en place les têtes de bobines et contenir l'action de la forte force centrifuge sur les composants d'assemblage [11]



Figure I.9 : Rotor à Pôles lisses d'un alternateur haut tension [7]

○ Le Stator :

Le stator constitue la partie fixe de l'alternateur, du point de vue électrique, le stator d'un alternateur est identique à celui d'un moteur asynchrone triphasé, il se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé, l'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre [11]

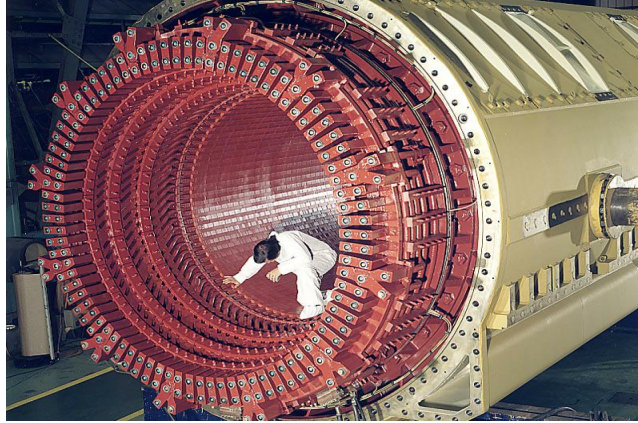


Figure I.10 : Stator d'un alternateur haut tension [7]

I.5 Les Types d'alternateur :

I.5.1 Alternateur à rotor à pôles saillants

La partie avant de l'arbre on a deux bagues de prise de courant. Ce rotor est employé dans les machines à vitesse réduite de l'ordre de 1000 à 1500 tr/mn comme les turbines hydrauliques (alternateurs hydrauliques) [11]

I.5.2 Alternateur à rotor à pôles lisses

Ce rotor est réalisé sous forme d'un cylindre sans pôles saillants. Il est employé dans les machines à grande vitesse de l'ordre de 1500 à 3000 tr/min comme les turbines à vapeur (les turbo-alternateurs) [11]

I.6. Principe de fonctionnement

L'alternateur est une machine synchrone, ce qui signifie qu'il y a un parfait synchronisme entre la vitesse de rotation du rotor et de la vitesse du champ tournant. En d'autres termes, il n'y a pas de « glissement ». Sous l'effet d'un champ électrique permanent délivré par le circuit d'excitation et tournant à la vitesse de rotation de la turbine, le rotor est l'origine d'un flux d'induction magnétique Φ variable, d'après la loi de Faraday, l'alternateur permet d'obtenir du courant électrique grâce au variation du flux d'induction magnétique Φ à travers les enroulements statorique pendant un intervalle de temps permettent de créent une force électromotrice induite aux bornes des enroulements statorique [8]

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$$\Phi = N B S$$

Φ : Flux d'induction magnétique à Travers la bobine. En Weber (Wb)

B : Champ magnétique de l'aimant, en ampère par mètre (A/m)

S : Vecteur surface de la bobine. En (m²)

N : nombre de spire de la bobine

e : force électromotrice induit, en volts (V)

I.6.1. Représentation vectorielle :

On peut donner un schéma simplifié d'une phase d'alternateur dans lequel apparaissent les grandeurs de f.é.m., de tension et de courant débité par cette phase [10]

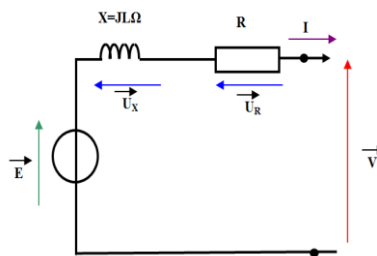


Figure I.11 : Représentation schématique de l'alternateur (une phase) [10]

Où :

- **E** : est la f.é.m. vide, en dehors de toute charge externe ; elle est exprimée en volts
- **V** : est la tension aux bornes d'un enroulement de la machine, exprimée en volts.
- **I** : est le courant d'induit, débité par la phase ; il est exprimé en Ampères
- **R** : est la résistance de l'enroulement d'induit ; exprimée en Ohms
- **X** : est la réactance synchrone de la machine, exprimée en Ohms.

L'inductance **L** du schéma tient compte à la fois de l'inductance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit.

1.6.2 Caractéristique vectorielle de Fresnel :

La représentation de Fresnel permet de bâtir un graphe sur lequel les différentes grandeurs électriques sinusoïdales participant au système apparaissent avec leur module et leur phase, c'est à dire, le décalage temporel entre elles. Par exemple, on sait que la chute de tension aux bornes de la résistance d'induit « **r** » se trouve en phase avec le courant de charge qui la traverse ($\varphi = 0$). Au contraire, la chute de tension due à la réactance synchrone **L ω** à profil inductif est en quadrature avant sur le courant qui la traverse ($\varphi < 0$). Sur ce graphe apparaissent : [13]

- L'angle, caractéristique du déphasage introduit par la charge à laquelle est connecté l'alternateur
- L'angle θ , existant entre la f.e.m de la machine et la tension aux bornes, est l'angle interne

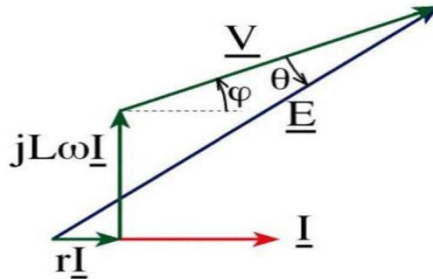


Figure I.12 : Diagramme de Fresnel de l'alternateur [13]

I.7. Analyse de fonctionnement d'un alternateur

I.7.1. Caractéristique à vide de la machine :

A vide $I = 0$, le rotor est entraîné à la fréquence de rotation n constante. On relève, en fonction du courant d'excitation I_e , les variations de la tension aux bornes d'un enroulement ; à vide $V_0 = E$, Tant que le courant d'excitation dans l'inducteur I_e ne dépasse pas une certaine limite ($I_e \text{ max}$), la valeur efficace E de la f.é.m. est proportionnelle à ce courant. C'est le courant I_e qui détermine le flux magnétique Φ dans l'entrefer de la machine.

Le seul champ régnant dans l'entrefer est alors celui créé par le courant rotorique. Ce champ tourne à la vitesse de rotation Ω du rotor et induit dans les bobinages statoriques une f.é.m. par enroulement de pulsation $\omega = 2\pi f = p\Omega$ et de valeur efficace $E_0 = KNf\Phi_0$, avec p , nombre de paires de pôles, K , coefficient de Kapp, N , nombre de brins actifs et Φ_0 , flux sous un pôle.

En associant des nombres complexes aux vecteurs E_0 et Φ_0 et en tenant compte de la relation qui lie leurs normes, on peut traduire le premier diagramme de Fresnel par la relation [13]

$$E_0 = -jKNf\Phi_0$$

(I.2)

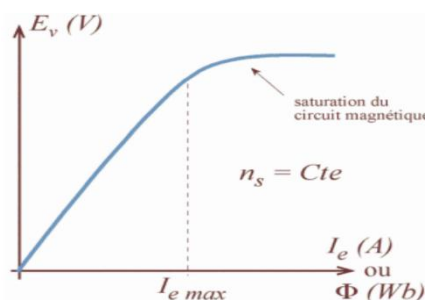


Figure I.13 : caractéristiques à vide [13]

Lorsqu'on augmente graduellement le courant d'excitation tout en observant la tension E_0 entre une phase et le neutre N. On constate que E_0 augmente d'abord proportionnellement à I_e cependant, au fur et à mesure que le flux augmente, l'acier se sature, et la tension croît de moins en moins pour une même augmentation de I_e . En effet si l'on trace la courbe de E_0 en fonction de I_e on obtient une courbe de saturation semblable à celle d'une génératrice à courant continu

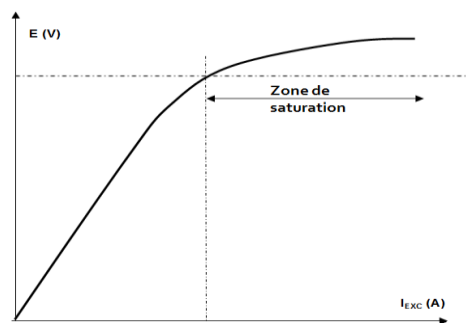


Figure I.14 : Courbe de saturation de l'alternateur montrant la tension induite en fonction du courant d'excitation [13]

I.7.2. Caractéristique en charge de la machine :

Il y a deux types de caractéristiques en charge :

- Les caractéristiques qui montent avec l'augmentation de la tension disponible aux bornes en fonction du courant de charge I .
- Les caractéristiques de réglage qui montrent comment il faut faire varier le courant inducteur pour maintenir la tension U constante

Le Comportement d'un alternateur dépend de la nature de la charge qu'il alimente. On distingue quatre types de charge [13]

1-charge résistive **2-** charge capacitive **3-**charge inductive **4-** réseau infini

La caractéristique de l'alternateur est tracée ci-après pour 3 types de déphasage distincts

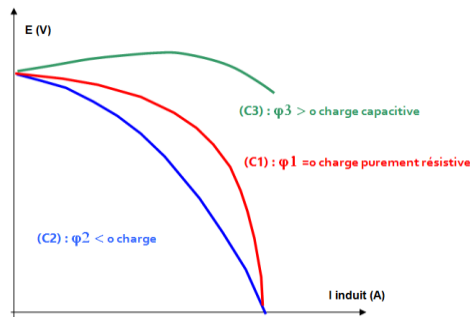


Figure I.15 : Caractéristique en charge de l'alternateur par différentes charges [13]

La courbe C1

Elle correspond à une charge purement résistive. La tension au stator décroît à mesure que le courant induit augmente, donc la charge de l'alternateur augmente.

La courbe C2

Cette courbe correspond à une charge résistive et inductive. Elle est entièrement au-dessous de la courbe C1 ; pour un courant d'intensité déterminée $I(A)$ et avec la même excitation I_e , la chute de tension est d'autant plus grande que la charge est inductive.

La courbe C3

Elle correspond à une charge résistive et capacitive. Elle est entièrement située au-dessus de C1; pour un courant d'intensité déterminée $I(A)$ et avec la même excitation I_e , la chute de tension est d'autant plus petite que la charge est capacitive

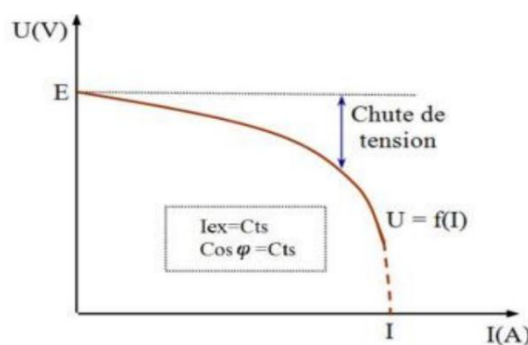


Figure I.16 : Caractéristiques d'un alternateur en charge [13]

La figure (I.16) montre que la chute de tension interne est très importante, pour un alternateur en charge, ce qui nécessite une régulation de tension très efficace pour maintenir une tension constante aux bornes de l'alternateur du régime à vide jusqu'au régime nominal

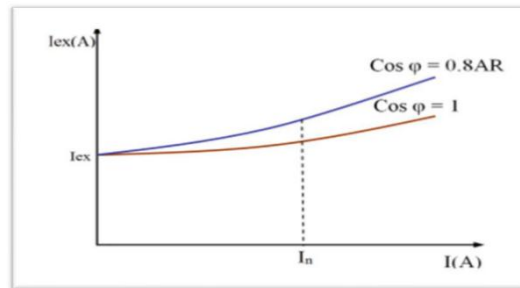


Figure I.17 : Caractéristique de réglage.

Pour l'étude du dispositif régulateur de tension automatique, il est utile de tracer la caractéristique de réglage $I_{ex} = f(I)$, la tension U avec le facteur de puissance $\cos\phi$ constant. On remarque que à l'aide des courbes de réglage, il est possible de déterminer en fonction du courant débité et du déphasage, le réglage de la valeur de I_{ex} avec le maintien de la tension U . Ce dispositif est un régulateur de tension.

I.8. Couplage des Alternateurs :

Pour coupler un alternateur sur un réseau ou même avec un autre alternateur, il faut de respecter les grandeurs existantes du réseau comme la fréquence et la valeur de la tension. Pour ajuster la fréquence, il nous suffira de jouer sur la vitesse du moteur d'entraînement et pour la tension, il nous faudra jouer sur la valeur du courant d'excitation. Coupler un alternateur sur un réseau signifie simplement que l'on couple deux alternateurs ou plus en parallèle. En effet, comme le réseau est lui-même alimenté par un alternateur, dans une centrale, et que nous, nous envisageons également d'alimenter le réseau.

I.8.1. Conditions de couplage

Il faut vérifier les points suivants :

❖ La même fréquence :

Nous avons vu dans la théorie de l'alternateur synchrone que la fréquence de la tension fournie dépendait du nombre de variation de flux en fonction du temps. Ce dernier est fonction de la vitesse du rotor, donc de la vitesse du moteur d'entraînement. Nous devons donc régler la vitesse de rotation [13].

❖ La même tension

Nous savons que pour qu'un alternateur synchrone délivre une tension, nous devons impérativement vérifier deux choses, la présence d'un flux d'une part et une variation de ce flux d'autre part, savons qu'il est fonction du courant d'excitation. Le flux lui va induire les bobinages

statoriques qui seront le siège de la FEM. Comme la tension est aux chutes de tension près égale à la FEM, je peux dire que la tension sera réglée par ce même courant d'excitation

La tension et la puissance active étant fixées, ne pourront modifier que la puissance réactive échangée avec le réseau. Pour le montrer, on peut se contenter 'une étude simplifiée à partir du modèle de **Behn-Eschenburg**, en négligeant la résistance d'induit.

Comme V est constant, $L\omega I \cos\phi$ est proportionnel à $P = 3VI \cos\phi$. A puissance active constante (réglée, rappelons-le par le dispositif d'entraînement), BC est constant et C se déplace sur une parallèle à V lorsque E_0 , donc J , varie. Ceci a pour effet de faire varier le terme $L\omega I \sin\phi$, donc $Q = 3VI \sin\phi$, la puissance réactive pouvant ainsi être absorbée ou fournie suivant l'état d'excitation de la machine [13]

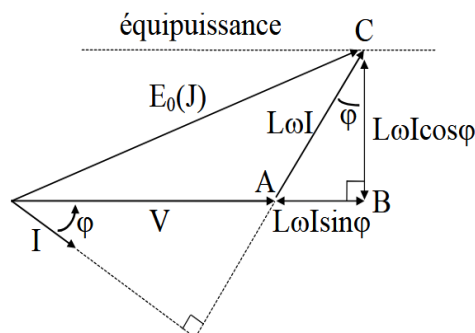


Figure I.18 : : modèle de Behn-Eschenburg pour modifier la puissance réactive [13]

La même succession des phases

Les deux alternateurs représentés sur la figure (I.19), possèdent la même fréquence et la même tension, que les vecteurs V_1 et V_1' sont identiques et qu'ils tournent à la même vitesse. Le potentiel entre V_1 et V_1' est donc nul, on remarque que le potentiel entre V_2 et V_2' est maximum ce qui montre bien que dans de telle condition nous ne pourrions en aucun cas réaliser la mise en parallèle car nous aurons un flash au commutateur. Nous devons donc réaliser la succession des phases de telle sorte qu'en tout moment, V_1 soit sur V_1' , V_2 soit sur V_2' et V_3 soit sur V_3' . Cette mise en phase peut être réalisée Sens inverse, soit en inversant le sens de rotation du moteur d'entraînement d'un des alternateurs soit en inversant deux phases sur l'un des alternateurs [13]

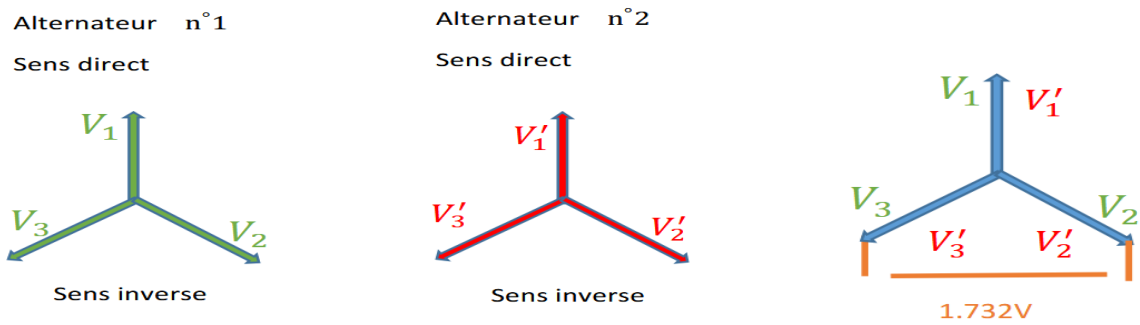


Figure I.19 : Exemple de couplage des phases entre 2 alternateurs [13]

En pratique :

La fréquence est vérifiée à l'aide d'un fréquencemètre et la tension à l'aide d'un voltmètre. La succession des phases est vérifiée à l'aide de feux lumineux.

Précisons encore que dans la pratique nous considérerons que le réseau de vecteurs de l'alternateur principal sera fixe et que c'est le réseau de vecteurs de l'alternateur à accoupler qui tourne. Nous pourrions réagir et dire que si les fréquences sont identiques, les réseaux ne devraient pas se mettre en rotation l'un par rapport à l'autre. Il ne faut pas oublier qu'en pratique il nous sera impossible de garantir une fréquence identique, rien que par le fait que la fréquence du réseau peut avoir une légère oscillation et que de plus les appareils de mesure que nous allons utiliser ont eux aussi leur précision.

La figure (I-20) représenté le couplage d'un alternateur sur le réseau électrique en utilisation la technique de synchronisation avec des lampes [13]

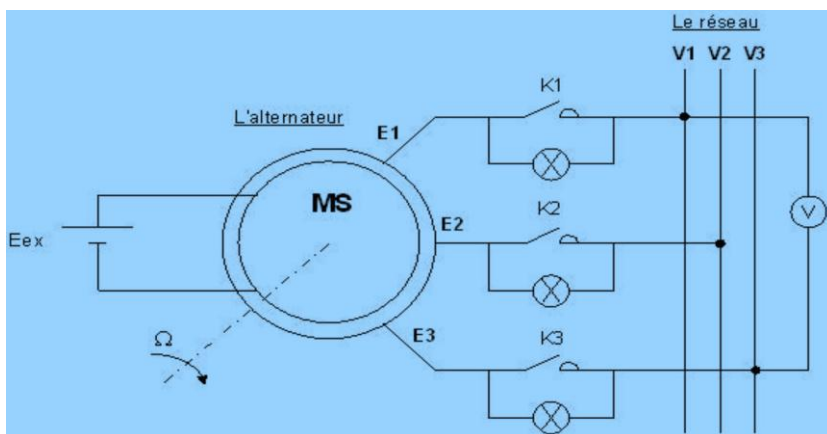


Figure I.20 : Couplage d'une machine synchrone sur un réseau [13]

I.9. Réaction magnétique d'induit :

Lorsque l'induit est fermé sur une charge, il est parcouru par des courants sinusoïdaux induits, qui à leur tour créent un flux variable qui perturbe l'état magnétique de la machine et modifie la valeur de la f.é.m. induite. La nécessité de conserver une tension constante à la sortie de la machine nécessite donc d'agir sur la valeur du courant d'excitation pour adapter la f.é.m. en fonction de la charge qui peut varier en intensité.

Les courants circulant dans les enroulements statoriques créent un champ supplémentaire, tournant à la même vitesse que celui généré par le rotor et se superposant à ce dernier. Ceci a pour effet de modifier le flux utile, donc la valeur de la f.é.m. induite, et constitue la réaction magnétique d'induit. Le phénomène est analogue à celui qui se produit dans les machines à courant continu. Il y a cependant une différence fondamentale par rapport à celles-ci. Dans le cas de la machine à courant continu, le champ statorique présente un décalage constant par rapport au champ rotorique et la réaction magnétique ne dépend donc que de l'intensité du courant d'induit, ce qui permet de la compenser grâce à des enroulements auxiliaires. Dans le cas des machines synchrones, par contre, la position du champ statorique dépend également du déphasage existant entre les courants et les tensions. La compensation par "construction" n'est donc pas possible, et il faut s'attendre a priori à des variations importantes de la tension aux bornes de la charge. [13]

I.10. Influence d'une variation du courant de charge I :

Si on observe l'évolution des différentes grandeurs lorsque le courant de charge (le courant débité par l'alternateur), passe d'une valeur I_1 à I_2 (la tension V , la fréquence et le déphasage φ étant fixes) [13]

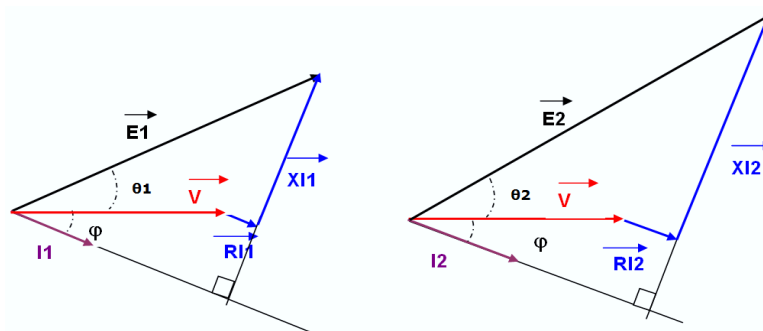


Figure I.21 : Diagramme de Behn-Eschenbourg de la variation de courant de charge [13]

On constate que V et φ étant constants, la f.e.m. doit varier. Or, $E = K.N.\Phi F$, ce qui n'est possible qu'en faisant varier le flux Φ , donc le courant d'excitation.

I.11. Excitation d'alternateur

Pour générer le champ magnétique nécessaire dans les alternateurs ont besoin d'un courant continu pour générer un champ qui ne varie pas dans le temps. Ce courant peut être fourni par différents systèmes d'excitations. Le rôle du système d'excitation est d'alimenter le rotor de l'alternateur avec un courant continu permettant de magnétiser la machine.

Le contrôle de l'excitation est basé sur un régulateur de tension numérique (AVR), qui contrôle l'allumage de ponts de thyristor afin d'alimenter l'alternateur avec un courant d'excitation variable.

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitation pour les génératrices synchrones se distinguent selon les types suivants [14 :

Système d'excitation à courant continu (DC)

- Système d'excitation à courant alternatif (AC)
- Système d'excitation statique.
- Auto-alimentation
- Excitation shunt
- Excitation compound
- Excitation shunt avec régulation électronique
- Emploi d'une dynamo excitatrice
- Emploi d'un alternateur d'excitation

L'équipement peut être configuré selon les demandes du système de contrôle.

