



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique
Spécialité : Electrotechnique Industriel

Thème

**ETUDE DU SYSTEME DE REGULATION DE LA TENSION (PSS+AVR)
DES ALTERNATEURS DE GRANDE PUISSANCE PAR LE RESEAU DE
NEURONES
APPLICATION : ALTERNATEUR DE LA CENTRALE DE MARSAT EL HADJADJ**

Réalisé par :

Benattia Mohamed

Benioub Sid Ahmed

Président :	Soltane Benalou Abdelkader	MAA	Université de Mostaganem
Examineur :	Bekkadour Benattia Mustapha	MCB	Université de Mostaganem
Encadreur :	Bekkouch Benaissa	PR	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2019/2020

في هذا العمل نقدم التنظيم التفصيلي للمولد. سنبدأ دراستنا بوصف محطة كهرباء مرسى الحجاج بالخصائص والمكونات الرئيسية ومبدأ التشغيل وأنماط الإثارة المختلفة لمولدها. ثم يتم تخصيص الجزء الثاني لدراسة ارتباط المولد بمنظم الجهد الأوتوماتيكي AVR ومثبت الطاقة PSS. تم تقديم نتائج المحاكاة أيضًا بناءً على المعلمات الفعلية للمولد. الغرض من المحاكاة لدينا هو تحليل تشغيل اللوائح في التشغيل العادي وفي حالة حدوث عطل عابر في دائرة قصر ثلاثية الطور. نفسر نتائجنا لنوعين من تنظيم جهد الإثارة (AVR + PSS التقليدي و AVR + PSS العصبي) لتحديد أفضل منظم. أخيرًا، استنتجنا أن المنظم العصبي AVR + PSS أسرع وأكثر كفاءة مقارنة بمنظم AVR + PSS التقليدي. تم تنفيذ المحاكاة بواسطة برنامج Matlab-Simulink.

الكلمات المفتاحية : مولد التيار المتردد ، مثبت الطاقة ، تنظيم الجهد والتردد ، الطاقة الكهربائية ، الشبكة العصبية.

Résumé

Dans ce travail nous présentons la régulation détaillée de l'alternateur. On va commencer notre étude par la description de la centrale de Marsat El Hadjadj 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. Les résultats de simulation ont été également présentés basés sur les paramètres réels de l'alternateur. 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 fugitif. Nous interprétons notre résultat pour deux types de régulation de tension d'excitation (AVR+PSS conventionnelle et AVR+PSS neuronal) pour déterminer le meilleur régulateur.

Enfin nous avons déduit que le régulateur neuronal AVR+PSS est plus rapide et performant par rapport au régulateur conventionnel AVR+PSS. 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

Summary

In this work we present the detailed regulation of the alternator. We will begin our study by describing the Marsat El Hadjadj power station with the characteristics, the main components, the operating principle and the different modes of excitation of its alternator. Then the second part is devoted to the study of the association of the alternator with automatic voltage regulators AVR and power stabilizer PSS. The simulation results were also presented based on the actual parameters of the alternator. The purpose of our simulation is to analyze the operation of the regulations in normal

operation and in the event of a transient three-phase short-circuit fault. We interpret our result for two types of excitation voltage regulation (AVR + PSS conventional and AVR + PSS neural) to determine the best regulator.

Finally, we deduced that the AVR + PSS neural regulator is faster and more efficient compared to the conventional AVR + PSS regulator. The simulation was carried out by the Matlab-Simulink software.

Keywords: Alternator, power stabilizer, voltage and frequency regulation, electrical energy, neural network

DEDICACE

Pour que notre réussite soit complète nous la partageons avec toutes les personnes que nous aimons ; nous dédions ce modeste travail :

À nos très chers parents qui n'ont pas cessé de prier pour nous et de nous assister durant toute la durée de nos études, que dieu les garde pour nous.

À nos chères frères et chères sœurs qu'ils nous fournissent tous leurs effort et moyen pour que nous terminons nos études.

À toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

À tous les amis de la faculté de science et de la technologie particulièrement la promo de génie électrique 2020.

À tous ceux que nous aimons et à tous ceux qui nous aiment.
Avec une dédicace spéciale à Mr BEKKOUCH BENAÏSSA qui nous a encouragés et permis de réaliser ce projet.

Remerciement

Nous remercions tout d'abord « Dieu » tout puissant, seigneur de l'univers, de nous avoir donné le courage et la volonté d'entamer et de finir cette mémoire dans les bonnes conditions.

*Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos profonde gratitude à notre professeur et encadrant **Monsieur Bekkouch Benaissa** pour le temps qu'il a consacré, pour les précieuses informations qu'il nous a prodiguées avec intérêt et compréhension, pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période du projet.*

*Nous adressons aussi nos vifs remerciements aux membres des jurys **Mr Soltane Benalou Abdelkader, Mr Bekkadour Benattia Mustapha** pour avoir bien voulu examiner et juger notre travail.*

Nos remerciements vont aussi à tout le personnel que nous avons contacté durant notre stage au sein de la centrale de Marsat El Hadjadj, auprès desquelles nous avons trouvé l'accueil chaleureux, l'aide et l'assistance dont nous avons besoin.

Nous ne laisserons pas cette occasion passer, sans remercier tous les enseignants et le personnel de la faculté de science et de la technologie, et particulièrement ceux de département de l'électrotechnique pour leur aide et leurs précieux conseils et pour l'intérêt qu'ils portent à notre cursus universitaire.

Enfin, nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet : notre famille, nos amies et nos camarades de promotion.

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale	01
Chapitre I : Présentation de la centrale thermique de Marsat El Hadjadj	
Introduction	04
I.1. Présentation de la centrale de MARSAT EL HADJADJ.....	04
I.1.1. Description de la centrale.....	04
I.2. Les principaux constituants de la centrale.....	06
I.2.1. groupe turbo-alternateur.....	06
I.2.1.1. Turbine.....	06
I.2.1.2. Alternateur.....	06
I.3. Installation électrique.....	07
I.3.1. Partie Haute Tension (220 KV).....	07
I.3.2. Ligne de Secours.....	08
I.3.3. Les auxiliaires électriques	09
I.3.3.1. Les auxiliaires Tranches	09
I.3.3.1.1. Partie Moyenne Tension	09
I.3.3.1.2. Basses Tension BT (380V)	10
I.3.3.1.3. Partie Courant Continue	11
I.3.3.2. Les Auxiliaires Généraux	12
I.3.3.2.1. L'éclairage	13
I.3.3.2.2. Eclairage de secours	13
I.4. Description de l'alternateur de MARSAT EL HADJADJ.....	13
I.4.1. Les caractéristiques nominales.....	14
I.4.2. Les principaux éléments de l'alternateur	14
I.4.2.1. Le Rotor	14

Sommaire

I.4.2.2. Le Stator	14
I.4.3. Les Types d'alternateurs	14
1.4.3.1. Alternateur à rotor à pôles saillants	14
1.4.3.2 Alternateur à rotor à pôles lisses	14
I.4.4. Principe de fonctionnement	15
I.4.4.1. Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur	15
I.4.4.2. Diagramme des tensions et autre expression de la f.e.m	15
I.4.4.3. Les zone de fonctionnement en alternateur	16
I.4.5.4. Bilan de puissance	17
I.4.5. Refroidissement de l'enceinte alternateur	18
I.5. Couplage des Alternateurs	19
I.5.1. Conditions de couplage.....	19
I.6. Excitations des alternateurs	21
I.6.1. Différents types de système d'excitation	22
I.6.1.1. Système d'excitation à courant continu (DC)	22
I.6.1.2. Système d'excitation à courant alternatif (AC)	22
I.6.1.3. Système d'excitation statique	24
I.7. Stabilité des alternateurs de puissance	24
I.7.1. Stabilité de l'angle du rotor (stabilité angulaire)	26
I.7.1.1. Stabilité angulaire aux grandes perturbations-stabilité transitoire	26
I.7.1.2. Stabilité angulaire aux petites perturbations-stabilité dynamique	26
I.7.2. Stabilité de tension de l'alternateur	26
I.7.3. La stabilité de fréquence	27
I.8. Circuits de stabilisation d'un système d'excitation	27

Sommaire

I.8.1. Représentation d'un système turbo-alternateur avec AVR	27
I.8.2. Éléments d'un système d'excitation	28
I.8.3. Stabilisateurs des systèmes de puissance 'PSS'	29
Conclusion	29

Chapitre II : Etude de stabilité de l'alternateur

Introduction	31
II.1. Description des régulations	31
II.1.1. Les régulateurs de tension AVR	32
II.1.1.1. Principe de fonctionnement du système AVR	33
II.1.1.1. Principe de la régulation de tension	33
II.1.2. Rôle du régulateur de tension	33
II.1.3. Réglage de la fréquence	34
II.1.4. Rôle du régulateur de fréquence	34
II.1.5. Cause et sortes d'oscillations de puissance	35
II.1.6. Les régulateurs de puissance PSS	35
II.1.6.1. Définition.....	35
II.1.6.2. Qu'est-ce que signifie PSS ?	35
II.1.6.3. A quoi sert PSS ?	35
II.2. Représentation du PSS appliqué au système MS-réseau infini	36
II.2.1. M.S avec son système de commande (AVR-PSS)	38
II.2.2. Les régulateurs de puissance PSS	38
II.2.3. PSS avec une action proportionnelle intégrale	39
II.2.4. Signal d'entrée	40
II.2.5. Signal de sortie	40

Sommaire

II.3. La régulation de fréquence par les réseaux de neurone	40
Introduction	40
II.3.1. Principe du réseau de neurone	41
II.3.1.1 Neurone biologique	41
II.3.1.2. Neurone formel	41
II.3.2. Structure d'un Réseau de Neurones	42
II.3.3. Equations du réseau	43
II.3.4. Apprentissage du réseau	43
II.3.4.1 Apprentissage par retro propagation du gradient	43
II.4 Réseaux Neuronaux Dynamiques	44
II.4.1 Réseaux avec retour d'état	44
II.4.2 Equations du réseau	44
II.4.3 Apprentissage des réseaux dynamiques	45
II.4.4 Structure de commande MFA/FEP	46
II.4.5 Entraînement du réseau contrôleur DTRNN par l'algorithme FEP	47
II.4.6. Application de l'approche MFA/FEP au PSS Neuronal	48
Conclusion	49

Chapitre III : Interprétations et comparaisons des Résultats de simulation

Introduction	51
III.1. Simulation de régulation AVR+PSS conventionnelle	51
III.1.1. Modèle de simulation	51
III.1.2. Simulation en fonctionnement normal	54
III.1.3. Interprétation des résultats	58
III.1.4. Simulation AVR+PSS en cas de défaut (court-circuit triphasé fugitif)	58

Sommaire

III.1.5. Interprétation des résultats	62
III.1.6. Comparaison entre AVR conventionnelle et AVR+PSS conventionnelle	63
III.1.6.1. Comparaison des tensions d'excitation	63
III.1.6.2. Comparaison des courants statoriques	64
III.1.6.3. Comparaison de la puissance active	67
III.1.7. Comparaison entre AVR conventionnelle et AVR+PSS conventionnelle en cas de défaut (court-circuit triphasé fugitif)	67
III.1.7.1. Comparaison des tensions d'excitation	67
III.1.7.2. Comparaison des courants statoriques	68
III.1.7.3. Comparaison de la puissance active	70
III.2. Simulation de régulation d'excitation AVR+PSS neuronal	72
III.2.1. Modèle de simulation	72
III.2.2. Simulation en fonctionnement normal	74
III.2.3. Interprétation des résultats	78
III.2.4. Simulation en présence d'un court-circuit fugitif	78
III.2.5. Interprétation des résultats	81
III.2.6. Comparaison entre AVR+PSS conventionnelle et AVR+PSS neuronal	82
III.2.7. Comparaison pour le fonctionnement normal	82
III.2.7.1. Comparaison des tensions d'excitation	82
III.2.7.2. Comparaison des courants statoriques	83
III.2.7.3. Comparaison de la puissance active	85
III.2.8. Comparaison entre AVR avec PSS conventionnelle et AVR avec PSS neuronal en cas de défaut (court-circuit triphasé fugitif)	86
III.2.8.1. Comparaison des tensions d'excitation	87

Sommaire

III.2.8.2. Comparaison des courants statoriques	88
III.2.8.3. Comparaison de la puissance active	89
Conclusion	90
Conclusion générale	92
Annexes	94
Bibliographie	98

Listes des Figures

Listes des Figures

Chapitre I : Présentation de la centrale thermique de Marsat El Hadjadj

Figure (I-1) : Illustration du processus de transformation calorifique en énergie électrique	05
Figure (I-2) : schéma global du central thermique	05
Figure (I-3) : la turbine	06
Figure (I-4) : l'alternateur	07
Figure (I-5) : Architecture du réseau de transport	08
Figure (I-6) : Jeux de barres moyen tension des auxiliaires de l'alternateur	09
Figure (I-7) : Jeux de barres moyen tension des auxiliaires du central	10
Figure (I-8) : Jeux de barres basse tension des auxiliaires de l'alternateur	10
Figure (I-9) : Jeux de barres de courant continue des auxiliaires de l'alternateur	11
Figure (I-10) : Jeux de barres basse tension des services généraux de la centrale	12
Figure (I-11) : Jeux de barres d'éclairage de la centrale	13
Figure (I-12) : Jeux de barres d'éclairage de secours de la centrale	13
Figure (I-13) : Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur	15
Figure (I-14) : Diagramme des tensions	16
Figure (I-15) : Bilan de puissance de l'alternateur	17
Figure (I-16) : Système de refroidissement de l'alternateur	19
Figure (I-17) : La succession des phases	20
Figure (I-18) : Couplage d'une machine synchrone sur un réseau	21
Figure (I-19) : système d'excitation de type DC	22
Figure (I-20) : excitation de type AC avec redresseur non commandé	23
Figure (I-21) : excitation de type AC avec redresseur commandé	23
Figure (I-22) : l'excitation AC de type Brushless	23
Figure (I-23) : Système d'excitation statique	24
Figure (I-24) : Représentation de l'angle interne δ	24

Listes des Figures

Figure (I-25) : Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.....	25
Figure (I-26) : Variation d'angle de rotor.....	26
Figure (I-27) : Le schéma synoptique d'ensemble Turbo-alternateur avec AVR	27
Figure (I-28) : Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone	28

Chapitre II : Etude de stabilité de l'alternateur

Figure (II.1) : Description bref de la régulation d'alternateur	31
Figure (II.2) : Modèle schématique d'un régulateur classique de tension AVR	32
Figure (II.3) : Diagramme fonctionnel de la régulation de tension	33
Figure(II.4) : Diagramme fonctionnel de la régulation de puissance et de fréquence	35
Figure(II.5) : Structure d'un PSS classique	36
Figure (II.6) : Les diagrammes de Bode d'une compensation par avance de phase	37
Figure (II.7) : Un exemple d'une compensation par retard de phase	38
Figure(II.8) : Système de commande de la MS-RI	39
Figure (II.9) : La structure du PSS avec une action proportionnelle intégrale	39
Figure (II.10) : Anatomie d'un neurone biologique	41
Figure (II.11) : Le modèle du neurone formel	42
Figure (II.12) : Architecture d'un réseau multicouche	42
Figure (II.13) : Réseau avec retour d'état	44
Figure (II.14) : Réseau Récurrent discret (DTRNN)	44
Figure (II.15) : Structure de commande MFA à base de FEP	46
Figure (II.16) : Système de commande de la MS-RI avec l'utilisation du PSSN	48

Chapitre III : Interprétations et comparaisons des Résultats de simulation

Figure (III.1) : modèle globale de simulation.....	52
Figure (III.2): schéma de simulation du PSS classique.....	53
Figure (III.3): régulateur conventionnelle tension d'excitation.....	53

Listes des Figures

Figure(III.4): régulateur de vitesse de la turbine à vapeur.....	53
Figure (III.5): les courants statoriques.....	54
Figure (III.6): zoom des courants statoriques en régime transitoire.....	54
Figure (III.7): Zoom des courants statoriques en régime établi.....	55
Figure (III.8): la puissance électrique active.....	55
Figure (III.9): le couple électromagnétique.....	56
Figure (III.10) : la vitesse angulaire du rotor.....	56
Figure (III.11) : la puissance mécanique de la turbine	57
Figure (III.12): la tension d'excitation.....	57
Figure (III.13): l'angle interne Delta.....	57
Figure (III.14): les courants statoriques.....	59
Figure (III.15): Zoom des courants statoriques au point de défaut.....	59
Figure (III.16) : la puissance électrique active.....	60
Figure (III.16.a) : Zoom de la puissance électrique active au point de défaut.....	60
Figure (III.17): Le couple électromagnétique	60
Figure (III.17.a): Zoom du couple électromagnétique au point de défaut.....	61
Figure (III.18): La tension d'excitation	61
Figure (III.18.a): Zoom de La tension d'excitation au point de défaut.....	61
Figure (III.19): la vitesse angulaire du rotor.....	62
Figure (III.19.a): Zoom de la vitesse angulaire du rotor au point de défaut.....	62
Figure (III.20): la tension d'excitation pour les deux régulateurs	63
Figure (III.21): Zoom la tension d'excitation pour les deux régulateurs	64
Figure (III.22): le courant statorique I_a (une seule phase) pour les deux régulateurs	64

Listes des Figures

Figure (III.23): Zoom du courant statorique I_a (une seule phase) pour les deux régulateurs en régime transitoire	65
Figure (III.24): Zoom du courant statorique I_a (une seule phase) pour les deux régulateurs en régime transitoire.....	65
Figure (III.25): le courant statorique I_a pour les deux régulateurs en régime permanent.....	65
Figure (III.26): la puissance électrique active pour les deux régulateurs.....	67
Figure (III.27): la tension d'excitation pour les deux régulateurs.....	68
Figure (III.28): Zoom de la tension d'excitation pour les deux régulateurs au point de défaut..	68
Figure (III.29): le courant statorique I_a pour les deux régulateurs.....	69
Figure (III.30): Zoom du courant statorique pour les deux régulateurs au point de défaut.....	69
Figure (III.31): Zoom du courant statorique pour les deux régulateurs au point de défaut.....	69
Figure (III.32): Zoom du courant statorique pour les deux régulateurs au point de défaut.....	70
Figure(III.33): la puissance électrique active pour les deux régulateurs.....	71
Figure (III.34): Zoom du puissance électrique active pour les deux régulateurs au point de défaut.....	71
Figure (III.35) : modèle globale de simulation.....	73
Figure (III.36): bloc du PSS neuronal.....	74
Figure (III.37) : Les courants statoriques.....	74
Figure (III.38) : zoom des courants statoriques en régime transitoire.....	75
Figure (III.39): zoom des courants statoriques en régime permanent.....	75
Figure (III.40) : La puissance électrique active.....	76
Figure (III.41) : Le couple électromagnétique.....	76
Figure (III.42) : l'angle interne Delta.....	76

Listes des Figures

Figure (III.43) : La vitesse angulaire du rotor.....	77
Figure (III.44) : La puissance mécanique.....	77
Figure (III.45) : La tension d'excitation.....	77
Figure (III.46) : Les courants statoriques.....	79
Figure (III.47) : zoom des courants statoriques.....	79
Figure (III.48) : La puissance électrique.....	80
Figure (III.48.a) : zoom de la puissance électrique.....	80
Figure (III.49) : Le couple électromagnétique.....	80
Figure (III.49.a) : zoom du couple électromagnétique.....	81
Figure (III.50) : La tension d'excitation.....	81
Figure (III.51) : la tension d'excitation pour les deux régulateurs.....	82
Figure (III.52) : zoom de la tension d'excitation pour les deux régulateurs.....	83
Figure (III.53) : le courant statorique I_a pour les deux régulateurs.....	83
Figure (III.54) : zoom du courant statorique I_a pour les deux régulateurs en régime transitoire.....	84
Figure (III.55) : zoom du courant statorique I_a pour les deux régulateurs en régime transitoire.....	84
Figure (III.56) : la puissance électrique active pour les deux régulateurs.....	86
Figure (III.57) : zoom de la puissance électrique active pour les deux régulateurs.....	86
Figure (III.58) : la tension d'excitation pour les deux régulateurs.....	87
Figure (III.59) : zoom de la tension d'excitation pour les deux régulateurs au point de défaut..	87
Figure (III.60) : le courant statorique I_a pour les deux régulateurs.....	88
Figure (III.61) : zoom du courant statorique I_a pour les deux régulateurs au point de défaut..	88

Listes des Figures

Figure (III.62) : la puissance électrique active pour les deux régulateurs.....89

Figure (III.63) : zoom de la puissance électrique active pour les deux régulateurs au point de défaut.....89

Annexe A

Figure (1) : Bloc PSS neuronal.....95

Figure (2) : La 1^{ère} couche cachée.....96

Figure (3) : les entrées et les sorties du produit scalaire.....96

Liste des Abréviations

PSS : Power System Stabiliser.

PSSC : PSS Conventionnel.

PSSN : PSS Neuronal.

AVR : Automatique Voltage Régulator.

MS : Machine Synchrone.

RI : Réseau Infini.

BP : Basse Pression.

HP : Haute Pression.

MP : Moyenne Pression.

MT : Moyenne Tension.

BT : Basse Tension.

HT : Haute Tension.

MFA : Modèl Free Aprox.

FEP : Feed Forward Propagation (algorithme de la propagation directe de l'erreur).

TR00 : transformateur de réseau.

TA : Transformateurs Auxiliaires.

TS : transformateur de soutirage.

R_r : Résistance dans le circuit d'excitation.

U : tension composée.

V : tension simple.

I_{ex} : Courant d'excitation.

E_{ex} : Tension d'excitation.

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

Ω : vitesse de rotation du champ tournant en rad.s⁻¹.

ω : pulsation des courants alternatifs en rad.s-1.

n : vitesse de rotation du champ tournant en trs.s-1.

f : fréquences des courants alternatifs en Hz.

p : nombre de paires de pôles de la machine synchrone.

θ : angle entre l'axe d et l'axe de référence ou angle du rotor.

δ : angle interne de la machine synchrone.

φ : le déphasage entre le courant et la tension aux borne d'un enroulement de la machine.

Φ : le flux magnétique.

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)

R = résistance d'une phase.

$X = L\omega$ = réactance synchrone.

$Z(\varphi)$ = impédance de la charge.

V_t : Tension mesurée à la sortie de la machine synchrone.

V_s : Tension du nœud infini. $V_{réf}$: Tension de référence.

V_e : L'erreur.

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

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

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

T_a : Constante de temps de l'AVR.

K_a : Gain de l'AVR

$d\omega$: la variation de la vitesse angulaire du rotor de la MS.

VS : le signal de sortie du PSS.

Ef : le signal de commande du MS-RI.

Vt: la tension de sortie de la machine.

n : nombre d'entrées.

Ui : composante du vecteur d'entrée.

Wi : composante du vecteur de poids synaptiques.

S : somme pondérée appelée potentiel.

U : la sortie ou réponse du neurone.

f : fonction d'activation.

Vd, Vq : Paramètres de sorties du système tension statorique.

LS : partie fixe des inductances propres statoriques.

Lm : l'amplitude des inductances statoriques en fonction de θ .

Introduction Générale

Introduction générale

La découverte de l'énergie électrique a bien changé le monde. Cependant notre vie sans électricité sera difficilement envisageable, elle occupe une place prépondérante dans l'industrie et l'usage domestique. Cette énergie ne se trouve pas dans la nature sous forme exploitable, il est donc nécessaire de la produire à partir de la conversion d'autres formes d'énergies telles que l'énergie solaire, nucléaire, thermique, éolienne ...etc.

La centrale thermique est un complexe industriel très important pour la production d'énergie électrique. En plus des groupes turbogénérateurs, elle contient de nombreux systèmes supplémentaires nécessaires à son bon fonctionnement. Cependant une perturbation instantanée de n'importe quel système peut provoquer une pénurie d'électricité. Pour cette raison, le développement et la modernisation de ces systèmes sont essentiels pour assurer une continuité du service de distribution d'énergie électrique. Le système le plus sensible est donc la régulation de la puissance active et réactive d'un générateur. L'importance de la stabilité dynamique d'un système électrique nécessite que les centrales électriques intègrent des outils de surveillance et de régulation au niveau des générateurs pour un fonctionnement et une efficacité corrects. Depuis la construction de la centrale électrique de Marsat El Hadjadj en 1984, elle utilise un système de régulation traditionnel pour contrôler l'excitation et la vitesse des générateurs. Avec le développement des régulateurs intelligents, les régulateurs traditionnels font partie des dispositifs obsolètes pour la fiabilité.

Pour une meilleure efficacité, la centrale s'efforce de remplacer son système de régulation classique par un régulateur intelligent plus précis avec un temps de réponse très rapide. Dans ce contexte, nous avons donc choisi de passer notre stage dans cette centrale. Cette formation pratique au sein de la structure nous a permis d'acquérir de nombreuses compétences pratiques et d'acquérir une grande connaissance des équipements et des éléments de l'usine. Ensuite, pour compléter notre formation et d'acquérir plus de compréhensions sur ces systèmes industriels, nous avons choisi dans le cadre de la préparation du projet de fin d'études de travailler sur l'amélioration du système de régulation de tension d'excitation et de l'énergie électrique active en utilisant la méthode intelligente des réseaux de neurones.

En général, parmi les critères de couplage d'un l'alternateur à un réseau est la stabilité de la tension et de la vitesse de la machine synchrone. Par conséquent, pour maintenir le point de stabilité à l'intérieur de sa région, la tension d'excitation, la vitesse de la turbine et la puissance électrique active, doivent être réglé en permanence. Ainsi, l'objective de notre étude concerne la modernisation du système de régulation classique « AVR+PSS » de la stabilité d'alternateur de Marsat El Hadjadj par un système de régulation a base réseaux de neurone. Pour ce faire, nous avons élaboré un plan d'étude divisé en trois parties comme suit:

Introduction générale

- La première partie sera consacrée à la présentation de la centrale thermique de Marsat El Hadjadj et ces différentes parties constructives avec une explication du cycle de production et de distribution de l'énergie électrique dans la centrale. Une étude détaillée sur l'alternateur sera décrite. Le dispositif de régulation de tension d'excitation (AVR : Automatic Voltage Regulator) et le stabilisateur du système de puissance (PSS : Power System Stabilizer) seront exposés.

- La deuxième partie sera destinée à l'étude de la stabilité de l'alternateur. Ensuite nous allons expliquer les deux types de régulation à savoir la régulation conventionnelle utilisée dans la centrale et la régulation intelligente par le réseau de neurone. Les schémas bloc des régulateurs de tension et de fréquence utilisés pour la simulation seront expliqués.

- La troisième partie sera consacrée aux différentes simulations, afin d'analyser le comportement de la régulation conventionnelles AVR+PSS et de régulation intelligente AVR+PSS. L'alternateur sera simulé dans le cas de fonctionnement normal et dans le cas d'apparition d'un défaut de court-circuit fugitif. Finalement une comparaison sera faite entre le régulateur classique et intelligent pour tester leur capacité, rapidité et leur efficacité pour remettre le système à son état stable.

D'après nos connaissances théoriques nous souhaiterons accomplir cette mission et recommander à la centrale pour appliquer la régulation intelligente pour moderniser nos systèmes de production d'énergies électriques

Chapitre I

Introduction :

La centrale thermique est un important complexe industriel pour la production d'énergie électrique. Il se compose d'une grande installation qui contient plusieurs systèmes de disciplines différentes. Par conséquent, de nombreux ingénieurs de différentes disciplines veillent sur le fonctionnement de ces systèmes interconnectés et complémentaires. Cependant, les équipements de machines synchrones (turbogénérateurs) pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique et ses accessoires de conversion et de régulation représentent le maillon le plus important de la chaîne générale de production d'électricité.

Le stage pratique au sein de la centrale électrique de Marsat El-Hadjadj nous a permis d'apprendre beaucoup de compétences pratiques et théoriques liées aux fonctionnements et l'utilisation des alternateurs triphasés.

Dans ce chapitre, nous présenterons brièvement la centrale thermique. La description et le principe de fonctionnement du générateur seront exposés. Nous terminerons cette première partie avec des présentations de différents types de système d'excitation de générateur, et une classification des différents types de stabilité du système d'alimentation et du stabilisateur du système d'alimentation "PSS". Cependant, ces derniers domaines détermineront le but de notre étude.

I.1. Présentation de la centrale de MARSAT EL HADJADJ :

I.1.1. Description de la centrale :

La centrale de Marsat El Hadjadj est située au bord de la mer près de la zone industrielle d'Arzew et à 50Km à l'Est d'Oran.

La centrale se compose de cinq groupes identiques produisant chacun 176 MW, soit une puissance électrique totale de 880 MW. La puissance fournie au réseau est de 840 MW, le reste (environ 40 MW) est consommée par les auxiliaires. L'énergie produite est transportée avec des lignes de 225 KV vers une sous station de transformation 225KV / 63KV installée à 3 KM de la centrale vers le sud [1].

Principe de fonctionnement :

Dans cette centrale thermique la transformation d'énergie ne se fait par plusieurs transformations comme le montre la figure (I-1): [1]

- De l'énergie chimique (gaz ou fuel) en énergie thermique ou calorifique (chaleur)
- De l'énergie thermique en énergie cinétique (vapeur).
- De l'énergie cinétique en énergie mécanique.
- De l'énergie mécanique en énergie électrique.