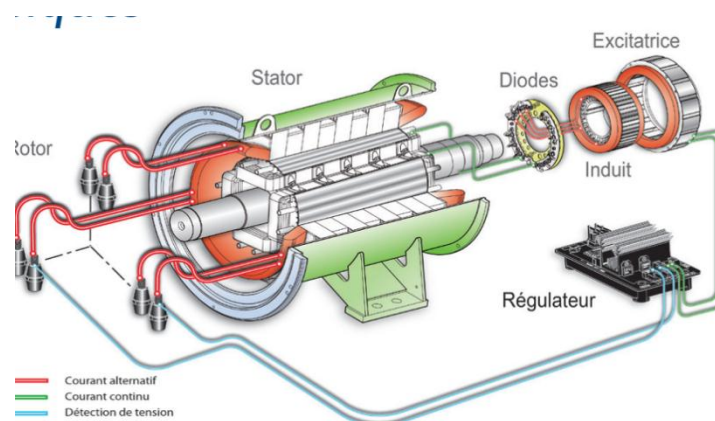


Figure I.22 : schéma d'excitation d'un alternateur [13]

I.12. Stabilité des alternateurs de puissance

La stabilité d'un système de puissance est la capacité d'un système d'énergie électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de retrouver le même état ou un autre état d'équilibre après avoir subi une perturbation, en gardant la plupart des variables de système dans leurs limites, de sorte que le système entier demeure en fonctionnement normal. Habituellement, la stabilité est divisée en trois groupes à savoir [12]

- La stabilité de l'angle de rotor (stabilité angulaire)
- La stabilité de tension
- La stabilité de fréquence

I.13. Différents types de stabilité :

I.13.1 .Stabilité statique :

Le domaine de la stabilité statique est le fonctionnement d'un alternateur raccordé à un réseau subissant de faibles perturbations ; correspondant au régime normal d'exploitation : variation de consigne de régulation, du régime de la machine, de la consommation, etc... [12]

I.13.2 . Stabilité dynamique :

Stabilité en régime dynamique L'étude de la stabilité en régime dynamique concerne toujours les petites déviations des variables d'état autour de leur point de fonctionnement. Ces déviations sont dues à une petite perturbation quelconque appliquée au système en état normal [12]

I.13.3. Stabilité transitoire :

La cause de l'instabilité en régime transitoire est une perturbation brusque et soudaine de forte amplitude et de courte durée (exemple: court-circuit). La condition de stabilité naturelle n'est plus respectée à cause du grand déplacement du point de fonctionnement [12]

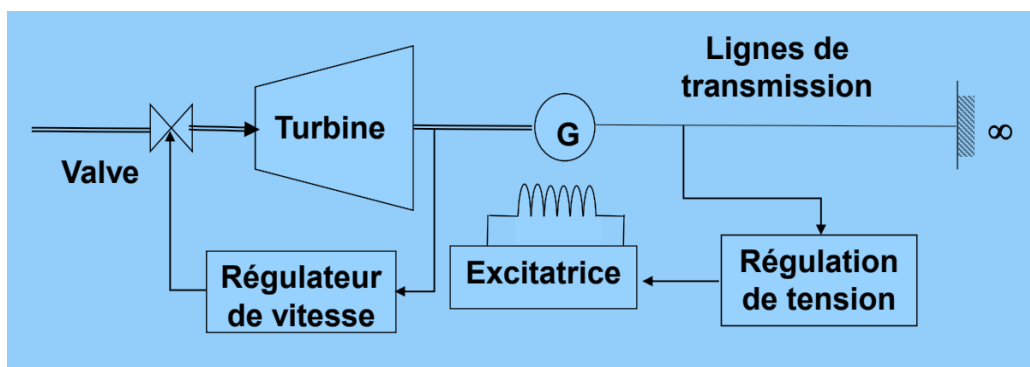


Figure I.23 : Synoptique général du réseau [12]

- 1- Induit de l'excitatrice
- 2- Redresseur tournant (6 diodes)
- 3- Roue polaire (inducteur principal)

I.15. Bilan des puissances d'un alternateur

✓ Puissance absorbée :

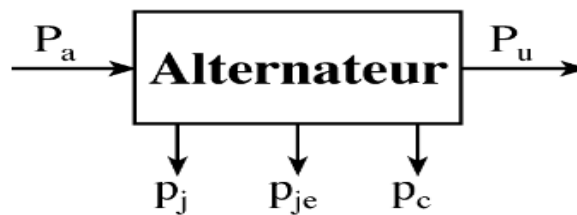


Figure I.25: bilan de puissance de l'alternateur [13]

La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur.

La puissance absorbée est mécanique.

$$P_a = \Omega_s \cdot C_m = 2\pi \cdot N_s \cdot C_m \quad (I.5)$$

Où

Ω_s : pulsation de rotation en rad.s⁻¹

N_s : vitesse en trs.s⁻¹

C_m : couple utile sur l'arbre en N.m

Si l'alternateur n'est pas auto-excité, il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor).

$$P_a = \Omega_s \cdot C_m + U_e \cdot I_e = 2\pi N_s C_m + U_e \cdot I_e \quad (I.6)$$

✓ Puissance utile

En triphasé avec une charge équilibrée de facteur de puissance $\cos \phi$ la puissance utile est :

$$P_u = \sqrt{3} UI \cos \phi \quad (I.7)$$

✓ Bilan des pertes :

Les pertes par effet joule dans l'inducteur sont données par :

$$P_{je} = U_e I_e = r_e I_e^2 \quad (I.8)$$

Les pertes par effet joule dans l'induit sont données par :

$$P_j = \frac{3}{2} R I^2 \quad (I.9)$$

Les pertes constantes P_c

Les pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge, elles sont généralement constantes.

✓ Rendement :

$$\eta = \frac{Pu}{Pa} = \frac{\sqrt{3}UI \cos\phi}{2\pi N_s C_m + P_c + U_e I_e}$$

(I.10)

Ceci peut être matérialisé à l'aide du schéma de la figure (I.30)

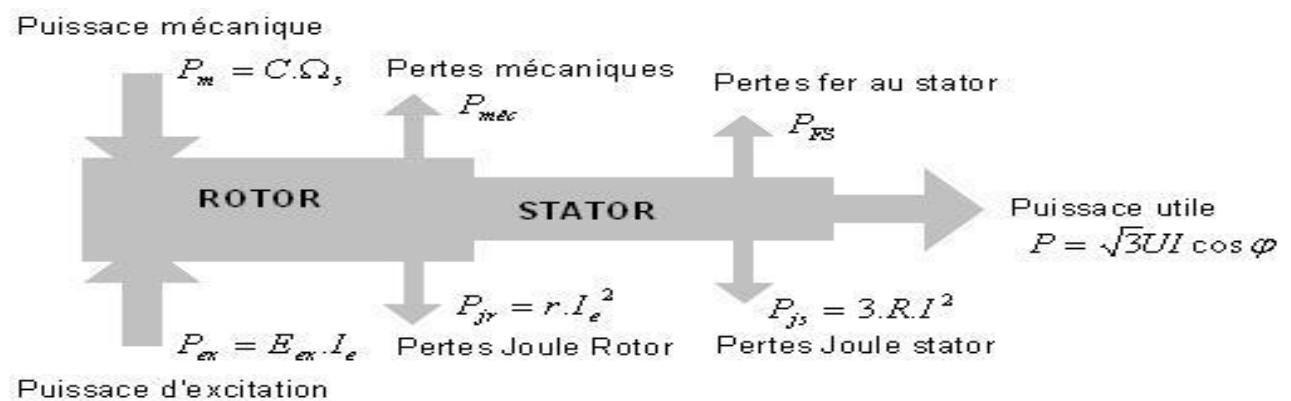


Figure I.23 : Synoptique du bilan [13]

I.16. Les types de transformateurs utilisés au niveau de la centrale

❖ Transformateurs élévateurs

Les transformateurs élévateurs sont conçus pour augmenter la tension de l'enroulement primaire à une tension plus élevée dans l'enroulement secondaire. Ces transformateurs sont couramment utilisés dans les systèmes de transport d'énergie, où des tensions élevées sont nécessaires pour minimiser les pertes sur de longues distances, au niveau de la centrale le transformateur élève la tension de 15KV à 400KV [9]

- Transformateurs abaisseurs

A l'inverse, les transformateurs abaisseurs sont utilisés pour réduire la tension de l'enroulement primaire à une tension plus faible dans l'enroulement secondaire. Ces transformateurs sont essentiels pour diverses applications, notamment la distribution d'énergie résidentielle et commerciale, ainsi que pour les appareils électroniques fonctionnant à des tensions plus basses, au niveau de la centrale le transformateur abaisse la tension de 15KV à 6.6 KV [9]

- Transformateurs de mesure

Ils sont des transformateurs spécialisés utilisés conjointement avec des instruments de mesure électriques, des relais et des dispositifs de protection. Ces transformateurs servent à isoler les équipements de mesure sensibles des hautes tensions et courants présents dans les systèmes électriques [9]]

Transformateurs d'isolement

Ils sont conçus pour fournir une isolation électrique entre deux circuits, empêchant le transfert de tension ou de courant d'un circuit à l'autre. Ils sont couramment utilisés pour protéger les équipements électroniques sensibles des boucles de masse, des pics de tension et du bruit électrique [9]

I.17. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre m'a permis d'explorer la centrale à cycle combiné Sonackter de Mostaganem et d'enrichir mes connaissances théoriques et pratiques. J'ai décrit la centrale et ses différents composants qui forment le cycle de production d'électricité. Comme, j'ai expliqué le fonctionnement du générateur, ses composants et ses principales caractéristiques. Donc, Le bilan de puissance, la stabilité du générateur, les différents transformateurs et le système de régulation automatique de tension (AVR) ont été expliqués. Cependant, le chapitre deux sera consacré à la modélisation de la machine pour analyser le système AVR et le système PSS, le système (AVR+PSS

Chapitre II : Modèle d'alternateur ce forme des blocs

II.1 Introduction

Sur la base des informations générales que nous avons abordées dans le chapitre précédent, concernant la présentation de la centrale à cycle combiné de Sonackter à Mostaganem, nous aborderons dans ce chapitre la modélisation de la machine synchrone (l'alternateur) et de ses différents sous-systèmes.

Comme nous l'avons appris lors de notre stage à la nouvelle centrale, le stabilisateur de réseau (PSS) est un complément idéal au système d'excitation pour améliorer la stabilité du réseau. C'est pourquoi nous avons souhaité implémenter un contrôleur flou et neuronal sur les systèmes de stabilisation du générateur (AVR + PSS) afin d'approfondir nos connaissances sur les techniques de réglage de la tension de sortie du générateur et, par conséquent, du contrôle du réseau.

Ce chapitre se concentrera donc sur diverses techniques de contrôle, telles que la régulation de tension et de fréquence et le stabilisateur de système de puissance de réseau électrique (PSS), pour améliorer la stabilité du générateur. Il fournira également un aperçu de la description générale de la logique floue et des réseaux de neurones

II.2. Structure d'un système de production de puissance

Le schéma de la figure (II.1) montre les différents sous-systèmes de production de la puissance électrique en utilisant les machines synchrone (alternateur).

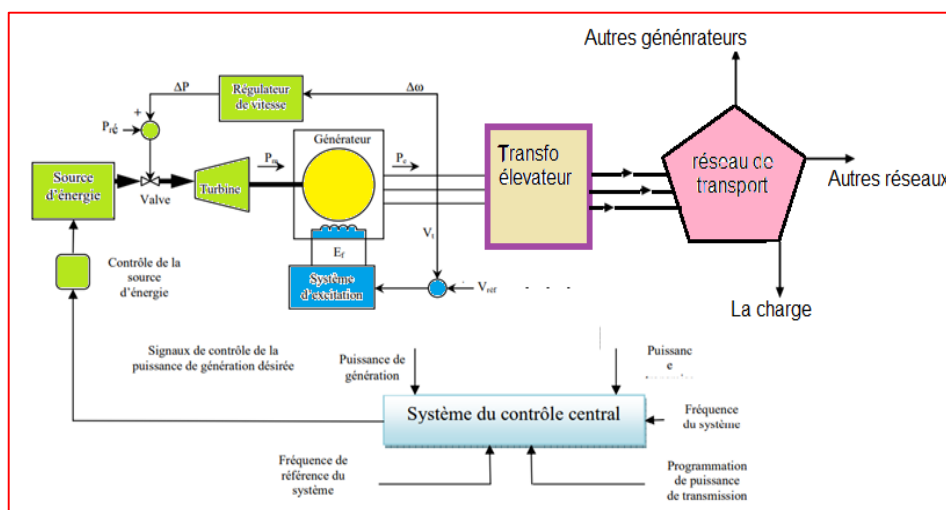


Figure II.1 : Structure d'un système de puissance

II.2.2. La modélisation des alternateurs :

En générale la modélisation des machines électriques triphasées est basée sur la détermination d'un modèle réduit de la machine. Donc ce modèle consiste à la projection des bobines de la machine sur les axes **q** et **d** appelé transformation de Park. Cette transformation nous permet de obtenir une machine biphasée. Quoique les équations mathématiques du modèle demandent beaucoup de mise en forme et des hypothèses simplificatrices, mais il facilite l'analyse de la machine. Les équations de la machine biphasée sont simples avec un nombre de paramètres réduit exemple l'équation du couple [7]

- Expression de couple :

L'expression du couple électromécanique T_{em} de la machine biphasée avec un nombre de pôles P est donnée par :

$$C_{em} = \frac{P e_m}{\omega} = \frac{3p}{2} (\varphi_d i_q + \varphi_q i_d) \quad (\text{N.m}) \quad (\text{II-1})$$

Avec :

P_{em} : est la puissance électromécanique en w.

ω : est la vitesse angulaire du rotor en rad/s

La valeur du couple électromécanique est positive dans le cas du fonctionnement en moteur et négative dans le cas de génératrice [7]

- Equation mécanique :

L'équation qui définit le mouvement de rotor est:

$$C_{em} + C_{mec} - C_{amor} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{N.m}) \quad (\text{II-2})$$

J : moment d'inertie (Kg. m^2)

ω : vitesse angulaire rotorique (rad/s)

Le couple électromécanique C_{em} et le couple mécanique C_{mec} sont dans la direction de rotation du rotor. Par contre, le couple d'amortissement C_{amor} est dans la direction opposée de rotation du rotor [7]

II.2.3 Modèle électrique de la machine synchrone

Bien que la stabilité d'énergie produite par l'alternateur peut être considérablement améliorée en utilisant des systèmes en boucle fermée avec des systèmes de contrôle adaptés. Cependant des

l'arbre moteur et la chaîne est réalisée via une roue dentée, comme le montre la figure (II.1).

Efforts de recherche importants sont déployés pour trouver les meilleurs contrôleurs. Le logiciel utilisé pour notre étude est Matlab-Simulink, ce logiciel utilise principalement les équations électrique et mécanique pour le modèle électrique et mécanique de la machine synchrone. D'autre part, la transformation de Park est essentiellement utilisée pour la simplification des calculs des tensions

Statoriques pour le modèle électrique de la machine, ainsi pour le feed back des tensions statoriques vers le circuit d'excitation puisque cette dernière forme une boucle fermée de régulation avec le modèle électrique de l'alternateur.

Voici le modèle électrique de la machine synchrone capturé depuis le logiciel utilisé de notre simulation :

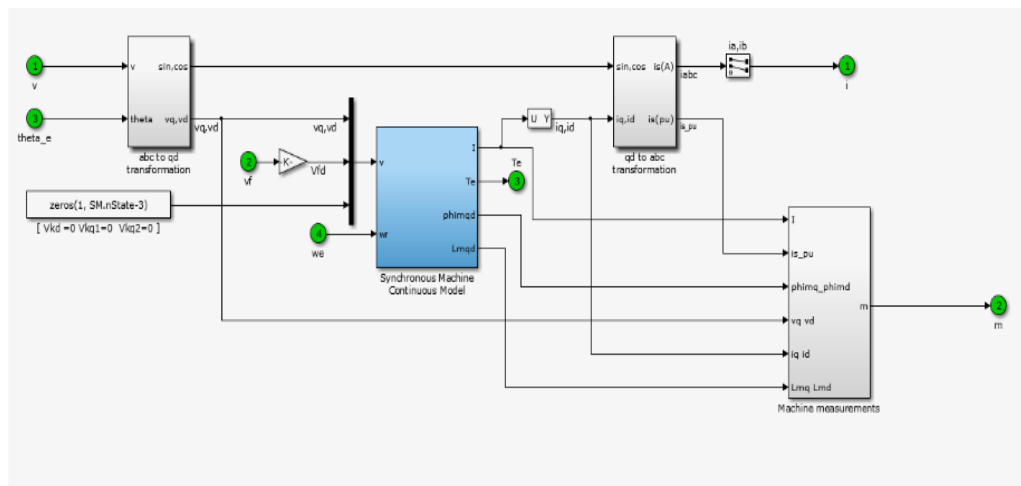


Figure II.2 : Modèle électrique de la machine synchrone

Voici le modèle mécanique de la machine synchrone capturé depuis le logiciel utilisé de notre simulation :

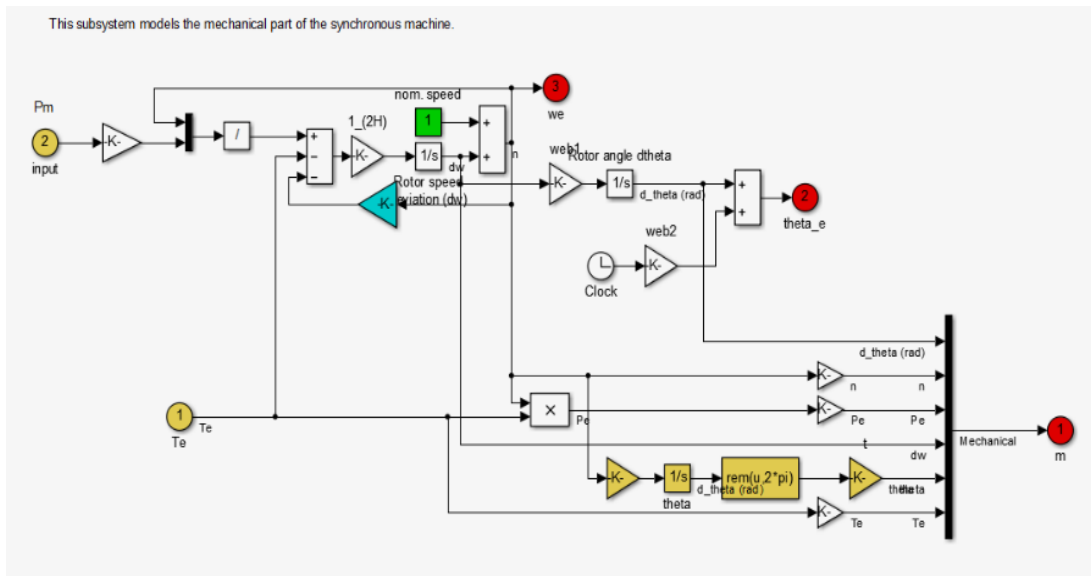


Figure II.3 : Modèle mécanique de la machine synchrone

II.2.4.. Le système d’excitation de l’alternateur :

En générale, l’excitation des alternateurs effectue par une génératrice à courant continue qui entraînée par l’arbre, ou par le réducteur de vitesse pour les puissances les plus élevées

- Le prélèvement de la puissance d’excitation est fait sur l’arbre du groupe par un alternateur d’excitation dont l’enroulement induit alimentant un pont redresseur.
- La puissance d’excitation est partagée entre deux transformateurs. Un transformateur de courant alimentant un pont de diodes et un transformateur de tension alimentant un pont de thyristors contrôlés par le régulateur de tension.

Le groupe étant à la vitesse nominale, la tension stator est égale à la consigne du régulateur de tension. Le dispositif de synchro-couplage agit sur la vitesse du groupe pour la synchronisation avec le réseau et sur la consigne de la régulation de tension pour l’égalité des tensions.

Après couplage, la prise de charge, s’effectue à tension stator constante et égale à la consigne de tension [13]

II.2.5. Les caractéristiques du système d’excitation

Un système d’excitation doit être conçu pour donner rapidement une surexcitation pour arrêter la réduction du flux magnétique de la machine, et éviter la perte du synchronisme, dans le

cas, ou le défaut n'est pas trop sévère ou s'il est écarté rapidement. Cette surexcitation minimise la chute de tension transitoire que subissent les récepteur proche la machine synchrone.

Le déclenchement de la machine initialement en charge se produit la surtension, dans des limites non dangereuses, le système d'excitation doit alors désexciter de manière à maintenir la surtension aux bornes de la machine.

La surtension est caractérisée par la tension maximale que peut délivrer le système d'excitation et la vitesse d'accroissement de tension d'excitation [13]

II.3. Les type d'excitation :

Classés en trois grandes catégories en fonction de la source d'énergie d'excitation :

- Systèmes d'excitation CC
- Systèmes d'excitation CA
- Systèmes d'excitation statique

II.3.1. Systèmes d'excitation CC :

Ce système utilise des générateurs à courant continu comme source d'énergie ; entraîné par un moteur ou par l'arbre du générateur principal. Les régulateurs de tension vont du premier type rhéostatique utilisant des amplificateurs rotatifs magnétiques. La figure (II-4) montre un schéma simplifié d'un système d'excitation CC typique avec un régulateur de tension **Ampli dyne** [13]

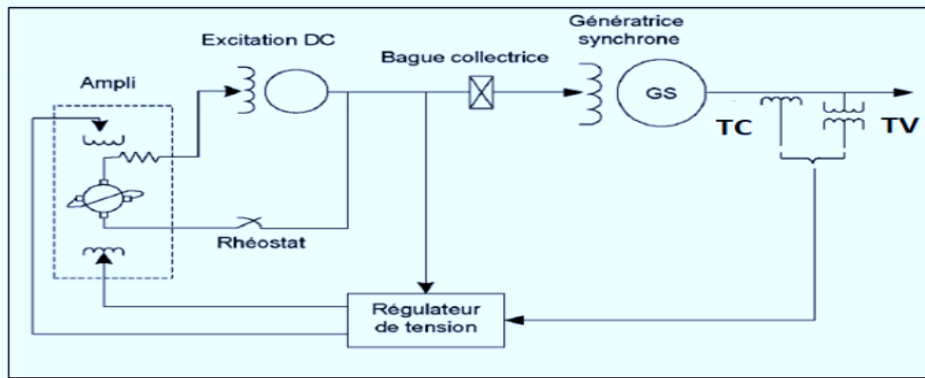


Figure II.4 : Système d'excitation CC avec régulateurs de tension amplidyne [13]

II.3.2. Systèmes d'excitation CA :

.Le système d'excitation à courant alternatif (CA) L'excitation à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant de la machine synchronisée. Le redresseur utilisé peut aussi être soit commandé ou non. Dans le cas d'un redresseur non commandé, le réglage s'effectue sur les enroulements de champ au niveau de l'excitation. Les Figures (II-5) Et (II-6) montrent l'excitation de type CA muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement.

L'excitatrice est sur le même arbre que la turbine-générateur la sortie CA de l'excitatrice est redressée par des redresseurs contrôlés ou non contrôlés, les redresseurs peuvent être fixes ou rotatifs [13]

II.3.3. Systèmes redresseurs stationnaires :

La sortie CC vers le champ du générateur principal alimentée par des bagues collectrices lorsque des redresseurs non contrôlés sont utilisés, le régulateur contrôle le champ de l'excitatrice CA ; la Figure (II-5) montre un tel système [13]

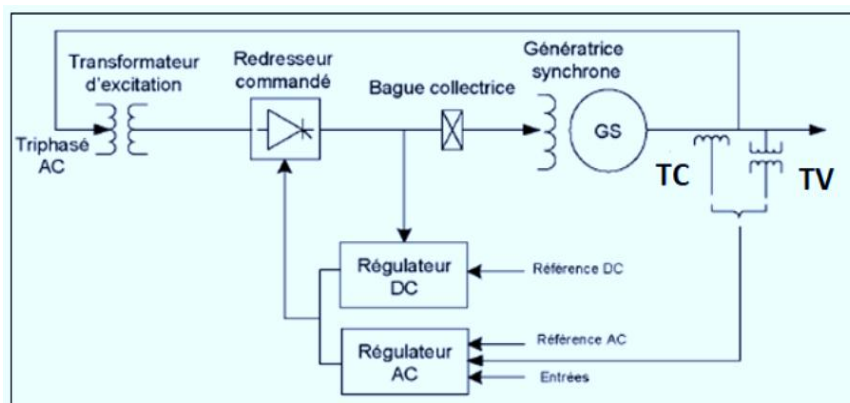


Figure II.5 : Système d'excitation de type AC avec redresseur non commandé [13]

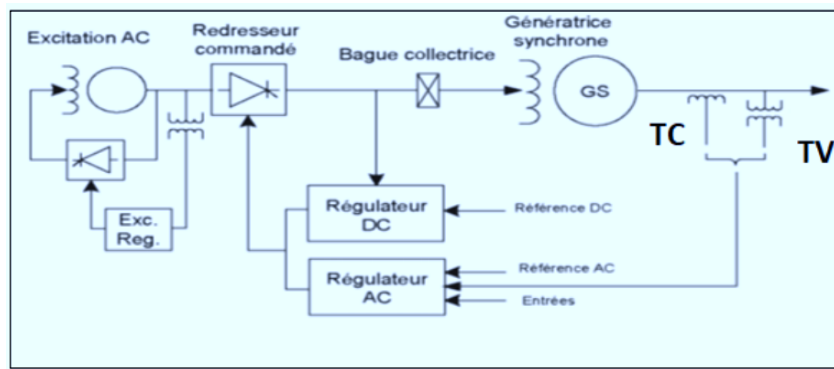


Figure II.6 : Système d'excitation CA avec redresseur commandé [13]

II.3.4. Systèmes d'excitation statique :

Tous les composants sont statiques ou stationnaires alimentés en courant continu directement le champ du générateur principal via des bagues collectrices, l'alimentation électrique des redresseurs provient du générateur principal ou du bus auxiliaire de la station [13]

II.3.5. Système redresseur à source de potentiel contrôlée :

La puissance d'excitation est fournie par un transformateur à partir des bornes du générateur principal régulé par un redresseur contrôlé communément appelé alimenté par bus ou alimenté par transformateur système d'excitation statique très petite constante de temps inhérente la tension de sortie maximale de l'excitateur dépend de la tension alternative d'entrée ; en cas de défaut du système, la tension de plafond disponible est réduite [13]

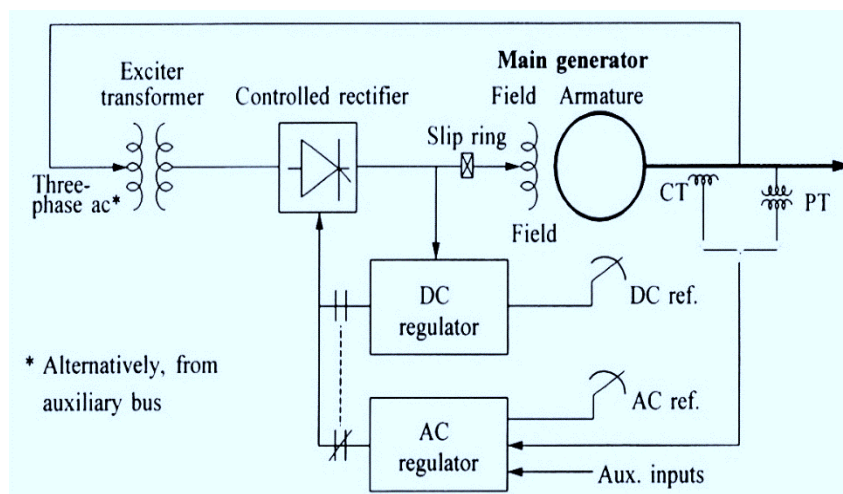


Figure II.724 : Système d'excitation à redresseur contrôlé par source de potentiel [13]

II.3.6. Système redresseur à source composée :

L'alimentation de l'excitatrice est formée en utilisant le courant et la tension du générateur principal réalisé grâce à un transformateur de potentiel de puissance (PPT) et un transformateur de courant saturable (SCT) le régulateur contrôle la sortie de l'excitateur par saturation contrôlée du transformateur d'excitation lors d'un défaut du système, avec une tension de générateur déprimée, l'entrée de courant permet à l'excitateur de fournir une capacité de forçage de champ élevée [13]

Un exemple est le GE SCT-PPT.

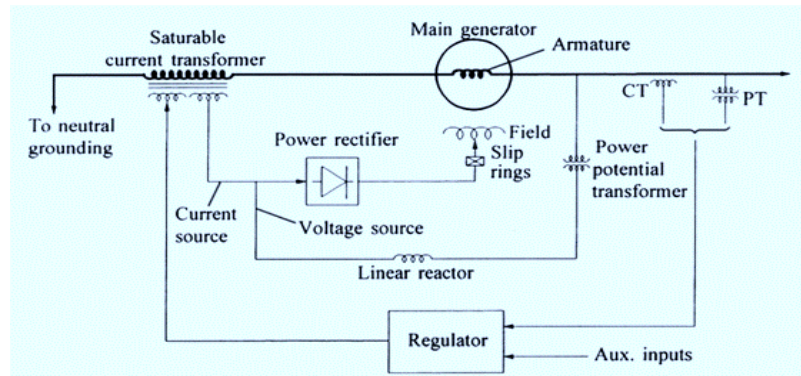


Figure II.8 : : Système d'excitation à redresseur à source composée [13]

II.3.7. Système redresseur à commande composée :

Il utilise des redresseurs contrôlés dans les circuits de sortie de l'excitatrice et la composition de la tension et du courant dans le stator du générateur, le résultat est un système statique à réponse initiale élevée avec une capacité de forçage complète en cas de défaut [13]

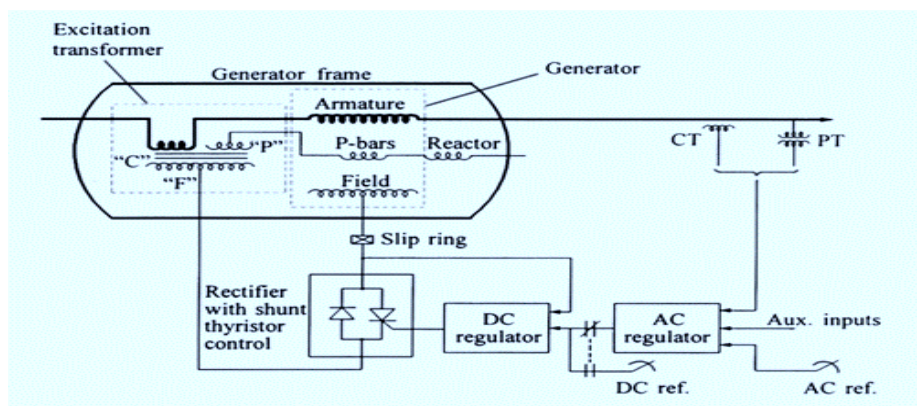
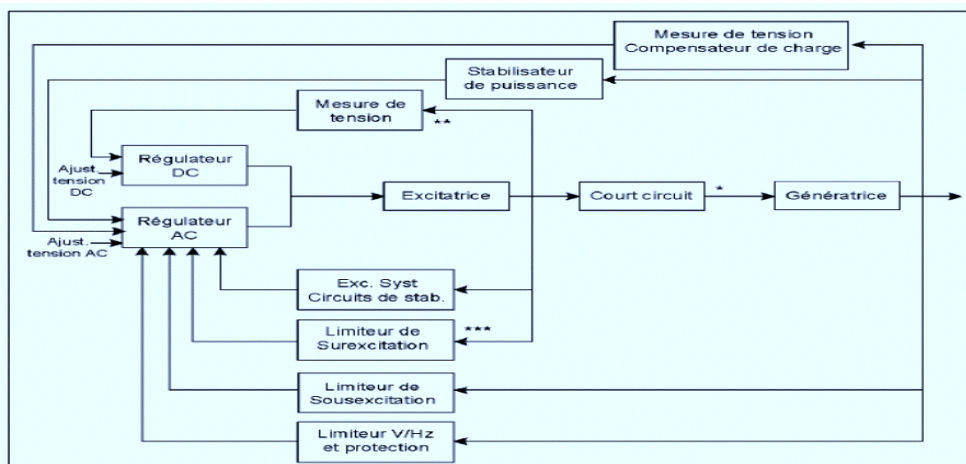


Figure II.9 : : Système d'excitation redresseur à commande composée GENERREX©IEEE1976 [13]

II.4. Fonctions de contrôle et de protection de circuit d'excitation :

Un système de contrôle d'excitation moderne est bien plus qu'un simple régulateur de tension il comprend un certain nombre de fonctions de contrôle, de limitation et de protection qui aident à répondre aux exigences de performance identifiées précédemment. La figure (II-10) illustre la nature de ces fonctions et la manière dont elles s'interfacent les unes avec les autres. Le système donné peut inclure seulement certaines ou toutes ces fonctions en fonction de l'application spécifique et du type d'excitateur [13]

- ☞ **Fonctions de contrôle :** régulé des quantités spécifiques au niveau souhaité ;
- ☞ **Fonctions limitatives :** s'empêcher certaines quantités de dépasser les limites fixées ;
- ☞ **Fonctions de protection :** retirer les composants appropriés ou l'unité du service si l'un des limiteurs tombe en panne ;
- ☞ **Régulateur AC :** la fonction de base est de maintenir la tension du stator du générateur de plus, d'autres auxiliaires agissent par l'intermédiaire du régulateur de courant alternatif ;
- ☞ **Régulateur CC :** maintient constante la tension du champ du générateur (commande manuelle), utilisé pour les tests et le démarrage, et lorsque le régulateur de courant alternatif



est défectueux

Figure II.10 : Circuits de contrôle et de protection du système d'excitation [13]

II.4.1 Circuits de stabilisation du système d'excitation :

Les systèmes d'excitation avec des retards importants ont de faibles performances dynamiques inhérentes à moins qu'un gain de régulateur à régime permanent très faible ne soit utilisé, l'action de contrôle est instable lorsque le générateur est en circuit ouvert une compensation en série ou par rétroaction est utilisée pour améliorer la réponse dynamique. La forme de compensation la plus couramment utilisée est une rétroaction dérivée (figure II.34) [13]

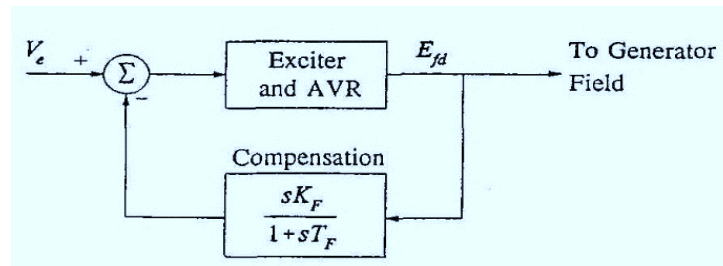


Figure II.11 : Stabilisation du système de contrôle d'excitation à rétroaction dérivée [13]

II.4.2 Stabilisateur de système d'alimentation (PSS) :

Le (PSS) utilise des signaux de stabilisation auxiliaires (tels que la vitesse de l'arbre, la fréquence, la puissance) pour moduler la tension du champ du générateur afin d'amortir les oscillations du système.

L'utilisation d'un stabilisateur de puissance dans les systèmes d'excitation, est souvent requise, car cet élément permet essentiellement un amortissement des oscillations de puissance surtout dans le cas de faibles signaux, ce qui assure ainsi une meilleure stabilité [13]

II.4.3 Compensateur de charge :

Utilisé pour réguler une tension à un point situé à l'intérieur ou à l'extérieur du générateur obtenu en intégrant des circuits supplémentaires dans la boucle **AVR**, comme il est montré sur la figure. II.12 ;

Avec R_C et X_C positif, le compensateur régule une tension en un point du générateur; Utilisé pour assurer un partage approprié des **VAR** entre les générateurs reliés entre eux à leurs terminaux ;

Couramment utilisé avec les unités hydrauliques et les unités thermiques à composés croisés Avec R_C et X_C négatif, le compensateur régule la tension à un point au-delà des bornes du

générateur couramment utilisé pour compenser la chute de tension à travers un transformateur élévateur lorsque les générateurs sont connectés via des transformateurs individuels [13]

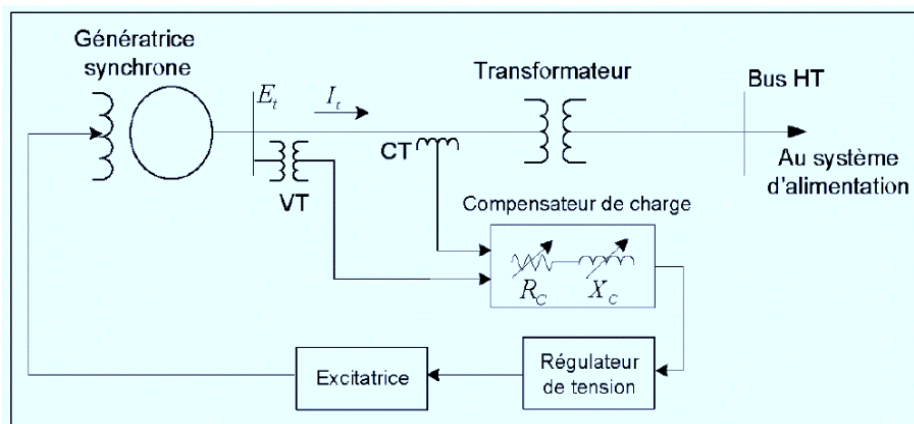


Figure II.12 : Schéma de principe d'un compensateur de charge [13]

II.5. Introduction sur la régulation :

La régulation consiste à agir de façon à ce qu'une mesure soit égale à une consigne. Si l'on cherche à atteindre une consigne (de position ou de température), on parlera de poursuite ou asservissement ; si l'on cherche à éliminer des perturbations pour qu'une valeur reste constante (ex : garder la température intérieure de la voiture constante quelle que soit la température extérieure), on parlera de régulation. L'industrie utilise à foison des systèmes d'asservissement ou de régulation : que ce soit pour gérer le débit d'un fluide dans une conduite, la température d'un produit, la hauteur d'un niveau de cuve...

Historiquement, les régulateurs n'étaient pas intégrés dans l'unité centrale des Automates Programmables Industriels, mais se présentaient sous forme de modules autonomes gérant leur environnement propre (acquisition, calcul, commande...). De plus en plus, les automates intègrent les régulateurs au sein de l'unité centrale. Soit sous la forme de module autonome émulant un régulateur externe au sein de l'UC (évitant ainsi la redondance de câblage qu'imposait l'utilisation de régulateur externe), soit sous la forme de blocs primitifs intégrables au sein du code au même titre qu'un bloc temporisateur.

Les régulateurs permettent ainsi de lier plus simplement les parties séquentielles et continues du procédé. La régulation fait partie intégrante de la qualité de production : c'est donc un point non négligeable de la chaîne de valeurs d'une installation [13]

II.5.1 Etude de système régulation de l’alternateur :

Lorsqu’un alternateur débit sur une charge isolée (ou dans un réseau), il se produit dans cet alternateur une chute de tension dépendant de l’intensité et du déphasage du courant ; lorsque ces grandeurs varient la tension aux bornes varie également et il faut agir sur l’excitation pour maintenir la tension constante aux bornes de l’alternateur, c’est donc ici apparait le rôle du régulateur.

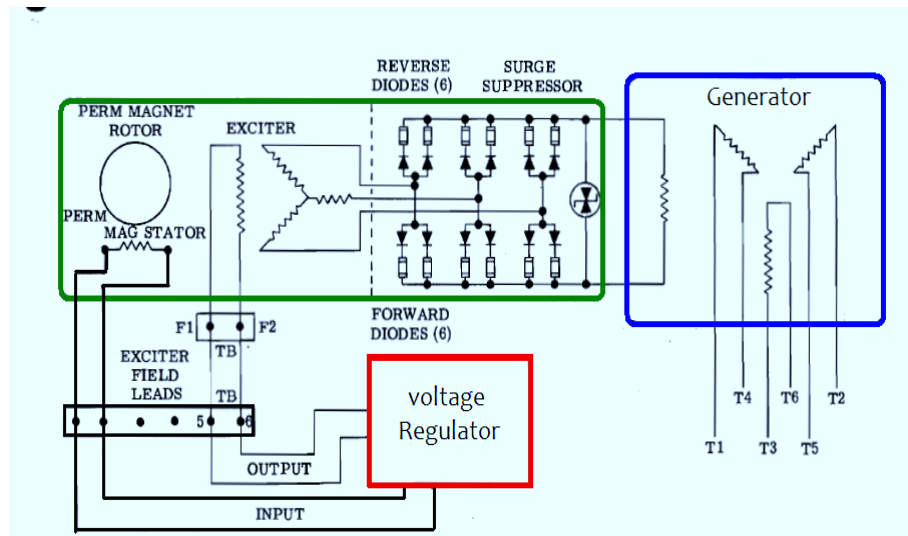


Figure II.13 : schéma de principe de régulation de l’alternateur [13]

II.5.1.1. Description de régulation de l’alternateur :

La stabilité du système électrique est la capacité d'un système électrique, dans certaines conditions de fonctionnement initiales, à revenir au même état d'équilibre ou à un état d'équilibre différent après avoir subi une perturbation, en maintenant la plupart des variables du système dans leurs limites, de sorte que l'ensemble du système reste en fonctionnement normal [14]

Les paramètres principaux pour la sûreté du système de puissance sont :

- La tension,
- La vitesse de la turbine,
- La fréquence
- Le courant d'excitation.

La régulation pendant des perturbations est faite selon ces paramètres comme est montré sur la figure suivante :

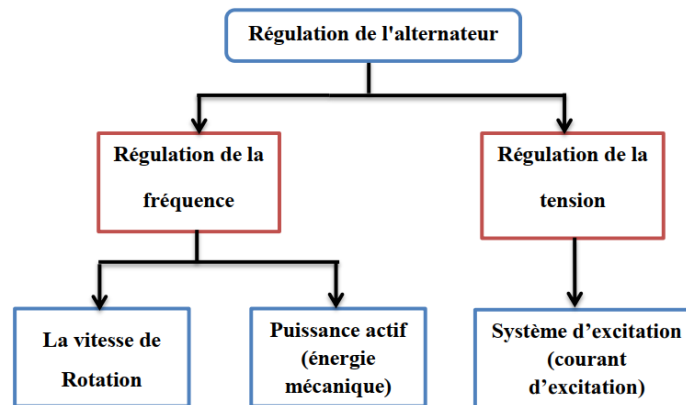


Figure II.14: Description bref de la régulation d'alternateur [14]

II.5.1.2.La régulation de la tension :

Le système d'excitation fournit une tension et un courant continu, mais il doit être capable également de faire varier rapidement la tension d'excitation en cas de perturbation sur le réseau. Les systèmes d'excitation sont équipés de contrôleurs, appelés habituellement régulateurs de tension (AVR : Régulateur de tension automatique). Ces derniers sont très importants pour l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie où absorbée selon les besoins des charges. En outre ces contrôleurs représentent un moyen très important pour assurer la stabilité transitoire du système de puissance.

Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour régler le flux magnétique dans la machine et "ramener" la tension de sortie de la machine aux valeurs souhaitées.

Une caractéristique très importante d'un régulateur de tension est sa capacité à faire varier rapidement la tension d'excitation [14]

Dans notre étude nous allons voir la régulation de tension selon deux méthodes :

- Régulateur de tension conventionnelle
 - Régulateur de tension en utilisant la logique floue et réseaux de neurone
- Les régulateurs de tension conventionnelle AVR

C'est un composant électronique essentiel dans les systèmes de génération d'énergie électrique. Il a pour fonction de maintenir une tension de sortie stable et régulière, malgré les variations de charge ou de vitesse du moteur.

Le régulateur de tension est généralement installé sur l'alternateur lui-même, ou dans le panneau de commande du groupe électrogène. Il est relié aux enroulements de l'alternateur par des

capteurs de courant et de tension, qui lui permettent de détecter les variations de la tension de sortie.

Selon le type de régulateur utilisé, différentes méthodes peuvent être utilisées pour maintenir la tension de sortie stable. Les régulateurs électroniques modernes utilisent généralement des circuits intégrés pour réguler la tension, Le régulateur de tension est un élément clé pour assurer la qualité de l'énergie électrique produite par le générateur. Une tension instable peut entraîner des problèmes de fonctionnement pour les équipements électriques connectés, et des dommages sur le long terme. Il est donc important de vérifier régulièrement le bon fonctionnement du régulateur de tension, et de le remplacer s'il est endommagé ou défectueux. La figure(II.38) illustre le modèle schématique d'un régulateur classique de tension AVR [17]

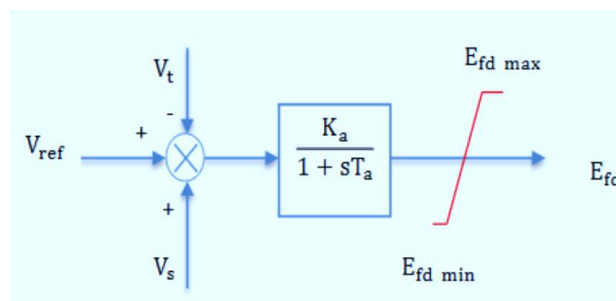


Figure II.15 : Modèle schématique d'un régulateur classique de tension AVR [7]

Tel que :

V_t : Tension mesurée à la sortie de la machine synchrone

V_s : Tension du nœud infini.

V_{ref} : Tension de référence.

V_e : L'erreur

E_{fd} : Tension d'excitation de la machine synchrone

E_{fd-max} : Limite supérieure de la sortie de

E_{fd-min} : Limite inférieure de la sortie de

T_a : Constante de temps de l'AVR

K_a : Gain de l'AVR

La figure (II.39) suivante montre le modèle du système d'excitation et de son régulateur de tension conventionnelle utilisé dans notre cas.