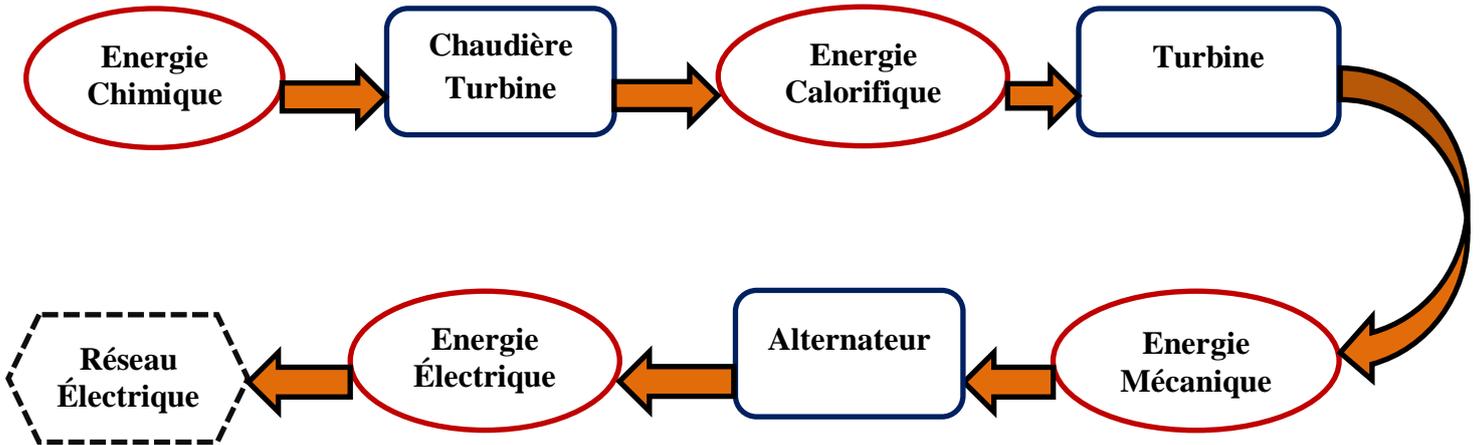


Figure (I-1) : Illustration du processus de transformation calorifique en énergie électrique

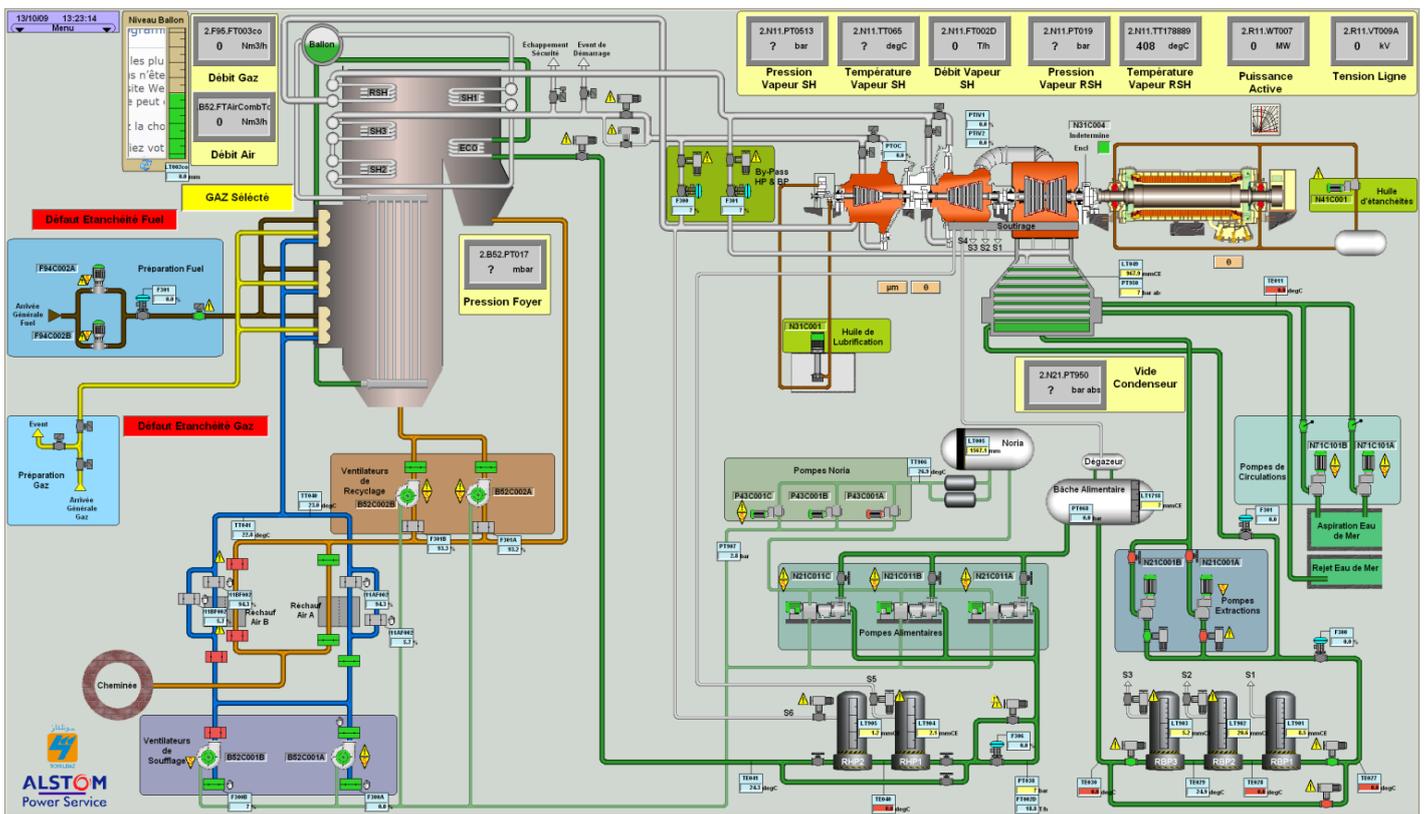
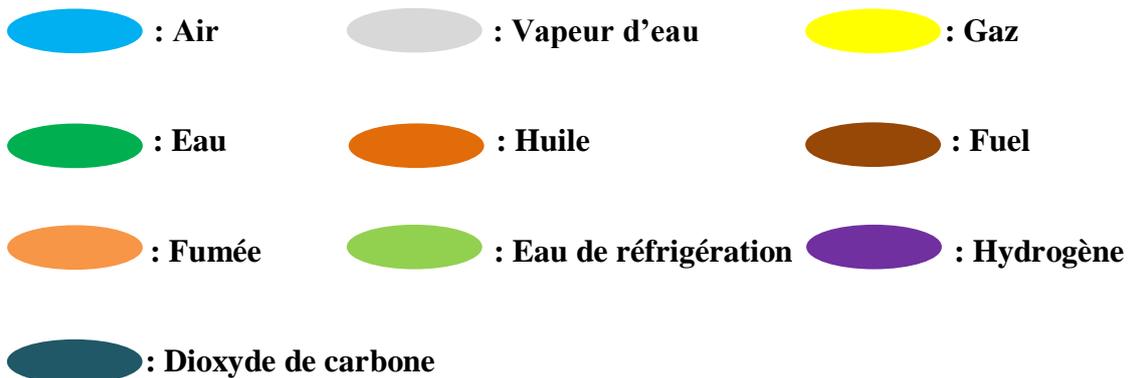


Figure (I-2) : schéma global du central thermique [1]



I.2. Les principaux constituants de la centrale :

I.2.1. groupe turbo-alternateur :

I.2.1.1. Turbine :

La vapeur produite par la chaudière pénètre dans la turbine ou un appareil nommé tuyère va lui donner une vitesse réalisant la transformation de l'énergie calorifique en énergie cinétique.

Dans la turbine toujours, cette vapeur à grande vitesse fait tourner la turbine et transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique la figure (I-3).

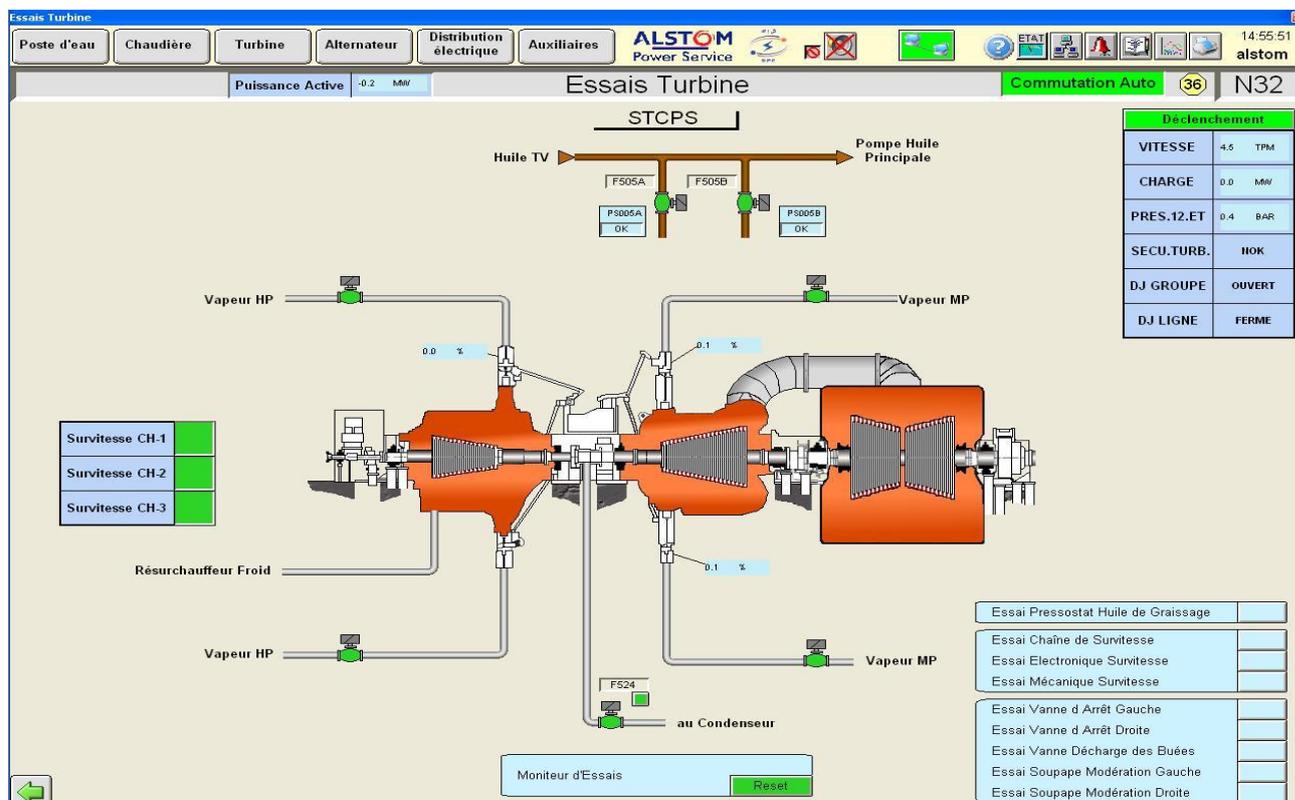


Figure (I-3) : la turbine[1].

La turbine est composée de trois corps : haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP). Elle comporte six (06) soutirages qui alimentent (03) réchauffeurs (BP), (02) réchauffeurs(HP), et la bêche alimentaire. Le rotor de la turbine est accouplé avec l'alternateur, et l'ensemble tourne à une vitesse constante réglée à 3000 tr/mn. Donc, l'alternateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique [1].

I.2.1.2. Alternateur :

Il se constitue d'un rotor (partie mobile) et d'un stator (partie fixe). [1]

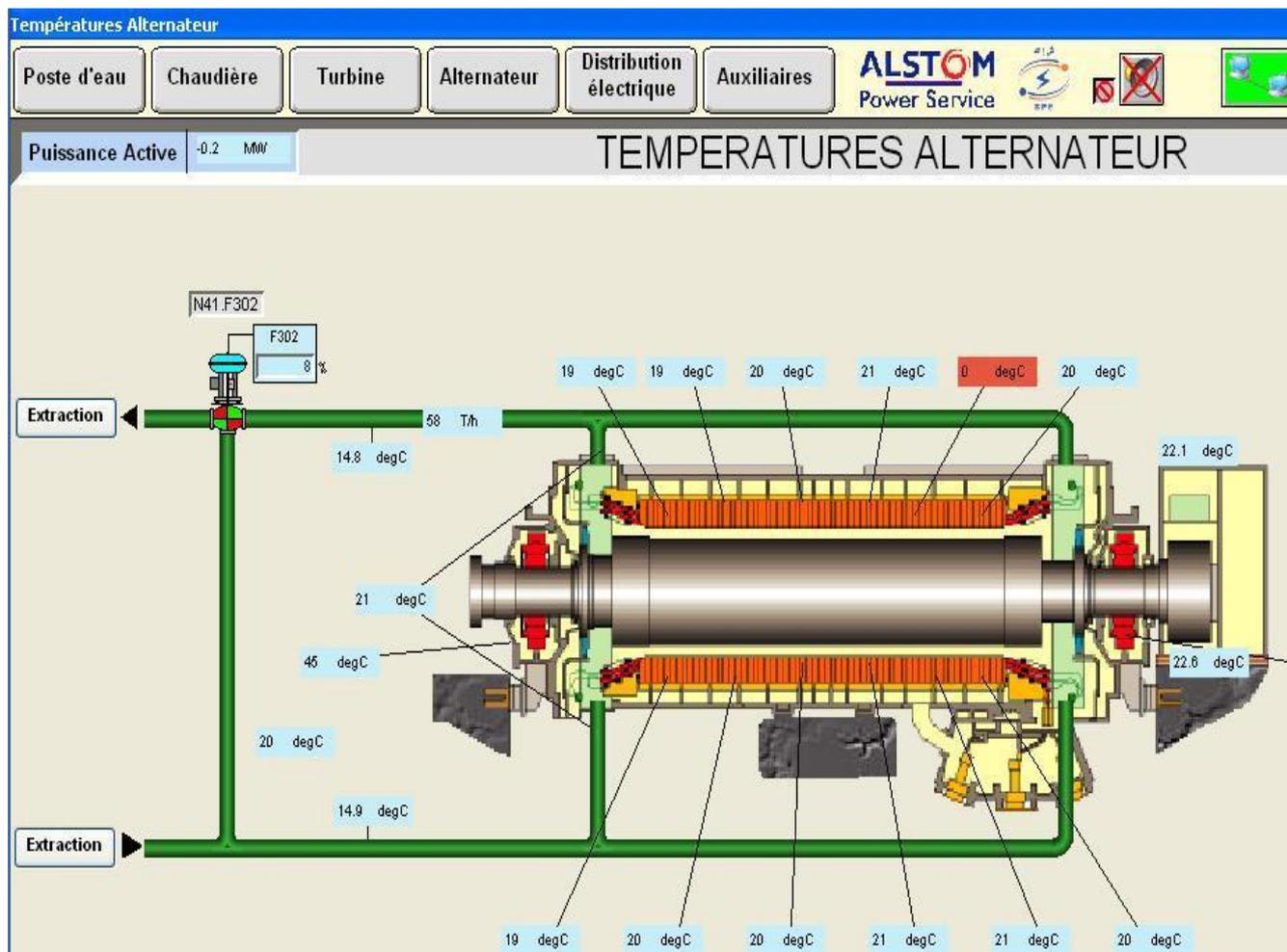


Figure (I-4) :l'alternateur

I.3. Installation électrique :

I.3.1. Partie Haute Tension (220 KV) :

Le transport de la tension produite est réalisé à l'aide d'un transformateur élévateur HT installé et connecté à la sortie de l'alternateur par l'intermédiaire d'un disjoncteur appelé disjoncteur machine pour élever la tension de 13,8 KV au 220 KV avec une puissance nominal de 220 (MVA) pour le réseau national, une partie de cette puissance est utilisé pour l'alimentation des tableaux MT et BT des auxiliaires de central à travers un transformateur de soutirage.

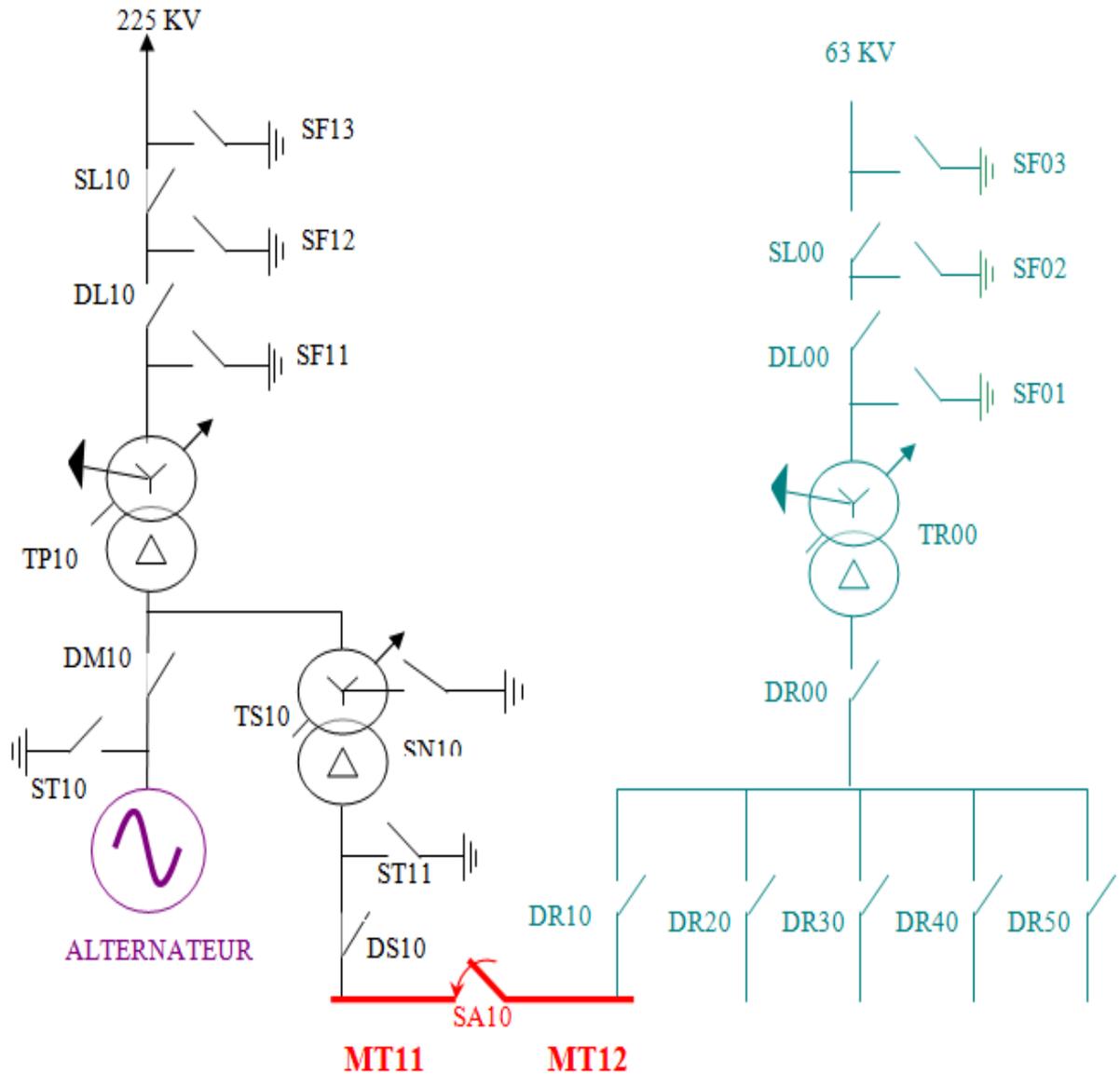


Figure (I-5) : Architecture du réseau de transport [1]

I.3.2. Ligne de Secours :

La ligne de secours est alimentée par le réseau en cas de manque de courant dans la centrale, avec une tension de 63 kV qui alimente les jeux de barres moyen tension des tranches à travers un transformateur de réseau TR00 (63 KV/6,6 KV).

Cette même ligne assure l'interconnexions entre les trois tranches partie MT (6,6 KV).

Donc nous avons deux types de secours [1]:

- Secours tranche réseau: avec fermeture des disjoncteurs DR00 et DR10, DR20 ou DR30 de la tranche à secourir.
- Secours tranche-tranche : ouverture de disjoncteur DR00 et fermeture des disjoncteurs de la ligne de secours de la tranche donneuse et réceptrice.

I.3.3. Les auxiliaires électriques :

I.3.3.1. Les auxiliaires Tranches :

I.3.3.1.1. Partie Moyenne Tension :

Une puissance de 8 MW est destinée à alimenter la partie moyenne tension (6,6 kV) tel que les tableaux MT (11, 12), MT (21, 22), MT (31, 32) à travers les transformateurs de soutirage TS10, TS20, TS30 comme indiqué dans la figure (I-5), le jeu de barres MT de chaque tranche alimente les jeux de barres des auxiliaires BT (11, 12, 13), BT (21, 22, 23), BT (31, 32, 33) (380V) à travers les transformateurs auxiliaires TA (11, 12, 13) (6,6 KV/380 V) un jeu de barres contient [1] :

- Arrivée du transformateur de soutirage TS comme est montré sur la figure (I-5).
- Les disjoncteurs de départ vers les Pompes et les Ventilateurs comme est montré dans les figures (I-8) et (I-10)
- Disjoncteur de départ vers l'excitatrice de l'alternateur à travers un transformateur TX.
- Disjoncteur de départ vers les transformateurs auxiliaires DA (11, 12, 13).
- Disjoncteur de départ vers le tableau commun MT(01,02). Comme est montré dans la figure (I-7)
- Disjoncteur arrivée de la ligne de secours réseau DR00. Comme la montre la figure(I-5)

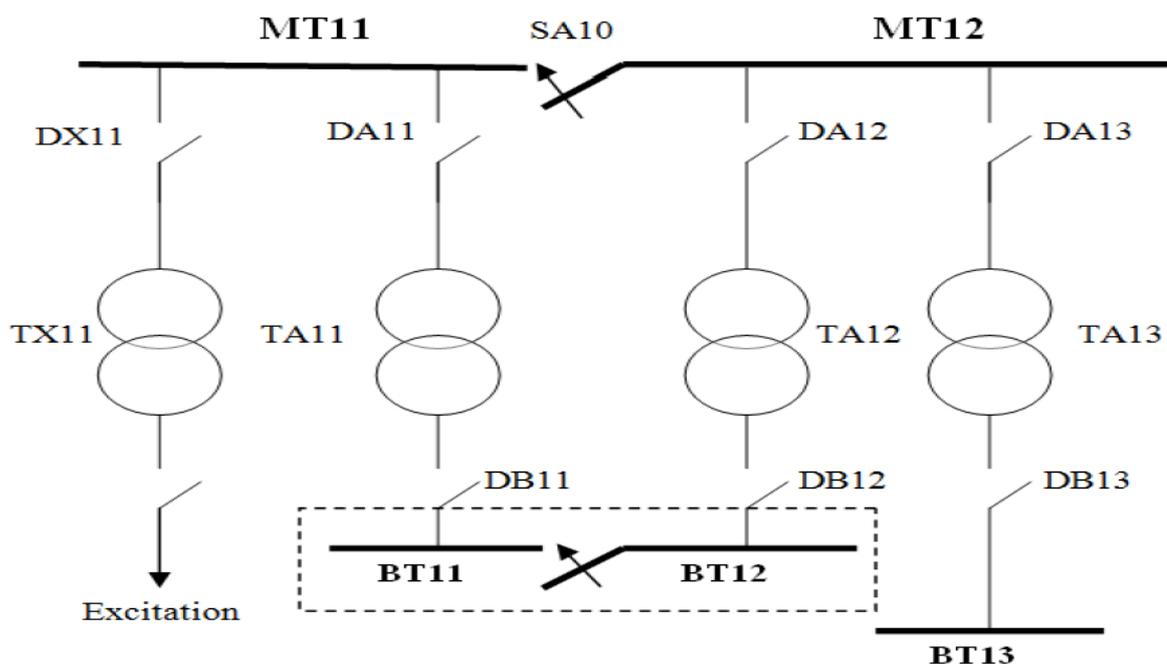


Figure (I-6) : Jeux de barres moyen tension des auxiliaires de l'alternateur [2]

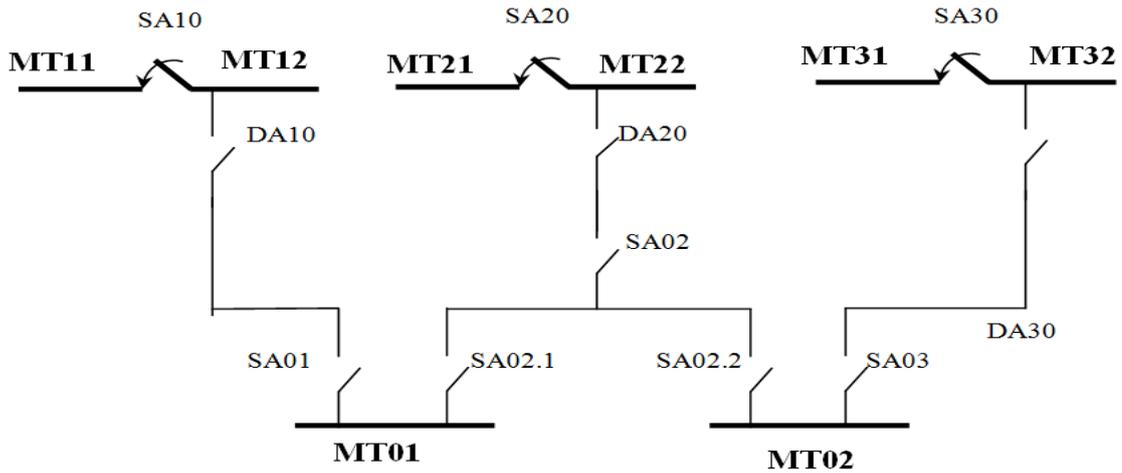


Figure (I-7) : Jeux de barres moyen tension des auxiliaires du central [1]

I.3.3.1.2. Basses Tension BT (380V) :

Chaque tranche BT (13, 23, 33) comme est indiqué sur les Figures (I-8) et (I-9) alimente un tableau de basse tension commune BC00 pour l'alimentation des auxiliaires de secours.

Pour MARSAT (I) nous avons 02 générateurs à moteurs (diesels) qui secourent la tranche qui a besoin d'être alimenté en cas de coupure [1].

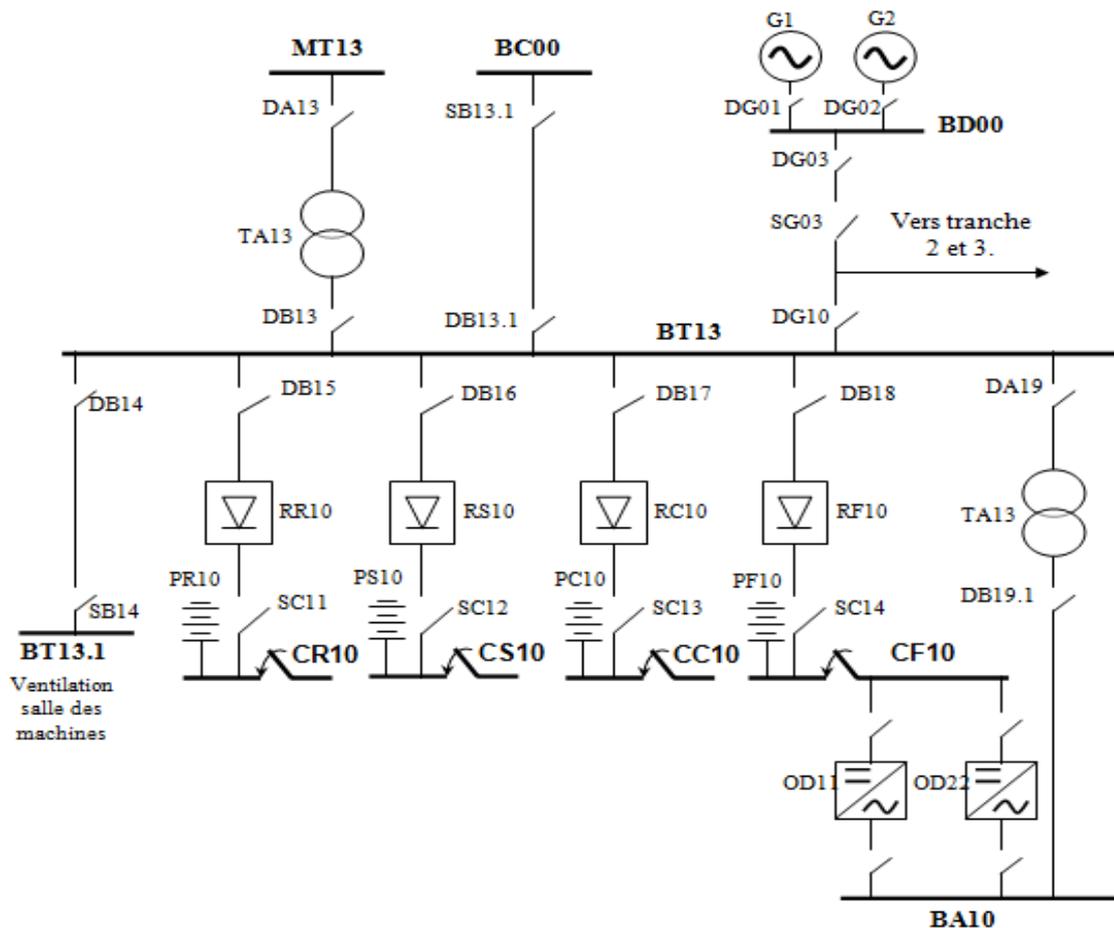


Figure (I-8) : Jeux de barres basse tension des auxiliaires de l'alternateur

Sur chaque tableaux des auxiliaires de tranche basse tension nous avons (comme exemple la tranche 01) :

- DB14 : disjoncteur basse tension départ ventilation salle machine.
- DB16 : disjoncteur basse tension départ redresseur courant de régulation.
- DB16 : disjoncteur basse tension départ courant de signalisation.
- DB17 : disjoncteur basse tension départ courant de commande.
- DB13.1 : disjoncteur basse tension départ BC00.
- DB13 : disjoncteur basse tension arrivée transformateur auxiliaire TA13.
- DG10 : disjoncteur basse tension arrivée diesel de secours.
- DB19 : disjoncteur basse tension départ transformateur T0 10.

Pour MARSAT(II) le BC01 et l'interconnexion entre les deux tranches BT42 et BT53 [1].

I.3.3.1.3. Partie Courant Continu :

Vu la nécessité du maintien en service des organes prioritaires tel que : Le graissage, l'étanchéité de l'alternateur, donc certains fonctions sont obligatoire dans les cas de fonctionnement le plus défavorable de la centrale tel que :

- Redresseurs et batteries.
- Courant de régulation (courant de commande des régulateurs) CR : 48 Vcc.
- Courant de signalisation (courant qui commande les détecteurs) CS : 48 Vcc.
- Courant de commande (courants qui commande les actionneurs) CC : 110 Vcc.

Chaque fonction est alimentée par leur propre tableau commun (CR00, CC00, CS00, CF00), dans le cas de défaillance dans le réseau, les tableaux sont alimentés par leurs propres batteries de secours (PC, PS et PR)

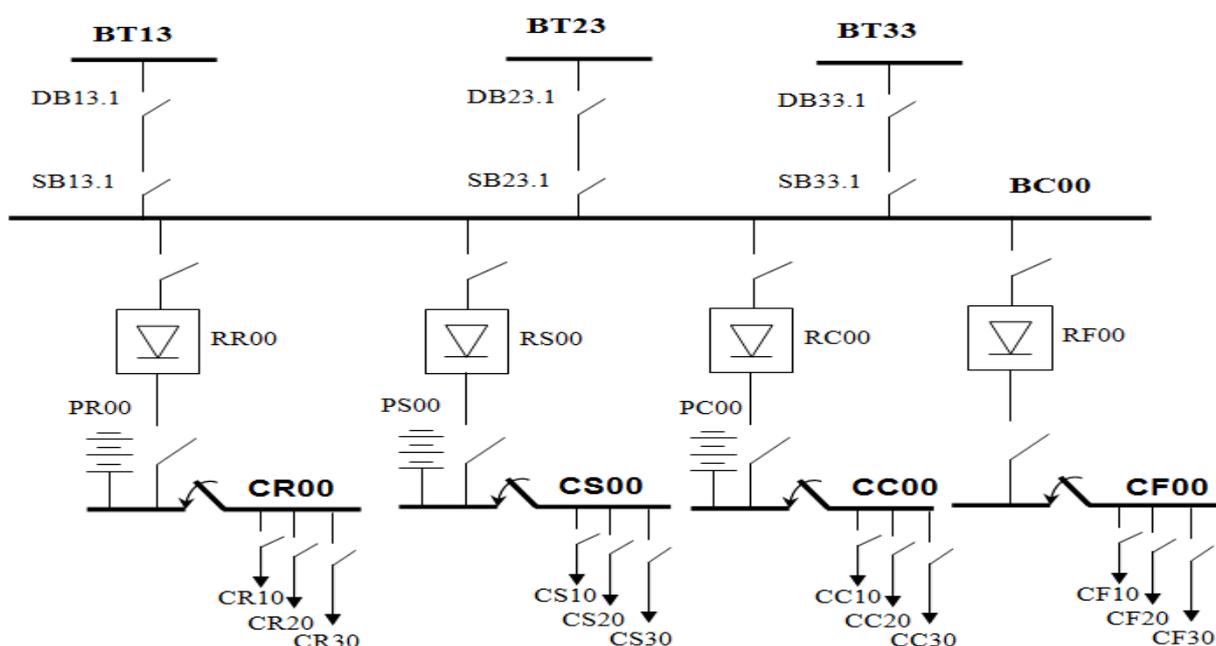


Figure (I-9) : Jeux de barres de courant continu des auxiliaires de l'alternateur [1]

I.3.3.2. Les Auxiliaires Généraux :

A partir du tableau MT une dérivation est destinée à alimenter une partie MT commune (MT01/MT02) comme est montré dans la figure (I-7), les jeux de barres MT communs destinés à l'alimentation des auxiliaires généraux :

- Station dessalement.
- Station d'électro chloration.

Et les services généraux comme :

- Tableau atelier.
- Tableau cuisine.
- Station de pompage et chloration.
- Déminéralisation.
- Traitement chimique.

Les tableaux basse tension BT01 et le BT02 des auxiliaires généraux sont alimentés par les jeux de barres MT01 et MT02 à travers les transformateurs auxiliaires TA01 et TA02. Chaque tableau a deux possibilités d'être alimenté, soit par les jeux de barres BT01 ou BT02 dans le cas où il y a intervention sur l'un des deux.