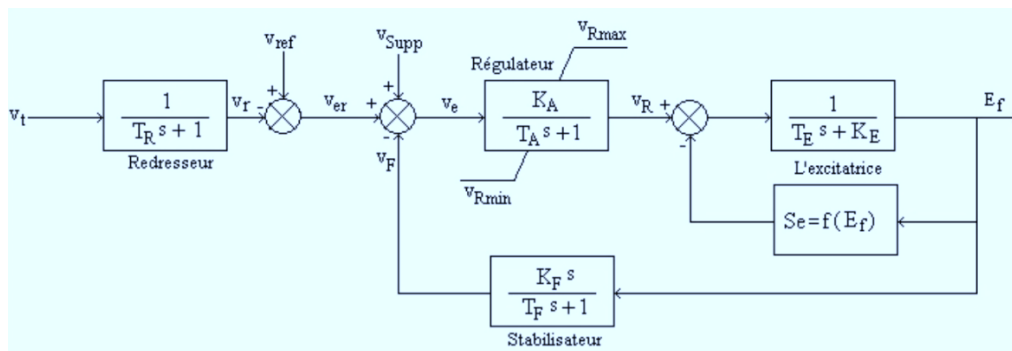


Figure II.16 : système régulation (AVR) d'une excitation d'une machine synchrone [15] [16]

- ☞ **Redresseur** : Le premier bloc représente la fonction de transfert du redresseur et un filtre de la tension à la sortie de la machine (v_t).
- ☞ **Régulateur** : Le deuxième bloc est un régulateur de tension ayant une constante de temps (T_A) et un gain (K_A). Il consiste typiquement à amplifier l'erreur (v_e) avec une limitation:

$$v_e = v_{er} + v_{supp} - v_f \tag{II-3}$$

Les signaux d'entrée du régulateur de tension sont : le signal de retour du stabilisateur (v_F), le signal d'erreur (v_{er}) (entre la tension à la sortie de la machine et la tension de référence) et le signal supplémentaire (v_{supp}) du PSS (régulateur de puissance). **Le stabilisateur** : K_F et T_F sont respectivement le gain et la constante de temps du stabilisateur. Son rôle est de fournir l'avance de phase nécessaire pour atteindre les marges de phase appropriées dans la réponse fréquentielle en boucle ouverte, (l'amortissement en boucle fermée dépend de la marge de phase et de l'amortissement en boucle ouverte). **L'excitatrice** : Les systèmes d'excitation peuvent être classés selon la source primaire de puissance d'excitation. On distingue deux types : à courant continu (dc-exciter) et ceux à courant alternatif (ac-exciter).

Le modèle de l'excitatrice inclut le bobinage d'excitation et la non linéarité magnétique du chemin principal du champ de l'excitatrice (la saturation du circuit magnétique donnée par la fonction Se) [15] [16]

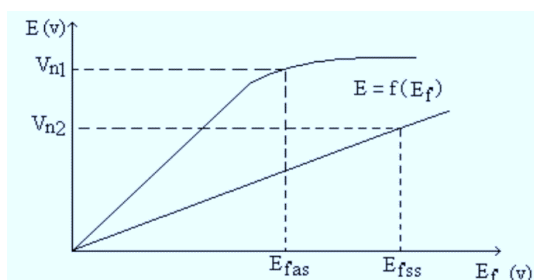


Figure II.17 : Courbe de magnétisation de l'excitatrice [7]

Avec: E : la f.e.m induit par phase. E_{fas} et E_{fss} : les tensions inductrices donnant à vide les tensions nominales V_{n1} et V_{n2} respectivement avec et sans saturation. La fonction de saturation Se peut être estimée par une exponentielle : $Se = f(E_f) = A \exp (B E_f)$ (II-4)

En négligeant le phénomène de saturation, on aura le schéma simplifié du système d'excitation de la machine synchrone connecté à un réseau infini

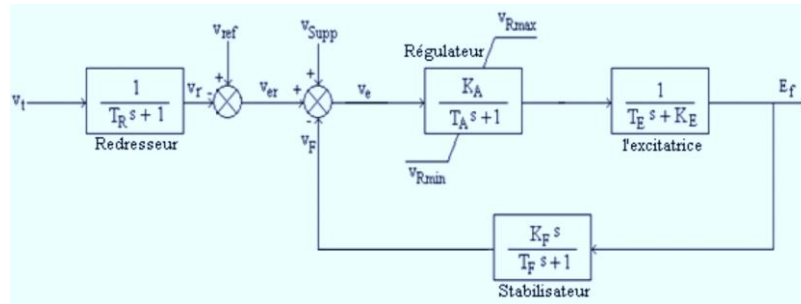


Figure II.18 : Le schéma simplifié d'un système régulation (AVR) d'une excitation d'une machine synchrone [15]

II.5.1.3 .Le régulateur de la fréquence

En tout premier lieu, la turbine devra absolument conserver une vitesse de rotation constante. Cette vitesse peut-être de 3000 tr/mn, de 3600 tr/mn ou de 1500 tr/mn (cas des tranches nucléaires) est le moyen direct de régler la fréquence du groupe turbo-alternateur, en conséquence de cette relation directe :

$$f = P.N \tag{II-5}$$

(N = vitesse de la machine,

p = nombre de paires de pôles,

f = Fréquence de la machine)

La vitesse de la turbine doit être constante étant donné que la fréquence du réseau sur lequel la machine est couplée est constante.

Pour permettre le réglage de cette vitesse, la grandeur régnante utilisée sera le débit de vapeur admis dans les corps HP et MP de la turbine au travers des organes de réglage (soupapes de réglage HP et soupapes modératrices MP), pilotés par la régulation qui proportionne la levée des tiges de soupape au débit de vapeur requis [13]

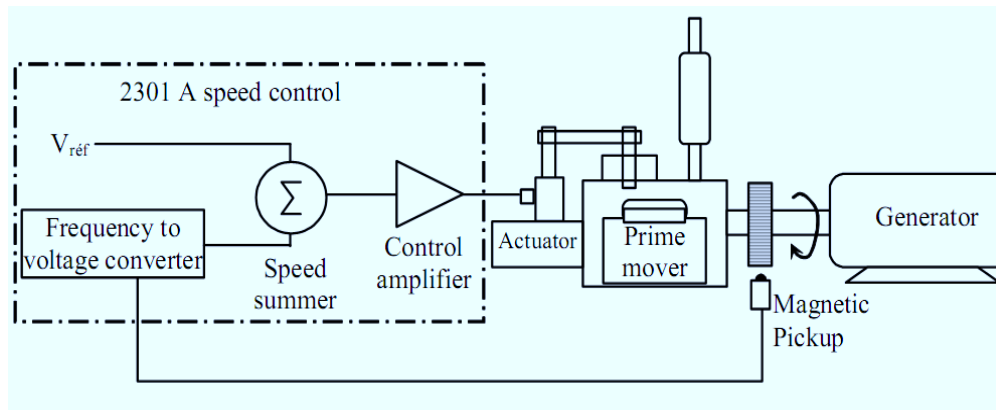


Figure II.19 : Schéma de principe de la régulation de fréquence [13]

II.5.1.4. Les régulateurs de puissance PSS :

Ce sont des signaux de contrôle supplémentaires de stabilisations, reconnus sous le nom « Stabilisateur de système d'alimentation ou Power System Stabilizer » générés par des réseaux spéciaux pour objet l'élimination des oscillations électromécaniques et l'amélioration de facteur d'amortissement du système. Ce contrôleur détecte les variations de vitesse de rotor ou de puissance terminale du générateur et applique ce signal à l'entrée du régulateur de tension (**AVR**) [15]

II.6. Représentation du PSS :

Le stabilisateur a pour fonction d'améliorer l'amortissement des oscillations de puissance et la stabilité du réseau de transport en dotant le système d'excitation du générateur d'un signal de contrôle adéquat qui permet d'influencer la consigne du régulateur automatique de tension (**AVR**). Le signal de stabilisation est élaboré à partir de la variation de la vitesse angulaire du rotor ou, aussi, à partir de la puissance électrique. Le schéma bloc représentant le type de **PSS** le plus utilisé est connu sous le nom de CPSS conventionnel (ou PSS avance/retard). Ce dernier a montré sa grande efficacité dans le maintien de la stabilité aux petites perturbations. Ce PSS utilise la variation de vitesse de rotor comme entrée est montré sur la figure (II.43). Il est constitué d'un gain K_S , d'un compensateur de phase et d'un limiteur [15]

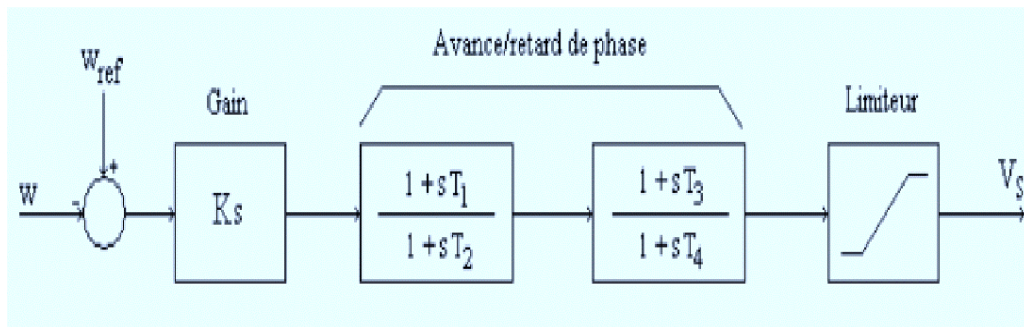


Figure II.20 : Structure d'un PSS classique [15]

La fonction de transfert du PSS est donnée par :

$$G_s(S) = \frac{V_s}{dw} = K_s \frac{(1+sT_1)(1+sT_3)}{(1+sT_4)(1+sT_2)} \quad (II-6)$$

Avec : $dw = w_{ref} - w$

T_1 et T_2 : constante de temps de la première avance de phase

T_3 et T_4 : constante de temps de la deuxième avance de phase

V_s : tension de sortie

W : signal d'entrée

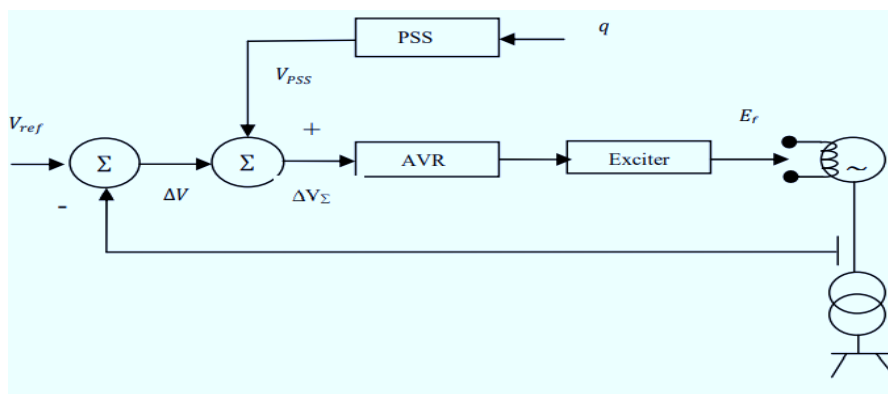


Figure II.21 : Modèle simplifié de connexion entre un PSS et le reste du système [15]

II.6. 1. Fonctionnement du régulateur de puissance PSS :

Un PSS permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la variation de vitesse de rotor à l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur. 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 vite et au bon moment. Le signal de stabilisation qui vient modifier par contre-réaction négative la valeur de la référence du régulateur de tension, doit être formé à partir de la puissance d'accélération. Cette puissance est la différence entre la puissance mécanique développée par la turbine et la puissance active générée par l'alternateur (ou bien la différence entre les vitesses de rotation), le résultat de la soustraction devient le signal d'entrée d'un circuit de stabilité [16]

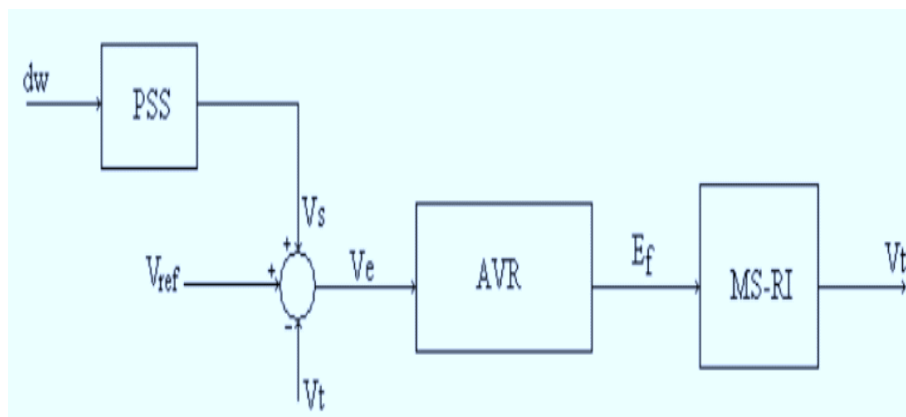


Figure II.22 : Système de commande de la machine synchrone [16]

II.6. 2. Principe de régulation :

La chaîne de traitement de l'information :

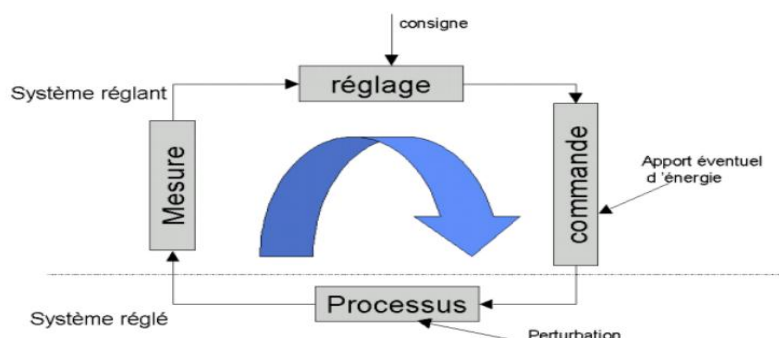


Figure II.23 : Schéma de la chaîne de traitement de l'information

II.6. 3. Les éléments de la chaîne

Le système se décompose en trois zones : mesurage, algorithmique, commande.

- ✓ **Le mesurage** : englobe le capteur , l'acquisition par l'automate et le traitement de la mesure.
- ✓ **L'algorithme** : correspond à la partie calcul, la commande en respectant les consignes.
- ✓ **La commande** : représente l'écriture sur la carte de sortie ainsi que l'actionneur.

II.6. 4. La régulation classique PID :

➤ Action PID :

PID est l'abréviation de Proportionnelle Intégrale Dérivée, les trois actions effectuées par le correcteur. Soit $e(t)$ l'erreur entre la consigne désirée et la mesure de la sortie.

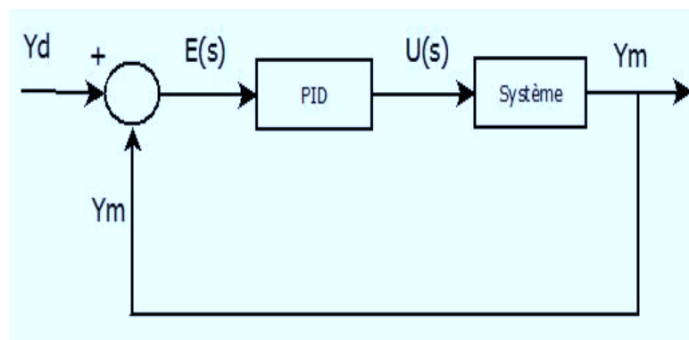


Figure II.24: boucle de régulation PID

II.7. Régulation à l'aide des méthodes d'intelligence artificielle

II.7. 1. La logique floue :

Les systèmes flous peuvent être considérés comme des systèmes logiques qui utilisent des règles linguistiques pour établir des relations entre leurs variables d'entrée et de sortie. Ils sont apparus pour la première fois dans les années soixante-dix avec des applications dans le domaine du contrôle des processus. La commande floue a pour but de gérer automatiquement un processus en fonction d'une consigne, par action sur des variables de commande [18] [19] [20]

II.7. 2. La logique floue VS la logique classique

La logique classique est un pan des mathématiques relativement bien connu du public. C'est sur son principe que fonctionne les ordinateurs, calculateurs et la plupart des machines numériques. En logique classique, les décisions sont binaires : soit vraies, soient fausses '0' ou '1', En logique floue, une décision peut être à la fois vraie et fausse en même temps, avec un certain degré d'appartenance à chacune de ces deux croyances.

Par exemple, considérons ces deux règles d'inférences :

Si l'objet est à moins de 20 mètres, alors il est proche

Si l'objet est à plus de 20 mètres, alors il est loin

En logique classique, un objet ne pourra être que proche ou que loin. Si la distance à l'objet est de 19 mètres, alors celui-ci sera proche. En logique floue par contre, l'objet sera à la fois proche et loin en même temps.

On se rend compte qu'en logique floue, un fait n'a plus une appartenance stricte à une croyance, mais une appartenance "floue" [18] [19] [20]

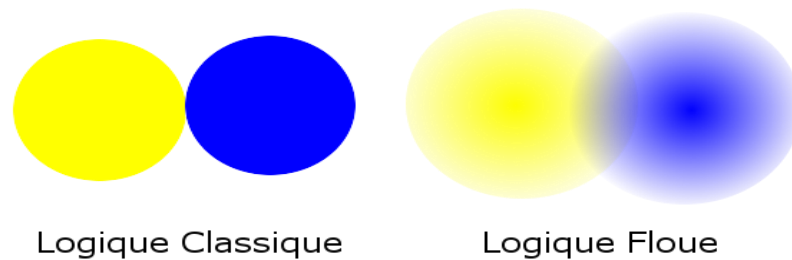


Figure II.25 : la différence entre La logique floue et classique [18]

La logique floue a été développée et formalisée par Lofti Zahed en 1965. Cette théorie se base sur la théorie des ensembles flous et la logique. Elle généralise notamment le **Modus Ponens** de la logique classique.

- En logique classique, le **Modus Ponens** stipule que **sachant A, si A impliqué B, alors on en déduit B**. ($A, A \Rightarrow B \vdash B$)
- En logique floue, le **Modus Ponens** est formulé différemment : **sachant que x est A', si x est A impliqué y est B, alors on en déduit y est B'**. ($X=A', x=A \Rightarrow y=B \vdash y=B'$) [18]

II.7. 3. - Réseaux de neurones

- **Définition :**

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau.

- **Neurone biologique :**

Un neurone biologique est constitué d'un corps cellulaire appelé 'soma', de plusieurs prolongements d'entrée de l'ordre $0.01\mu\text{m}$ appelés 'dendrites' et un prolongement de sortie appelé 'axone' [20]

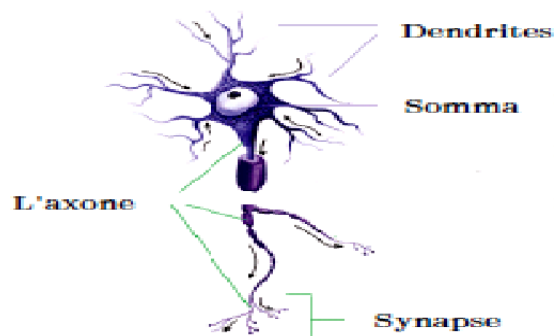


Figure II.26 : Anatomie d'un neurone biologique [20]

Le cerveau est constitué d'environ mille milliards de neurones. La sortie de chaque neurone est liée à des milliers d'autres neurones. Chaque neurone effectue un traitement local. Il collecte les signaux issus des dendrites et leur fait la somme. Si l'amplitude résultante dépasse un certain seuil interne, un signal est envoyé à travers l'axone vers d'autres neurones. Les interactions entre les neurones se font au niveau du corps cellulaire ou dans les dendrites à des points de jonctions appelés 'synapses'[20]

- **Neurone formel :**

Le neurone formel est une fonction non linéaire, paramétrée à valeurs bornées, il se caractérise par un état interne $s \in S$, des signaux d'entrée x_1, \dots, x_N et une fonction de transition d'état f comme suit :

$$s = h(x_1, \dots, x_N) = f(w_0 + \sum_{j=1}^N w_{ij} x_j)$$

$$O_i = g(u_i)$$

Où:

x_j : représente l'entrée j connectée au neurone i .

b_i : le seuil interne du neurone.

w_{ij} : désigne le poids de la connexion reliant l'entrée j au neurone i

O_i = est la sortie du neurone

g : sa fonction d'activation

La fonction de transition est une transformation d'une combinaison des signaux d'entrée.

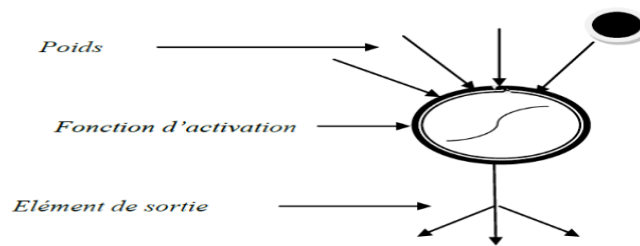


Figure II.27 : Le modèle du neurone formel [19]

Cette combinaison est déterminée par un vecteur de poids (w_0, \dots, w_N) associé à chaque neurone et dont les valeurs sont estimées dans la phase d'apprentissage, β_0 étant appelé le biais du neurone, il constitue la mémoire ou la connaissance répartie du réseau [19]

II.8 : Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué les systèmes d'excitation et différentes régulations de l'alternateur à grand puissance, Nous avons présenté d'une façon générale les différents types de stabilité des réseaux électriques. Aussi les méthodes de l'intelligence artificielle floue et neurone, Cette étude nous a permis de conclure les points suivants :

Un système de puissance est stable s'il retrouve un état d'équilibre après avoir été soumis à une perturbation ;

Le régulateur de tension rapide du système d'excitation de générateur, participe vivement à augmenter la marge de stabilité transitoire, ce qui conduit à son amélioration.

Les stabilisateurs de puissance (PSS), sont les moyens efficaces les plus communs non seulement pour éliminer les effets pour amortir les oscillations des modes globaux ainsi que les modes locaux leur action est cumulatifs.

Les régulateurs de tension AVR jouent un rôle essentiel dans la stabilité et les performances des alternateurs, il permet de maintenir une tension constante malgré les variations des charges, assurant aussi la fiabilité des système

Chapitre III : Simulation de régulation de l'alternateur (AVR + PSS)

III.1 Introduction

Après avoir acquis des connaissances sur la centrale électrique de la Sonackter Mostaganem, grâce à la présentation exposée dans le premier chapitre. Ensuite avoir étudié tous les composants et sous-systèmes de l'installation à l'aide de la modélisation des systèmes de production d'électricité détaillée au chapitre deux.

Nous avons compris que la stabilité et l'efficacité de la production de la centrale est basé sur la précision de la régulation et le contrôle du système d'excitation de la machine synchrone, ainsi de la vitesse de la turbine qui implique la stabilité de la puissance transmise au réseau. Cependant dans ce contexte, nous consacrerons ce troisième chapitre à la simulation du groupe turbo-alternateur de la centrale pour analyser son processus de régulation, en utilisant trois méthodes de régulation de la tension et de la puissance. La première est une régulation conventionnelle basée sur un intégrateur proportionnel **PI**. La deuxième est une régulation basée sur la logique floue, et la troisième est une régulation basée sur les réseaux de neurones.

L'étude sera appliquée premièrement pour un fonctionnement normal de l'alternateur et deuxièmement pour un cas de présence d'un défaut de court-circuit. La simulation de ces opérations sera exécutée sous matlab-simulink.

En fin les résultats obtenus pour différentes simulations seront interprétés, comparés pour comprendre et maîtriser le comportement de la machine en régime de fonctionnement relié au réseau.

III.2. Simulation de régulation AVR et PSS :

III.2.1. Simulation avec une régulation conventionnelle PI:

III.2.1.1 Modèle globale de simulation :

Le schéma de notre modèle global de simulation a été inspiré de matlab-simulink. Qu'il existe plusieurs schémas de simulations sur ce logiciel le choix d'un prototype dépend des compétences d'opérateur. Cependant pour notre cas, nous avons combiné entre plusieurs schémas et modèles en intégrant les types de régulateurs. Le schéma final est constitué d'une machine synchrone (Alternateur), d'une turbine à vapeur et d'une excitation la courant continu

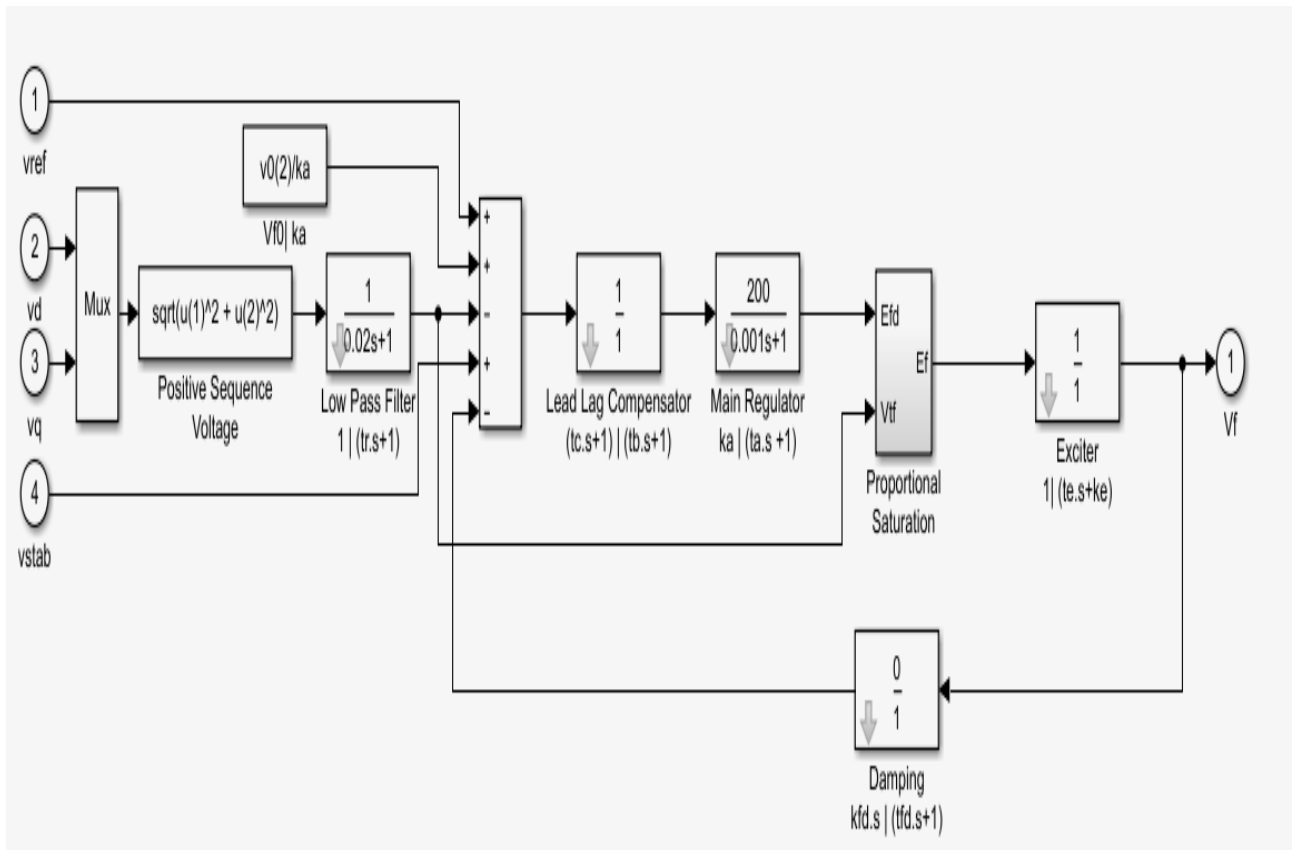


Figure III.1 : Schéma globale de simulation pour le rotor, un transformateur élévateur, des charges en parallèle.

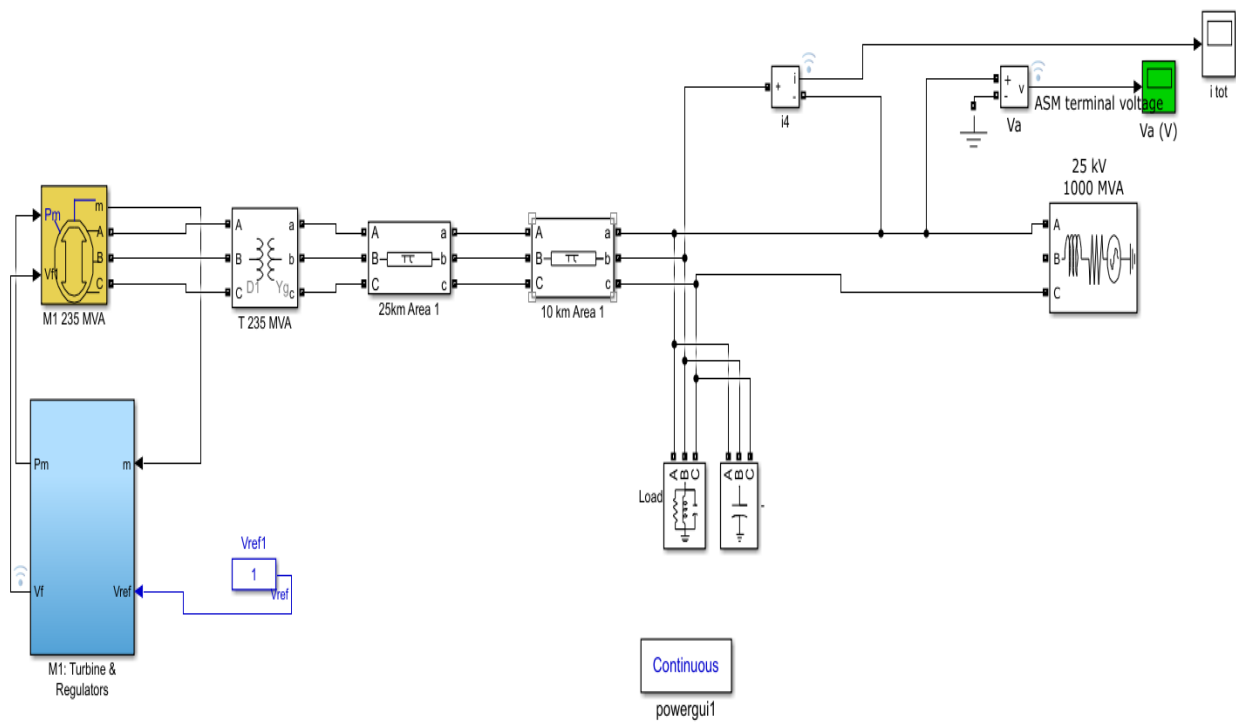


Figure III.2 : Régulateur conventionnelle de tension d'excitation

III .2.1.2 . Simulation avec un fonctionnement normal :

Nous avons exécuté la simulation pour le premier essai de fonctionnement normal avec un régulateur PI pendant 20 secondes. Alors nous avons obtenu les résultats suivants :

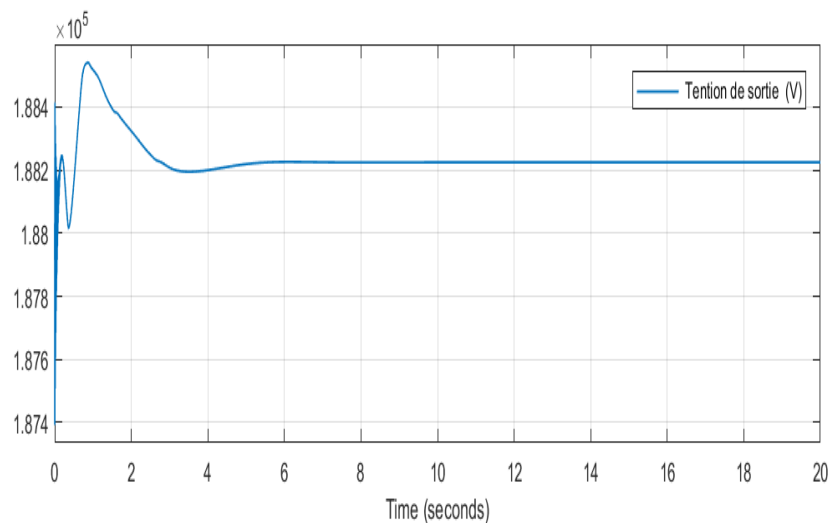


Figure III.3 : La tension de sortie du réseau

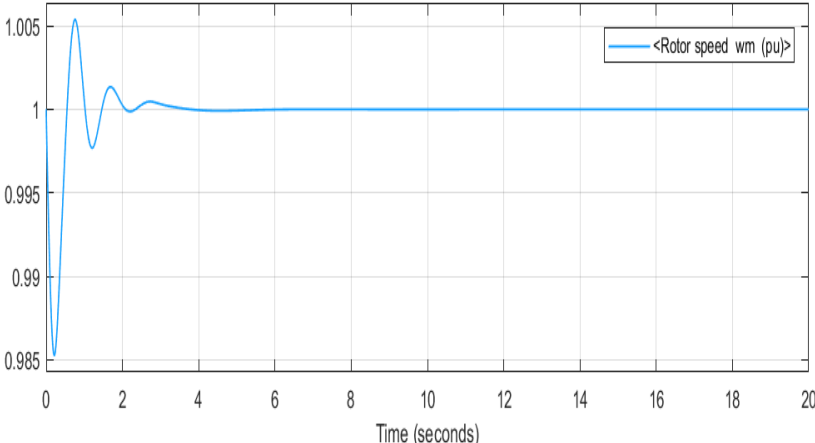


Figure III.4 : La vitesse du rotor

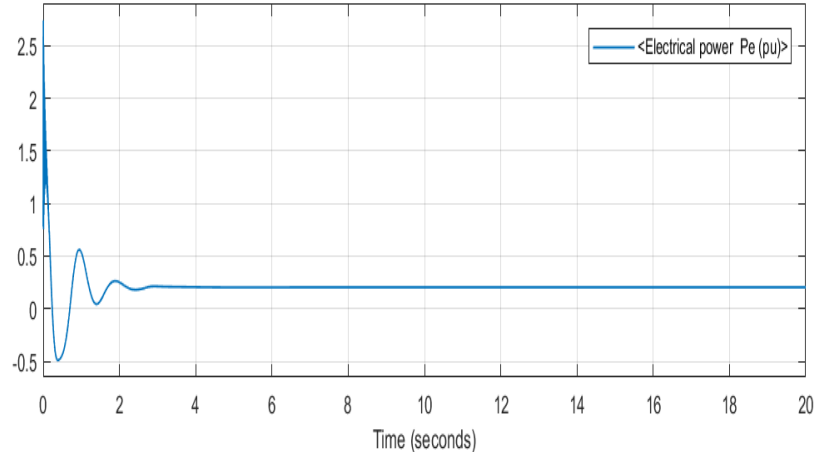


Figure III.5 : La puissance électrique

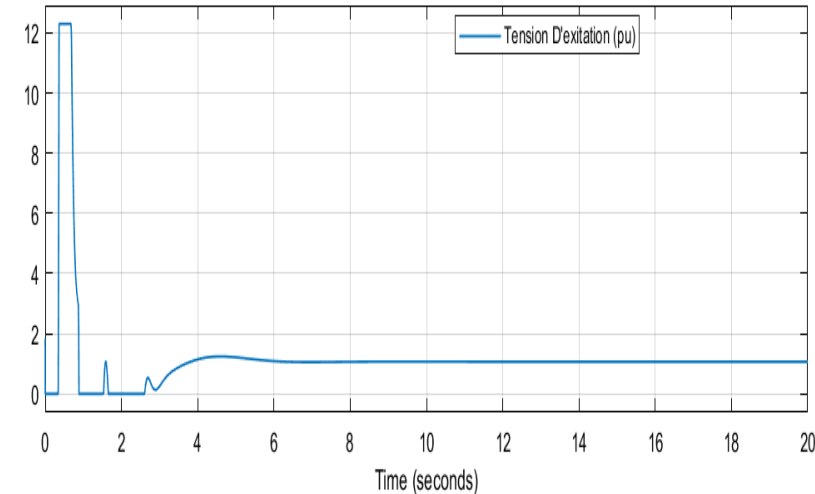


Figure III.6 : La tension d'excitation

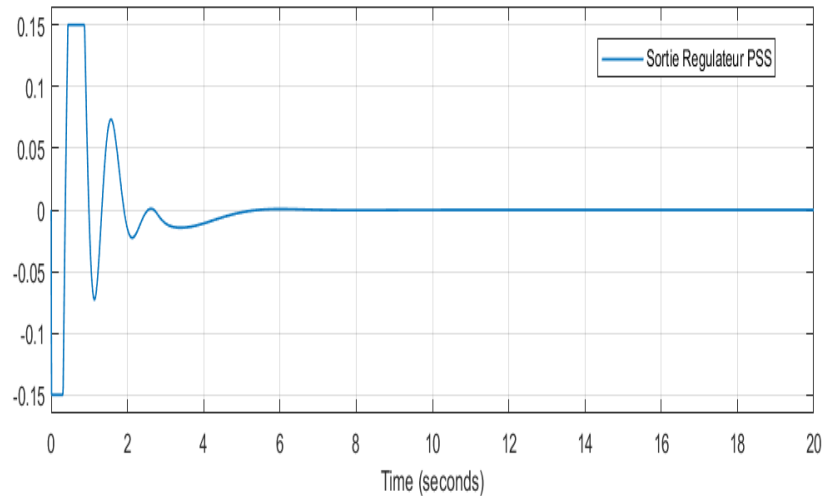


Figure III.7 : la sortie de régulateur PSS

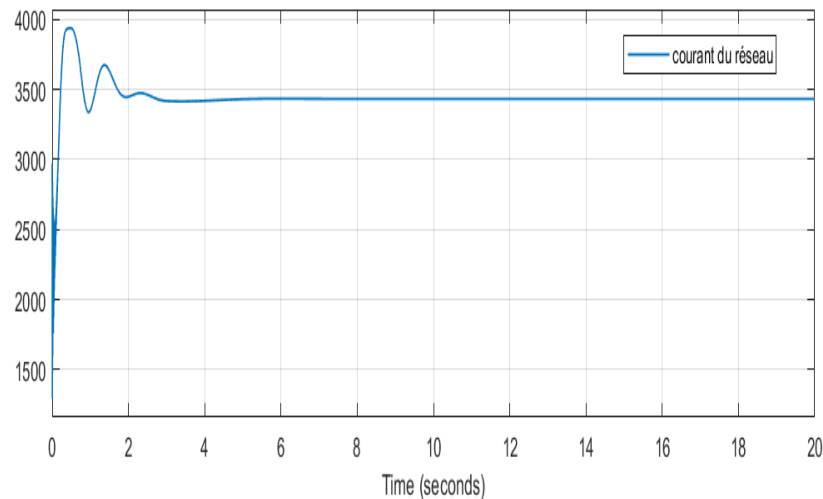


Figure III.8 : le courant du réseau

III.2.1.3 Interprétation des résultats de fonctionnement normal :

Les six courbes obtenues permettent d'analyser le comportement du système électrique sous régulation combinée (AVR+ PSS) commandée par le contrôleur PI

- Analyse du graphique Vitesse du rotor, la courbe montre un dépassement initial suivi de petites oscillations amorties et après un temps de réponse court la tension se stabilise autour de sa valeur nominale, indique que la régulation d'excitation assure un fonctionnement stable
- Analyse du graphique La puissance électrique, la puissance subit une variation transitoire au début, puis converge rapidement vers une valeur stable, prouve que le régulateur limite efficacement les fluctuations de puissance et améliore la stabilité transitoire du réseau

- Analyse du graphique La vitesse du rotor, une perturbation initiale est observée et suivi d'oscillations amorties, la vitesse revient rapidement à sa valeur nominale, ce qui traduit une bonne stabilité en fréquence du système
- Analyse du graphique Courant du réseau, le courant présente un dépassement au démarrage mais retrouve sa valeur stable après quelques oscillations cela confirme que la régulation maintient le fonctionnement normal du réseau malgré les perturbations
- Analyse du graphique Tension de sortie, la tension reste pratiquement constante avec de très faibles écarts ce qui montre la robustesse d'excitation
- Analyse du graphique La sortie du PSS, présente un comportement oscillatoire transitoire au début, ce qui est normale car le stabilisateur agit pour compenser les fluctuations du système, après quelque secondes la réponse revient fixe à une valeur constante montrant que le régulateur a accompli son rôle en améliorant la stabilité

Ces résultats montrent que le système atteint un état stable en un temps très faible.

III.2.2. Simulation avec un régulateur flou

III.2.2.1. Modèle de simulation :

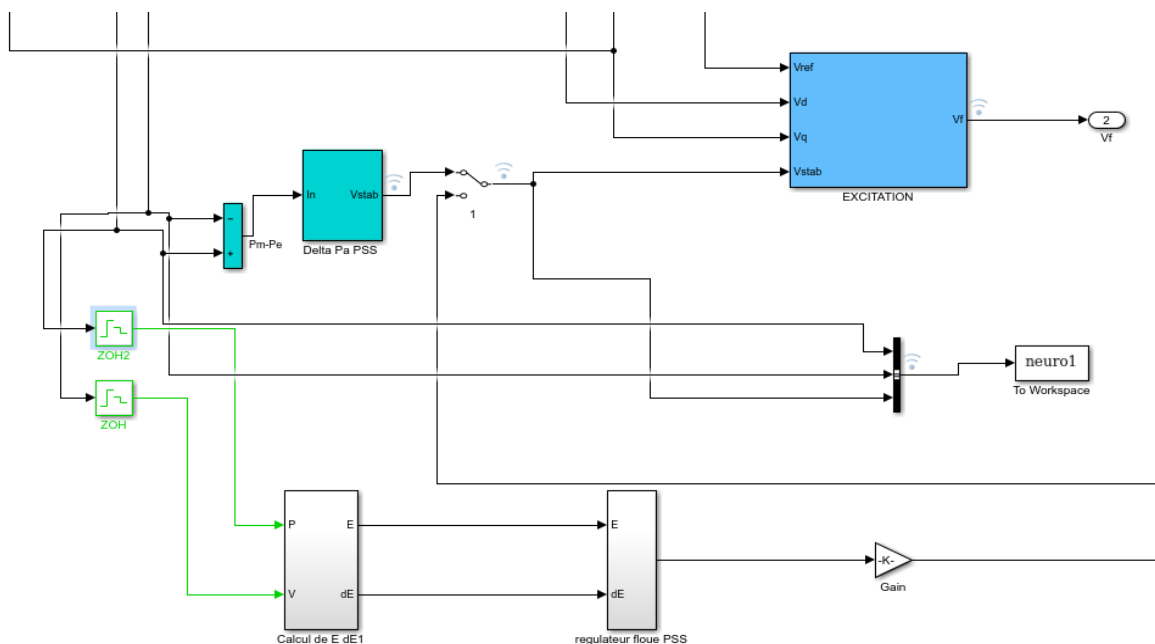


Figure III.9 : la régulation d'excitation par la logique floue

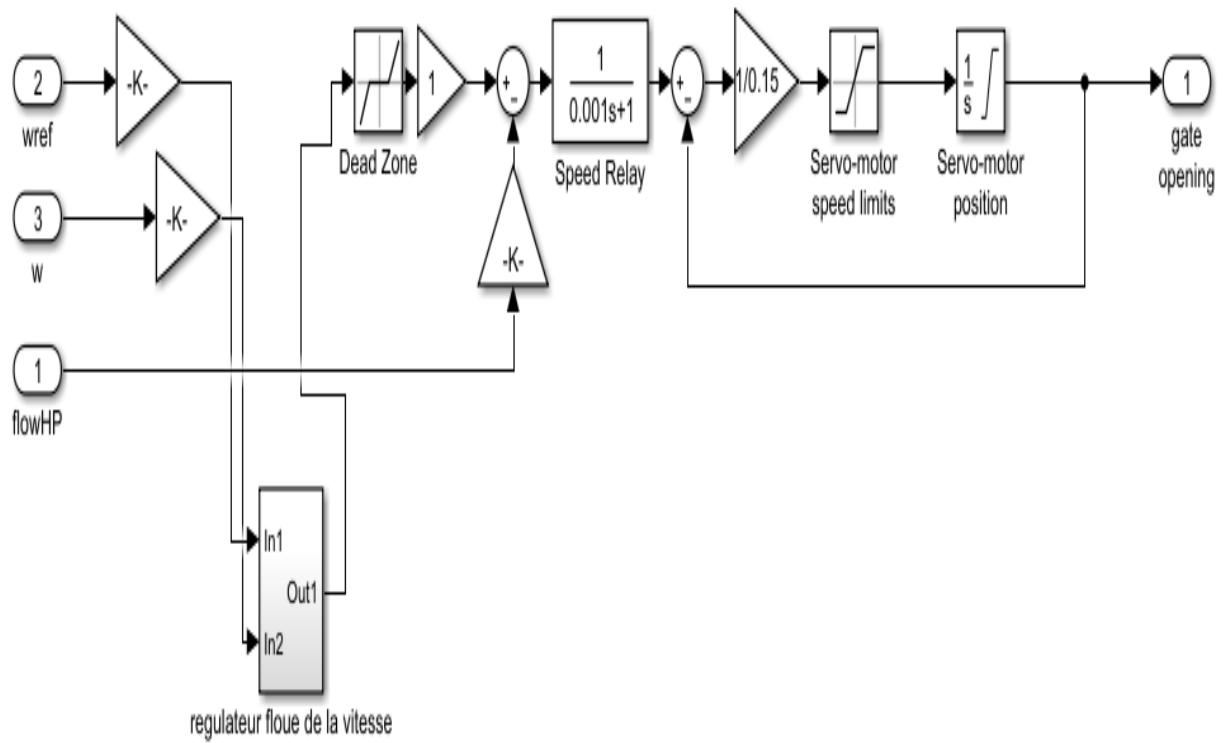


Figure III.10 : régulateur de vitesse par logique floue

III.2.2.2. 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 (III.11)

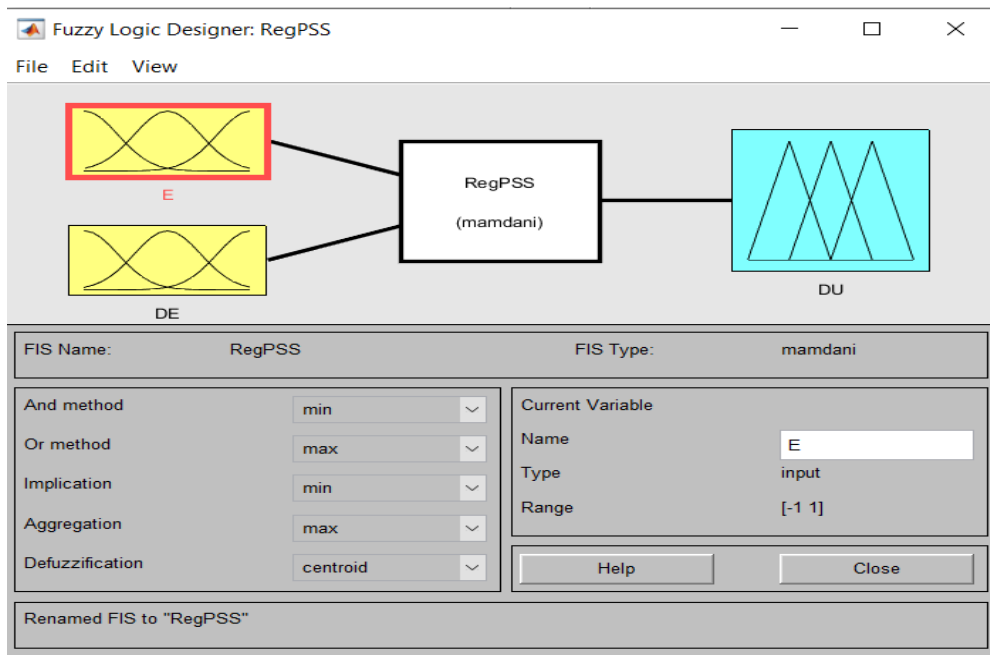


Figure III.11 : schéma du régulateur flou Mamdani

III.2.2.3 Fonction d'appartenances :

Pour la conception de notre régulateur flou, on va exploiter trois variables, deux entres (E-DU) et la sortie (excitation).