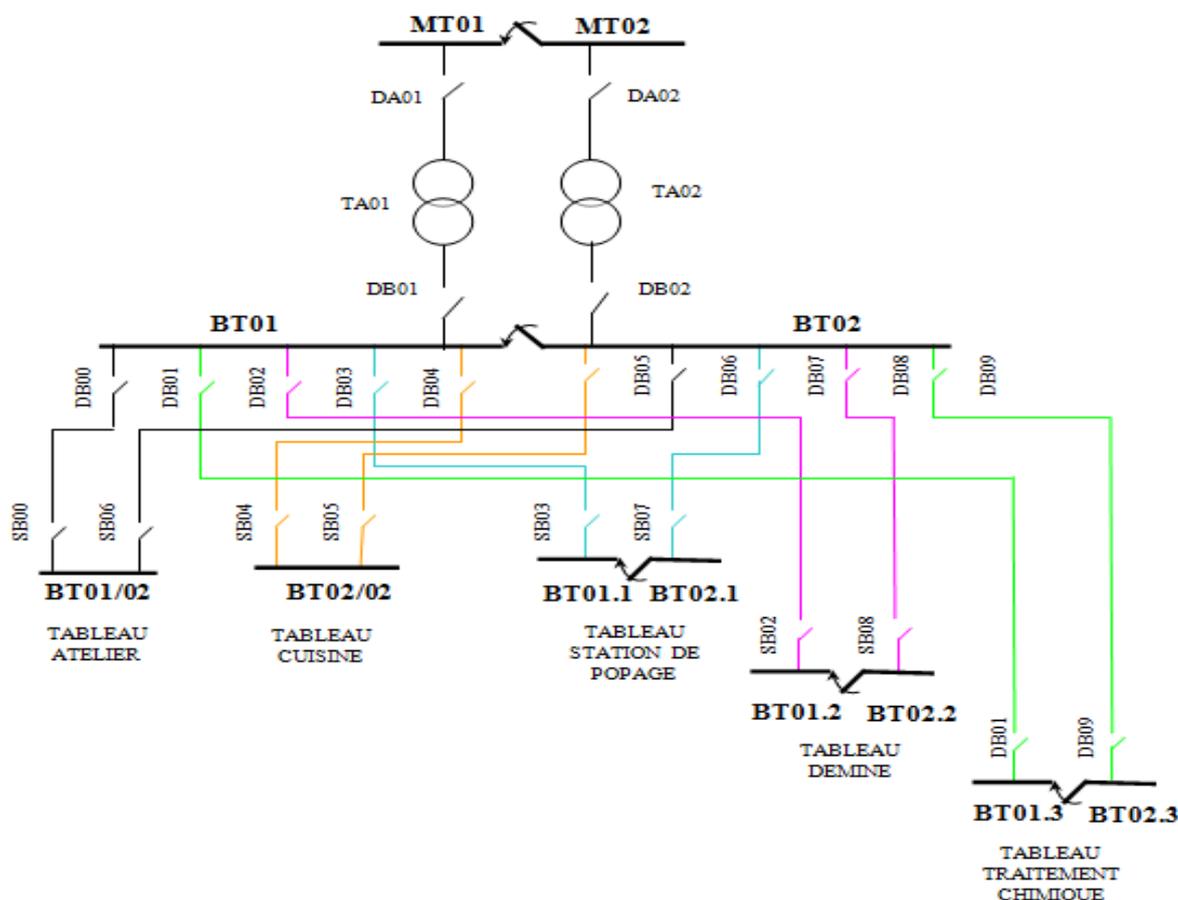


Figure (I-10) : Jeux de barres basse tension des services généraux de la centrale [1]

I.3.3.2.1. L'éclairage :

L'éclairage de MARSAT 01 de la centrale est assuré par le tableau BE (01,02) (éclairage basse tension) alimenté par les transformateurs d'éclairage TE01 et TE02 des jeux de barres MT01, MT02 (6,6 KV).

L'éclairage de MARSAT 02 du central est alimenté par le tableau BE (03,04) des jeux de barres MT03, MT04 on passant par les transformateurs d'éclairage TE03, TE04

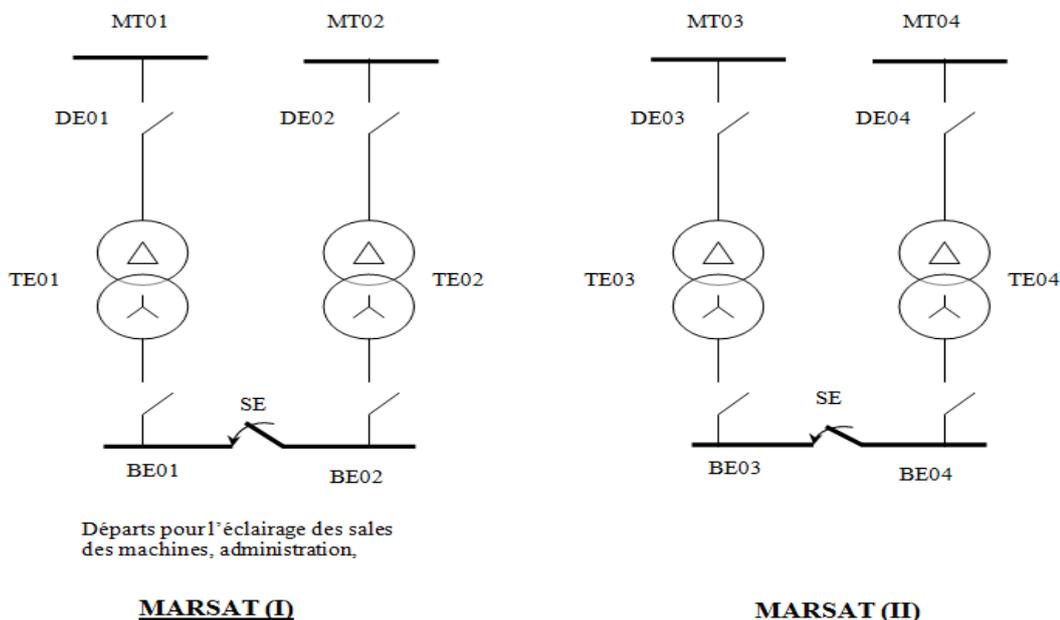


Figure (I-11) : Jeux de barres d'éclairage de la centrale [1]

I.3.3.2.2. Éclairage de secours :

L'éclairage de secours est assuré par le tableau BE03 alimenté par le tableau basse tension commun BC00 à travers un transformateur TE03(380,380).

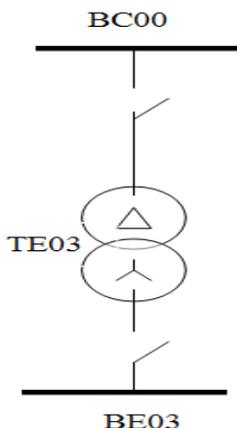


Figure (I-12) : Jeux de barres d'éclairage de secours de la centrale [1]

I.4. Description de l'alternateur de MARSAT ELHADJADJ :

L'alternateur est la partie commune à toutes les centrales électriques. C'est un dispositif qui

produit un courant alternatif et fournit, à ses bornes, une tension variable et alternative. Il correspond à l'association d'une bobine et d'un aimant qui peut tourner. Un alternateur est un convertisseur d'énergie cinétique en énergie électrique.

I.4.1. Les caractéristiques nominales:

La plaque signalétique de la machine indique les valeurs suivantes[1]:

- Puissance apparente : 220 MVA.
- Facteur de puissance : 0,8.
- Tension : 13,8 KV \pm 5% KV.
- Fréquence : 50Hz.
- Vitesse : 3000 tr/min.

I.4.2. Les principaux éléments de l'alternateur :

I.4.2.1. Le Rotor :

C'est la partie tournante (pour des machines de faible puissance, c'est un aimant permanente), sinon c'est un électroaimant qui est alimenté (excité) en courant continue, génère P paires de pôles. Il existe des rotors à pôle saillants 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.[2]

I.4.2.2. Le Stator :

Le stator constitue la partie fixe de l'alternateur, Il est constitué d'enroulements qui vont être siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux de champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit [2].

I.4.3. Type des alternateurs :

1.4.3.1. 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). [3]

1.4.3.2 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). [3]

I.4.4. 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 statoriques pendant un intervalle de temps permettent de créer une force électromotrice induite e aux bornes des enroulements statoriques [2] .

$$e = N \frac{d\Phi}{dt}$$

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.4.4.1. Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur :

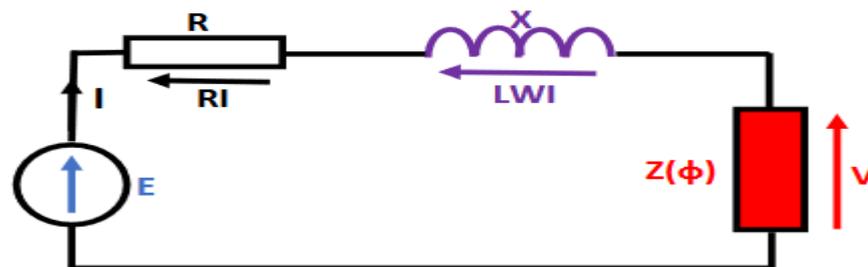


Figure (I-13) : Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur [4]

R = résistance d'une phase.

X = $L\omega$ = réactance synchrone.

Z (φ) = impédance de la charge.

$$\vec{E} = \vec{RI} + \vec{L\omega I} + \vec{V} \quad (\text{I.1})$$

OU

$$\underline{E} = \underline{V} + \underline{RI} + \underline{JL\omega I} \quad (\text{I.2})$$

I.4.4.2. Diagramme des tensions et autre expression de la f.é.m. :

En général la résistance R est très faible devant $L\omega$; on n'en tient compte que dans le calcul du rendement [4] :

$$\vec{E} = \overline{L\omega I} + \vec{V} \quad \text{Ou} \tag{I.3}$$

$$\underline{E} = \underline{L\omega I} + \underline{V} \tag{I.4}$$

$$E = jL\omega I + (V\cos\varphi + jV\sin\varphi) = j(L\omega I + V\sin(\varphi)) + V\cos(\varphi) \tag{I.5}$$

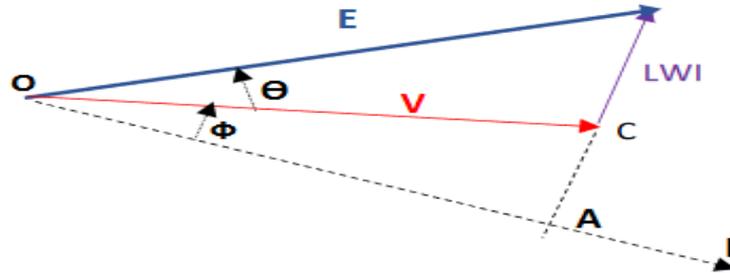


Figure (I-14) : Diagramme des tensions

I.4.4.3. Les zone de fonctionnement en alternateur :

1^{er} Cas

C'est dans la Zone I

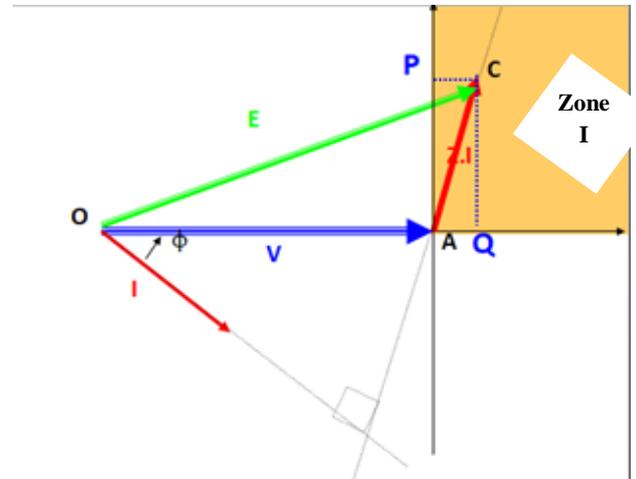
$P > 0$

$Q > 0$

C'est un ALTERNATEUR SYNCHRONES surexcité

Qui fournit une Puissance Active P au réseau.

Qui fournit une Puissance Réactive Q au réseau.



2^{ème} Cas

C'est dans la Zone II

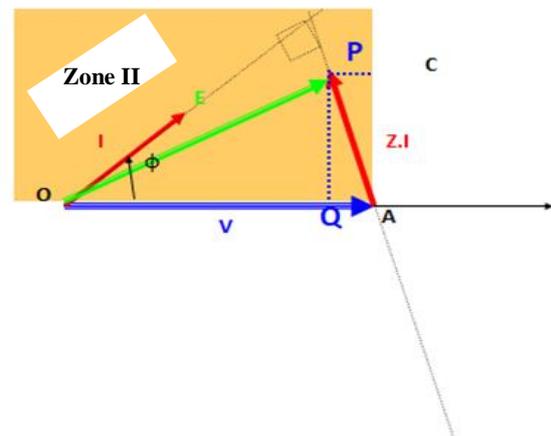
$P > 0$

$Q < 0$

C'est un ALTERNATEUR SYNCHRONES sous excité

Qui fournit une Puissance Active P au réseau.

Qui consomme une Puissance Réactive Q au réseau.



I.4.5.4. Bilan de puissance :

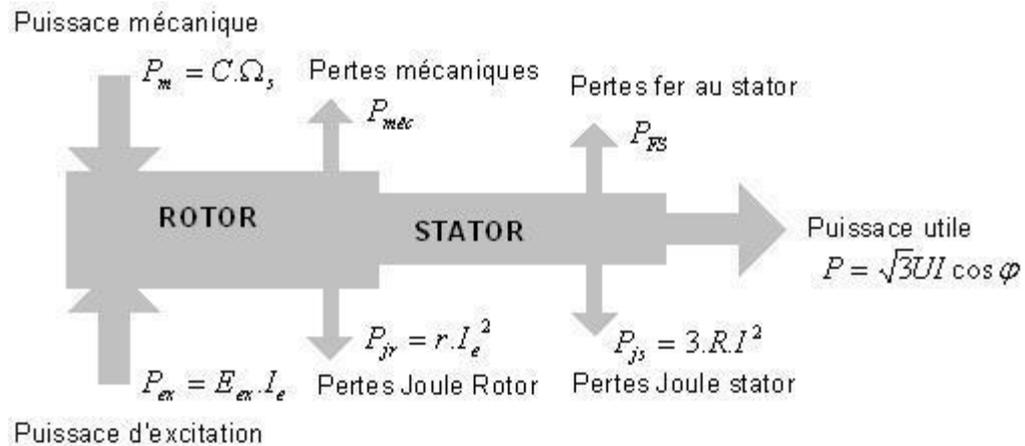


Figure (I-15) : bilan de puissance de l'alternateur [4]

- **Puissance absorbée :**

La turbine quelle que soit leur type (à gaz, à vapeur, hydraulique) entraîne l'arbre le l'alternateur, c'est-à-dire cette turbine fournit une puissance mécanique à l'entrée de l'alternateur (puissance absorbée par l'alternateur) et on montre sa par la formule suivant [4]:

$$P_a = C_m \cdot \Omega \quad (I.6)$$

Ou :

Ω : Vitesse de rotation du champ tournant en rad/s.

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

Dans notre travail l'alternateur n'est pas auto-excité, donc il faut prend en compte l'énergie électrique par le rotor à travers le système d'excitation.

$$P_a = C_m \cdot \Omega + E_{ex} \cdot I_{ex} \quad (I.7)$$

Avec :

I_{ex} : Courant d'excitation.

E_{ex} : Tension d'excitation

- **Puissance utile :**

Lors de fonctionnement à une vitesse constant l'alternateur produit une puissance utile électrique P_u qui dépend de la charge qui est connecté (influence du $\cos \varphi$).

$$P_u = U I \cos \varphi \quad (I.8)$$

$$P_u = 3 V I \cos \varphi \quad (I.9)$$

D'où :

U : tension composée.

V : tension simple.

- **Bilan des pertes :**

a- Pertes de puissance mesurable :

Les pertes de puissance mesurable sont décomposées en deux types:

1- pertes par effet joules (en watts) dépendent de la charge et sont divisées comme suit :

- Pertes joule dans le stator :

$$P_{js} = \frac{3}{2}RI^2 \quad (\text{I.10})$$

Ou : R : Résistance entre deux borne de l'alternateur.

- Pertes joule dans le circuit inducteur (rotor).

$$P_{jr} = R_r.I_{ex}^2 \quad (\text{I.11})$$

R_r : Résistance dans le circuit d'excitation

2- pertes constantes indépendantes de la charge :

- Les pertes fer dans les tôles de l'armature d'induit.

- Les pertes mécaniques P_m dans les paliers, bagues et ventilation.

Ces types des pertes on les détermine dans l'essai à vide.

b- Pertes supplémentaires

Ce sont les pertes dues à des phénomènes liés l'alternateur à savoir :

- Concentration du courant vers l'extérieur du conducteur dans une encoche.
- Courant de Foucault induit dans un conducteur par le courant même qui le traverse.
- Supplément de pertes dans le fer du fait de la distorsion du flux en charge.
- Pertes par courant de Foucault dans les inducteurs des alternateurs monophasés.

- **Rendement :**

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - P_{js} - P_{jr} - P_m - P_{fs}}{P_a} \quad (\text{I.12})$$

I.4.5. Refroidissement de l'enceinte alternateur :

Un refroidissement de l'enceinte alternateur est assuré par circulation forcée d'un fluide à l'intérieur de la machine. La circulation du fluide est assurée à la fois dans les parties libres de la machine et notamment entre stator et rotor, ainsi qu'à l'intérieur des barres du rotor, portant des canaux longitudinaux et radiaux assurant la réfrigération des conducteurs.

Suivant les technologies on rencontre des techniques de refroidissement à l'air ou encore à l'hydrogène. [2]

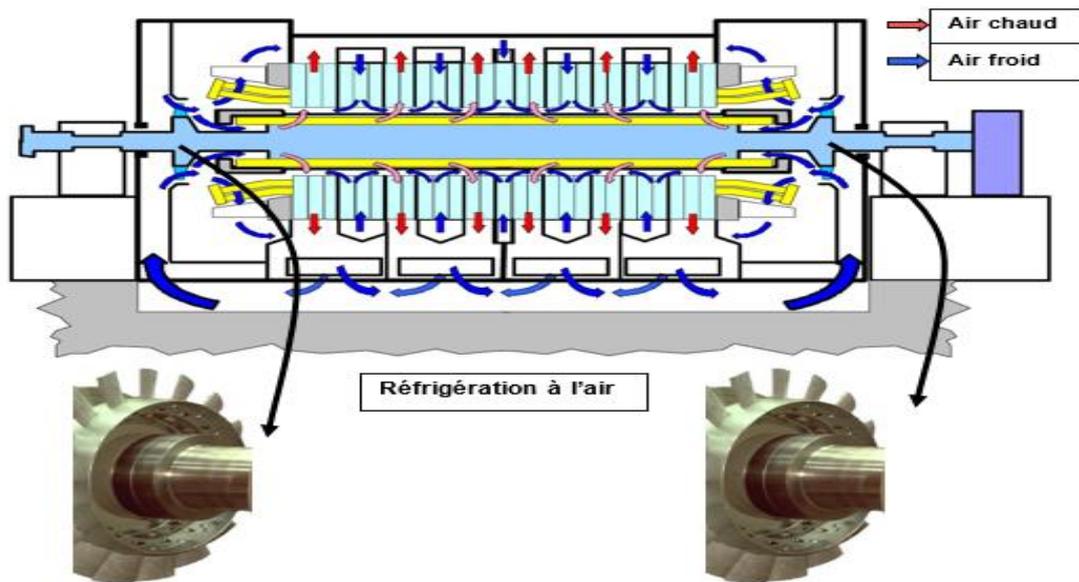


Figure (I-16) : Système de refroidissement de l'alternateur

I.5. couplage des Alternateurs :

La procédure de synchronisation en agissant sur le régulateur de vitesse de la turbine, on amène tout d'abord l'alternateur à une vitesse voisine de la vitesse synchrone, afin que sa fréquence soit proche de celle du réseau. On règle ensuite l'excitation de façon que la tension induite soit égale à celle du réseau. On observe que les tensions ont même fréquence et même phase au moyen d'un synchroscope.

Une fois couplé à un grand réseau (réseau infini), un alternateur fait partie d'un système comprenant des centaines d'autres alternateurs qui alimentent des milliers de charges. Il est alors impossible de préciser la nature de la charge (grosse ou petite, résistive, inductive ou capacitive) branchée aux bornes de cet alternateur en particulier.

La tension et la fréquence appliquées aux bornes de la machine étant constantes, on ne peut plus faire varier que deux paramètres [4] :

- 1- Pour ajuster la fréquence il nous suffira de jouer sur le couple mécanique exercé par le système d'entraînement mécanique du rotor.
- 2- pour la tension il nous faudra jouer sur la valeur du courant d'excitation.

I.5.1. Conditions de couplage

Pour coupler un alternateur sur un réseau ou même avec un autre alternateur, il faut vérifier les points suivants : [5]

- **La même fréquence :**

Nous avons vu dans la théorie de l'alternateur synchrone que la fréquence de la tension fournie par un alternateur synchrone dépendait du nombre de variation de flux en fonction du temps. Cette dernière est fonction de la vitesse du rotor donc de la vitesse du moteur d'entraînement. Nous devons donc régler la vitesse de rotation.

- **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. Pour ce dernier point nous en avons parlé ci-dessus.

Pour ce qui est de la valeur du flux, nous 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 même succession des phases :**

Soit les deux alternateurs représentés ci-dessous

Il est simple de comprendre que si deux alternateurs 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. Par contre, en fonction de l'ordre de succession des phases nous pourrions avoir des potentiels différents sur les autres phases. Voyons l'exemple suivant :

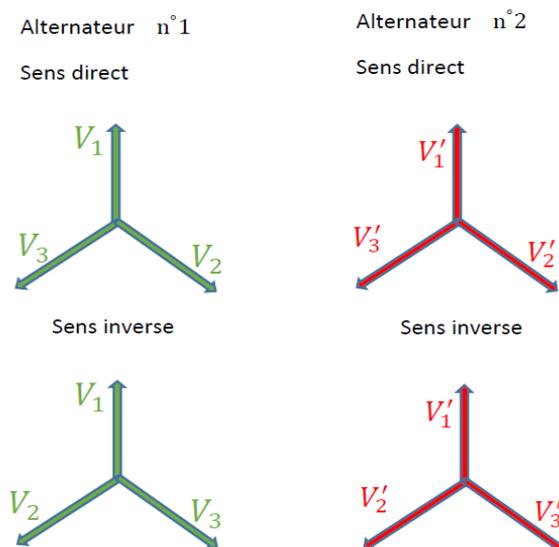


Figure (I-17) : La succession des phases

Dans cette configuration, on remarque que le potentiel entre V_2 et V_2' est maximum ce qui montre bien que dans de telles conditions 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 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.

En pratique :

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-18) représente le couplage d'un alternateur sur le réseau électrique en utilisant la technique de synchronisation avec des lampes [5].

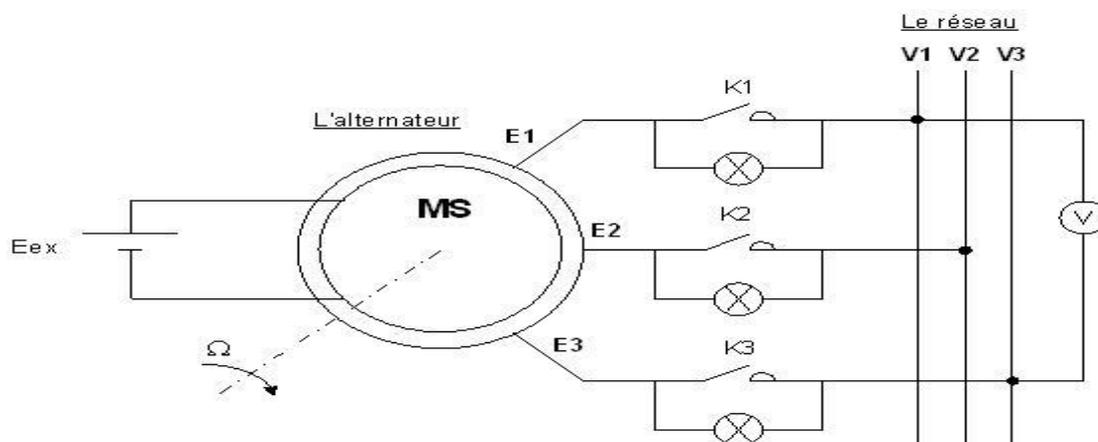


Figure (I-18) : Couplage d'une machine synchrone sur un réseau.

I.6. Excitations des alternateurs :

L'excitation est très importante dans la machine synchrone quand la machine travaille comme générateur parce que le système peut régler la quantité de puissance réactive cédée ou absorbée par le générateur.

Pour générer le champ magnétique nécessaire dans les alternateurs on utilise des aimants permanents ou électroaimants. Ces derniers 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. [4]

I.6.1. Différents types de système d'excitation :

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitations pour les génératrices synchrones se distinguent selon trois types essentiels [5]:

- Systèmes d'excitation à courant continu (DC)
- Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)
- Systèmes d'excitation statiques

I.6.1.1. Système d'excitation à courant continu (DC) :

Cette catégorie d'excitation utilise une machine à courant continu comme source d'excitation, fournissant le courant au niveau du rotor de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices. La machine à courant continu est entraînée par un moteur de l'arbre de la génératrice et peut soit auto excitée soit excitée séparément. [5]

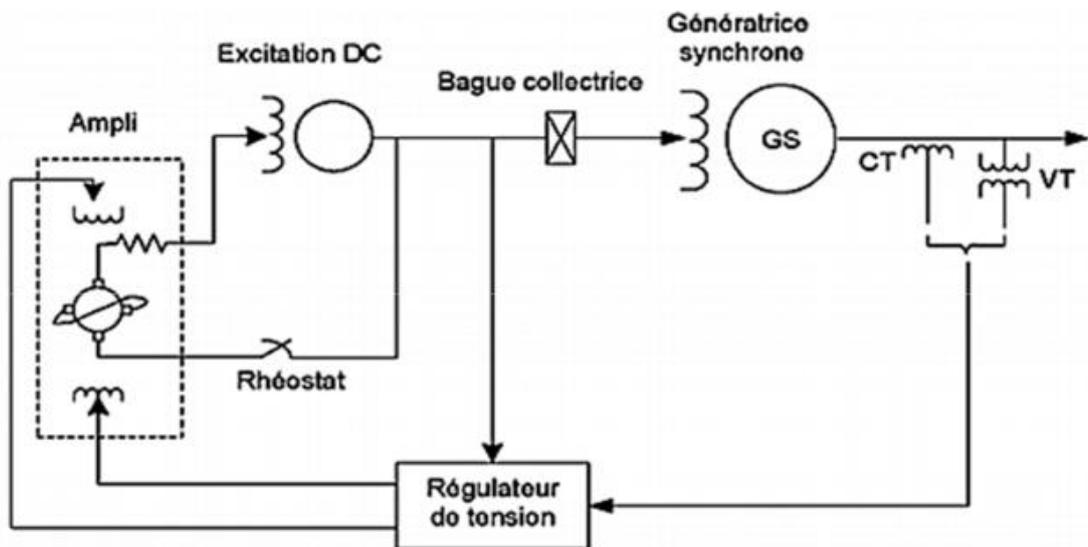


Figure (I-19) : système d'excitation de type DC

I.6.1.2. Système d'excitation à courant alternatif (AC) :

L'excitatrice à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant de la machine synchrone 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 (I-20) et (I-21) montrent l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement [5]

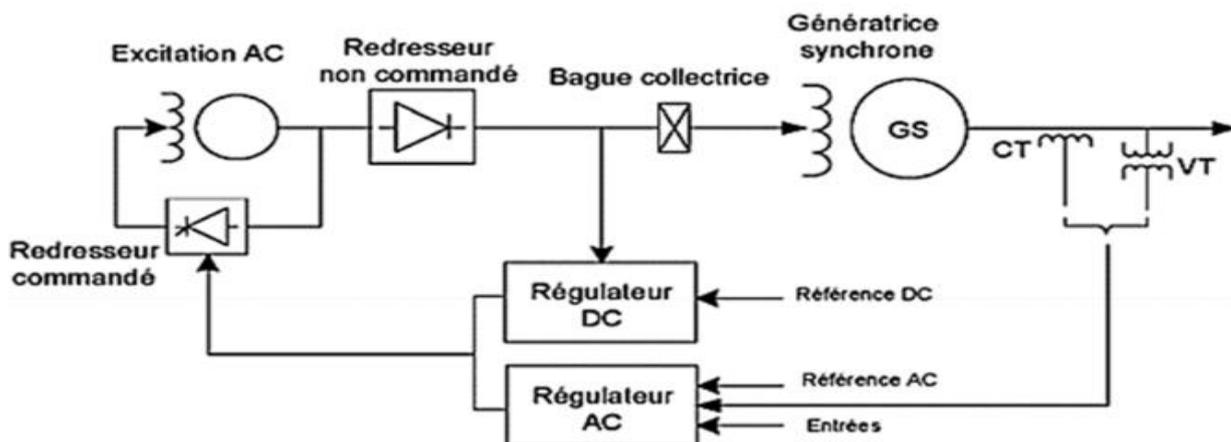


Figure (I-20) : excitation de type AC avec redresseur non commandé

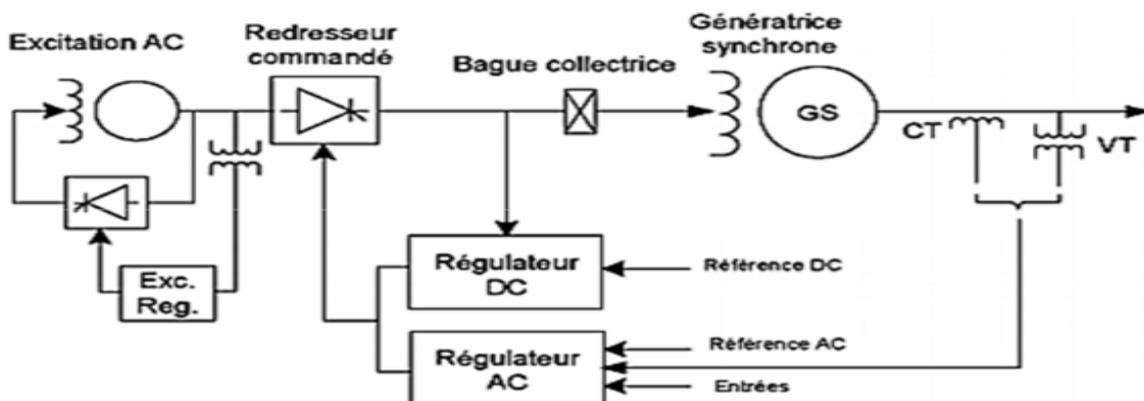


Figure (I-21) : excitation de type AC avec redresseur commandé

Dans le cas de l'excitation à courant alternatif avec redresseur tournant, les bagues collectrices sont éliminées et la sortie du redresseur à diodes est directement reliée à la machine synchrone. La Figure (I-22) illustre l'excitation AC de type Brushless où l'on observe la structure tournante composée de l'excitatrice principale AC et du redresseur à diodes, tel que la sortie du redresseur de l'excitatrice pilote active le champ à la structure tournante.