Les fonctions d'appartenances pour les entres et la sortie du régulateur flou sont présentées dans les figures (III.12) (III.13) (III.14) :

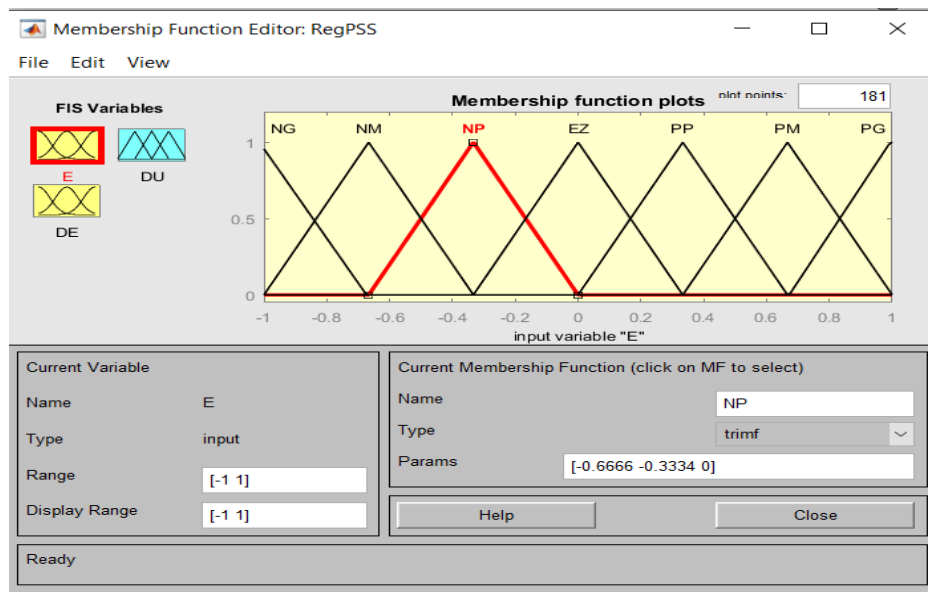


Figure III. 12: Fonction d'appartenances d'entrée E

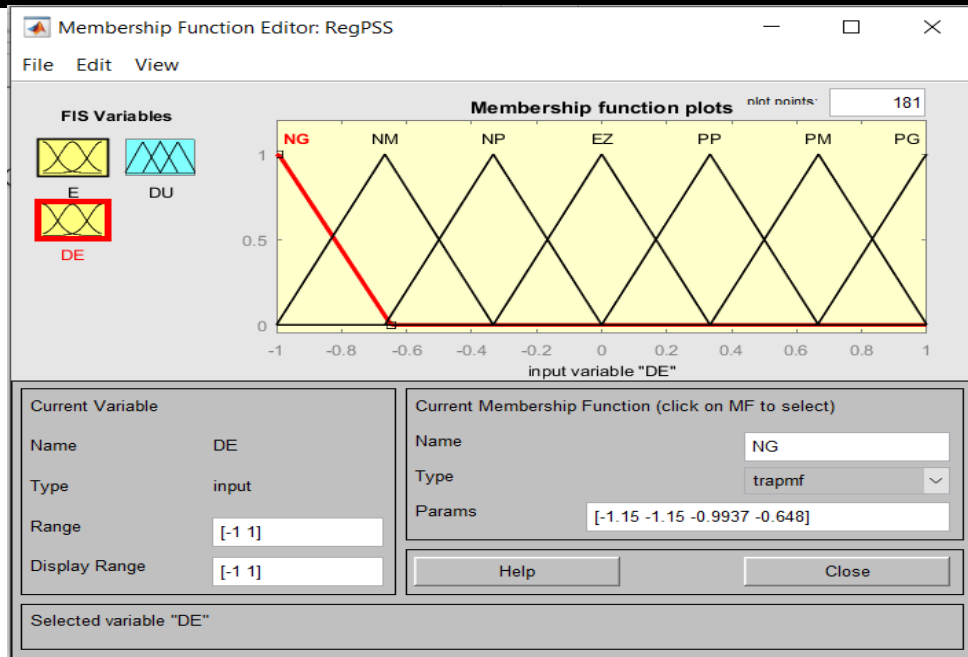


Figure III.13: Fonction d'appartenances d'entrée DE

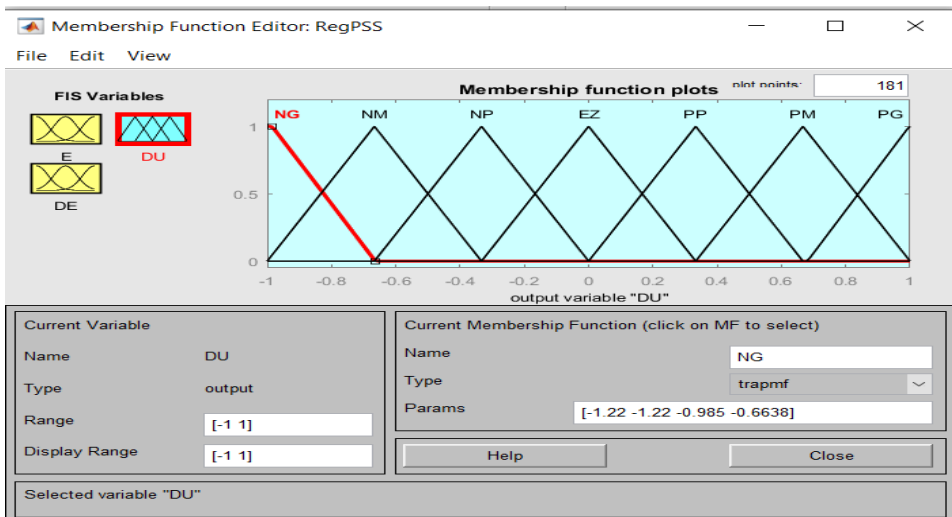


Figure III. 14: Fonction d'appartenances de sortie DU

III.2.2.4. Les résultats de la simulation floue

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation de la réponse dynamique d'un Système de génération équipé d'un système d'excitation contrôlé par logique floue :

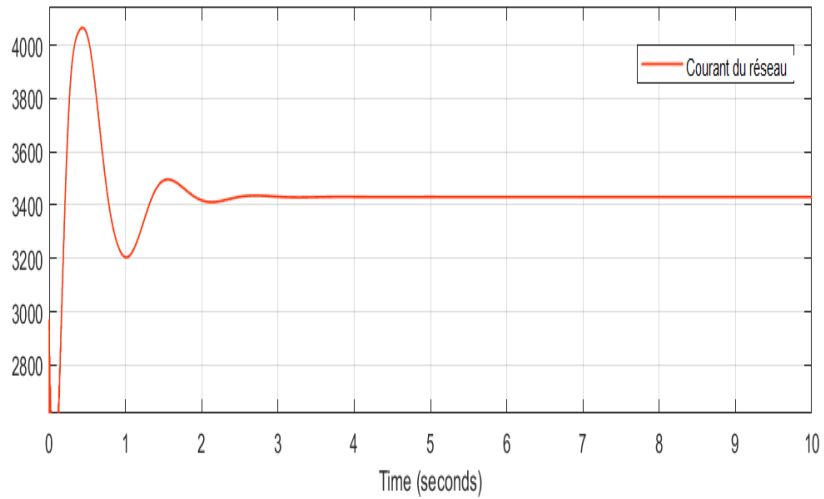


Figure III. 15: la tension de sortie

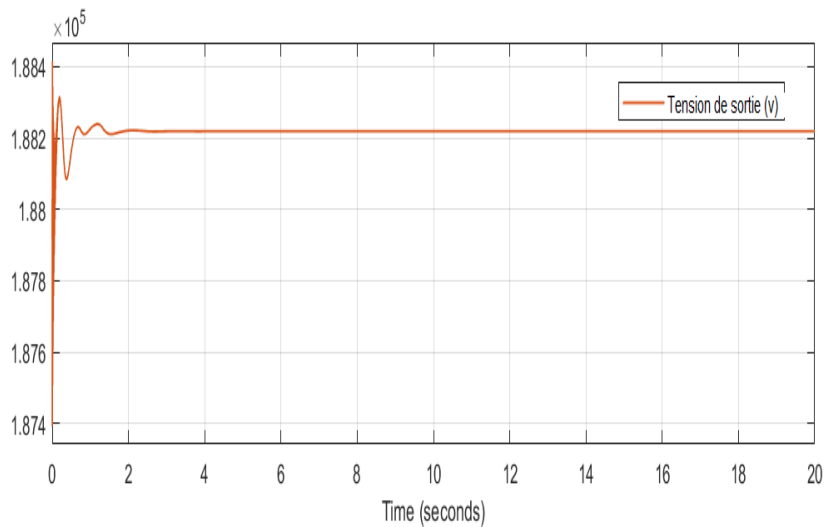


Figure III. 16 : courant du réseau

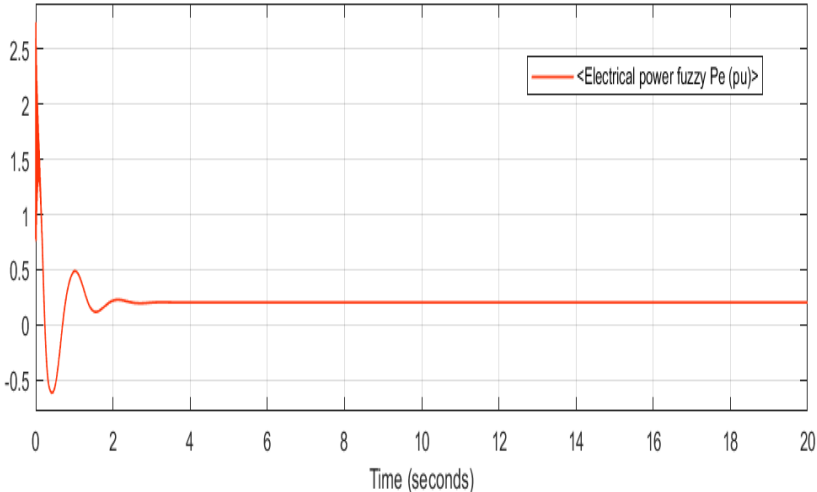


Figure III. 17: la puissance électrique

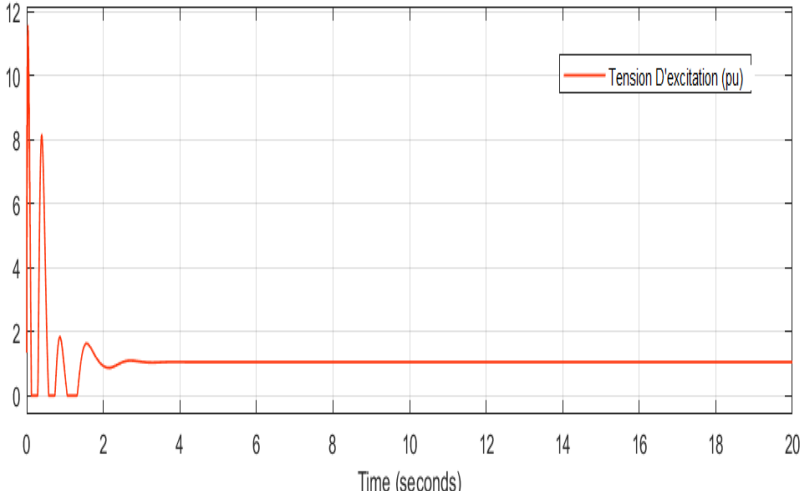


Figure III. 18: la tension d'excitation

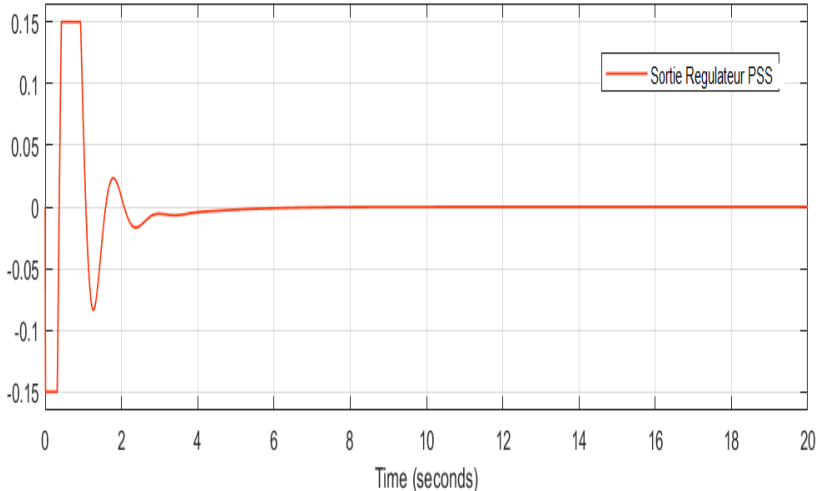


Figure III. 19: la sortie de régulateur PSS

III.2.2.5. Interprétation des résultats de fonctionnement normal :

Analyse de la graphique tension de sortie, le système subit une perturbation a $t=0$, ce qui provoque une chute puis un dépassement de tension, après la tension descend brièvement en dessous de sa valeur de régime permanent car le contrôleur flou réagit rapidement ramenant la tension vers sa valeur nominale

Analyse du graphique courant de réseau, la courbe subit une forte variation initiale, le contrôleur gère efficacement les variations transitoires de courant, amortissant rapidement les oscillations et stabilisant le courant à sa valeur nominale

Analyse du graphique de puissance électrique, la puissance active fournie par la machine synchrone, est fortement affectée par la perturbation avec une chute puis un pic important et revient rapidement pendant 3 secondes à sa valeur nominale, le contrôleur Assur un retour rapide à l'équilibre.

Analyse du graphique de tension d'excitation, la figure montre l'action du régulateur de tension AVR basé sur logique flous, le système ajuste de manière agressive la tension d'excitation aussi montre la capacité du contrôleur à fournir la commande nécessaire pour corriger rapidement la tension de sortie

Analyse du graphique de la sortie de régulateur PSS, la courbe représente l'action de PSS et son rôle nécessaire pour amortir efficacement les oscillations de puissance et d'angle.

Analyse du graphique de vitesse de rotor, au début il y a une variation brusque de la vitesse synchrone, le régulateur réagirait immédiatement pour amortir les oscillations et le rotor retrouve sa vitesse synchrone

Les résultats indiquent que le régulateur neuronal offre une réponse rapide et proche de l'optimale après l'apprentissage

III.2.3. Simulation avec un régulateur neurone :

III.2.3.1. Modèle de simulation :

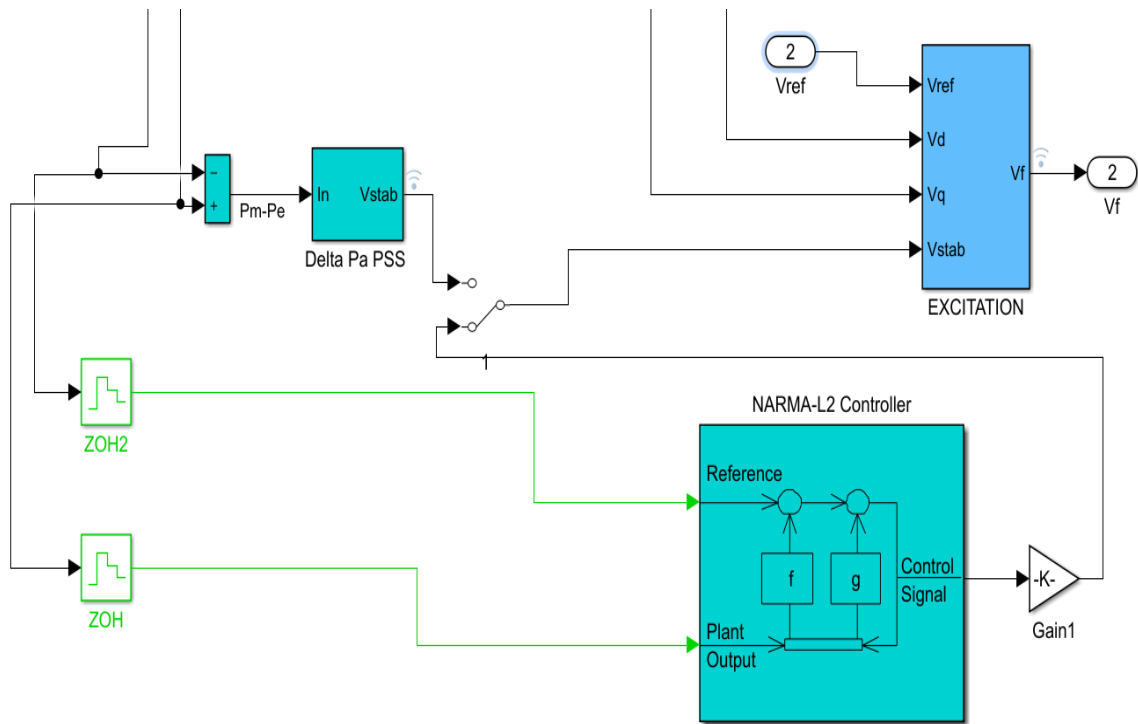


Figure III. 20: schéma de la régulation d'excitation par le réseau de neurone

Cette fenêtre affiche la structure de neural network qui montre la phase d'entraînement du régulateur neuronal basé sur le modèle NARMA-L2



Figure III. 21 Schéma de la structure et le modèle du réseau de neurone

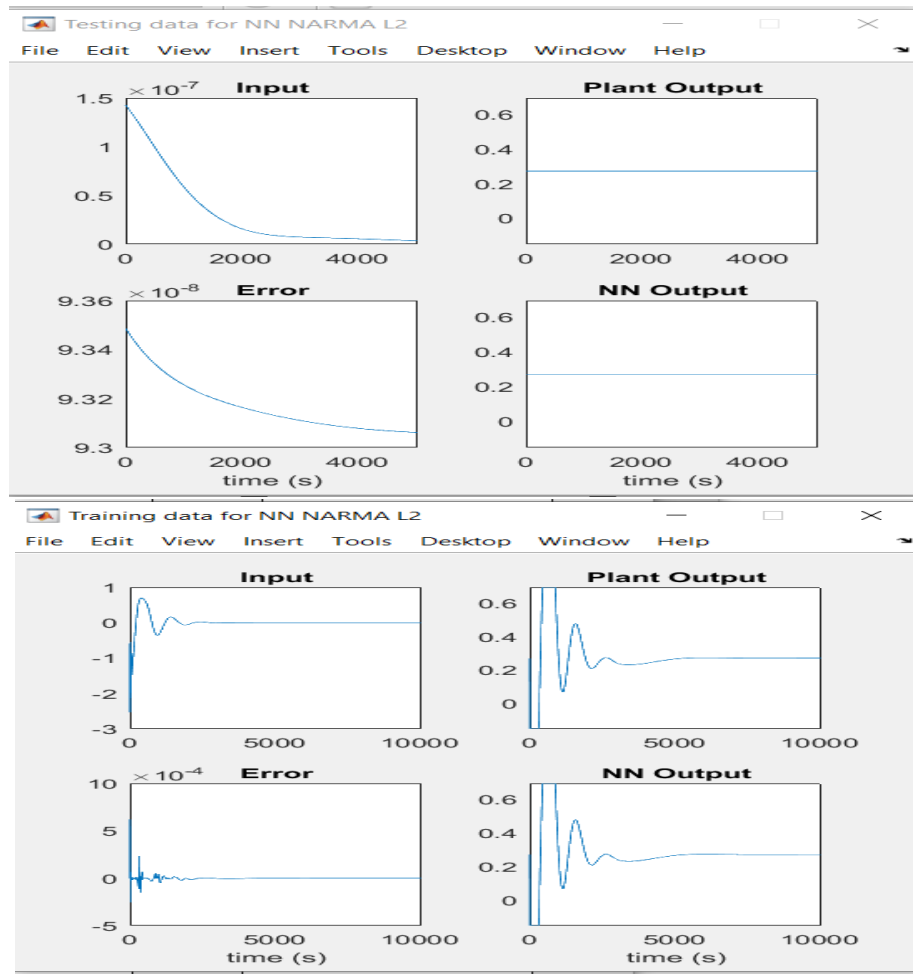


Figure III. 22 : les résultats obtenus pendant la phase d'entraînement du réseau de neurone

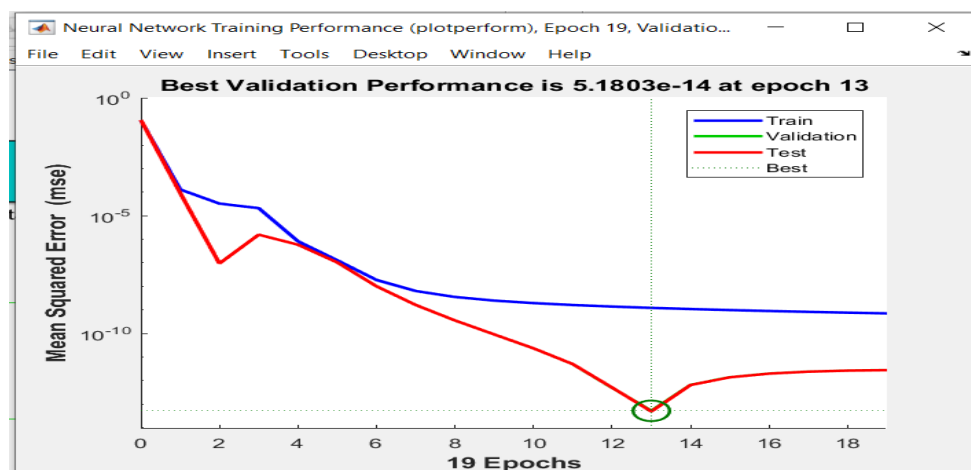


Figure III. 23: courbe de performance d'un réseau de neurone

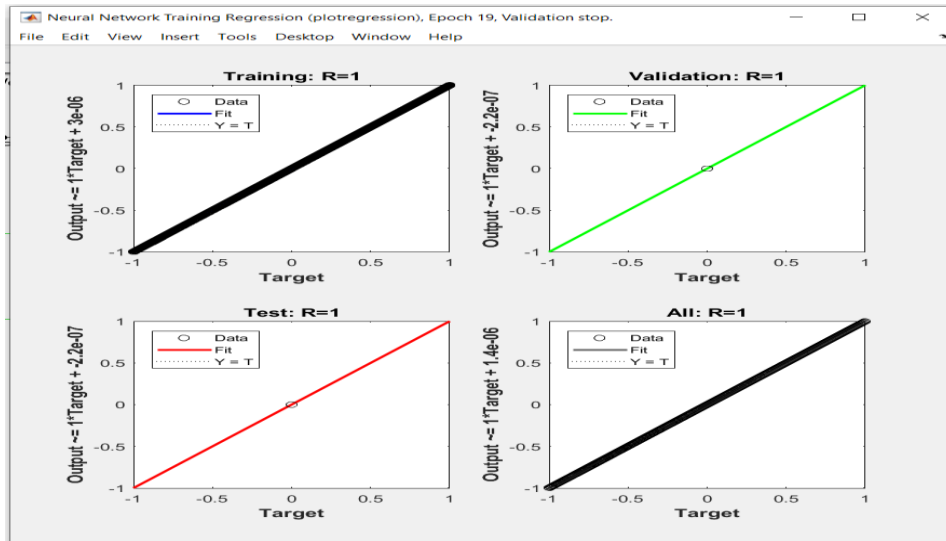


Figure III. 24: graphique de régression

III.2.3.2. Les résultats de simulation :