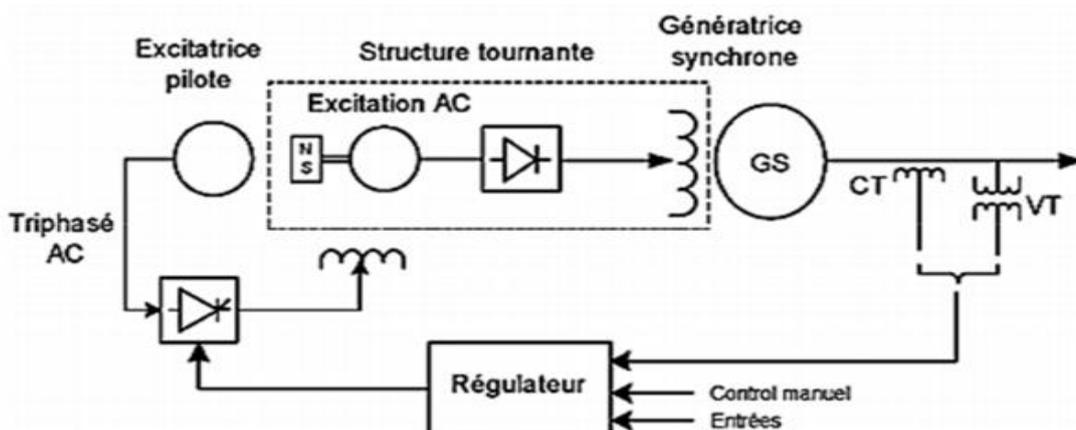


Figure (I-22): l'excitation AC de type Brushless

I.6.1.3. Système d'excitation statique :

Dans ce type de système d'excitation, tous les composants sont statiques ou stationnaires. La source de courant continu est constituée par un transformateur branché à la sortie du générateur, un redresseur qui convertit le courant alternatif en courant continu et un système de balais et collecteurs tournants qui transmettent le courant de la source à la bobine du rotor. Le contrôle de la tension s'effectue dans le pont de diodes qui peut régler l'amplitude de la tension de sortie. [5]

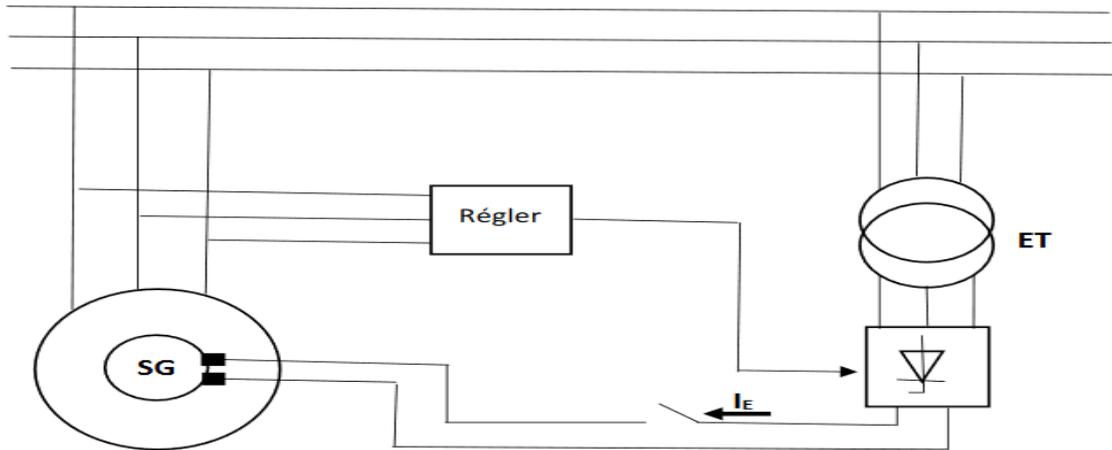


Figure (I-23) : Système d'excitation statique

I.7. Stabilité des alternateurs de puissance :

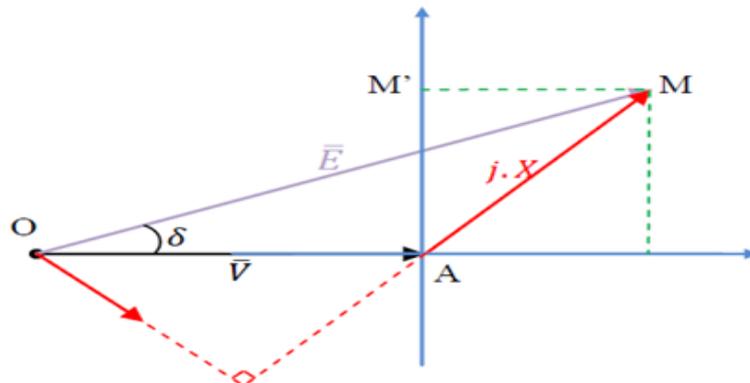


Figure (I-24) : Représentation de l'angle interne δ

$$P = \frac{3VE}{X} \sin \delta \quad (\text{I.13})$$

Il est clair que la puissance électrique transmise au réseau est maximum lorsque la valeur de l'angle interne δ atteint $\frac{\pi}{2}$. Afin que le fonctionnement soit stable, Il faut que l'angle interne reste inférieur à un angle limite proche de $\frac{\pi}{2}$.

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 : la stabilité de l'angle de rotor (stabilité angulaire), la stabilité de tension et la stabilité de fréquence.

Le schéma en figure (I-25) montre la classification utilisée pour mener une analyse en vue de résoudre les problèmes d'instabilité d'un système de puissance. [6]

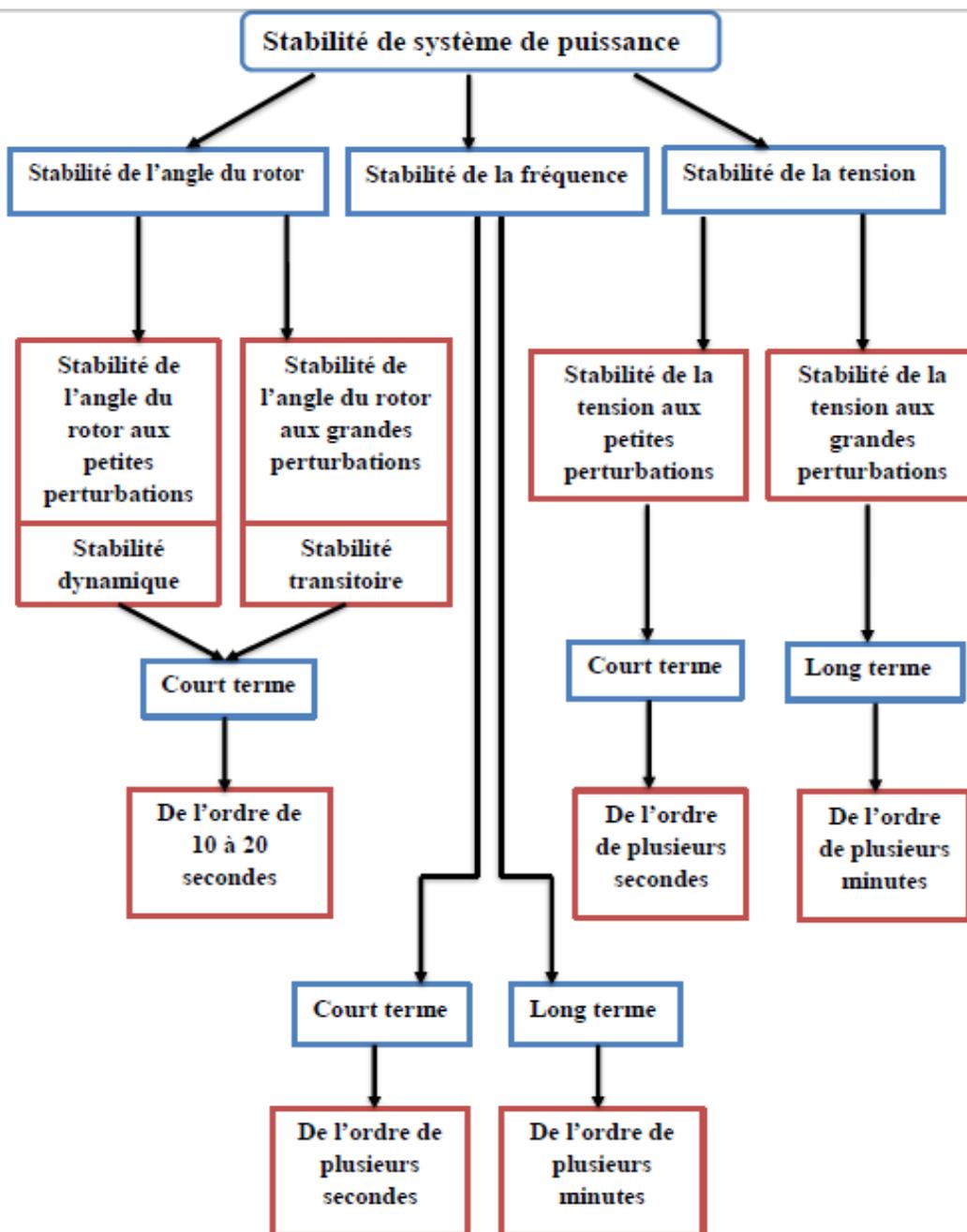


Figure (I-25): Classification des différents types de la stabilité de système de puissance

I.7.1. Stabilité de l'angle du rotor (stabilité angulaire) :

La stabilité de l'angle de rotor concerne la capacité des machines synchrones d'un système de puissance interconnecté à rester en synchronisme suite à une perturbation. Elle dépend de la capacité de maintenir ou restaurer l'équilibre entre les couples électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque machine synchrone dans le système. L'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs. [7]

I.7.1.1. Stabilité angulaire aux grandes perturbations-stabilité transitoire :

La stabilité transitoire dépend non seulement de l'amplitude des perturbations et du point de fonctionnement initial mais elle dépend également des caractéristiques dynamiques du système.

Elle se manifeste à court terme sous forme d'un écart croissant de façon aperiodique de certains angles de rotor. Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation, (cas 1, figure (I-26)), et elle s'étend sur 3 à 5 secondes. [7]

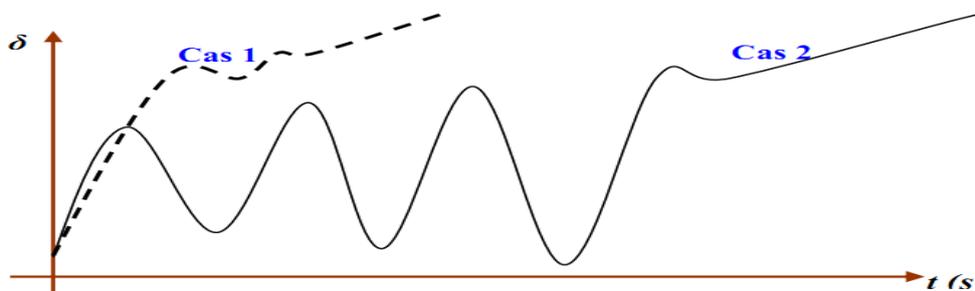


Figure (I-26) : Variation d'angle de rotor

Cas 1 : instabilité de première oscillation

Cas 2 : instabilité de multi-oscillations

I.7.1.2. Stabilité angulaire aux petites perturbations-stabilité dynamique :

Cette stabilité appelée stabilité dynamique est définie par la capacité du système de puissance à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations. L'instabilité qui en résulte est sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non entre les angles de rotor. Elle dépend surtout du point de fonctionnement d'équilibre initial du système ainsi que des caractéristiques dynamiques du système et ne dépend pas du niveau de perturbations, car celles-ci sont en général en faibles amplitudes. Ces oscillations peuvent cependant aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie du réseau ou tout le réseau. Dans ce cas, il peut à des modèles linéaires pour simuler le système de puissance. [7]

I.7.2. Stabilité de tension de l'alternateur :

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions

acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. La stabilité de tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge. L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions à quelques nœuds.

Généralement, l'instabilité de tension se produit lorsqu'une perturbation entraîne une augmentation de puissance réactive demandée au-delà de la puissance réactive possible.

Enfin, la stabilité de tension peut être classée en deux catégories ; la stabilité de tension aux grandes perturbations et aux petites perturbations [7].

I.7.3. La stabilité de fréquence :

Le maintien de la fréquence à une valeur nominale dans un système de puissance est lié à l'équilibre global entre les puissances actives produites et consommées (y compris les pertes).

Autrement dit, suite à certaines perturbations, l'équilibre global des puissances produites consommée peut être déséquilibré : ce déséquilibre entraîne alors une variation de fréquence.

L'énergie cinétique stockée dans les pièces tournantes des machines synchrones et autres machines électriques tournantes peut éventuellement compenser ce déséquilibre. Si ce dernier n'est pas trop grand, les générateurs participant à la commande de fréquence régleront la puissance active fournie à travers leurs réglages secondaires fréquence-puissance et ramèneront ainsi l'écart de fréquence à des valeurs acceptables. Par ailleurs, si le déséquilibre est trop grand, l'écart de fréquence sera significatif avec des graves conséquences (effondrement complet du système). [7]

I.8. Circuits de stabilisation d'un système d'excitation :

I.8.1. Représentation d'un système turbo-alternateur avec AVR :

L'AVR (régulateur automatique de tension) est un système de régulation de la tension d'un système Turbo-alternateur. Le système AVR agit pour réguler cette tension par l'intermédiaire de l'excitatrice figure (I-27)

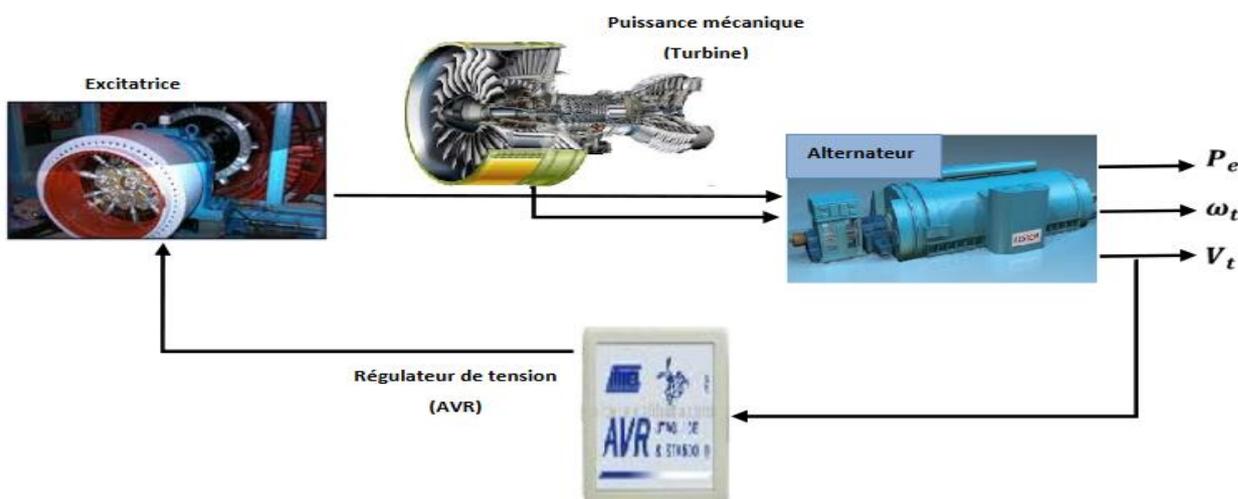


Figure (I-27) : Le schéma synoptique d'ensemble Turbo-alternateur avec AVR [5]

I.8.2. Éléments d'un système d'excitation :

Les différentes parties et les éléments d'un système d'excitation sont représentés dans la figure suivante : [8]

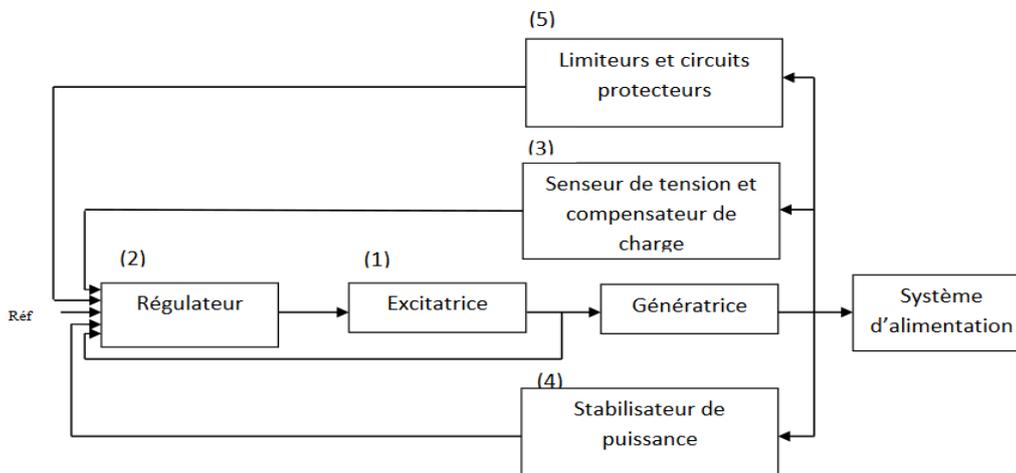


Figure (I-28) : Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone.

(1) L'excitatrice :

Fournit la puissance aux bobines qui créent le champ au rotor. Typiquement, un générateur d'une puissance de 600MW nécessite une excitatrice d'environ 1 MW.

(2) Le régulateur :

Permet de contrôler et stabiliser le signal d'entrée de l'excitatrice.

(3) Le senseur de tension :

Mesure la tension aux bornes de la machine, la filtre et la redresse en une valeur continue. Ensuite, cette mesure est comparée à la référence (tension voulue aux bornes de la machine).

- **le compensateur de charge :** est un élément additionnel et facultatif qui permet de conserver une tension constante en un point particulier distant des bornes de la machine.

(4) le stabilisateur de puissance (PSS) :

Il fournit un signal d'entrée additionnel au régulateur du système d'excitation afin d'amortir les oscillations de puissance a basse fréquence du réseau électrique.

(5) les limiteurs et les circuits protecteurs :

Sont toute une gamme de moyens qui s'assurent que les limites du circuit d'excitation et du générateur ne sont pas outrepassées.

Par exemple, limitation du courant d'excitation, limiteur de surexcitation, limiteur de tension et limiteur de sous-excitation.

I.8.3. Stabilisateurs des systèmes de puissance ‘PSS’ :

Le stabilisateur de puissance (PSS) utilise des signaux de stabilisation additionnels qui agissent sur le système d'excitation dans le but d'améliorer les performances dynamiques du système électrique global. Généralement les grandeurs utilisées à l'entrée d'un stabilisateur de puissance sont générées par : la vitesse de rotation de l'arbre, la fréquence et la puissance [8]. L'utilisation d'un stabilisateur de puissance dans les systèmes d'excitation, est souvent requise, car cet élément permet essentiellement l'amortissement des oscillations de puissance surtout dans le cas de faibles signaux, ce qui assure ainsi une meilleure stabilité.

Conclusion :

Cette étude nous a permis de découvrir la centrale thermique de Marsat El Hadjadj et d'enrichir nos connaissances théoriques et pratiques. Dans ce chapitre, nous avons présenté la centrale thermique de Marsat El Hadjadj et ses différents composants qui rentrent dans le cycle de production de l'énergie électrique. Nous avons présenté aussi les définitions et les caractéristiques des différents types de stabilité d'un système de puissance. Le concept général de la stabilité peut être synthétisé en trois groupes : stabilité de l'angle de rotor, de la tension et de la fréquence.

Dans le chapitre suivant, on s'intéressera à l'ajout d'un signal supplémentaire généré par un stabilisateur du système de puissance (PSS) sur la consigne de l'AVR permet de réaliser un ensemble (AVR+PSS) conduisant à une stabilité très élevée du réseau.

Chapitre II

Introduction :

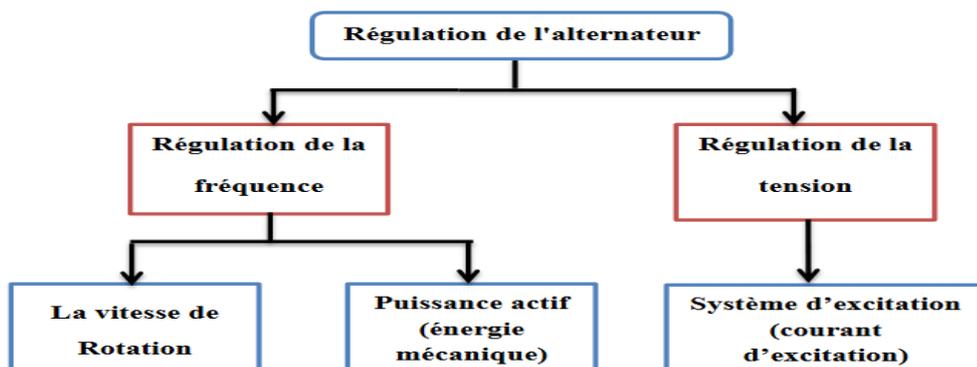
La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir un système. La régulation automatique est la technique utilisée pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système telles que la tension, la fréquence... en vue d'en imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des niveaux prédéfinis.

La machine synchrone est généralement utilisée pour générer l'énergie électrique, elle est modélisée par un système d'équations qui permet de faciliter son analyse en tenant compte de plusieurs hypothèses simplificatrices. Cependant plusieurs chercheurs utilisent les transformations de Park afin de déterminer le modèle réduit biphasé de la machine triphasé pour simplifier la simulation et l'étude de cette dernière.

Notre objectif est l'étude du système d'excitation et de la puissance avec la méthode des réseaux de neurones. Actuellement ce système est conçu sur la base d'une régulation classique PI et PID. Néanmoins dans le cadre de modernisation des systèmes de la centrale, nos collègues l'année passée ont réalisé un comparaison du comportement du circuit de réglage classique avec un régulateur flou. Les résultats obtenus par l'application de la logique floue étés nettement appréciables. Dans ce contexte pour continu le travail d'application des régulateur intelligents aux systèmes de stabilité de l'alternateur (AVR + PSS), nous souhaiterons utilisé un régulateur neuronal dans le but d'obtenir un résultat meilleur de réglage de la tension de sortie de l'alternateur et donc du réseau. Parce que le PSS (Power System Stabilizer) s'adapte parfaitement comme complément au système d'excitation et permet une amélioration de la stabilité du réseau électrique.

II.1. Description des régulations :

Les paramètres principaux pour la sureté de fonctionnement du système de puissance sont : La tension, La vitesse de la turbine, La fréquence et Le courant d'excitation. La régulation pendant des perturbations est faite selon ces paramètres, la figure(II.1) illustre un schéma simplifié de la régulation d'un alternateur. [12]



Figure(II.1) : Description bref de la régulation d'alternateur

II.1.1. Les régulateurs de tension AVR :

Le système d'excitation est un système auxiliaire qui alimente les enroulements du rotor de la machine synchrone afin que cette dernière puisse fournir le niveau de puissance demandé. En régime permanent, ce système fournit une tension et un courant continu mais il doit être capable également de faire varier rapidement la tension d'excitation en cas de perturbation sur le réseau. Les systèmes d'excitation sont équipés de contrôleurs, appelés habituellement régulateurs de tension (AVR : Automatic Voltage Regulator). [12]

Donc ces systèmes d'excitation 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 de fonctionnement nominales. Une caractéristique très importante d'un régulateur de tension est sa capacité à faire varier rapidement la tension d'excitation. [12]

$$V_e = V_{\text{réf}} + V_s - V_t \quad (\text{II.1})$$

La fonction de transfert du modèle du système d'excitation et de son régulateur de tension utilisé dans notre cas est montrée par la figure (II.2).

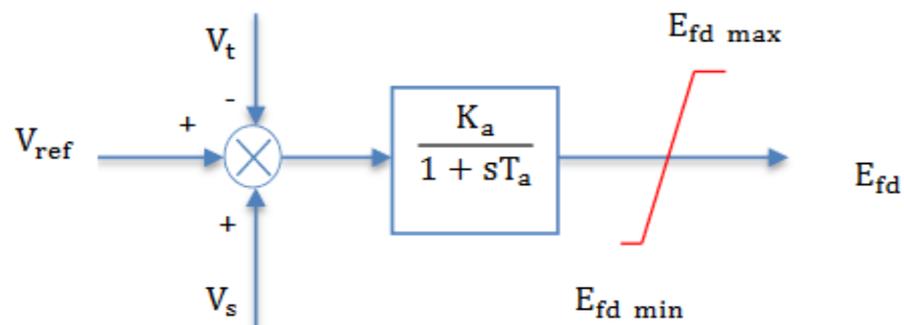


Figure (II.2) : Modèle schématique d'un régulateur classique de tension AVR [12]

Tel que :

V_t : Tension mesurée à la sortie de la machine synchrone

V_s : Tension du nœud infini.

$V_{\text{réf}}$: Tension de référence.

V_e : L'erreur

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

$E_{fd \text{ max}}$: Limite supérieure de la sortie de

$E_{fd \text{ min}}$: Limite inférieure de la sortie de

T_a : Constante de temps de l'AVR

K_a : Gain de l'AVR

La grandeur $V_{\text{réf}}$, est la consigne de tension déterminée pour satisfaire les conditions de l'état équilibrée. Le régulateur de tension compare le signal V_t à la tension de consigne $V_{\text{réf}}$. [12]

Un signal complémentaire u_s peut-être ajouté au nœud de sommation : il s'agit d'un signal issu de certains dispositifs spécifiques de commande comme les stabilisateurs de puissance.

Ensuite, le signal d'erreur est amplifié pour donner la tension d'excitation demandée E_{df} .

La constante de temps et le gain de l'amplificateur sont respectivement T_a et K_a , les valeurs extrémales de la tension d'excitation ($E_{\text{fd-max}}$, $E_{\text{fd-min}}$) sont fixées par un système de limitation.

La relation suivante décrit le fonctionnement dynamique du modèle : [12]

$$E'_{\text{fd}}(t) = \frac{1}{T_a} (K_a (V_{\text{réf}} - V_t(t) + V_s(t)) - E_{\text{fd}}(t)) \quad (\text{II.2})$$

II.1.1.1.Principe de fonctionnement du système AVR :

Le système AVR agit pour réguler la tension de sortie de l'alternateur par l'intermédiaire de l'excitatrice. [14]

II.1.1.1.Principe de la régulation de tension :

Pour régler la tension de l'alternateur, le système AVR excite la génératrice d'excitatrice dans un premier temps, à son tour, l'excitatrice va exciter l'alternateur ce qui induit une tension. Le système AVR dispose de la mesure de la tension de sortie de l'alternateur, et la tension de référence (point de consigne), à partir de l'écart entre ces deux signaux, l'AVR agit en permanence pour corriger, réguler la tension de sortie de l'alternateur par l'intermédiaire de l'excitatrice. [14]

II.1.2. Rôle du régulateur de tension :

Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour ajuster la puissance réactive. Si le courant d'excitation augmente, alors la puissance réactive produite augmente et la tension locale du nœud augmente. [10]

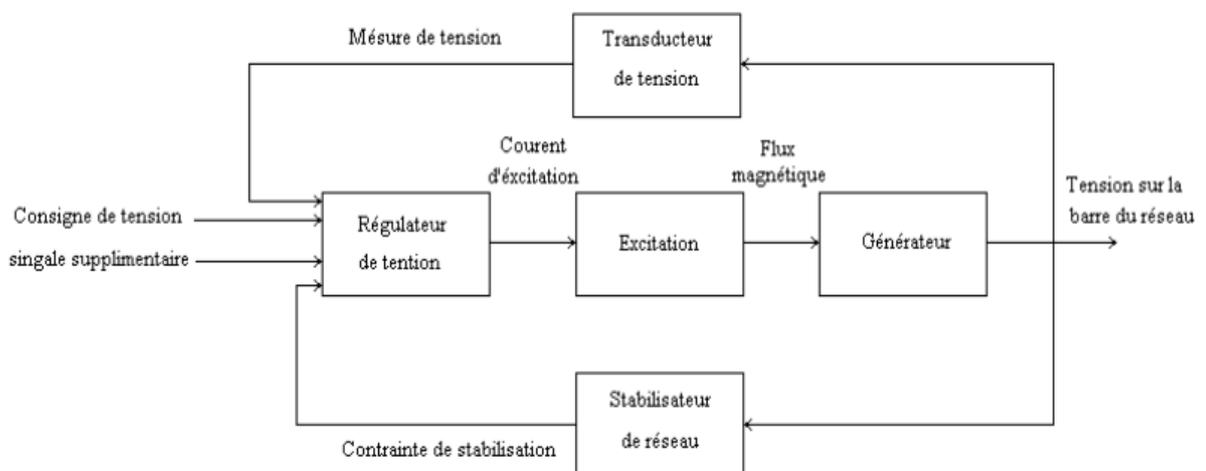


Figure (II.3) : Diagramme fonctionnel de la régulation de tension

II.1.3. Réglage de la fréquence :

Les centrales de production d'électricité sont interconnectées grâce au maillage du réseau de transport. Pour que le réseau interconnecté fonctionne, les alternateurs de toutes les centrales doivent tourner à la même vitesse électrique, afin de produire une tension de fréquence uniforme dans tout le réseau. C'est ce qu'on appelle le synchronisme des alternateurs.

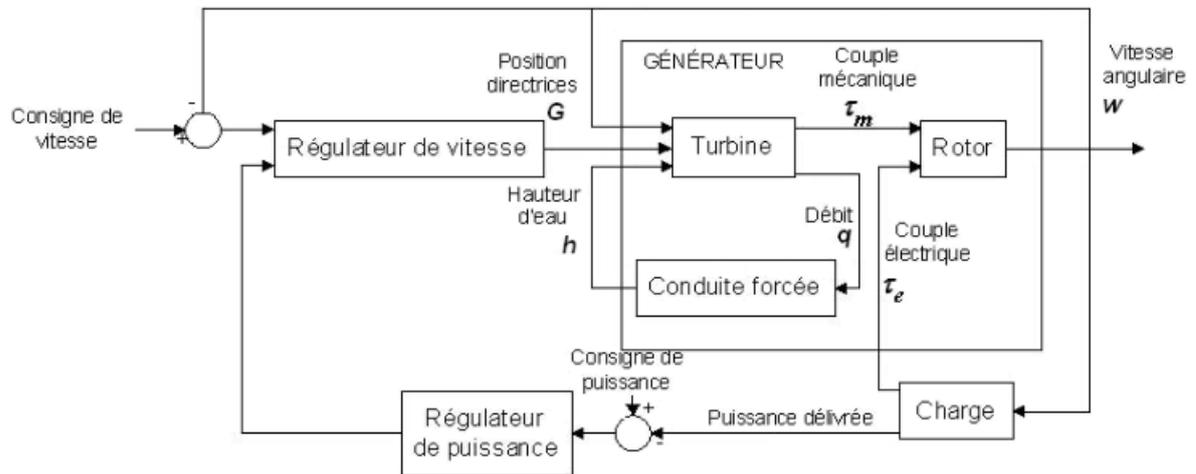
La fréquence doit être alors maintenue autour de la valeur nominale de 50 Hz, quelles que soient les variations de consommation ou de production. En effet, d'une part, une fréquence évoluant sans cesse rendrait l'électricité inutilisable pour de multiples usages, d'autre part, la plupart des composants du système électrique sont conçus pour fonctionner dans une plage de fréquence donnée, en dehors de laquelle des dysfonctionnements de matériels peuvent apparaître. La fréquence varie en permanence très légèrement en fonction de la consommation d'électricité et des événements affectant la production. On distingue :

- Les petites variations globales et aléatoires autour de 50 Hz dues aux évolutions continues de la consommation ;
- Les variations globales de fréquence, qui peuvent être provoquées par des variations brutales de production (arrêt inopiné d'une centrale ou avarie sur la ligne de raccordement d'un groupe ;
- Les fortes variations locales de fréquence qui surviennent lors d'incidents de type court-circuit.

Prenons l'exemple de variations de fréquence liées à des variations de consommation. Lorsque la consommation exactement égale à la production (situation d'équilibre) l'arbre de la turbine conserve son rythme, la fréquence est donc maintenue. Si la consommation augmente, l'arbre de la turbine va ralentir, donc la fréquence du courant produit va baisser. Si la consommation baisse, l'arbre de la turbine accélère et la fréquence augmente. Des systèmes de régulation permettent de corriger ces variations de fréquence. [10]

II.1.4. Rôle du régulateur de fréquence :

Le régulateur de vitesse ou de fréquence agit sur la force motrice fournie à la machine à l'aide du positionnement des directrices, qui sont des vannes permettant d'ajuster le débit et la direction de l'eau sur les aubes, pour équilibrer la puissance active. Si l'ouverture des directrices est augmentée, alors le générateur fournit plus de puissance active et la fréquence augmente. [10]



Figure(II.4) : Diagramme fonctionnel de la régulation de puissance et de fréquence

II.1.5. Cause et sortes d'oscillations de puissance :

Les oscillations de puissance actives sont provoquées par des dérangements du réseau ou par une exploitation proche de la limite de stabilité du réseau et stimulent un échange réciproque entre les alternateurs et le réseau. Ces oscillations électromécaniques du rotor se laissent amortir par une influence adéquate sur le courant d'excitation. Il faut différencier les oscillations de puissance entre :

- Les oscillations locales : entre un alternateur et les autres machines de la même centrale
fréquence d'oscillation typique : 0.8.....2.0 HZ
- Oscillations entre des centrales voisines : fréquence d'oscillation typique : 1.0...2.0 HZ
- Oscillations entre des réseaux régionaux : comprenant chacun plusieurs machines. fréquence d'oscillation typique : 0.2.....0.8 HZ
- Oscillations globales : caractérisées par balancement en phase de toutes les machines des réseaux interconnectés. fréquence d'oscillation typique : inférieur à 0.2 HZ

Le but de la stabilisation (Power System Stabilizer - PSS) est de détecter les oscillations de puissance et d'élaborer un signal qui permet d'influencer la consigne du régulateur de tension. [15]

II.1.6. Les régulateurs de puissance PSS :

II.1.6.1. Définition :

II.1.6.2. Qu'est-ce que signifie PSS ? :

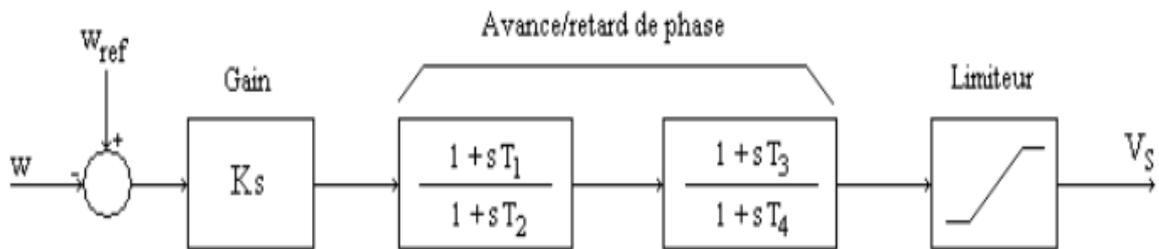
Ce sont des signaux de contrôle supplémentaires de stabilisations, reconnus sous le nom « Power System Stabilizer » générés par des réseaux spéciaux. [16]

II.1.6.3. A quoi sert PSS ? :

Les signaux de PSS ont pour objet l'élimination des oscillations électromécaniques et l'amélioration de facteur d'amortissement du système. [16]

II.2. Représentation du PSS appliqué au système MS-réseau infini :

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.5). Il est constitué d'un gain K_S , d'un compensateur de phase et d'un limiteur. [11]



Figure(II.5) : Structure d'un PSS classique

La fonction de transfert du PSS est donnée par :

$$G_S(S) = \frac{V_S}{d_w} = K_S \frac{(1+sT_1)(1+sT_3)}{(1+sT_2)(1+sT_4)} \quad (\text{II.3})$$

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

Le gain K_S :

Est un facteur important dans la structure du PSS classique. Il permet d'augmenter l'amortissement des oscillations et d'améliorer aussi la stabilité de la réponse du système en boucle fermée. Ses valeurs varient dans une proportion à une certaine valeur critique. Au-delà de celle-ci, l'amortissement des oscillations commence à diminuer. [11]

Bloc compensateur de phase :

On peut utiliser les diagrammes de Bode pour comprendre l'effet d'une compensation sur un système.

La fonction de transfert du compensateur de phase est donnée par : $D(s) = \frac{1+aTs}{1+Ts}$

Compensation par avance de phase ($a > 1$) :

C'est-à-dire ajouter une phase positive autour du point critique, sans modifier le comportement aux basses et hautes fréquences. La figure (II.6) représente un exemple d'une compensation par avance de phase pour $a=2$ et $T=0.05$. Celle-ci permet d'ajouter une phase positive, pouvant aller jusqu'à 90 degré, au système entre les fréquences $1/aT$ et $1/T$. Le maximum de phase $\Phi_m = \sin^{-1}(a-1/a+1) = 19.47^\circ$ se produit à la fréquence $\omega = 1/(T\sqrt{a}) = 14.14$ rad/s. Ce qui augmente la marge de phase et, par conséquent, la stabilité du système. Elle augmente aussi le gain du système en hautes fréquences. Ce qui réduit le temps de montée et le temps de réponse. [11]

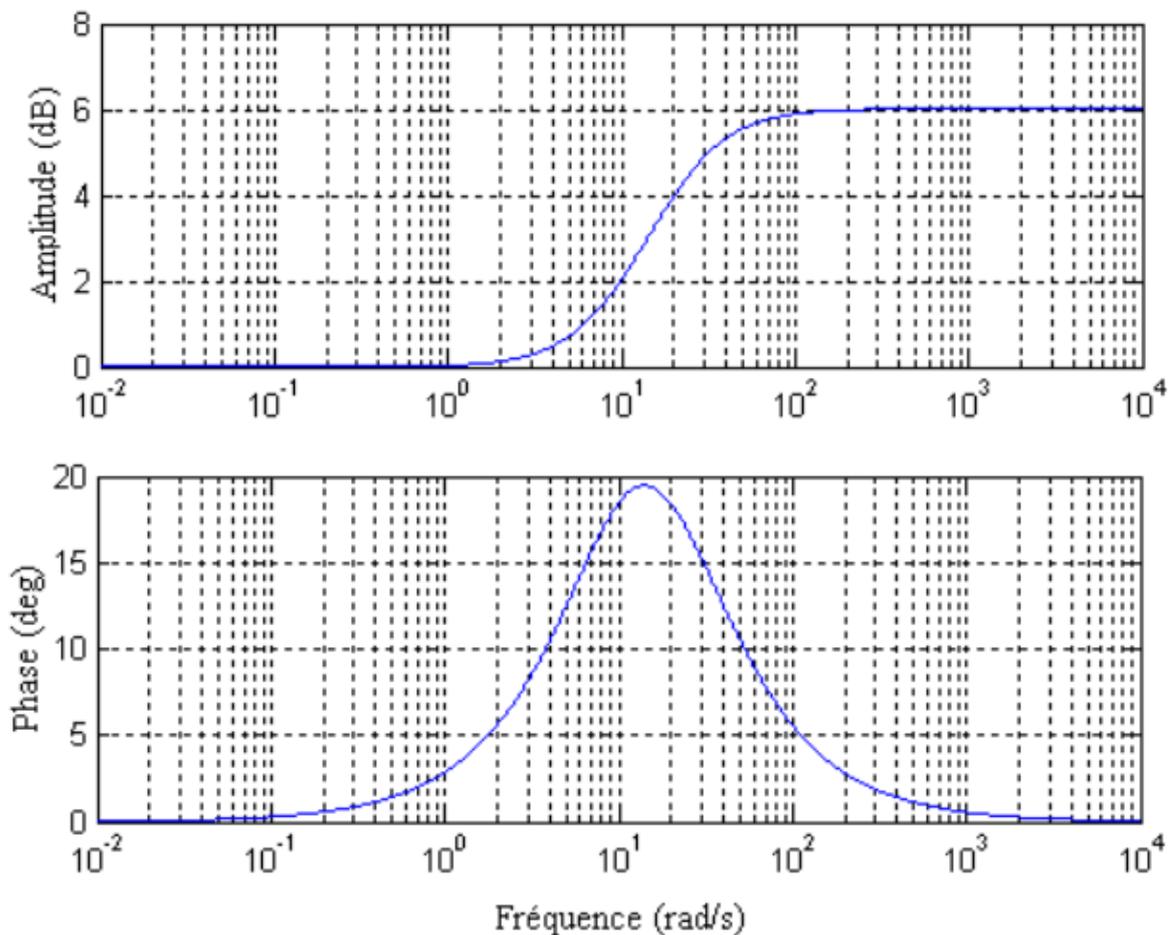


Figure (II.6) : Les diagrammes de Bode d'une compensation par avance de phase

Compensation par retard de phase ($a < 1$) :

La figure (II.7) représente un exemple d'une compensation par retard de phase pour $a=0.5$ et $T=0.1$. La compensation par retard de phase, pouvant aller jusqu'à -90 degré, permet d'ajouter une phase négative au système entre les fréquences $1/T$ et $1/aT$. Le maximum de phase $\Phi_m = \sin^{-1}(a-1/a+1) = -19.47^\circ$ se produit à la fréquence $\omega = 1/(T\sqrt{a}) = 14.14$ rad/s. Cette compensation augmente le gain du système en basses fréquences. Ceci permet de réduire l'erreur statique, mais affecte la stabilité du système. [11]

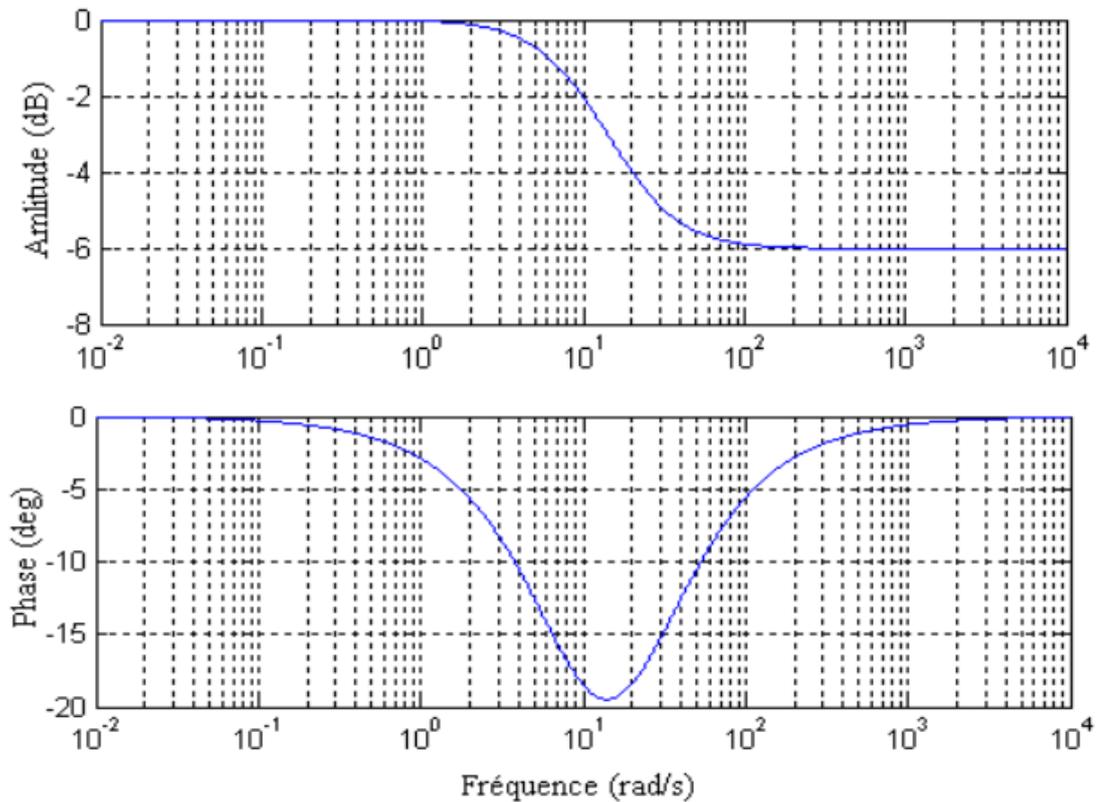


Figure (II.7) : Un exemple d'une compensation par retard de phase

Les variables du PSSC dépendent des paramètres de la machine, elles sont déterminées séparément pour chaque type de générateur. [11]

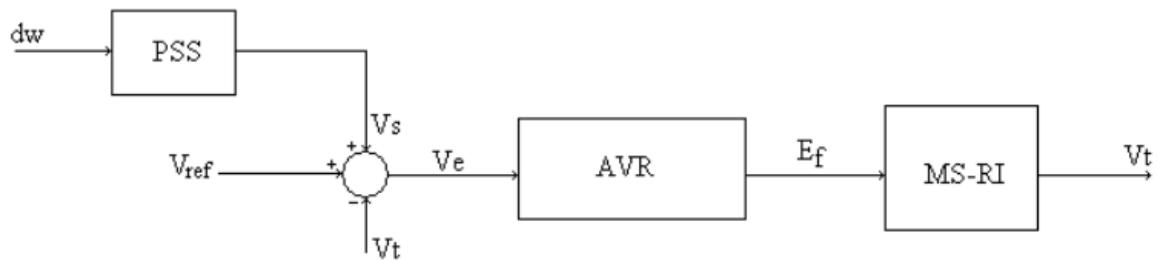
II.2.1. M.S avec son système de commande (AVR-PSS) :

II.2.2. Les régulateurs 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. [12]

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 figure (II.8).



Figure(II.8) : Système de commande de la MS-RI

Avec :

d_w : la variation de la vitesse angulaire du rotor de la MS.

V_s : le signal de sortie du PSS.

E_f : le signal de commande du MS-RI.

V_t : la tension de sortie de la machine.

On note que le PSS est décrit par la figure (II.5) et que la structure de l'AVR est illustrée par figure (II.8). L'ensemble (AVR + PSS) doit fournir au bout d'un certain temps, une tension de commande E_f telle que le système (MS-RI) présente une grandeur de sortie V_t égale à la consigne V_{ref} . [11]

II.2.3. PSS avec une action proportionnelle intégrale :

Avec une simple action proportionnelle(K_s), il est impossible d'obtenir un bon compromis erreur statique / stabilité. Il est alors indispensable de trouver une structure de correction permettant de limiter, voire d'annuler l'erreur statique. Le correcteur doit ainsi fixer la forme de la réponse au moyen d'une correction proportionnelle, puis d'annuler l'erreur statique à l'aide d'une action intégrale.[11]

Un tel correcteur est caractérisé par :

$$C(s) = \frac{1+sT_c}{T_c s} \tag{II.4}$$

Si $\omega \rightarrow 0$ alors $C(s) = \frac{1}{T_c s}$, on retrouve donc l'action intégrale au niveau de l'erreur statique.

Si $\omega \gg 1/T_c$ alors $C(s) \rightarrow 1$, le correcteur n'a alors plus aucune action.

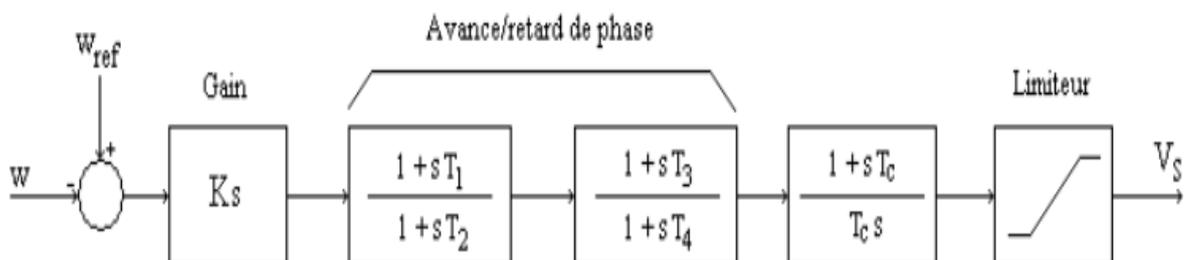


Figure (II.9) : La structure du PSS avec une action proportionnelle intégrale

- **Le gain de stabilisateur KPSS** détermine la quantité d'atténuation présentée par le PSS.
- **Le bloc correcteur** est un filtre passe-haut, il permet aux signaux liés aux oscillations de passer sans changements, sans ce filtre, les changements réguliers de la vitesse modifient la tension terminale (le correcteur du PSS répond seulement aux changements de la vitesse).
- **Le bloc de compensation de phase** qui compense le retard de phase entre l'entrée d'excitateur et le Couple électrique de générateur. [11]

II.2.4. Signal d'entrée :

L'action principale du PSS doit commander les oscillations du rotor. IL fournit une entrée additionnelle à la boucle d'excitation en cas de transitions d'angle rotorique, afin d'ajuster la tension d'excitation. Ceci devrait être fait sans causer un effet nuisible sur le système. Le signal d'entrée est une différence entre la puissance mécanique générée par la turbine et la puissance électrique fournie par le générateur au réseau (ou bien entre les couples). Dans ce travail on a utilisé comme paramètres d'entrées au PSS la vitesse angulaire du rotor (ω) et la puissance active (P_{e0}) [15].

II.2.5. Signal de sortie :

Le signal de sortie du PSS est celui d'une tension (V_{pss}). Ce signal est supplémentaire comme signal d'entrée à l'AVR. [15]

II.3. La régulation de fréquence par les réseaux de neurone :

Introduction :

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID proportionnel intégral dérivé), un régulateur PID est un régulateur qui dispose de trois actions P, I et D. Son intérêt est de réunir les avantages des trois correcteurs de base. Grâce au terme P, la rapidité augmente et grâce à l'action I, la précision augmente (l'annulation de l'erreur statique) tout en autorisant grâce à l'action D des performances de rapidité supérieures. [18]

Les contrôleurs PID sont couramment utilisés pour améliorer les performances des systèmes AVR. En utilisant un contrôleur proportionnel, le temps de montée d'une réponse peut être réduit, mais l'état stationnaire de l'erreur ne peut pas être éliminé à zéro. Un contrôleur intégré peut améliorer la performance en régime permanent, mais il peut affecter sérieusement la réponse transitoire. Un contrôleur dérivé améliore la performance transitoire en réduisant le dépassement, améliorant ainsi la marge de stabilité pour le système [22].

Il existe d'autres méthodes de régulations intelligentes telles que la logique floue qui a été utilisée l'année passée, d'après leur étude on déduit que le régulateur flou est beaucoup plus rapide et performant que le régulateur conventionnel. Notre travail sera basé sur une autre méthode de régulations intelligente « le réseau de neurone ». Cette dernière peut être simple et robuste.

II.3.1. Principe du réseau de neurone :

Un réseau de neurones artificiels est un système dont la conception est à l'origine schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques, et qui par la suite s'est rapproché des méthodes statistiques.

Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type probabiliste, en particulier bayésien. Ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de créer des classifications rapides (réseaux de Kohonen en particulier), et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle auxquelles ils fournissent un mécanisme perceptif indépendant des idées propres de l'implémenteur, et des informations d'entrée au raisonnement logique formel[17].

II.3.1.1 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'.

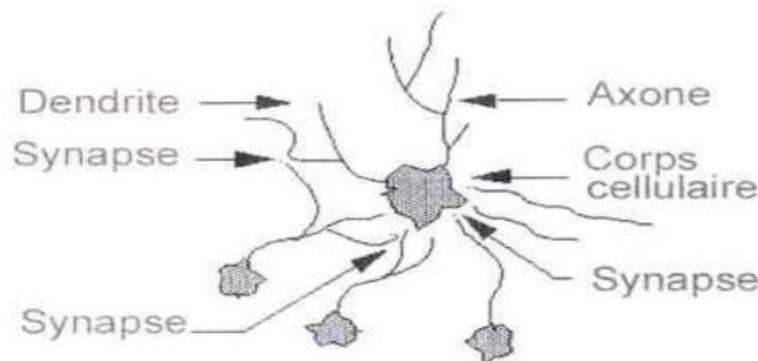


Figure (II.10) : Anatomie d'un neurone biologique

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'[17].

II.3.1.2. Neurone formel :

Conceptuellement, le fonctionnement du neurone biologique peut être représenté par le modèle de la figure II.11. Ce neurone formel peut être considéré comme un opérateur ou élément processeur qui collecte les entrées et fournit une sortie seulement quand la somme dépasse un certain seuil interne.

L'évaluation de la sortie se fait typiquement par la somme pondérée, soustraction du seuil et le passage du résultat à travers une non linéarité [17].

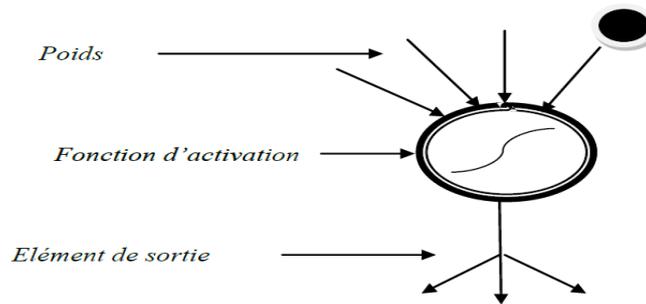


Figure (II.11) : Le modèle du neurone formel

Mathématiquement, ceci peut être modélisé par les équations suivantes :

$$S = \sum_{i=0}^n W_i \times U_i \quad (\text{II.5})$$

$$U = f(S) \quad (\text{II.6})$$

n : nombre d'entrées.

U_i : composante du vecteur d'entrée.

W_i : composante du vecteur de poids synaptiques.

S : somme pondérée appelée potentiel.

U : la sortie ou réponse du neurone.

f : fonction d'activation.

II.3.2. Structure d'un Réseau de Neurones :

Les capacités d'un seul neurone sont limitées. L'implémentation de fonctions complexes nécessite l'intégration de plusieurs neurones sous forme d'un réseau à topologie spécifique. Un exemple de réseau est illustré par la figure (II.12). Plusieurs neurones sont arrangés par couches en cascade ; D'où l'appellation MLP (Multi Layer Perceptron) [18] et [19].

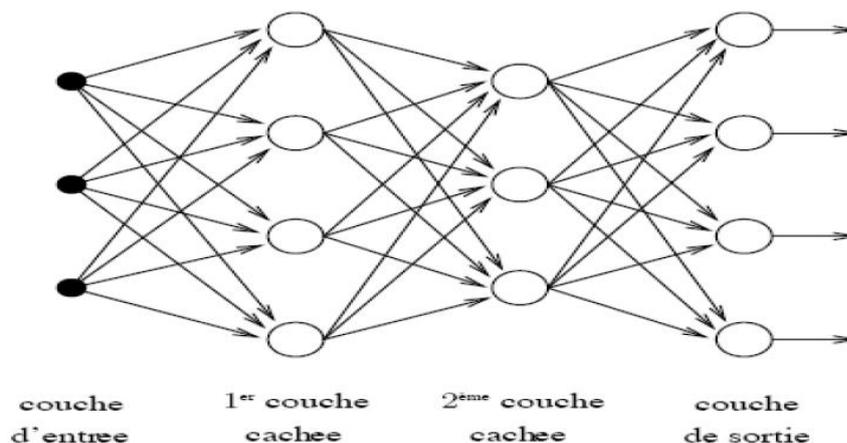


Figure (II.12) : Architecture d'un réseau multicouche.

II.3.3. Équations du réseau :

Le réseau statique est caractérisé par les équations suivantes :

$$S_i^l(k) = \sum_{j=1}^{N_l-1} W_{ij}^{l-1} \times U_j^{l-1}(k) \quad (\text{II.7})$$

$$U_i^l(k) = f[S_i^l(k)] \quad (\text{II.8})$$

$$i=1,2,\dots,N_l \text{ et } 1 \leq l \leq L \quad (\text{II.9})$$

$U_i^l(k)$: Sortie du neurone i de la couche l à l'instant k .

$S_i^l(k)$: La somme des entrées pondérées du neurone i de la couche l à l'instant k .

W_{ij}^{l-1} : Le poids de la connexion entre le $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche $l-1$ et le neurone i .

II.3.4. Apprentissage du réseau :

Toute l'information que peut contenir un réseau neuronal réside dans les poids synaptiques. L'apprentissage consiste donc à ajuster ces derniers de telle façon qu'il puisse générer correctement la sortie correspondante à chaque point de l'espace d'entrée. Ainsi, l'apprentissage peut être défini comme tout changement dans la matrice de poids.

L'apprentissage est accompli à l'aide de règles qui changent ou adaptent les poids des coefficients synaptiques en fonction des exemples présentés à l'entrée (apprentissage non supervisé) et dans certains cas en fonction des sorties désirées (apprentissage supervisé) [19].

II.3.4.1 Apprentissage par retro propagation du gradient :

La retro propagation est la méthode d'apprentissage la plus utilisée pour l'entraînement des réseaux de neurones. Le principe de cet algorithme est de calculer les sorties des neurones, couche par couche de l'entrée vers la sortie (propagation directe), calculer les erreurs sur les sorties des neurones de la sortie vers l'entrée (retro propagation), puis calculer le gradient et l'adaptation des poids synaptiques. Le processus est répété autant de fois que l'erreur reste supérieure à un seuil.

Le critère à minimiser est sous la forme [19] :

$$J_N(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_L} [U_{L,j}(k) - U_{L,j}^d(K)]^2 \quad (\text{II.10})$$

$J_N(k)$: Valeur du critère d'erreur à l'instant k .

$U_{L,j}(k)$: $j^{\text{ème}}$ Sortie du réseau à l'instant k .

$U_{L,j}^d(K)$: Valeur désirée correspondante à $U_{L,j}(k)$.

Les paramètres du réseau sont ajustés comme suit :

$$W_{l,j,i}(k+1) = W_{l,j,i}(k) - \mu \frac{\partial J_N}{\partial W_{l,j,i}(k)} \quad (\text{II.11})$$

Les poids sont adaptés suivant l'expression :

$$W_{l,j,i}(k+1) = W_{l,j,i}(k) - \mu \times g_{l,j,i}(k) \quad (\text{II.12})$$

Où μ est le taux d'apprentissage et $g_{l,j,i}$ forment les éléments de la matrice du gradient correspondant à la matrice de poids W .

II.4 Réseaux Neuronaux Dynamiques

Les réseaux de neurones dynamiques ont une topologie de connexions récurrentes. Chaque neurone peut recevoir, comme entrées, les sorties des autres neurones et sa propre sortie. Cette particularité d'interconnexion permet de tenir compte de la dimension temps et de rendre ces réseaux très appropriés pour la modélisation et le contrôle des processus dynamiques.

II.4.1 Réseaux avec retour d'état :

Ce type de réseaux, faisant l'objet de notre étude, possède une seule couche de neurones connectés entre eux. Dans le cas le plus général, les neurones sont entièrement interconnectés (c'est-à-dire, chaque neurone est connecté à tous les autres neurones et possède un retour sur lui-même).

En plus, chaque neurone peut recevoir une entrée externe. Cette architecture est illustrée sur la figure (II.13) [21].

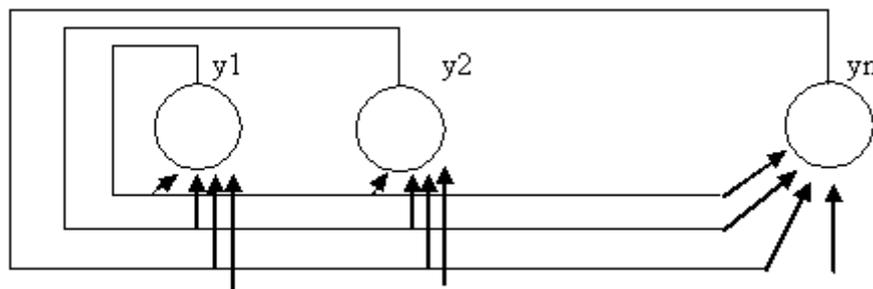


Figure (II.13) : Réseau avec retour d'état

Dans notre travail, on a utilisé une architecture récente utilisée dans le domaine de la modélisation et du contrôle des systèmes dynamiques ; à savoir l'architecture neuronale récurrente à temps discret DTRNN (Discret Time Recurrent Neural Network). Celle-ci est analogue au réseau d'Hopfield voir figure (II.14).

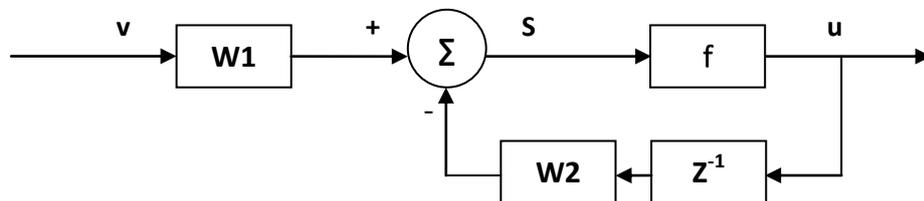


Figure (II.14) : Réseau Récurrent discret (DTRNN)

II.4.2 Équations du réseau :

À l'origine, les équations régissant ce type de réseau sont de la forme :

$$U_i(k+1) = f \left[\sum_{j=1}^m W_{ij} \times U_j(k) + V_i(k) \right] \quad (\text{II.13})$$

Si on considère que les entrées V_i sont aussi pondérées selon la figure II.14, (II.15) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$U_i(k+1) = f \left[\sum_{j=0}^{m+n} W_{ij} \times U_j(k) \right] \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \quad \quad j=0 \\ U_j(k) = U_j(k) \quad j=1, \dots, n \\ U_{j-n}(k) \quad j=n+1, \dots, n+m \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

$$U_j(k) = U_j(k) \quad j=1, \dots, n \quad (\text{II.16})$$

$$U_{j-n}(k) \quad j=n+1, \dots, n+m \quad (\text{II.17})$$

Où :

$U_i(k+1)$: $i^{\text{ème}}$ Variable d'état du réseau ($i=1, \dots, n$).

$v_j(k)$: $j^{\text{ème}}$ Entrée externe ($j=1, \dots, m$).

n : nombre de neurones dans le réseau.

m : dimension du vecteur d'entrée V .

$U_{0i}(k)=1$: Entrée seuil.

Les sorties sont choisies parmi les variables d'état. L'apprentissage est accompli à l'aide d'algorithmes qui adaptent les coefficients synaptiques en fonction des exemples présentés (entrées / sorties désirées correspondantes).

II.4.3 Apprentissage des réseaux dynamiques :

Plusieurs méthodes d'apprentissage ont été proposées pour l'entraînement des réseaux dynamiques. Dans notre exposé, nous se limitons à l'entraînement du réseau DTRNN, par l'algorithme RTRL (Real Time Recurrent Learning). Ce dernier peut être formulé comme suit :

$$J_p(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{j \in \Omega} [U_j(k) - U_j^d(k)]^2 \quad (\text{II.18})$$

$J_p(w)$: Est le critère quadratique d'erreur à travers la $P^{\text{ème}}$ séquence.

k_p : Longueur de la $P^{\text{ème}}$ séquence d'entraînement.

Ω : est l'ensemble des neurones de sorties.

$U_j(k)$: Sortie du $j^{\text{ème}}$ neurone de sortie.

$U_j^d(k)$: Valeur désirée correspondante à $U_j(k)$.

Les paramètres du réseau sont ajustés comme suit :

$$W_{j,i}(m+1) = W_{j,i}(m) - \mu \frac{\partial J_p}{\partial W_{j,i}} \quad (\text{II.19})$$

Où m est l'indice d'itération concernant l'adaptation des poids qui s'incrémente à la fin de chaque séquence. On tient à préciser qu'on intéresse à des processus sur un certain horizon de temps correspondant à une séquence d'actions. La sortie du réseau peut être jugée à la fin de chaque essai.

Ainsi, le gradient peut être exprimé par :

$$\frac{\partial J_p(w)}{\partial W_{j,i}} = \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{h \in \Omega} [U_h(k) - U_h^d(k)] \times P_{j,i}^h(k) \quad (\text{II.20})$$

Où $P_{j,i}^h(k)$ est une dérivée partielle définie comme suit :

$$P_{j,i}^h(k) = \frac{\partial U_h(k)}{\partial W_{j,i}} \quad (\text{II.21})$$

$$=f' \left[\sum_{\alpha=0}^{n+m} W_{h,\alpha} \times U_{\alpha}(k-1) \right] \times \left[\delta_{h,j} \times U_j(k-1) + \sum_{\beta=1}^n W_{h,\beta} \times \frac{\partial U_{\beta}(k-1)}{\partial W_{j,i}} \right] \quad (\text{II.22})$$

Où $\delta_{h,j}$ est la fonction delta de Kronecker définie comme suit :

$\delta_{h,j}=1$ Pour $h=j$ et $\delta_{h,j}=0$ pour tout $h \neq j$.