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation de la réponse dynamique d'un système de génération équipé d'un système d'excitation contrôlé par les réseaux de neurones:

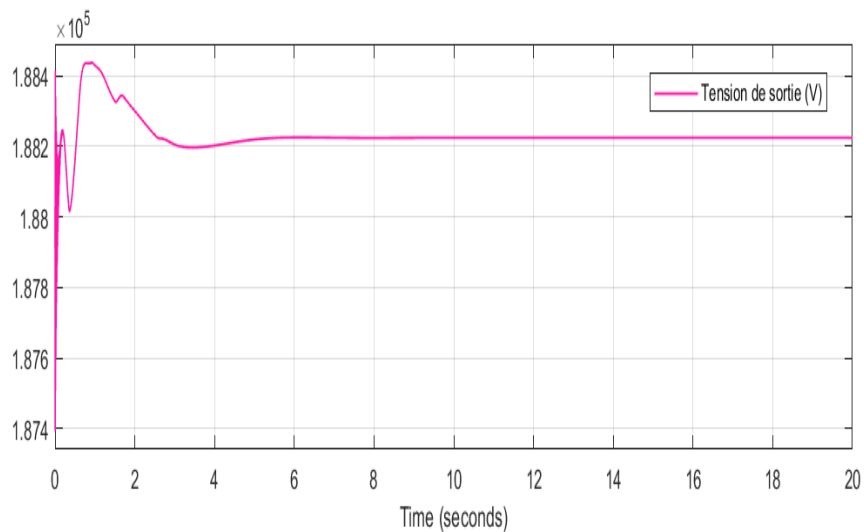


Figure III. 25: la tension de sortie

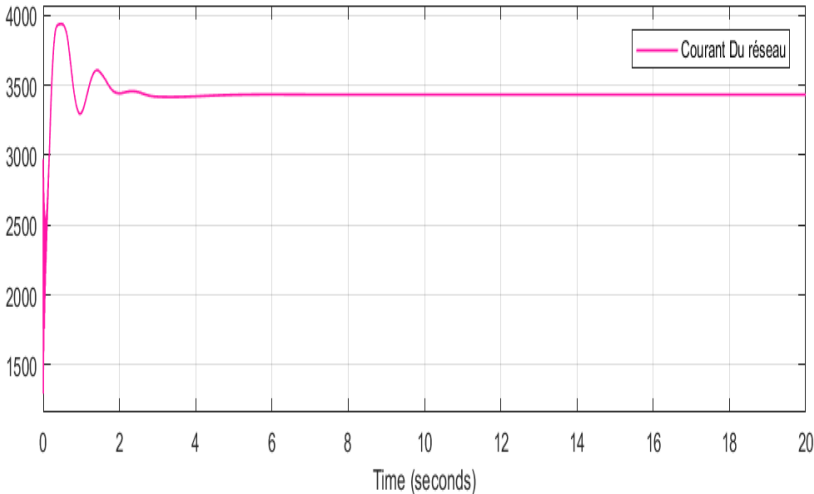


Figure III. 26: courant du réseau

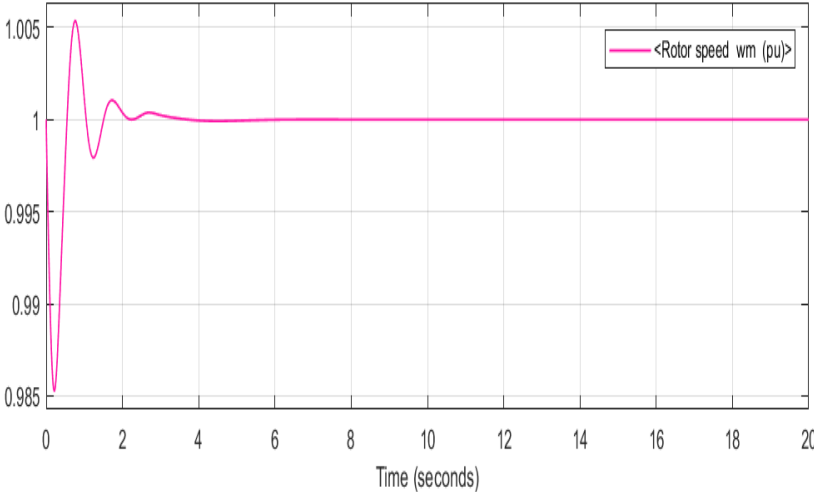


Figure III.27: la vitesse de rotor

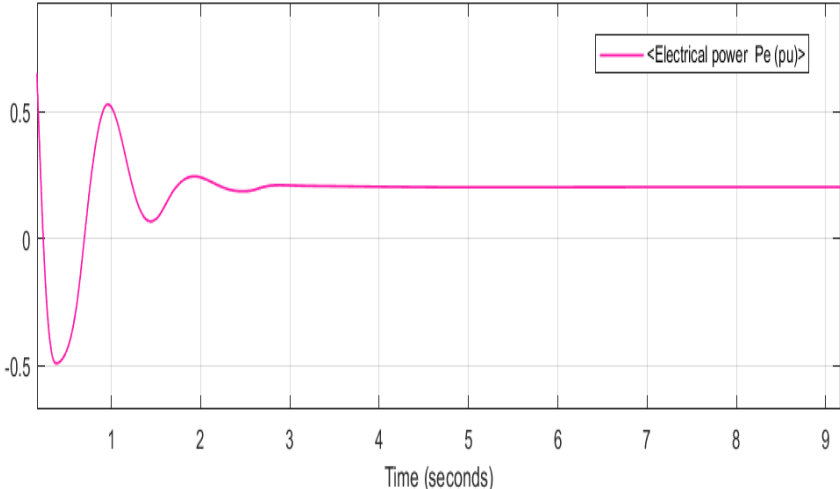


Figure III. 28 : la puissance électrique

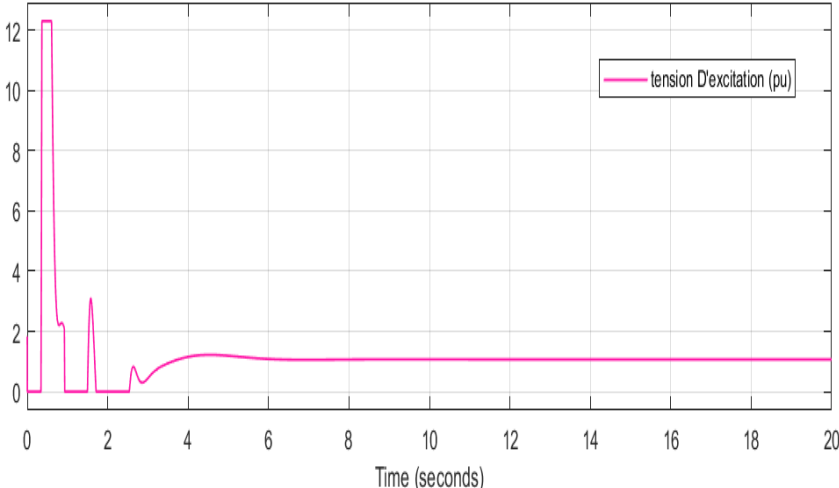


Figure III.29 : la tension d'excitation

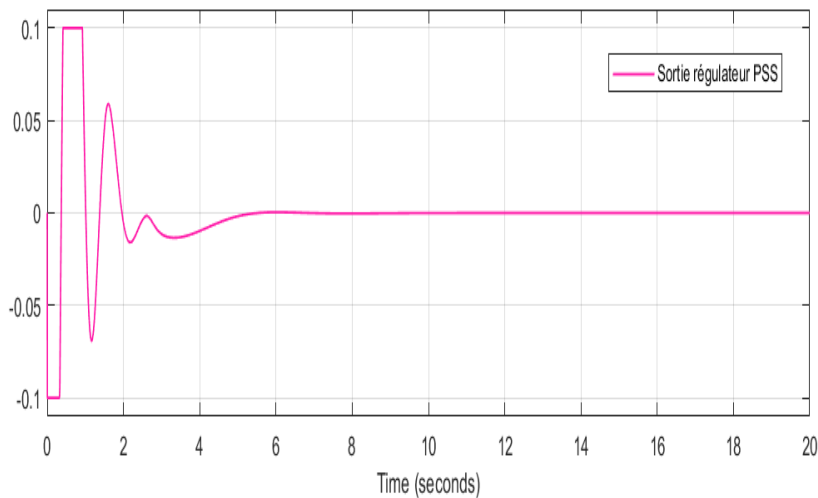


Figure 30 : la sortie de régulateur PSS

III.2.3.3. Interprétation des résultats de fonctionnement normal :

Analyse du graphique Tension de sortie, un pic initial puis amortissement rapide aussi un petit dépassement visible au début puis converge vers la valeur de consigne sans erreur, le comportement très peu oscillant après (2_4) seconde indique que le contrôleur neuronal assure une bonne capacité d'apprentissage

Analyse du graphique de courant du réseau, le courant injecté au réseau présente un choc transitoire lié à la perturbation initiale mais revient rapidement à sa valeur d'équilibre, le contrôleur limite la durée des oscillations du courant ce qui est favorable pour la qualité du courant et la protection du réseau

- Analyse du graphique de la vitesse du rotor, la vitesse retrouve rapidement sa valeur nominale avec des oscillations fortement amorties, Cela signifie que le contrôleur assure une bonne synchronisation et stabilité mécanique
- Analyse du graphique de la puissance électrique, la courbe montre un transitoire atténué par le contrôleur neuronal, après les perturbations la puissance retrouve rapidement sa valeur de régime indiquant une bonne gestion de l'échange d'énergie
- Analyse du graphique de la tension d'excitation, très forte variation (un pic important) puis décroissance et stabilisation à faible niveau, cette stratégie de commande agressive au départ permet de réduire le temps de réponse globale mais il faut vérifier que les amplitudes de commande restent acceptables
- Analyse du graphique de la sortie de régulateur PSS, la loi de commande du réseau de neurone est dynamique forte au début pour corriger les perturbations puis s'atténue rapidement en régime

Ces résultats montrent que le régulateur flous réduit considérablement le dépassement et permet une réponse plus douce avec une meilleure robustesse face aux perturbations

III.3 : La comparaison entre les trois contrôleurs :

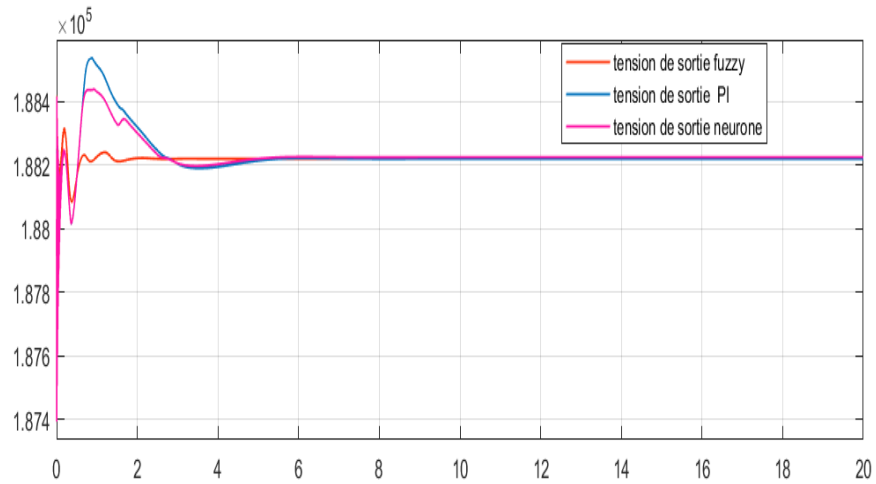


Figure III.31 : la tension de sortie de trois régulateurs

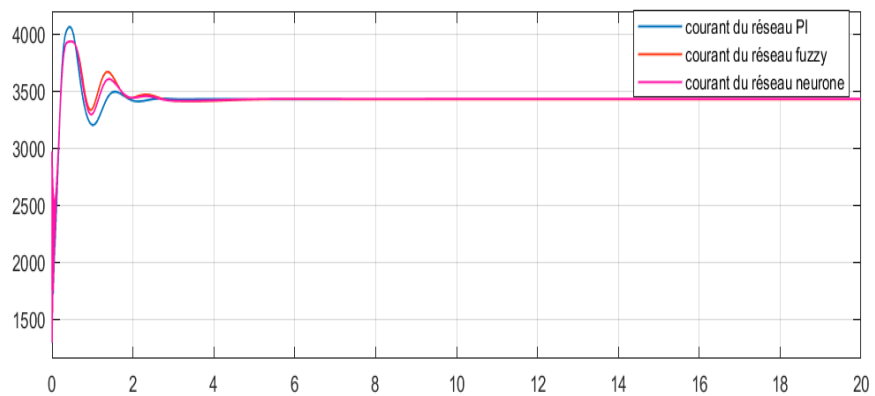


Figure III. 32 : courant du réseau de trois régulateurs

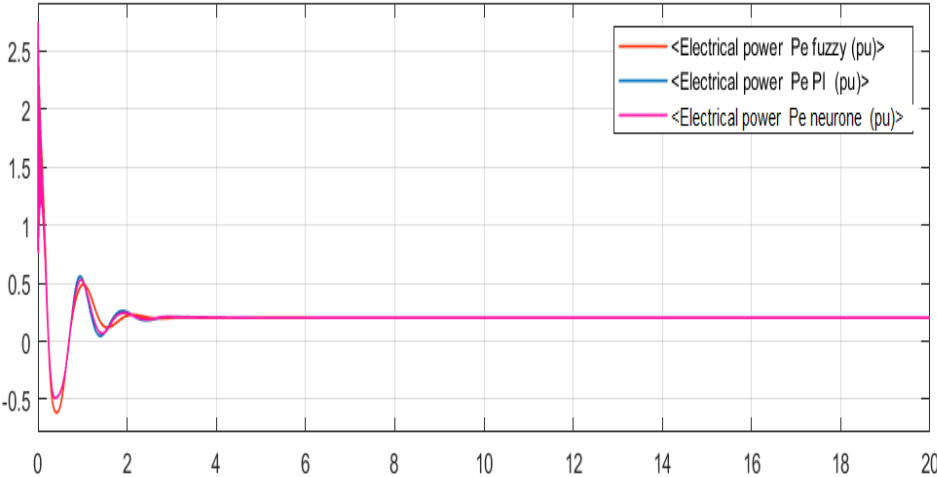


Figure III.33: la vitesse de rotor de trois régulateurs

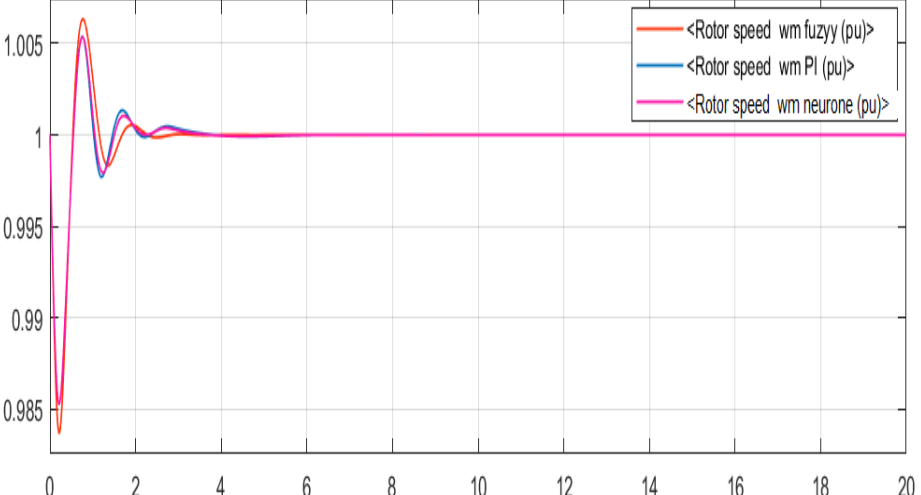


Figure III.34 : la puissance électrique de trois régulateurs

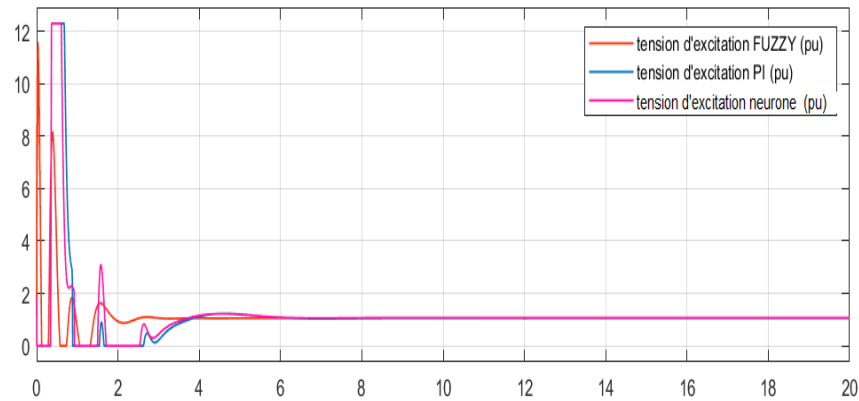


Figure III.35 : la tension d'excitation de trois régulateurs

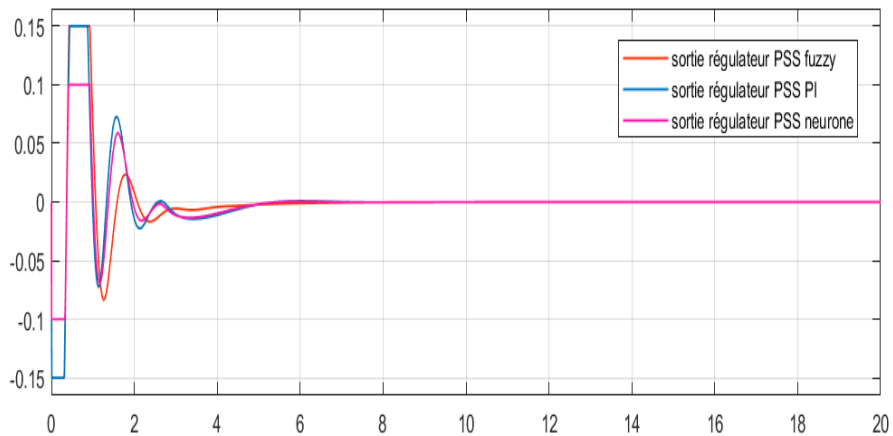


Figure III.36 : la sortie de régulateur PSS de trois régulateurs

Tableau (III.2) de comparaison

Observé	Critère de performance	Contrôleur PI	Contrôleur fuzzy	Contrôleur neuronal
Tension de sortie (v)	Temps de réponse	11.9 ms	6.7 ms	8.3 ms
	Dépassement	23.0 %	27.7 %	27.4 %
	Temps de Signal stabilisation	19.1 ms	19.1 ms	19.1 ms
Tension d'excitation	Temps de réponse	14.6 ms	56.2 ms	58.4 ms
	Dépassement	0.5 %	1.1 %	0.9 %
	Temps de stabilisation	--	--	--
Puissance électrique	Temps de réponse	--	--	--
	Dépassement	--	1.9 %	1.9 %
	Temps de stabilisation	--	--	--

Courant du réseau	Temps de réponse	81.4 ms	79.51 ms	218.2 ms
	Dépassement	59.0 %	67.1 %	34.4 %
	Temps de stabilisation	--	--	--
Vitesse du rotor	Temps de réponse	230.6 ms	215.5 ms	215.9 ms
	Dépassement	36.3 %	40.1 %	40.1 %
	Temps de stabilisation	--	--	--
Sortie régulateur PSS	Temps de réponse	0.0 s	2.3 ms	5.0 ms
	Dépassement	Inf %	16.4 %	0.5 %
	Temps de stabilisation	--	--	4.7 μ s

✓ **Remarque :**

Les résultats des courbes superposés et les valeurs remarquables relevés du tableau (III.2), montre que le contrôleur flou présente :

Le meilleur temps de réponse sur presque tous les signaux.

Une bonne stabilité avec des temps de stabilisation similaires ou équivalents aux autres.

Même si les dépassements sont parfois un peu plus élevés, il reste performant grâce à sa rapidité et sa capacité d'adaptation.

✓ **Commentaire :**

Le contrôleur PI reste simple mais limité par ses dépassements élevés. Le contrôleur neuronal offre un compromis intéressant entre rapidité et stabilité. Cependant, le contrôleur fuzzy apparaît comme le plus performant dans l'ensemble, grâce à sa rapidité de réponse et son efficacité sur plusieurs critères, ce qui en fait la meilleure solution pour ce système.

III.4.1 Simulation avec un court-circuit triphasé :

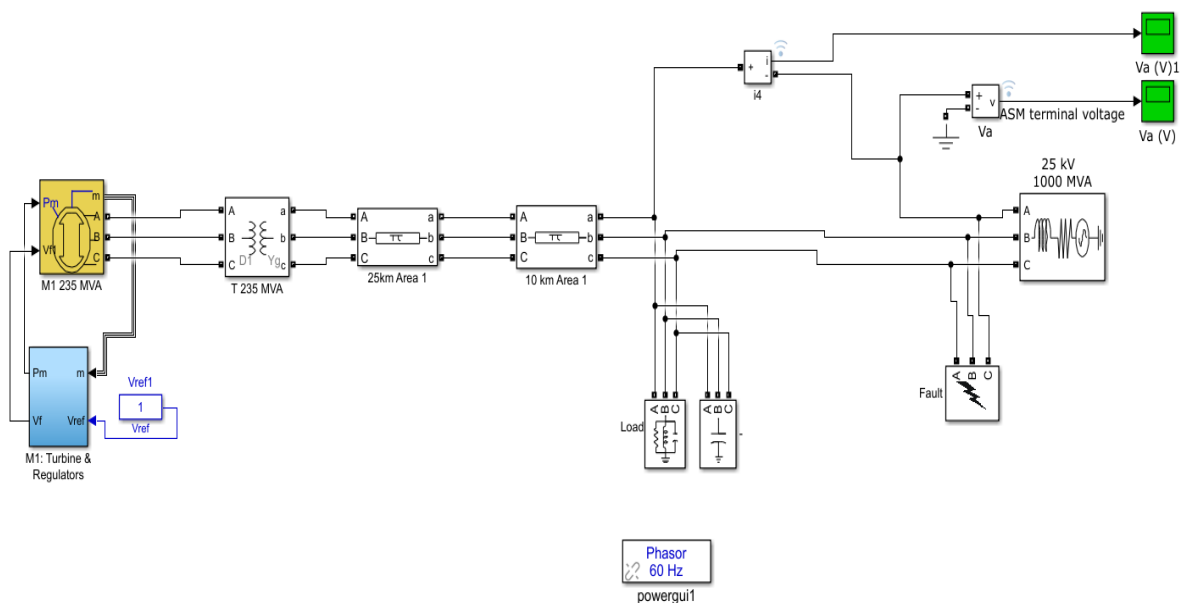


Figure III.37: schémas globaux de simulation avec un défaut triphasé

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation de la réponse dynamique d'un système de génération équipé d'un système d'excitation contrôlé par les trois régulateurs en cas de défaut triphasé.