Après substitution, on obtient

$$W_{j,i}(m+1) = W_{j,i}(m) - \mu \sum_{k=1}^{K_P} \sum_{h \in \Omega} [U_h(k) - U_h^d(k)] \times P_{j,i}^h(k) \quad (\text{II.23})$$

La complexité de cet algorithme est liée essentiellement au calcul des termes récurrents $P_{j,i}^h(k)$.

II.4.4 Structure de commande MFA/FEP :

Le problème principal dans les systèmes de commande est de concevoir un contrôleur qui peut générer la commande adéquate afin de répondre à un certain ensemble de spécifications constituant l'objet de l'action de commande. Souvent, ces spécifications sont exprimées en termes de rapidité, précision et stabilité.

Dans le cas de la commande neuronale, le problème revient à trouver une meilleure manière pour l'ajustement des poids de ce réseau. La difficulté principale est comment utiliser l'erreur sur la sortie du système pour modifier les paramètres du contrôleur, du fait que le système physique est interposé entre la grandeur commandée et le signal de commande.

Plusieurs stratégies d'apprentissage ont été proposées pour surmonter ce problème. On trouve la méthode d'apprentissage supervisé, apprentissage généralisé par modèle inverse, modélisation direct par apprentissage spécialisé, ..., et la structure de commande indépendante du modèle (MFA pour Model Free Approach). Dans ce travail, on s'intéressera à cette dernière.

Le principe de cette structure consiste à évaluer l'erreur de sortie (i.e. l'écart entre la sortie du système et sa valeur désirée) à l'entrée du contrôleur et la faire propager directement, de l'entrée vers la sortie, pour avoir les erreurs des couches cachées et celle de la couche de sortie. Ceci peut être réalisé par l'algorithme de la propagation directe de l'erreur (FEP) confectionné spécialement pour cet objectif. Ce qui permet un calcul direct et rapide des erreurs des couches consécutives, exigées pour l'ajustement des paramètres du contrôleur. Cette commande est représentée sur la figure (II.15) [21].

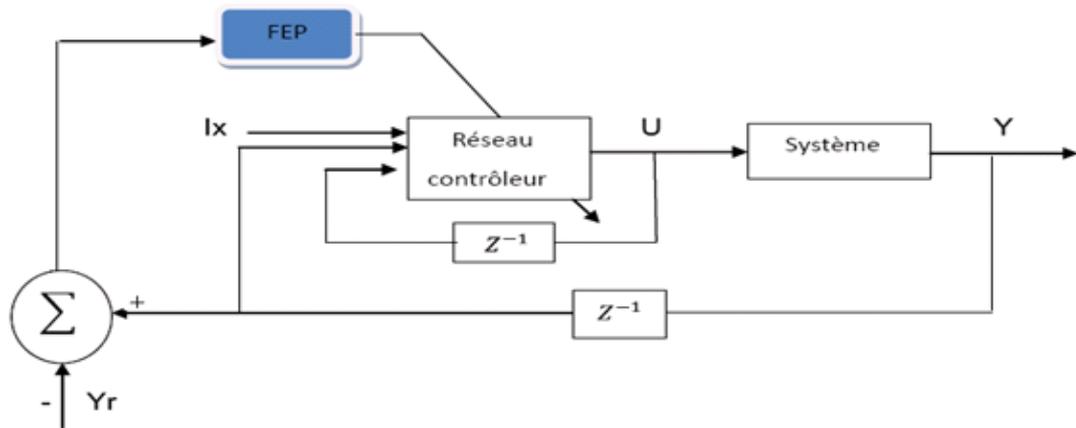


Figure (II.15) : Structure de commande MFA à base de FEP

II.4.5 Entraînement du réseau contrôleur DTRNN par l’algorithme FEP

L’entraînement des réseaux récurrents DTRNN par l’algorithme RTRL est une opération assez complexe. La retro propagation de l’erreur dans le réseau ne peut pas être fait qu’à travers les lignes de retard. Une fois cette erreur véhiculée, l’algorithme RTRL se charge du calcul du vecteur global en utilisant les termes $P_{ji}^h(k)$. Seulement, une telle opération exige un temps énorme et un espace mémoire considérable.

Face à ces inconvénients, l’approche MFA/FEP constitue une alternative plus efficace. L’injection directe de l’erreur de l’entrée permet d’avoir l’ensemble du vecteur d’erreur de sortie nécessaire pour l’adaptation des poids du réseau. L’interprétation formelle de ce principe est donnée par le paragraphe suivant. Le réseau DTRNN est régi par les équations suivantes (II.14), (II.15), (II.16) et (II.17). Le vecteur d’entrée total $X(k)$ au réseau est constitué de l’entrée seuil, des entrées externes $x_i(k)$ et des variables d’état du réseau (retours $U_i(k)$) [21] :

$$X(k) = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1(k) \\ \vdots \\ x_m(k) \\ u_1(k-1) \\ \vdots \\ u_n(k-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0(k) \\ X_1(k) \\ \vdots \\ X_L(k) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad U(k) = \begin{bmatrix} U_1(k) \\ U_2(k) \\ \vdots \\ U_n(k) \end{bmatrix}$$

$X(k)$: vecteur d’entrée total du réseau.

$U(k)$: vecteur d’état du réseau récurrent.

L’adaptation des poids se fait toujours avec la formule suivante :

$$W_{ij}^l(k+1) = W_{ij}^l(k) - \mu \frac{\partial J}{\partial W_{ij}^l(k)} \tag{II.24}$$

J est le critère à minimiser défini par l’équation (II.18).Le gradient se calcule comme :

$$\frac{\partial J}{\partial W_{ij}^l(k)} = \frac{\partial J}{\partial U_i(k)} \frac{\partial U_i}{\partial W_{ij}^l(k)} \tag{II.25}$$

Calculant maintenant la partie $\frac{\partial J}{\partial U_i(k)}$. Soit l'erreur calculée entre la sortie du réseau et la sortie désirée :

$$e_y(k) = U_L(k) - U_L^d(k) = \Delta U_L(k) \tag{II.26}$$

En injectant cette erreur à l'entrée du réseau, on obtient :

$$\frac{\partial J}{\partial U_i(k)} = e_i(k) = \sum_{j=0}^L \frac{\partial f(S_i(k))}{\partial x_j} = \Delta U_j \tag{II.27}$$

Toutes les composantes du vecteur d'erreur à l'entrée seront toutes mises à zéro excepté celles qui correspondent aux variables de retour. L'équation(II.27) deviendra :

$$e_i(k) = \frac{\partial f(S_i(k))}{\partial x_L(k)} \Delta U_L(k) \tag{II.28}$$

$$e_i(k) = \frac{\partial f(S_i(k))}{\partial x_L(k)} \frac{\partial S_i(k)}{\partial x_L(k)} e_y(k) \tag{II.29}$$

Le vecteur d'erreur global est calculé alors comme suit :

$$e(k) = e_y(k) \sum_{i=1}^n f'(s_i(k)) W_{iL} \tag{II.30}$$

Le calcul de la deuxième partie du gradient (II.25) $\frac{\partial U_i}{\partial W_{ij}^l(k)}$ se fait comme suit :

$$\frac{\partial U_i}{\partial W_{ij}^l(k)} = \frac{\partial f(S_i(k))}{\partial s_i(k)} \frac{\partial S_i(k)}{\partial W_{ij}^l(k)} = \sum_{j=0}^{n+m} f'(s_i(k)) X_j(k) \tag{II.31}$$

On combinant les équations (II.27) et (IV.31) on obtient :

$$\frac{\partial J}{\partial W_{ij}^l(k)} = e_i(k) \sum_{j=0}^{n+m} f'(s_i(k)) X_j(k) \tag{II.32}$$

Il représente le gradient du critère J par rapport aux poids W_{ij} .

II.4.6. Application de l'approche MFA/FEP au PSS Neuronal :

Le but de cette commande est d'assurer la régulation optimale de la tension de sortie d'un système de puissance en utilisant l'approche MFA/FEP comme outil d'implémentation.

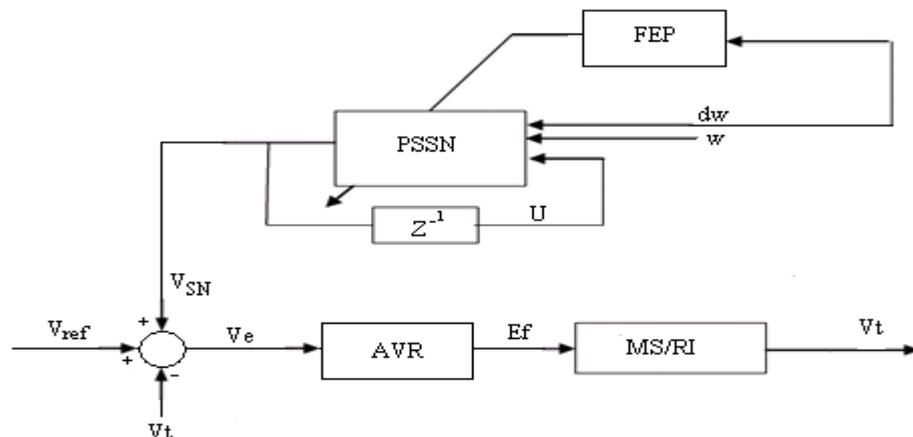


Figure (II.16) : Système de commande de la MS-RI avec l'utilisation du PSSN

Le PSS Neuronal (PSSN) reçoit à l'entrée un vecteur $X = [dw \ w \ U']$, avec U est son propre vecteur d'état. La sortie du PSSN, VSN , qui est choisie comme sa première variable d'état, est appliquée à l'entrée du régulateur automatique de tension.

Pour une structure adéquate du stabilisateur, on a choisi un réseau de 3 neurones. Ce réseau reçoit 3 entrées externes (dw , w , valeur numérique) et ses 3 variables d'états dont la première représente la sortie du PSSN. Le taux d'apprentissage est fixé à $\mu = 0.2$.

Les étapes suivies lors de la commande sont exprimées comme suit :

- Initialisation des poids à de petites valeurs dans un intervalle $[0 \ 0.1]$. La matrice des poids synaptiques est de dimension 3×6 (3 sorties et 6 entrées).
- Initialisation du vecteur des variables d'états.
- Calcul du vecteur de sortie du réseau contrôleur.
- Application de la commande au système MS/RI.
- Propagation d'erreur et adaptation des poids.

Conclusion :

Le système étudié est constitué d'un alternateur, réseau infini, et system AVR-PSS. Le système AVR – PSS joue un rôle très important dans l'amélioration des performances dynamiques des systèmes. Dans ce travail nous avons présenté la régulation conventionnelle et intelligente de l'alternateur de puissance et la résolution des problèmes d'instabilités qui se pose dans le système et pour se faire nous utiliserons des régulateurs de vitesse et de fréquence en vue de maintenir la tension constante aux bornes de l'alternateur pendant les perturbations qui peuvent apparaître dans le réseau de puissance.

Dans le chapitre suivant on va entamer la simulation de la régulation conventionnelle et intelligente par réseau de neurone du groupe turbo-alternateur de Marsat El Hadjadj par Matlab/Simulink, ont achèverons par une comparaison entre la régulation classique et la régulation intelligente.

Chapitre III

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons procéder à l'exécution de la simulation du groupe turbo-alternateur de Marsat El Hadjadj pour valider le processus de régulation, modélisé dans le chapitre précédent en utilisant deux méthodes de régulation. La première est une régulation conventionnelle du système **AVR avec PSS** basée sur un intégrateur proportionnel **PI**. La deuxième est une régulation intelligente du même système basée sur les réseaux de neurone. Nous allons faire une analyse pour chaque régulation dans le fonctionnement normal de l'alternateur et dans le fonctionnement en cas d'un court-circuit fugitif. Pour faire une comparaison globale nous avons inclus le travail de nos collègues de l'année passé sur la régulation conventionnelle **AVR sans PSS** [13], réalisé par deux méthodes de régulation conventionnelle et la logique floue. Donc, dans cette situation, nous allons comparer la régulation conventionnelle avec la régulation par réseaux de neurones pour observer la réaction de chaque contrôleur dans le cas normal de fonctionnement ainsi que dans la présence des perturbations.

Enfin les résultats obtenus pour différentes simulations seront interprétés pour montrer les avantages de la régulation numérique et pour maîtriser les problèmes de stabilité de l'alternateur en régime de fonctionnement relié au réseau.

III.1. Simulation de régulation AVR+PSS conventionnelle :

III.1.1. Modèle de simulation :

Le modèle global de notre simulation, sous Matlab-Simulink, est constitué d'une machine synchrone (alternateur), d'une turbine à vapeur et d'une excitation conventionnel à courant continu pour le rotor, un stabilisateur de puissance conventionnel, un disjoncteur et une transformateur élévateur, une source de tension pour modélisé le réseau et des charge en parallèle. Les paramètres réels des équipements sont indiqués en annexe A.

Le travail consiste à comparer la stabilité du système machine synchrone relié à un réseau infini (**MS-RI**) en utilisant une régulation AVR avec PSS et AVR sans PSS. On tient à préciser que pour cette étude concernant les PSS classiques, on a utilisé les modèles de *Simulink*, le choix de ces derniers dépend de nos compétences.

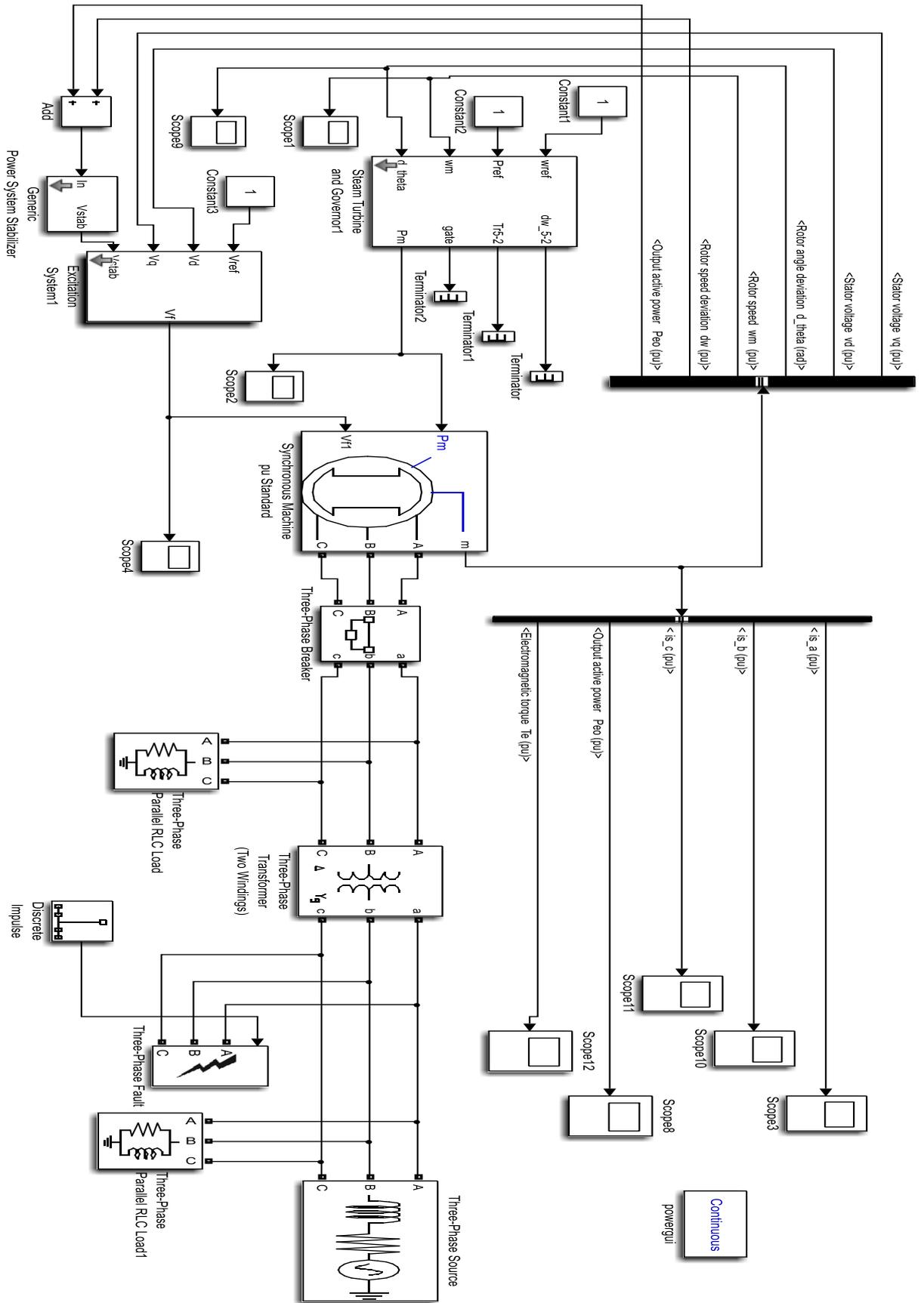


Figure (III.1) : modèle globale de simulation

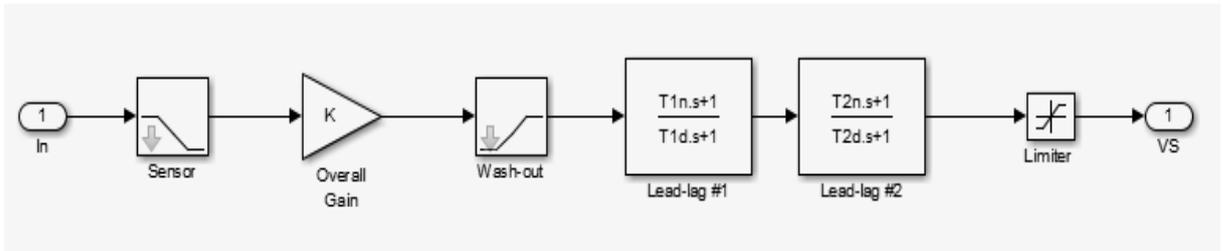


Figure (III.2): schéma de simulation du PSS classique. [22]

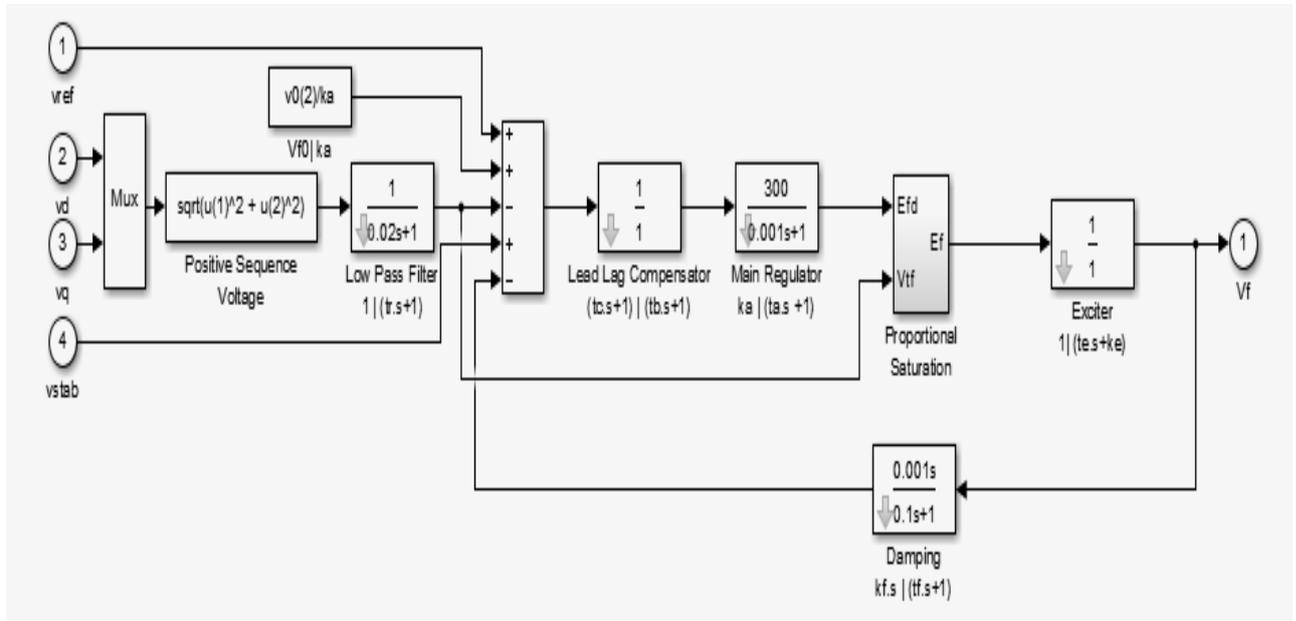
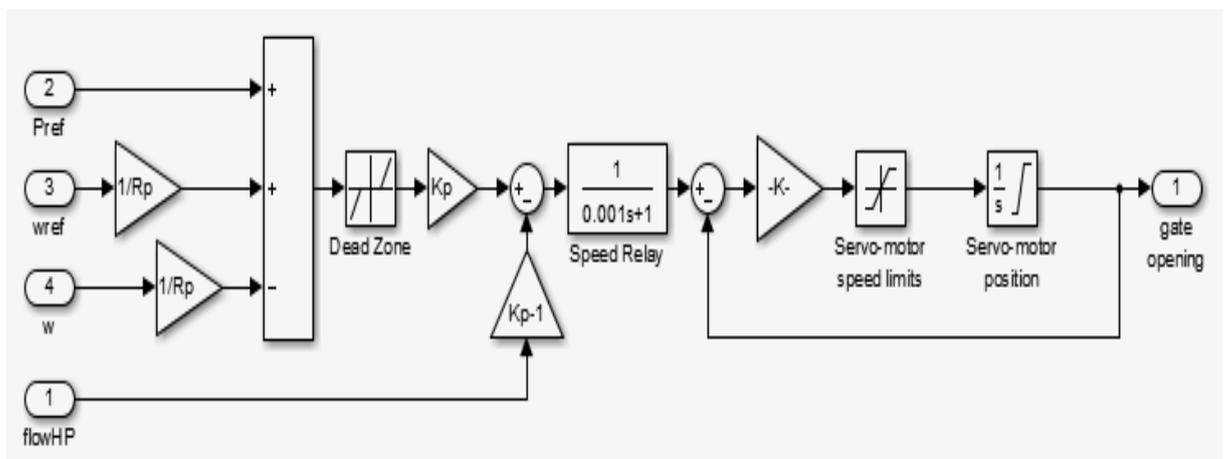


Figure (III.3): régulateur conventionnelle tension d'excitation. [22]



Figure(III.4): régulateur de vitesse de la turbine à vapeur. [22]

III.1.2. Simulation en fonctionnement normal :

Après l'introduction des paramètres de notre système dans le schéma pour la simulation avec un régulateur conventionnel (AVR+PSS), nous avons simulé notre système d'étude sous différents régimes de fonctionnements normale (démarrage, la décroissance de la courbe et le régime permanent).

Théoriquement la boucle supplémentaire PSS peut éliminer les oscillations du rotor d'une machine synchrone par le contrôle de leur excitation. Donc la rapidité et la performance de la régulation sont les meilleures, pour cela on s'intéresse de la simulation des courbes suivantes :

Les courants statoriques (I_a , I_b , I_c), pour voir l'évolution de ces courants en régime de démarrage et le temps nécessaire pour avoir le régime établi et le point de fonctionnement nominal, la figure (III.5) montre le comportement de cette courbe.

Le temps de la simulation est 100 secondes, les résultats obtenus en per unit (Pu) sont :

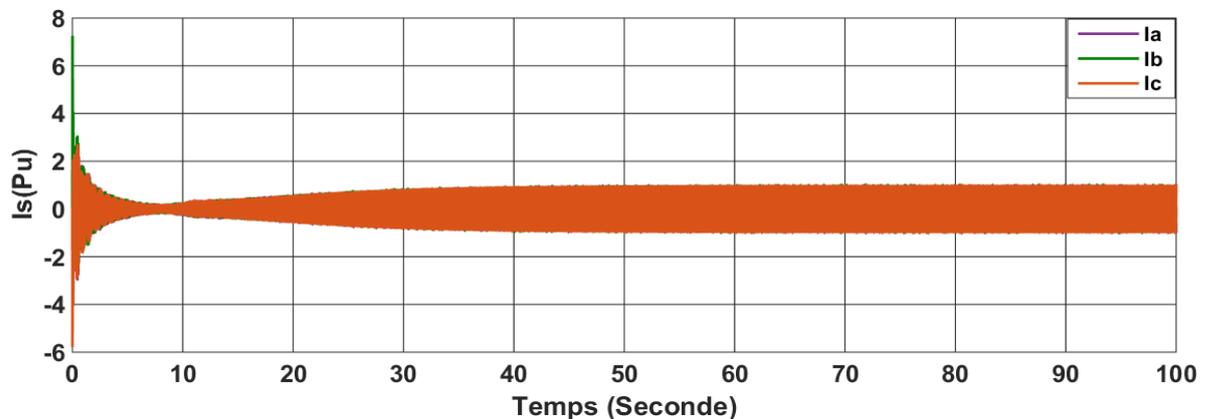


Figure (III.5): les courants statoriques

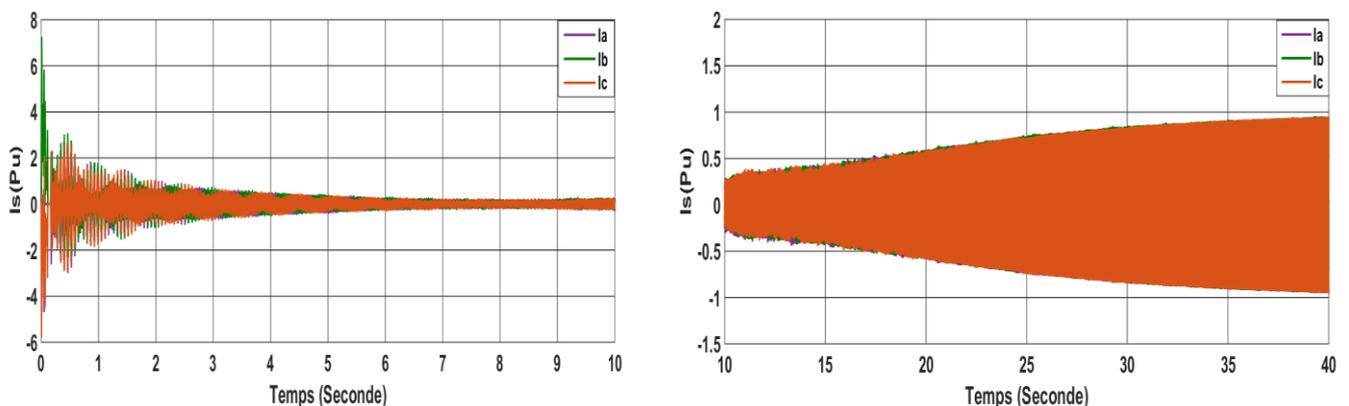


Figure (III.6): zoom des courants statoriques en régime transitoire

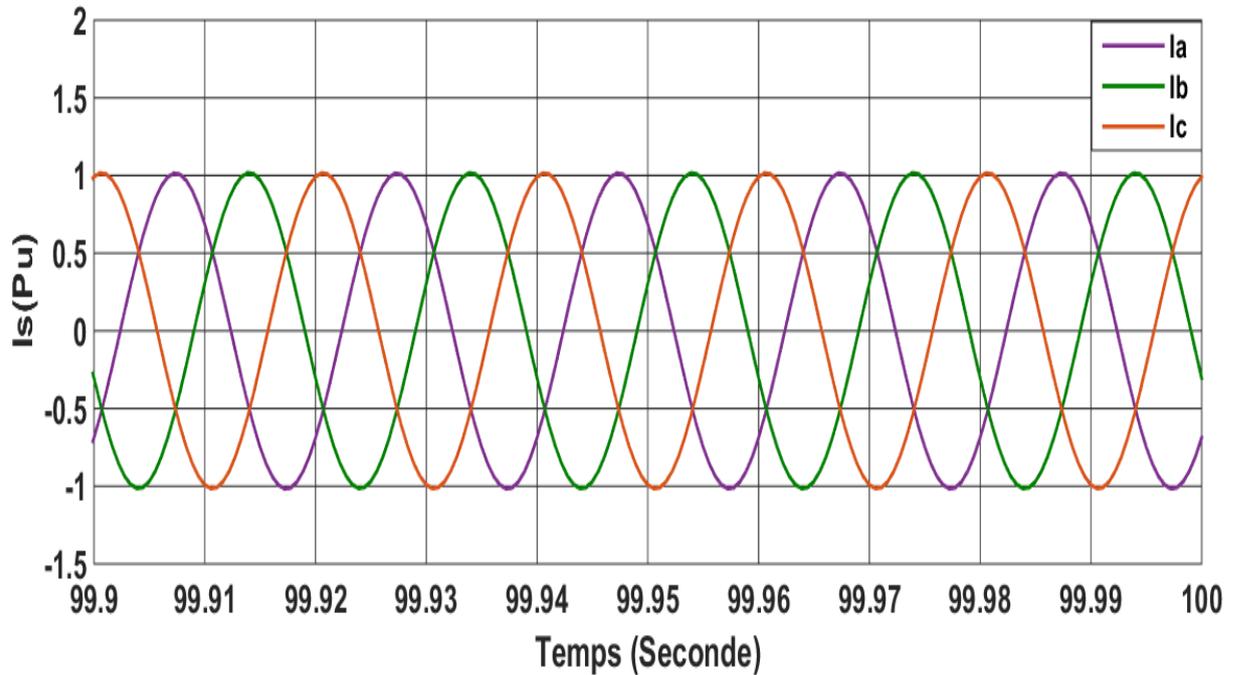


Figure (III.7): Zoom des courants statoriques en régime établi.

Le même comportement des courants statoriques normalement est reflété sur la puissance électrique active de l'alternateur (P_e) et sur le couple électromagnétique, ce qui nous représente un bon pour le fonctionnement du circuit de régulation, les figures (III.8) et (III.9) illustrent la variation de P_e et C_{em} de la machine.

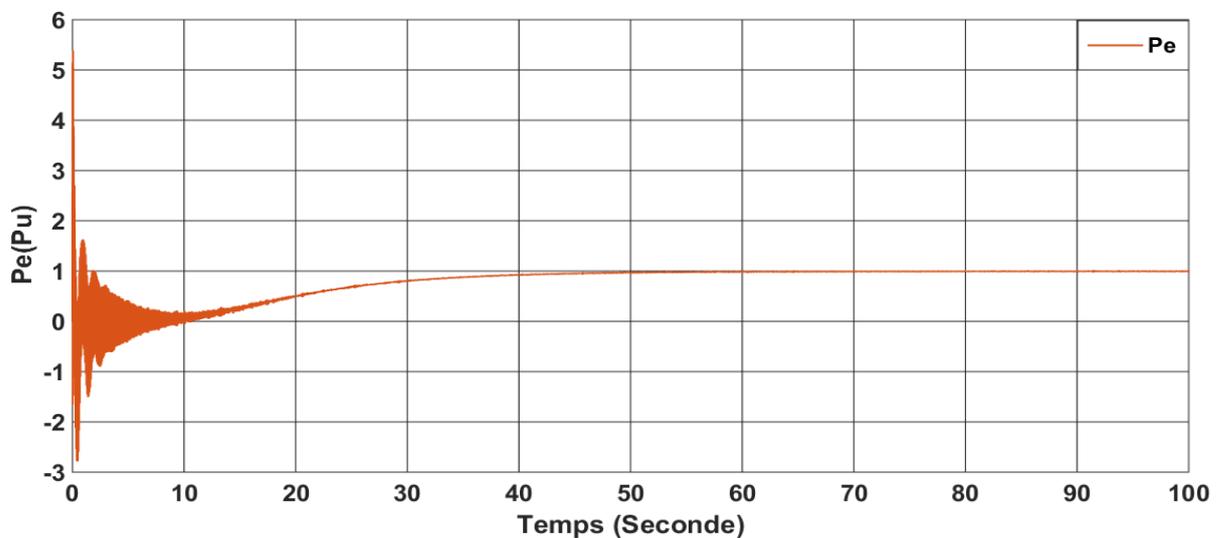


Figure (III.8): la puissance électrique active

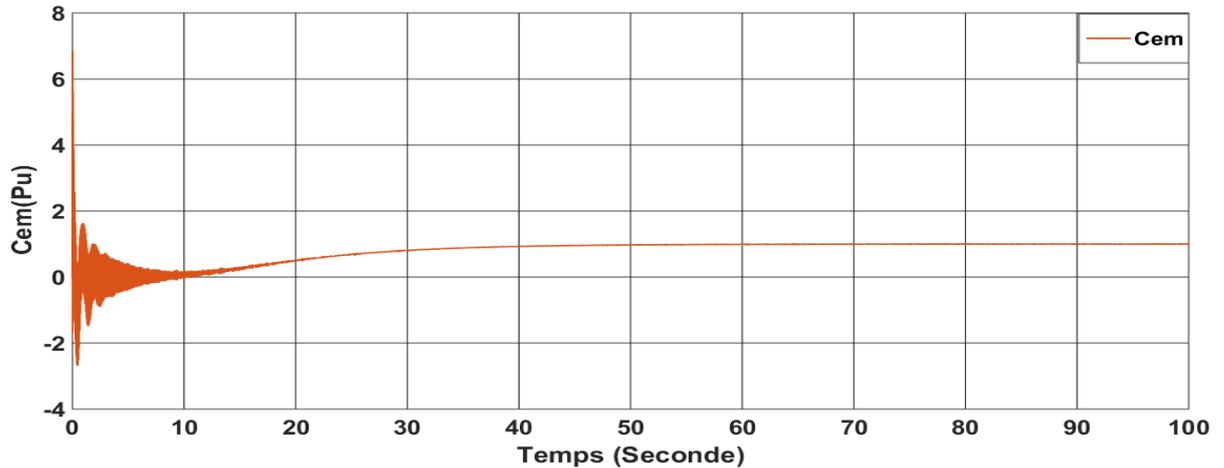


Figure (III.9): le couple électromagnétique

Généralement pour faire débiter l'alternateur sur le réseau, on dispose de deux moyens d'action : Augmenter la puissance mécanique (P_m) fournie par la machine d'entraînement (ajouter de la vapeur ou du fuel à la turbine) et on remarque le comportement de la vitesse du rotor sans toucher à l'excitation. Cependant, la puissance électrique augmente de la même quantité, sinon il y aurait accélération et la machine ne tournerait plus à la vitesse de synchronisme, indispensable à son fonctionnement. Cette opération nous permet de régler le point de puissance active si la vitesse augmente avec la puissance mécanique. Les figures (III.10) et (III.11) montrent la variation de ces paramètres.

Modifier le courant d'excitation I_{ex} en augmentant la tension d'excitation ce pour l'augmentation du flux et en fin l'augmentation de la f.e.m et la variation de l'angle δ . Les figures (III. 12) et (III.13) présentent la variation de la tension d'excitation et l'angle δ .

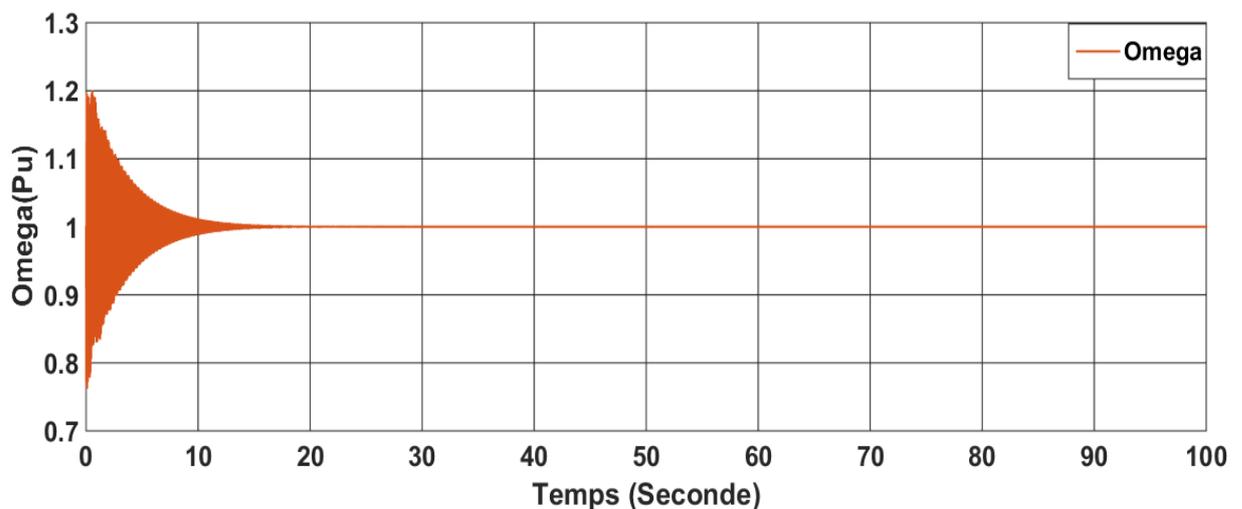


Figure (III.10) : la vitesse angulaire du rotor

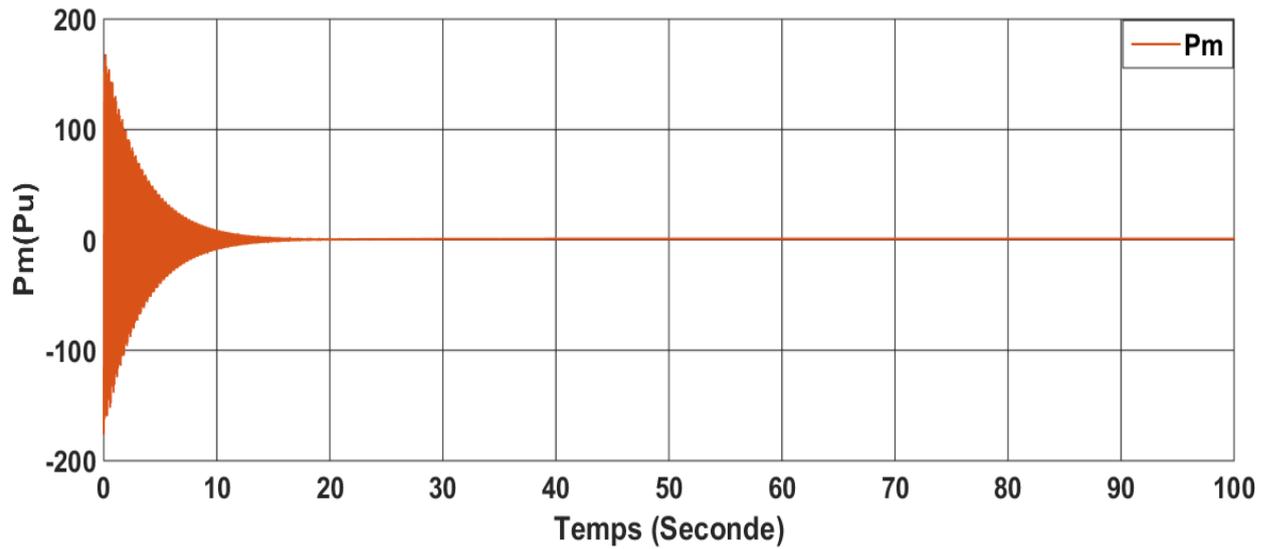


Figure (III.11) : la puissance mécanique de la turbine

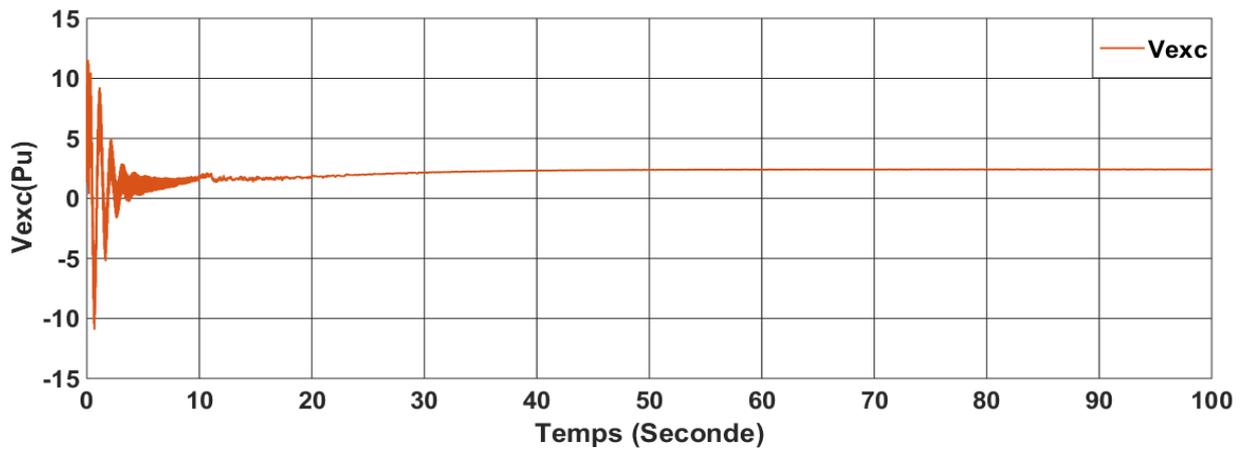


Figure (III.12): la tension d'excitation

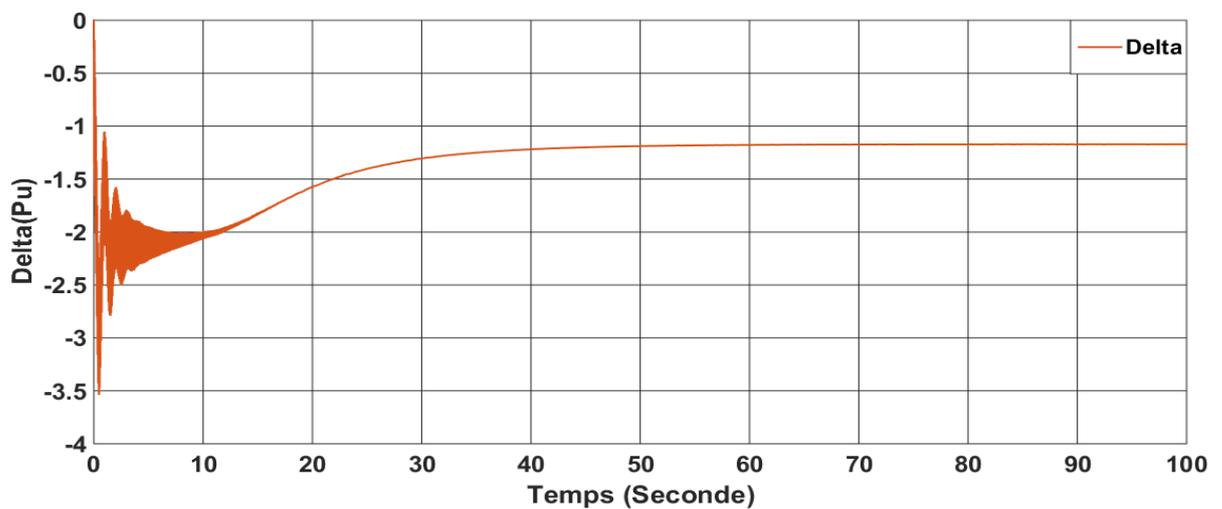


Figure (III.13): l'angle interne Delta

III.1.3. Interprétation des résultats :

Dans la phase de démarrage on aperçoit une forte oscillation des courants statoriques d'après les figure (III.5) et (III.6) à cause de la grande vitesse de rotation de l'arbre de rotor figure (III.10) et aussi à cause du manque de régulation. Ensuite la courbe des courants décroît exponentiellement vers une valeur d'amplitude inférieure dans un temps approximativement court de 8s. Cependant et à ce moment les régulateurs commence à réagir puisque il y a un retour des mesures des paramètres de sorties du système tension statorique (V_d , V_q) vers l'AVR et la variation de la vitesse de l'arbre de rotor (ω) et la puissance électrique active (P_{eo}) vers le PSS comme montre la figure (III.1). Alors l'intervention de la régulation conventionnel AVR+PSS ajuste cette perturbation et augmente l'amplitude de courant exponentiellement et se rapproche du régime permanent pendant une durée de 28s. La tension d'excitation figure (III-12) et la puissance mécanique figure (III-11) augmentent proportionnellement et simultanément ce qui augmente l'amplitude des courants et stabilise l'alternateur dans le régime permanent pour un temps maximal de 20s.

Dans notre analyse des courbes, nous avons remarqué que l'ensemble des caractéristiques tracées atteint leurs valeurs nominales au même temps (54s) et avec la même forme d'oscillations. Les courbes de la puissance active et celle de couple électromagnétique ont les mêmes formes. Bien que l'ensemble des courbes tracé présentent les mêmes perturbations de démarrage, le régime permanent établi reflète bien les amplitudes de notre machine, les courants de phase et le couple électromagnétique se stabilisent aux valeurs :

$$\mathbf{I}_{ABC} = 9204,13 \text{ (A)}, \mathbf{CEM} = 560509,6 \text{ (Nm)}, \mathbf{P} = 176 \text{ (MW)}$$

Plus du temps, nous avons fait une comparaison au niveau de l'amplitude entre les trois étapes du signal de courant obtenu (démarrage, la décroissance de la courbe et le régime permanent), cette opération nous a donné :

- Taux de décroissance = $\mathbf{I}_{\text{Démarrage}} / \mathbf{I}_{\text{Transitoire}} = 7.25/0.2 = 36,25 = 3625\%$.
- Taux de croissance = $\mathbf{I}_{\text{Transitoire}} / \mathbf{I}_{\text{Permanent}} = 0.2/1 = 0,2 = 20\%$.

D'après ces résultats nous avons constaté que la décroissance est très importante ce qui demande plus de temps à la régulation conventionnel AVR+PSS pour rétablir le régime permanent. Enfin les graphes que nous avons obtenus dans cet essai présentent un bon indice de fonctionnement de l'alternateur et que les régulateurs utilisés réagissent aux normes exigés.

III.1.4. Simulation AVR+PSS en cas de défaut (court-circuit triphasé fugitif) :

A partir de $t = 50s$ dans le régime permanent, on applique un défaut dans le réseau pour voir la réaction des régulateurs conventionnels (AVR+PSS) face à un défaut fugitif. Dans cette étude, on considère, par exemple, un court-circuit triphasé provisoire qui dure 0.1s (durée nécessaire pour la commutation du disjoncteur de protection). Nous avons simulé notre système d'étude sous différents

régimes de fonctionnements perturbés (défaut, et le régime permanent), le temps de la simulation est 100 secondes, les résultats obtenus en (Pu) sont :

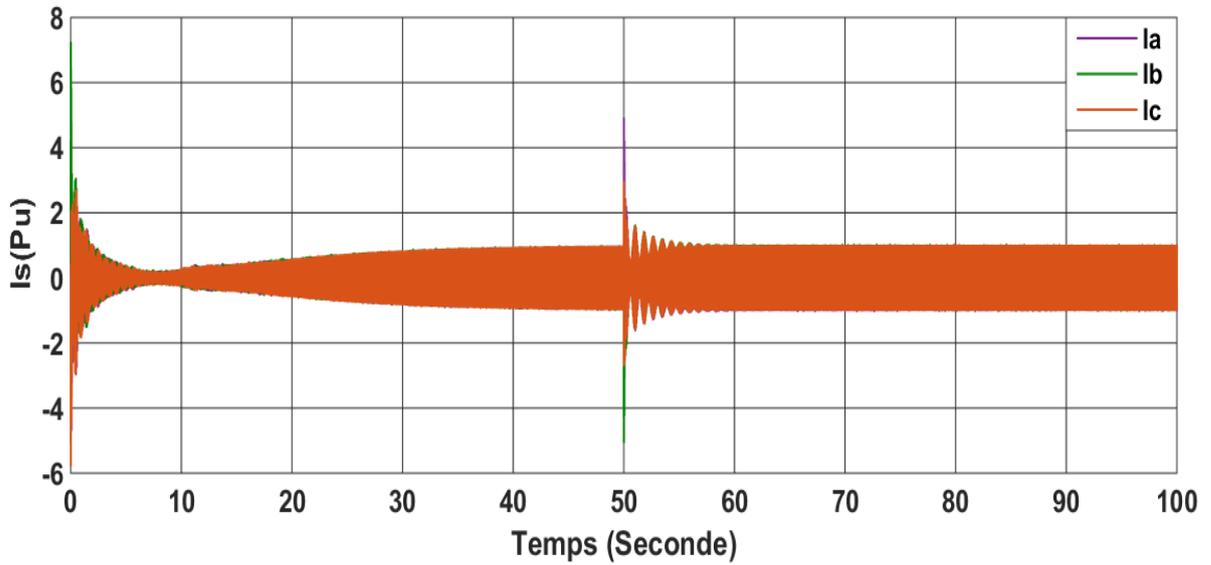


Figure (III.14): les courants statoriques

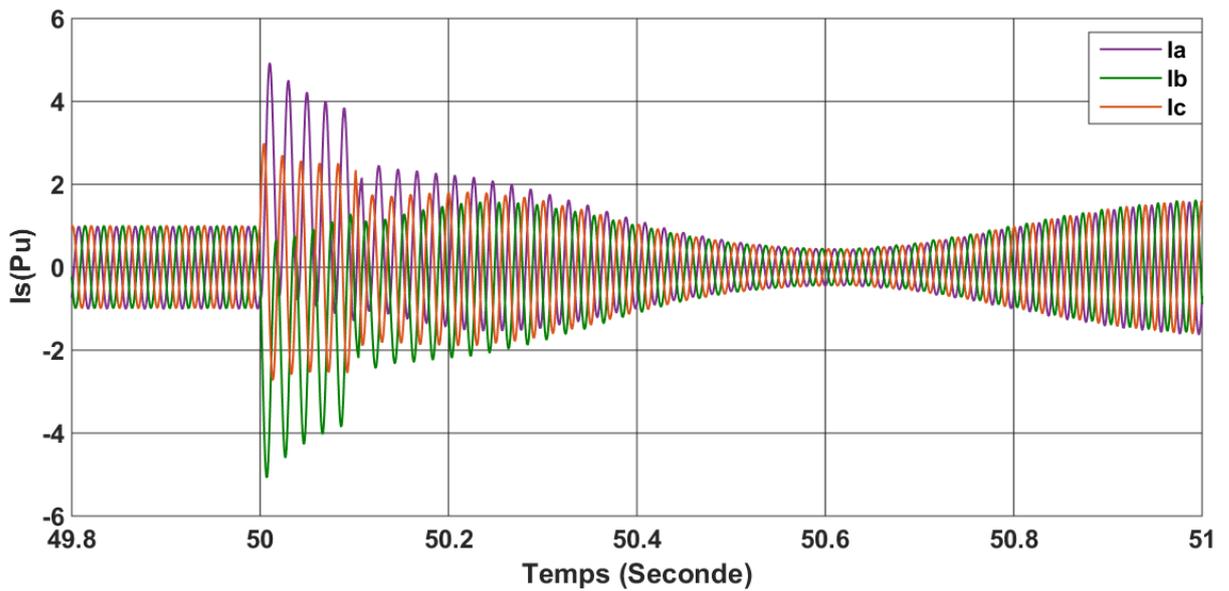


Figure (III.15): Zoom des courants statoriques au point de défaut

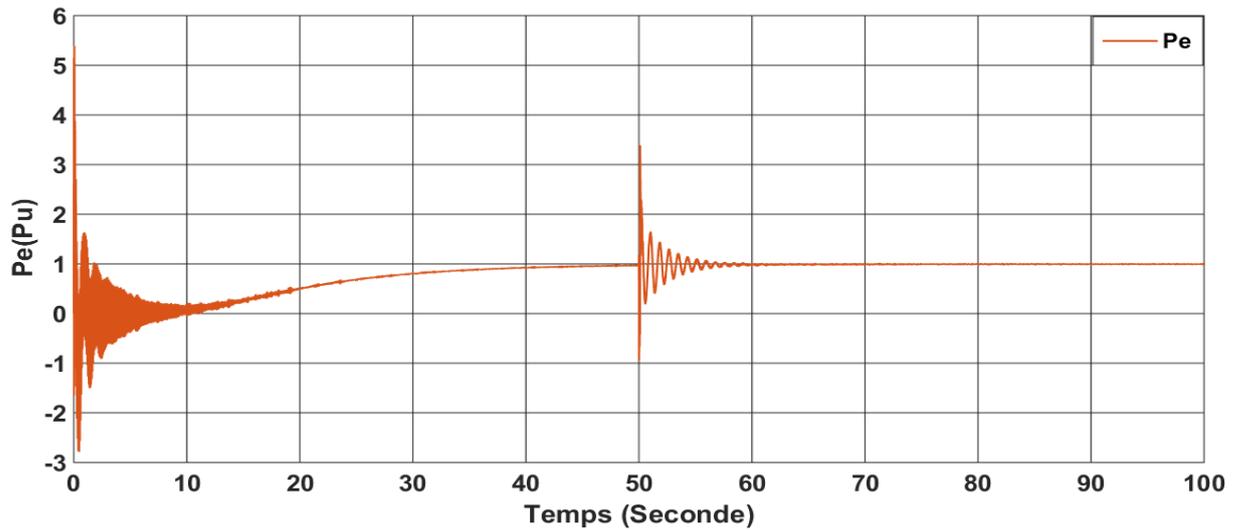


Figure (III.16) : la puissance électrique active

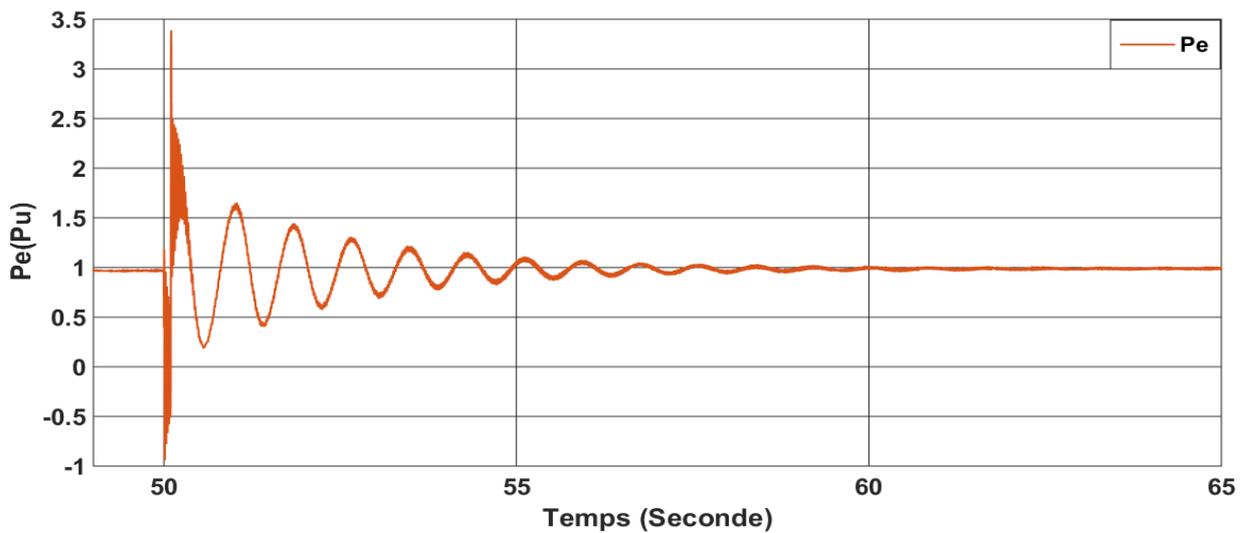


Figure (III.16.a) : Zoom de la puissance électrique active au point de défaut

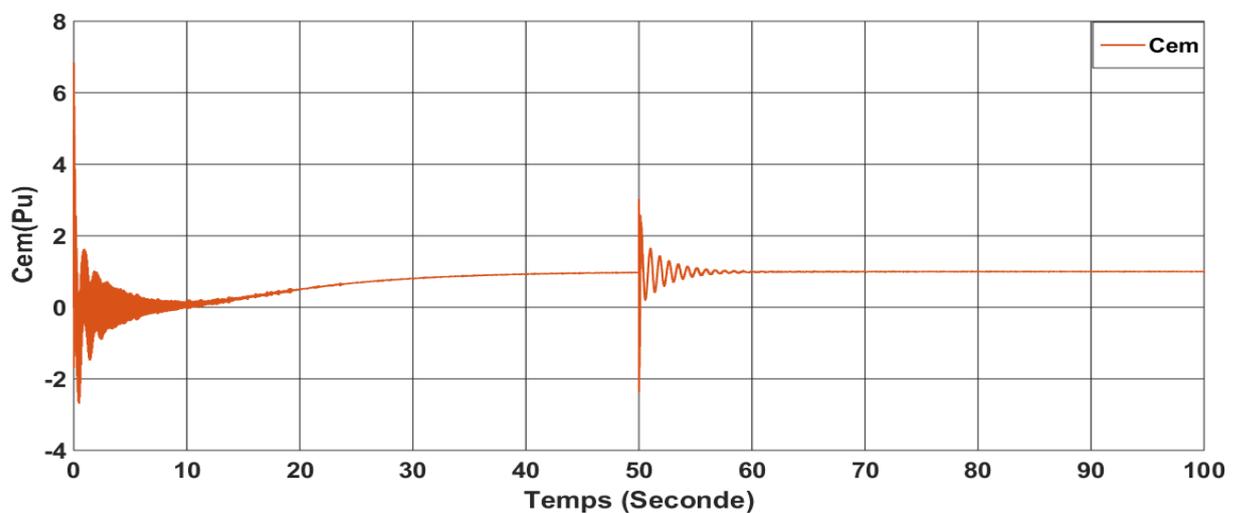


Figure (III.17): Le couple électromagnétique

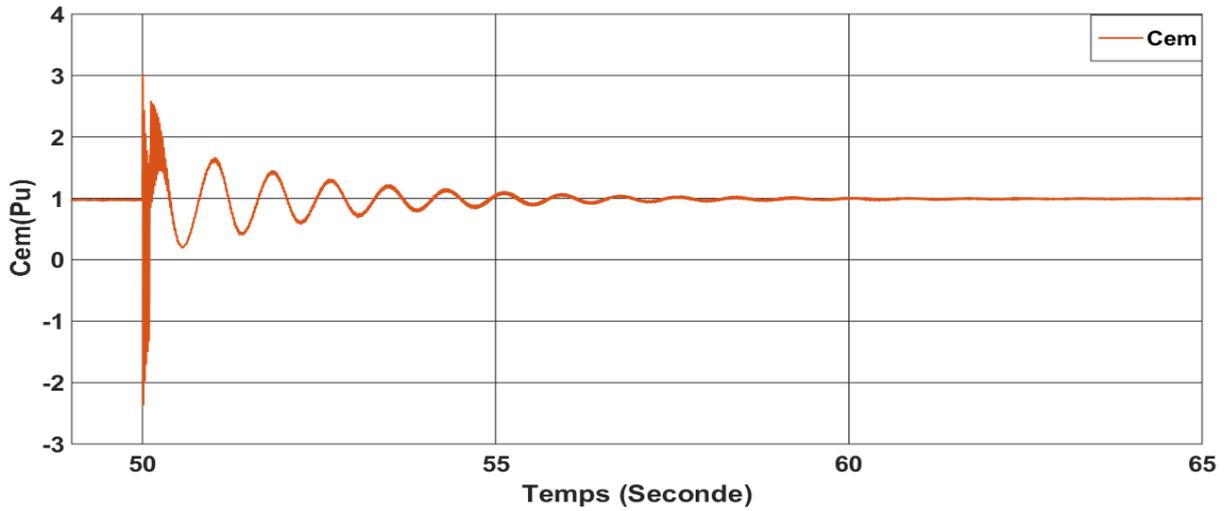


Figure (III.17.a): Zoom du couple électromagnétique au point de défaut

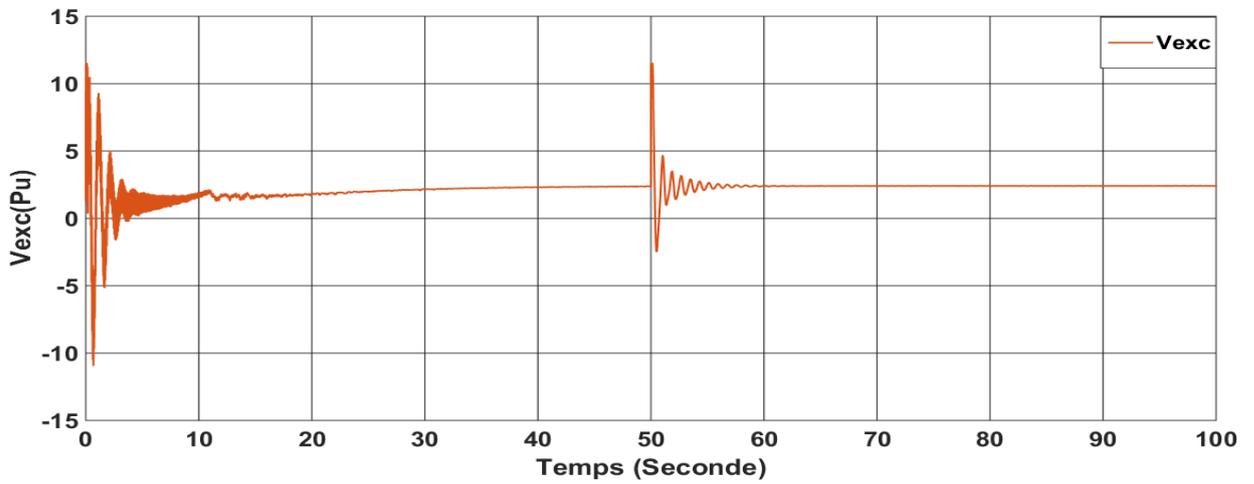


Figure (III.18): La tension d'excitation

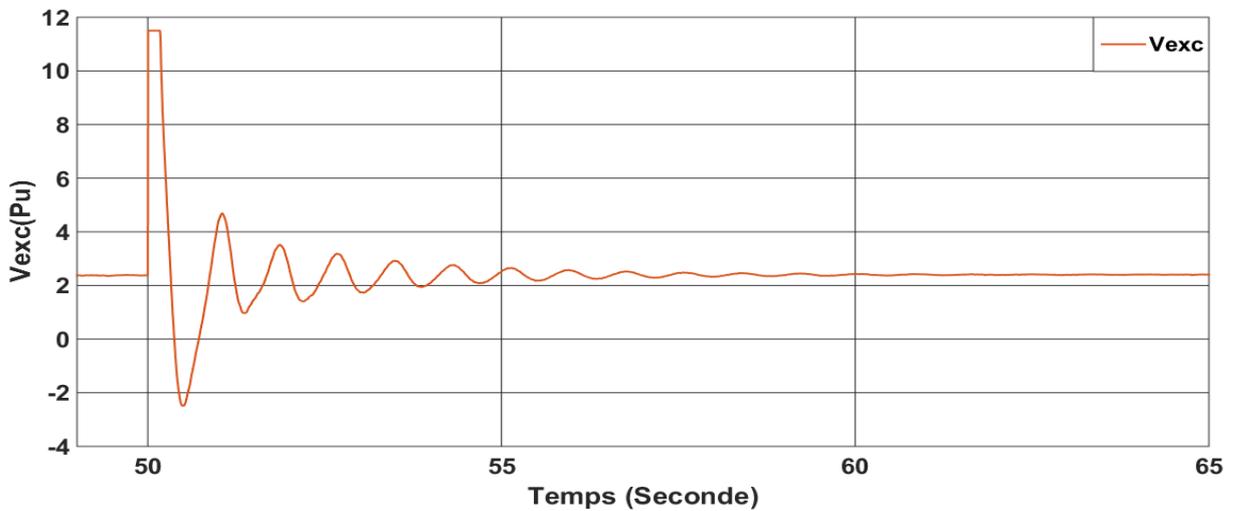


Figure (III.18.a): Zoom de La tension d'excitation au point de défaut

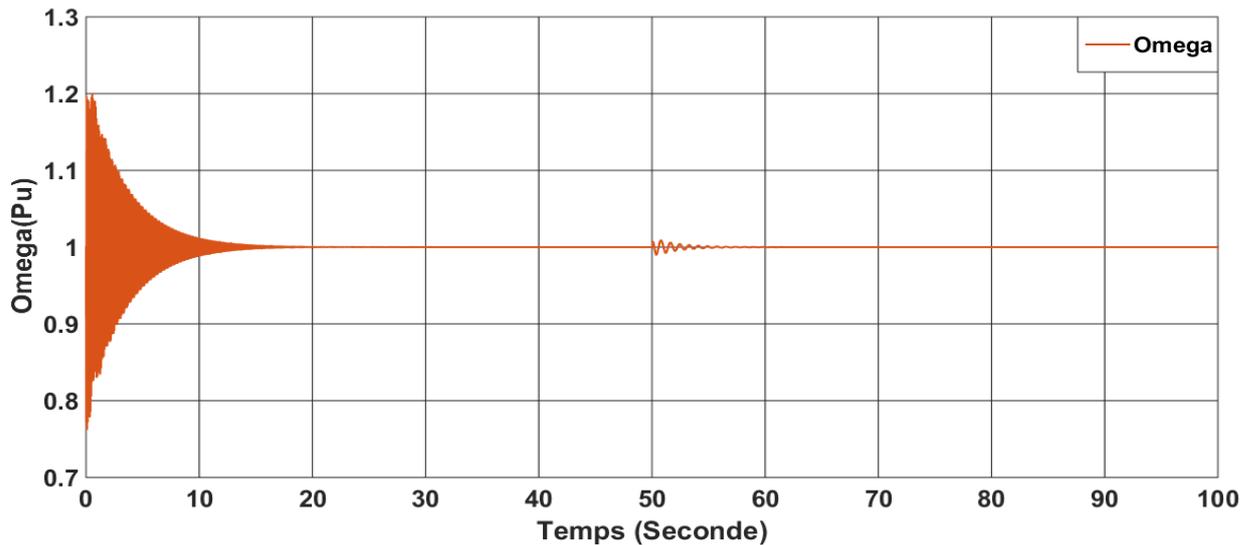


Figure (III.19): la vitesse angulaire du rotor

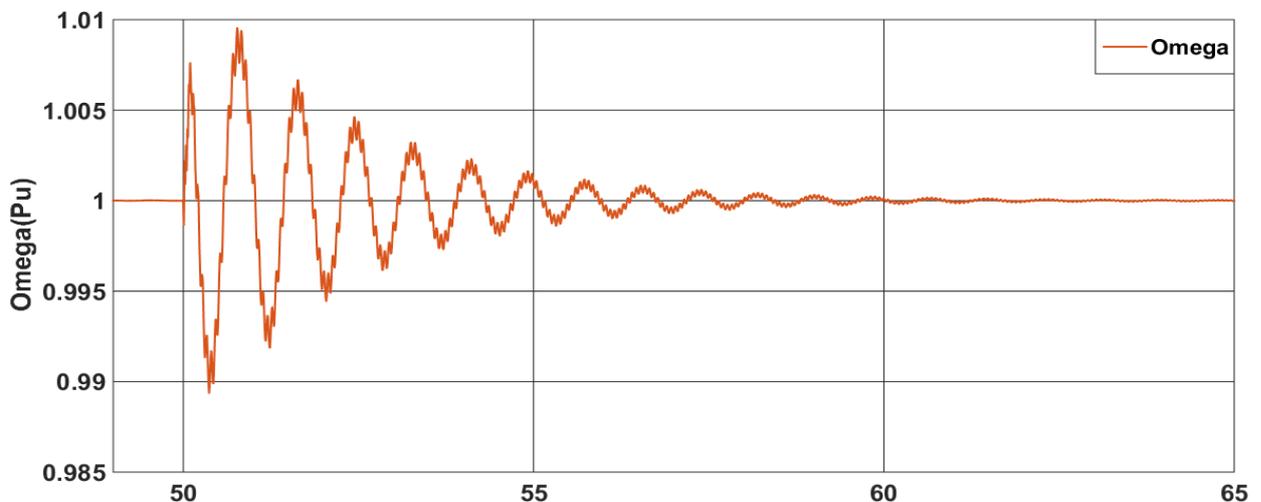


Figure (III.19.a): Zoom de la vitesse angulaire du rotor au point de défaut

III.1.5. Interprétation des résultats :