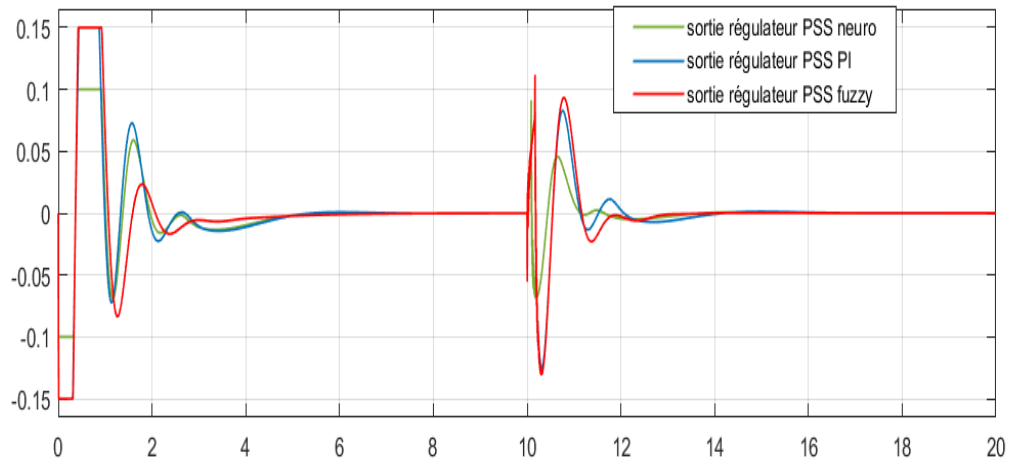


Figure III 38 : la sortie de régulateur PSS de trois régulateurs

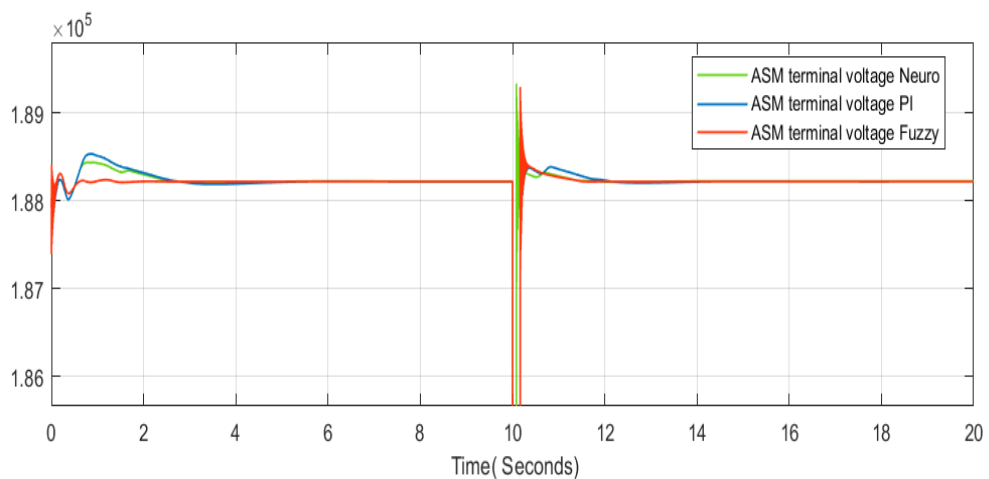


Figure III 39 : la tension de sortie de trois régulateurs

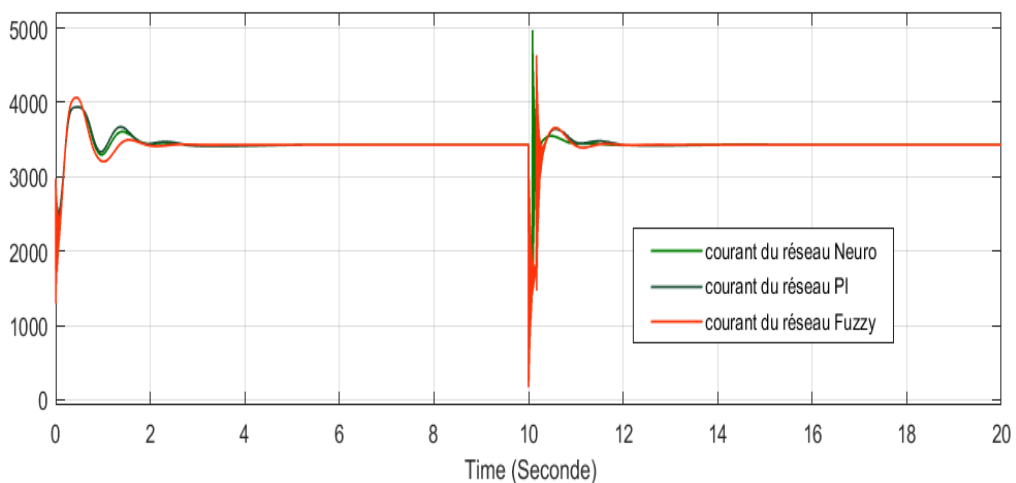


Figure III. 40 : courant du réseau de trois régulateurs

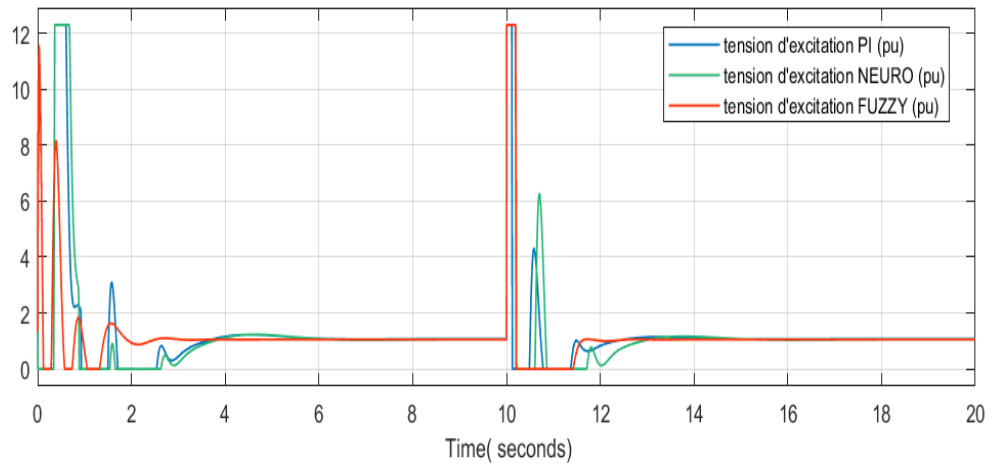


Figure III. 41 : la tension d'excitation de trois régulateurs

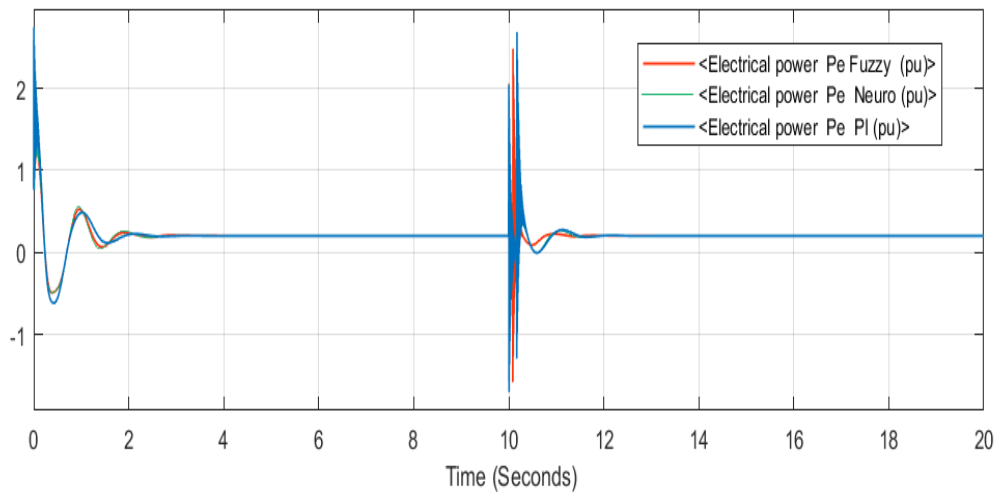


Figure III.42 : la puissance électrique de trois régulateurs

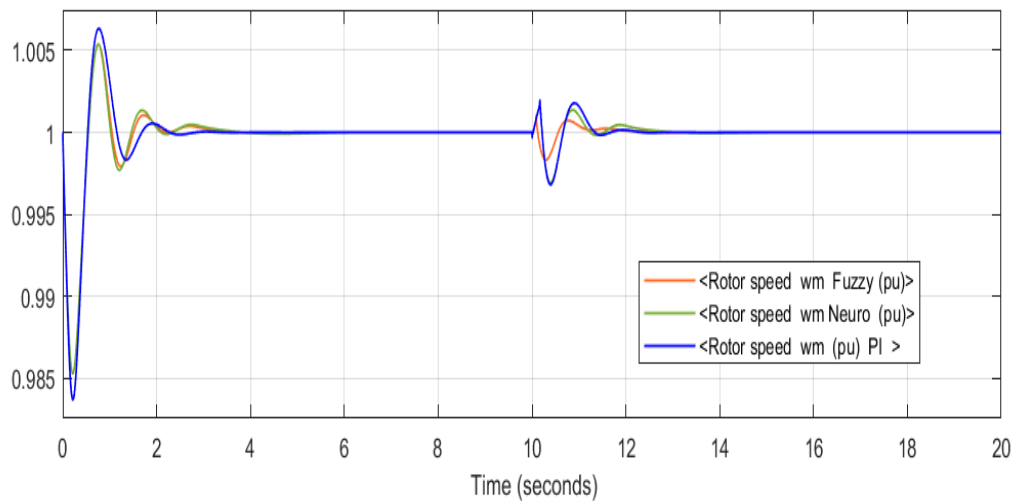


Figure 43 : la vitesse de rotor de trois régulateurs

III.4.2 : L'Interprétation générale :

L'étude comparative des différents régulateurs appliqués à l'alternateur met en évidence des différences significatives en termes de rapidité, de précision et de stabilité.

Le régulateur PI classique assure la régulation de la tension, mais au prix d'un temps de réponse relativement élevé, d'un dépassement marqué et d'oscillations résiduelles, traduisant une stabilité dynamique limitée.

Le régulateur à base de réseaux de neurones améliore la performance par rapport au PI, en réduisant partiellement les dépassements et en accélérant la stabilisation. Toutefois, dans les conditions de simulation, il présente encore des fluctuations et ne parvient pas à amortir totalement les oscillations.

En revanche, le régulateur à logique floue se distingue par sa supériorité globale. Il présente un temps de réponse plus court, un dépassement minimal, et surtout une stabilité remarquable. Les oscillations transitoires sont rapidement amorties et la tension se maintient proche de la valeur de consigne avec une grande précision.

Ainsi, dans le cadre de cette simulation, la régulation floue apparaît comme la solution la plus performante pour le contrôle de l'alternateur. Elle combine rapidité, robustesse et précision, ce qui en fait une approche mieux adaptée que les régulateurs classiques ou neuronaux dans ce contexte.

III.5. Conclusion

L'analyse des résultats obtenus met en évidence les différences de performance entre les trois types de régulateurs étudiés. Le contrôleur PI, bien qu'assez simple et relativement rapide, présente des dépassements importants et un manque de stabilité sur certains signaux, ce qui limite son efficacité dans des conditions dynamiques complexes. Le contrôleur neuronal, quant à lui, offre un compromis acceptable entre temps de réponse et réduction des dépassements, assurant ainsi une meilleure stabilité que le PI. Cependant, c'est le contrôleur fuzzy qui se démarque comme la solution la plus performante. En effet, il présente les meilleurs temps de réponse dans la majorité des cas et maintient une stabilité satisfaisante, ce qui confirme sa capacité d'adaptation et son efficacité supérieure pour la régulation du système

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé m'a permis d'explorer la centrale à cycle combiné Sonackter de Mostaganem et d'enrichir mes connaissances théoriques et pratiques. Comme, j'ai aussi eu beaucoup de savoir-faire sur le fonctionnement du générateur, ses composants et les différents transformateurs. Nous avons expliqué les systèmes d'excitation et différentes régulations de l'alternateur à grand puissance, Nous avons présenté d'une façon générale les différents types de stabilité des réseaux électriques. Aussi les méthodes de l'intelligence artificielle floue et neurone. Cette étude nous a permis de conclure

Le régulateur de tension automatique AVR du système d'excitation de générateur, participe vivement à augmenter la marge de stabilité transitoire, ce qui conduit à son amélioration. Les stabilisateurs de puissance (PSS), sont les moyens efficaces les plus communs non seulement pour éliminer les effets pour amortir les oscillations des modes globaux ainsi que les modes locaux leur action est cumulatifs.

Dans ce contexte nous avons choisi faire une étude du circuit de régulation du système de la puissance active et la puissance réactive pour la stabilité du point de fonctionnement de l'alternateur. Ce point est généralement commandé par la tension de l'excitation avec un régulateur automatique (AVR) et la vitesse de rotation transmise à partir de la turbine pour stabiliser la puissance (PSS).

Alors après l'étude des circuits du régulateur PI et un apprentissage sur les deux méthodes des réseaux de neurone et la logique flous, nous avons exécuté une simulation avec le logiciel de simulation Matlab-Simulink en vue de valider fonctionnement de la régulation de tension d'excitation et de la fréquence. Nous avons obtenu des résultats acceptables des grandeurs de l'alternateur dans le cas de fonctionnement normales et le cas d'un fonctionnement perturbé en présence d'un court-circuit, nous avons déduit que le régulateur flou AVR+PSS permet de stabiliser rapidement les tensions statoriques, les courants statoriques et puissance électrique active de l'alternateur pendant le démarrage ainsi dans le cas d'un défaut temporaire. En outre nous avons fait une comparaison entre le régulateur conventionnel AVR+PSS et les régulateur intelligent AVR+PSS de type neuronal et logique flous, ainsi nous avons remarqué que le régulateur flou été le meilleur.

Enfin notre mission a été achevée par la rédaction de ce mémoire au niveau de la nouvelle centrale de sonackter de Mostaganem. Ce projet de fin d'étude, nous a permet d'apprendre beaucoup de connaissances dans le secteur industriel de production de l'électricité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Rapport Centrale, document interne de la centrale thermique de Mostaganem en cycle combiné
- [2] : formation sur les centrales thermiques, document interne de la centrale thermique de Mostaganem en cycle combiné
- [3] : [Cycle de Rankine — Encyclopedie Energie \(energyeducation.ca\)](https://www.energyeducation.ca/fr/cycle-de-rankine)
- [4] : [Brayton fr.png \(768x358\) \(energyeducation.ca\)](https://www.energyeducation.ca/fr/brayton)
- [5] : [Turbine — Encyclopedie Energie \(energyeducation.ca\)](https://www.energyeducation.ca/fr/turbine)
- [6] : [Différence entre une turbine à gaz et une turbine à vapeur / Mécanique | La différence entre des objets et des termes similaires. \(differkinome.com\)](https://www.differkinome.com/fr/difference-entre-une-turbine-a-gaz-et-une-turbine-a-vapeur/)
- [7] : [mémoire fin d'étude de master, intitulé : Etude du système de controle de la tension des alternateurs de grande puissance application :alternateur de la centrale de marsat el hadjedj](#)
[L'auteur : Kellal, Mohamed; Saadaoui, Mouad \(2019-07-10\) \(7\).pdf ,université abdelhamid ibn badis ,Mostaganem](#)
- [8] : [Principe de l'alternateur - myMaxicours](#)
- [9] : [Transformateur électrique : définition et explications \(techno-science.net\)](https://www.techno-science.net/fr/transformateur-electrique-definition-et-explications)
- [10] : [Structure and equivalent circuit of PMSM. | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/325111111)
- [11] : Maintenance du générateur de secours TOSHIBA 3700KW.pdf « mémoire fin d'étude »

[12] : [CHOUCHA.Abdelghani.pdf \(enp.edu.dz\)](#)

[13] : document interne de la centrale thermique Marsat El Hadjadj

[14] [Mémoire Regulation Alternateur.pdf \(univ-km.dz\)](#)

[15] : P. M. Anderson, A. A. Fouad, "*Power System Control and Stability*", JOHN WILEY andSONS, 2003.

[16] : Zebalah Rebiha <<Synthèse des stabilisateurs de puissance (PSS) en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle>> mémoire fin d'étude.[17] :



[Régulation de Tension d'un Alternateur Triphasé.pdf \(univ-blida.dz\)](#) [Régulation de Tension d'un Alternateur Triphasé.pdf \(univ-blida.dz\)](#)

[18] : [modeles-de-prevision-neuronaux-vs-anfis.pdf](#)

[19] : [commande prdictive non lineaire en utilisant les systemes neuro flous.pdf \(univ-biskra.dz\)](#)

[20] : [Qu'est-ce que le Système d'Inférence Floue Adaptatif Neuro \(ANFIS\)? \(allaboutai.com\)](#)

Annexe A1 : (Plaque signalétique de alternateur entraîné par turbine à GAZ)

		ALTERNATEUR REFROIDI PAR HYDROGENE	
N D'ALTERNATEUR: GG10417			
BIPOLAIRE	TRIPHASÉ	COUPLAGE: ETOILE (Y)	50 HERTZ PRESSION DU GAZ: 45psig /310.3 kPa
TEMPERATURE A PUISSANCE NOMINALE		CLASSE DE SERVICE:	
N'EXCEDERA PAS:		PUISSANCE APPARENTE: 294000 KVA	
106 °C SUR LE STATOR		COURANT STATOR: 11316	A
120 °C SUR LE ROTOR		TENSION STATOR: 15000	V
TEMPERATURE MAX GAZ FROID 40 °C		COURANT ROTOR: 1561	A
TEMPERATURE EAU D'ENTREE DES REFRIGERANTS 30 °C		TENSION ROTOR: 576	V
		FACTEUR DE PUISSANCE: 0.90	
ANNEE DE FABRICATION: 2014			
TYPE D'ALTERNATEUR: 324 LU			
CLASSE D'ISOLATION DES ENROULEMENTS ROTOR: F			
CLASSE D'ISOLATION DES ENROULEMENTS STATOR: F			
CLASSE D'ECHAUFFEMENT DES ENROULEMENTS ROTOR: B			
CLASSE D'ECHAUFFEMENT DES ENROULEMENTS STATOR: B			
CLASSE DE SERVICE: CONTINU, (SERVICE S1)			
ALTITUDE: 5 m			
POIDS STATOR: 211147 Kg			
POIDS ROTOR: 45813 Kg			
POIDS ALTERNATEUR COMPLET: 278374 Kg			
DEGRE DE PROTECTION: IP-54			
NORME: IEC 60034-1 & -3			
VITESSE NOMINALE: 3000 rpm			
TEMPERATURE AMBIANTE MAXIMALE: 40 °C			
TEMPERATURE AMBIANTE MINIMALE: -2 °C			
TEMPERATURE MAXIMALE D'EAU DE REFROIDISSEMENT: 55 °C			
SENS DE ROTATION, VUE DU CÔT É COLLECTEUR  SENS ANTIHORAIRE			
ATTENTION: AVANT L' INSTALLATION, LA MISE EN ROUTE, OU LES OPERATIONS D'ENTRETIEN DE L'ALTERNATEUR, LISEZ LES INSTRUCTIONS DANS LA GER: 120528			
<h1>General Electric Company</h1>			
1 RIVER RD SCHENECTADY, NY 12345 U.S.A.		Fabriqué aux États-Unis	

Annexe A2 : (Plaque signalétique d'alternateur entraîné par turbine à VAPEUR)



ALTERNATEUR REFROIDI PAR HYDROGENE

N D'ALTERNATEUR: SG10189

2 POLES	3 PHASES	COUPLAGE: ETOILE (Y)	50 HERTZ	PRESSION DE GAZ: 60psig /413.7 kPa
PUISSANCE:				
LA PLAGE TOTALE DE TEMPERATURE A PUISSANCE NOMINALE	PUISSANCE APPARENTE: 330000		KVA	
N EXCEDERA PAS:	COURANT STATOR: 12702		A	
106 °C SUR LE STATOR	TENSION STATOR: 15000		V	
120 °C SUR LE ROTOR	COURANT ROTOR: 1716		A	
TEMPERATURE MAX GAZ FROID 40 °C	TENSION ROTOR: 611		V	
TEMPERATURE D'EAU ENTREE ECHANGEUR HYDROGENE 30 °C	FACTEUR DE PUISSANCE: 0.90			
ANNEE DE FABRICATION: 2015				
CODE MACHINE: 324 LD				
CLASSE D'ISOLATION DES ENROULEMENTS ROTOR: F				
CLASSE D'ISOLATION DES ENROULEMENTS STATOR: F				
CLASSE D'ECHAUFFEMENT DES ENROULEMENTS ROTOR: B				
CLASSE D'ECHAUFFEMENT DES ENROULEMENTS STATOR: B				
PUISSANCE: CONTINU, (SERVICE S1)				
ALTITUDE: 5 m				
POIDS STATOR: 211147 Kg				
POIDS ROTOR: 45813 Kg				
POIDS ALTERNATEUR COMPLET: 278370 Kg				
DEGRE DE PROTECTION: IP-54				
NORME: IEC 60034 1 & 3				
VITESSE NOMINALE: 5000 rpm				
TEMPERATURE AMBIANTE MAXIMALE: 40 °C				
TEMPERATURE AMBIANTE MINIMALE: -2 °C				
TEMPERATURE MAXIMALE D'EAU DE REFROIDISSEMENT: 30 °C				
SENS DE ROTATION, VUE DU CÔTÉ COLLECTEUR		SENS HORAIRE		

ATTENTION: AVANT L'INSTALLATION, LA MISE EN ROUTE, OU LES OPERATIONS D'ENTRETIEN DE L'ALTERNATEUR, LIRE LES INSTRUCTIONS DANS LA GDK: 120528

General Electric Company

1 RIVER RD SCHENECTADY, NY 12345 U.S.A. Made in U.S.A.