On a déjà discuté dans l'interprétation précédente des résultats du passage de l'état de démarrage à l'état de fonctionnement permanent. Cependant, nous avons réalisé un court-circuit triphasé à la terre de courte durée ($t = 0.1$ seconds) à l'instant $t = 50$ seconds pendant le fonctionnement normal de la machine pour voir le comportement de l'alternateur contre cette perturbation. On remarque d'après la figure (III.15) une grande oscillation dans la courbe des courants grâce au courant de court-circuit à l'instant de défaut, ces oscillations selon la figure (III.14) dure pendant 12 secondes et diminue d'amplitude rapidement à cause de l'intervention du régulateur (AVR+PSS). En plus, nous avons fait une comparaison au niveau de l'amplitude entre

deux étapes du signal de courant obtenu (l'instant de défaut, stabilisation de courant), cette opération nous a donné :

$$\text{Taux de croissance} = \mathbf{I}_{\text{défaut}} / \mathbf{I}_{\text{Permanant}} = 4.9 / 1 = 4,9 = 490 \%$$

Nous avons remarqué que la diminution après défaut est moins importante par rapport au régime de démarrage parce que la machine été en état de marche et aussi à cause de l'intervention de la régulation (AVR+PSS).

III.1.6. Comparaison entre AVR conventionnelle et AVR+PSS conventionnelle :

Dans cette partie de notre travail, nous allons analyser la différence entre les deux régulateurs AVR sans PSS [13] et AVR avec PSS pour voir l'impact de la PSS dans la stabilité du système.

Nous allons comparer la tension d'excitation, les courants statoriques et la puissance électrique active pour les deux régulateurs.

III.1.6.1. Comparaison des tensions d'excitation :

Cette fois nous allons analyser la tension d'excitation entre les deux régulateurs :

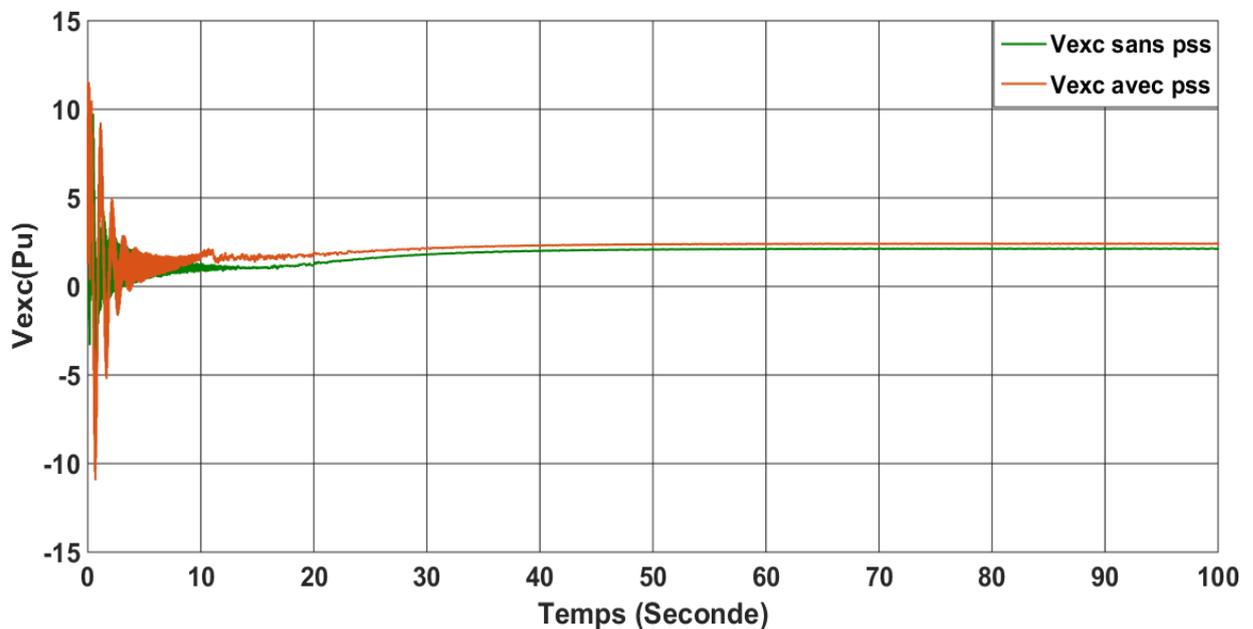


Figure (III.20): la tension d'excitation pour les deux régulateurs [13]

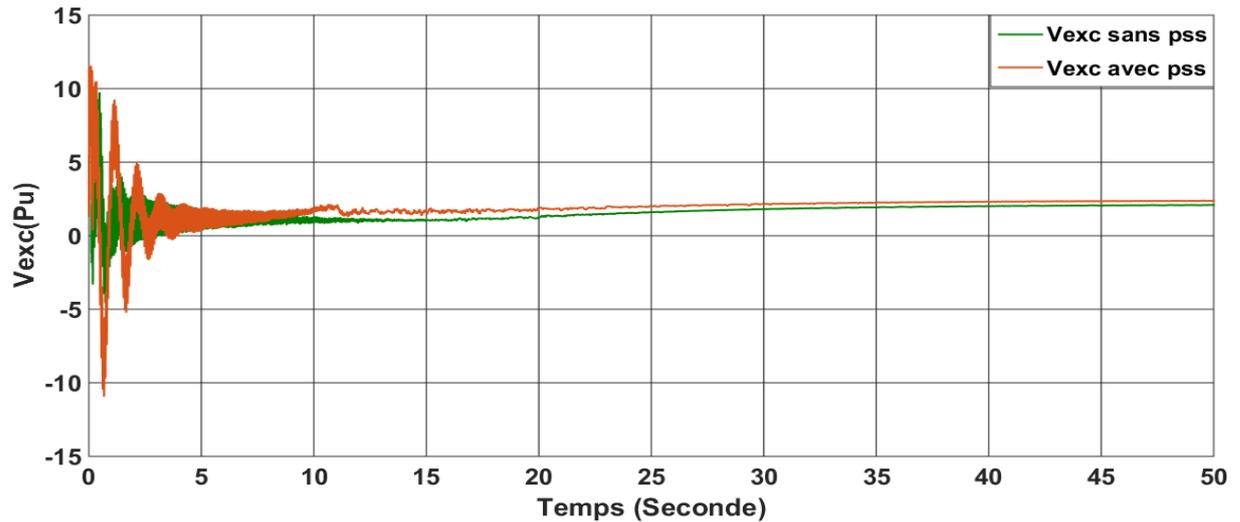


Figure (III.21): Zoom la tension d'excitation pour les deux régulateurs [13]

On remarque bien la différence entre les deux tensions dans la phase de démarrage en termes de rapidité et stabilité dans la figure (III.20) et la figure (III.21). On remarque que la tension d'excitation qui utilise un régulateur conventionnelle **AVR+PSS** augmente exponentiellement et rapidement vers sa valeur nominale pendant une période de 30 secondes, contrairement la tension d'excitation avec une régulateur conventionnelle **AVR** subit beaucoup de perturbations et augmente a des valeurs supérieures. Ensuite la tension commence à se stabilisé pendant une période de 50secondes pour arriver à sa valeur nominale

En déduit que la régulation conventionnelle **AVR+PSS** est plus rapide que la régulation conventionnelle **AVR**.

III.1.6.2. Comparaison des courants statoriques :

Nous allons analyser le courant statorique I_a (une seule phase) entre les deux régulateurs :

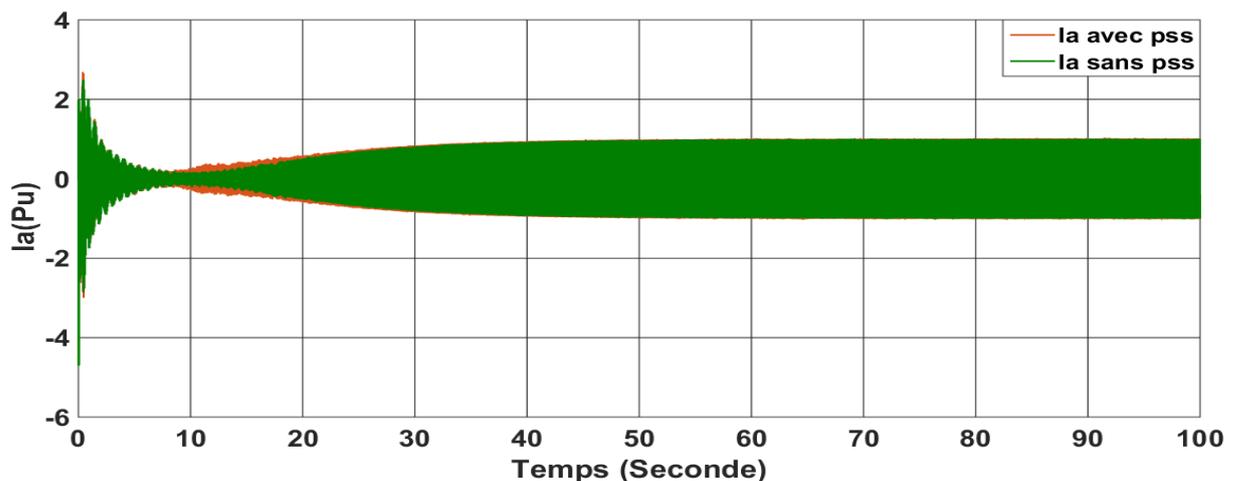


Figure (III.22): le courant statorique I_a pour les deux régulateurs [13]

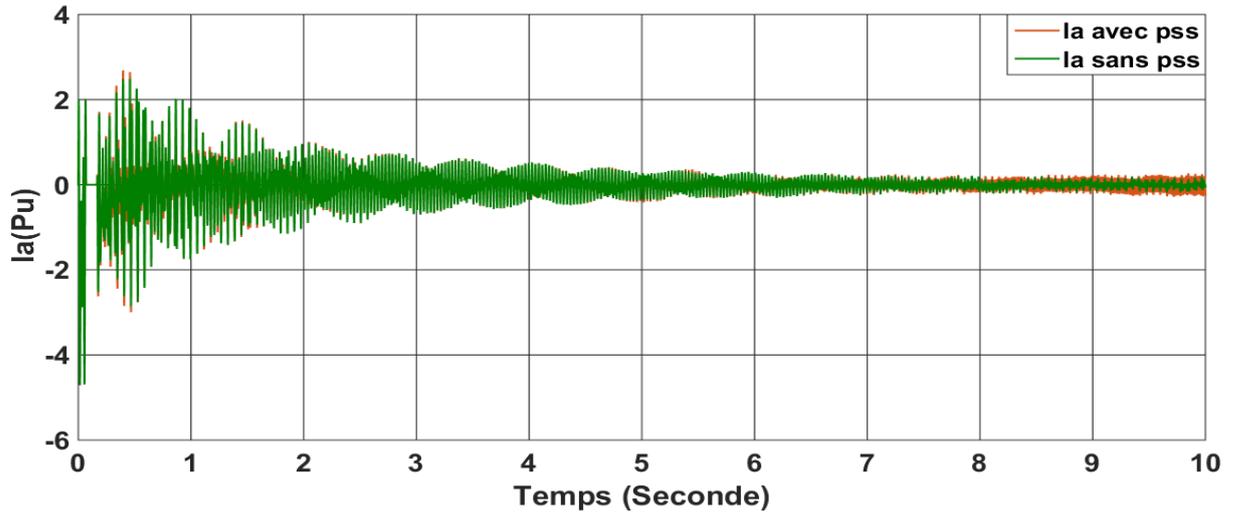


Figure (III.23): Zoom du courant statorique I_a pour les deux régulateurs en régime transitoire [13]

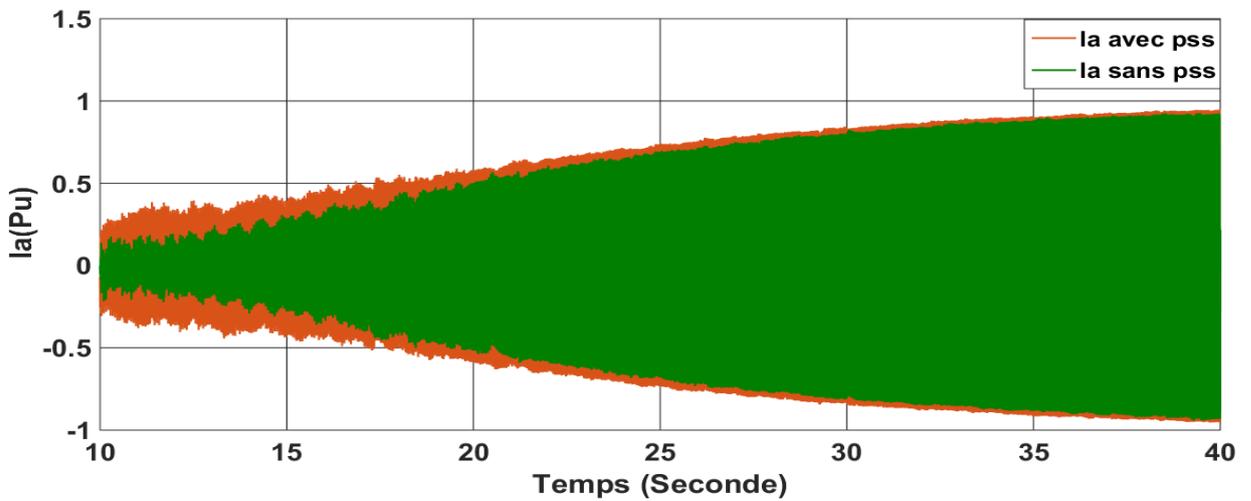


Figure (III.24): Zoom du courant statorique I_a pour les deux régulateurs en régime transitoire [13]

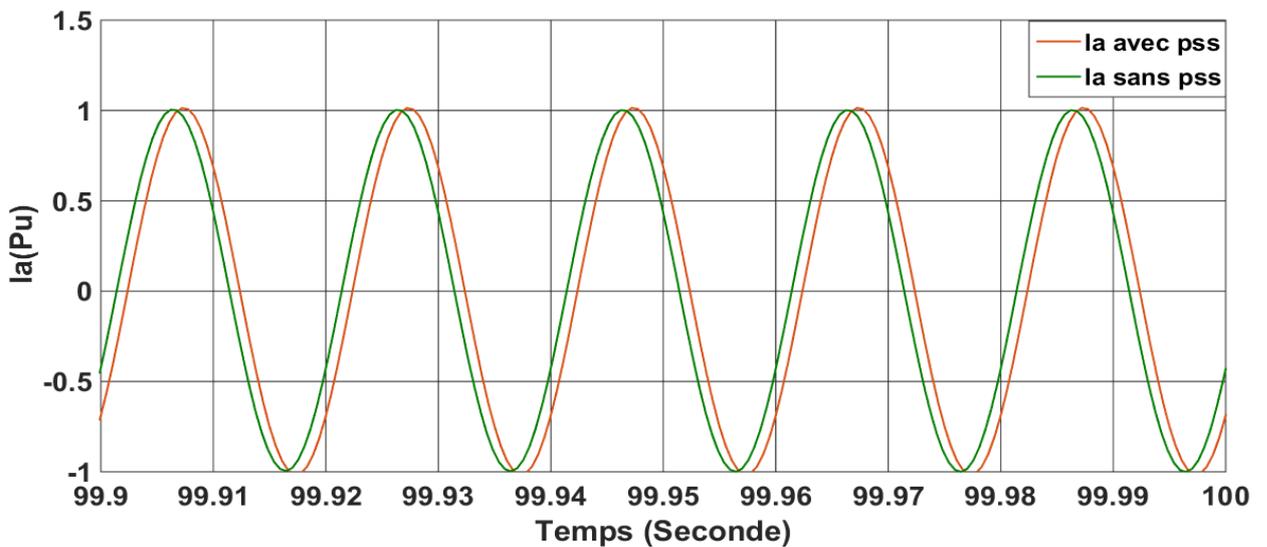


Figure (III.25): le courant statorique I_a pour les deux régulateurs en régime permanent [13]

D'après les figures (III.22), (III.23) et (III.24) et les calculs que nous avons fait avant sur les taux de croissance de décroissance des courants statoriques, on remarque une grande différence entre les deux:

✓ Taux de décroissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR**

Taux = $I_{\text{Démarrage}} / I_{\text{Transitoire}} = 3815,79\%$ [13]

✓ Taux de décroissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR+PSS**

Taux = $I_{\text{Démarrage}} / I_{\text{Transitoire}} = 3625\%$

En déduit que l'excitation avec le régulateur conventionnelle **AVR+PSS** minimise l'amplitude de décroissance exponentielle d'une façon plus performante que le régulateur conventionnelle **AVR**.

On a calculé le temps de décroissance des deux courant et on a trouvé que :

- Temps de décroissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR**.
- Taux = 10 secondes [13]
- Temps de décroissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR+PSS**.
- Taux = 8 secondes

En déduit que l'excitation avec le régulateur conventionnelle **AVR+PSS** minimise non seulement l'amplitude mais aussi le temps de décroissance d'une façon plus performante que le régulateur conventionnelle **AVR**. Ces propriétés sont très importantes puisqu'elles affectent le retour vers le régime permanent.

Dans le régime transitoire toujours on remarque que le courant avec le régulateur conventionnelle **AVR+PSS** maintien une valeur supérieur que celle avec un régulateur conventionnelle **AVR**. Cette propriété aide à accélérer le passage vers la stabilité de fonctionnement de l'alternateur. On a calculé aussi le taux de croissance du régime transitoire au régime permanent ainsi le temps nécessaire pour l'opération, on a trouvé :

- Taux de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR** = 19% [13]
- Temps de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR** = 50 secondes [13]
- Taux de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR+PSS** = 20 %
- Temps de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR+PSS** = 54 secondes

On remarque une grande différence entre l'amplitude et le temps de croissance des courants statoriques du régime transitoire vers le régime permanent de fonctionnement de l'alternateur. On

déduit par cela que le régulateur conventionnel **AVR+PSS** est plus performant que le régulateur conventionnel **AVR**.

Dans le régime permanent dans la figure (III.25) les courants pour les deux régulateurs sont identiques.

III.1.6.3. Comparaison de la puissance active :

D'après la figure (III.26) on remarque bien qu'il n'y a aucune différence entre les deux régulateurs pour la puissance active dans l'état de fonctionnement normal.

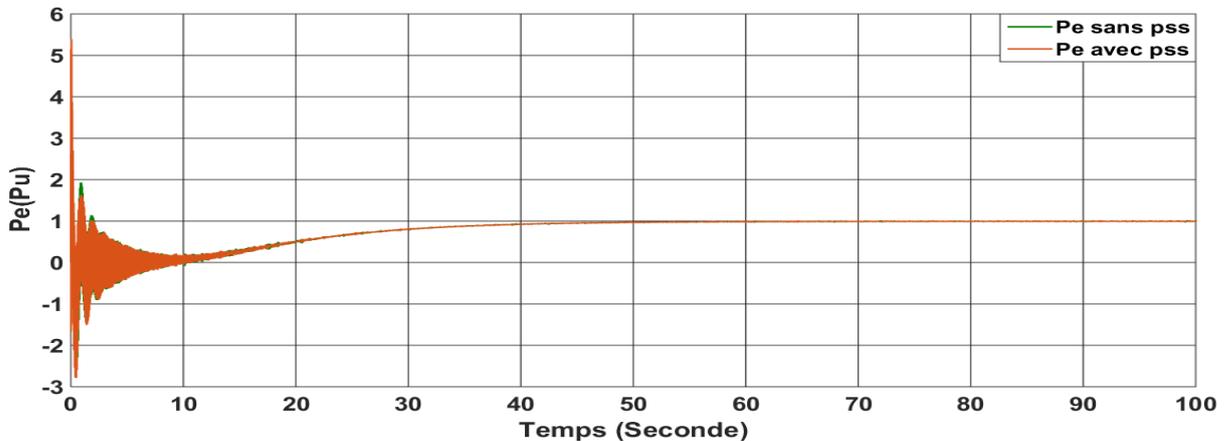


Figure (III.26): la puissance électrique active pour les deux régulateurs [13]

III.1.7. Comparaison entre AVR conventionnelle et AVR+PSS conventionnelle en cas de défaut (court-circuit triphasé fugitif) :

Dans cette partie de notre travail, nous allons analyser la différence entre les deux régulateurs **AVR avec PSS** et **AVR sans PSS** pour voir la réaction du PSS dans la stabilité du système en cas de perturbation (défaut fugitif).

Nous allons comparer la tension d'excitation, les courants statoriques et la puissance électrique active pour les deux régulateurs.[13]

III.1.7.1. Comparaison des tensions d'excitation :

Cette fois nous allons analyser les tensions d'excitation entre les deux régulateurs :

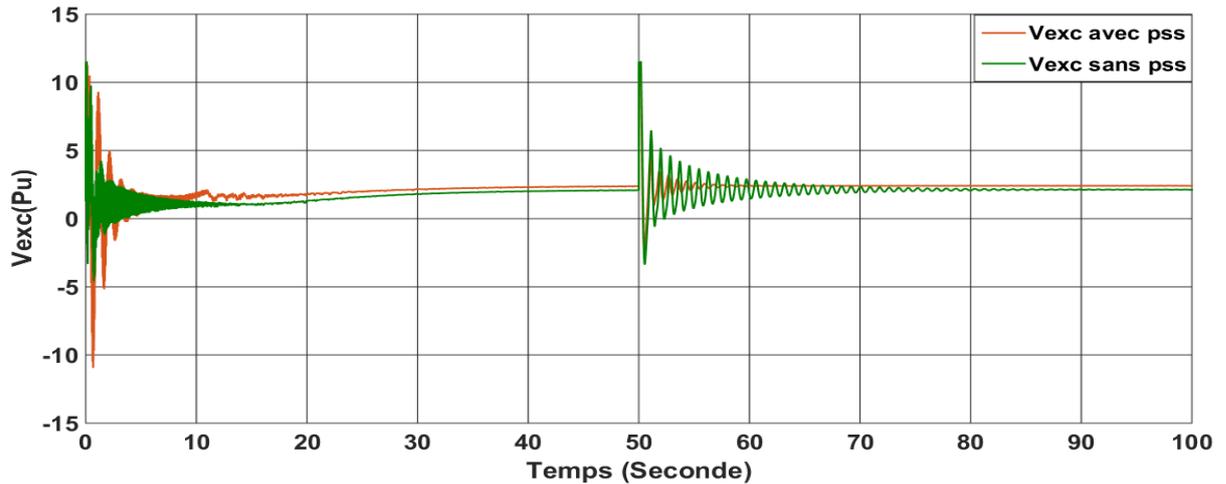


Figure (III.27): la tension d'excitation pour les deux régulateurs [13]

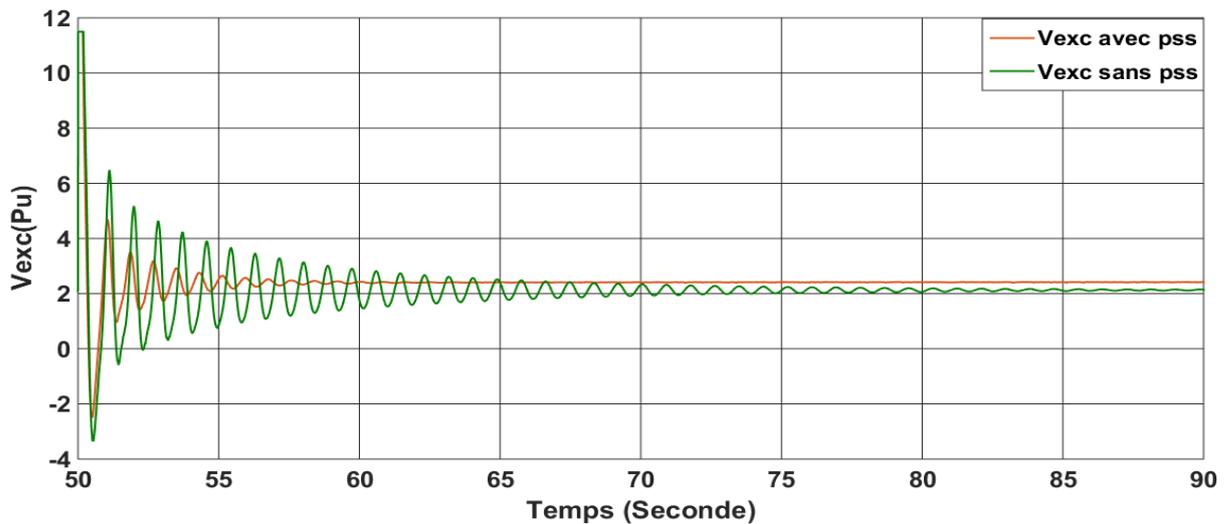


Figure (III.28): Zoom de la tension d'excitation pour les deux régulateurs au point de défaut [13]

Il existe une grande différence entre les deux réponses à l'instant de défaut, comme il est indiqué dans la figure (III.27), la tension d'excitation du régulateur conventionnelle **AVR** subit une grande perturbation et met une certaine période (40s) pour être stabilisé contrairement au régulateur conventionnelle **AVR+PSS** dans la figure (III.28) qui subit une perturbation beaucoup moins importante que le régulateur conventionnel **AVR** avec une durée de 10s, d'après ces résultats nous remarquons la différence de rapidité entre les deux régulateurs.

III.1.7.2. Comparaison des courants statoriques :

Nous allons analyser le courant statorique I_a (une seule phase) entre les deux régulateurs :

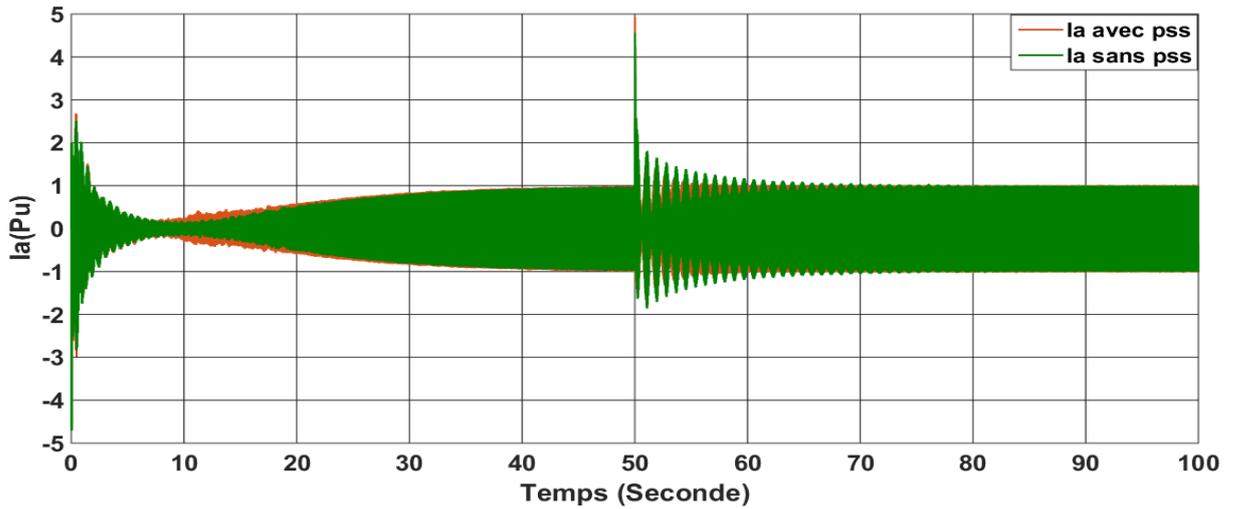


Figure (III.29): le courant statorique I_a pour les deux régulateurs [13]

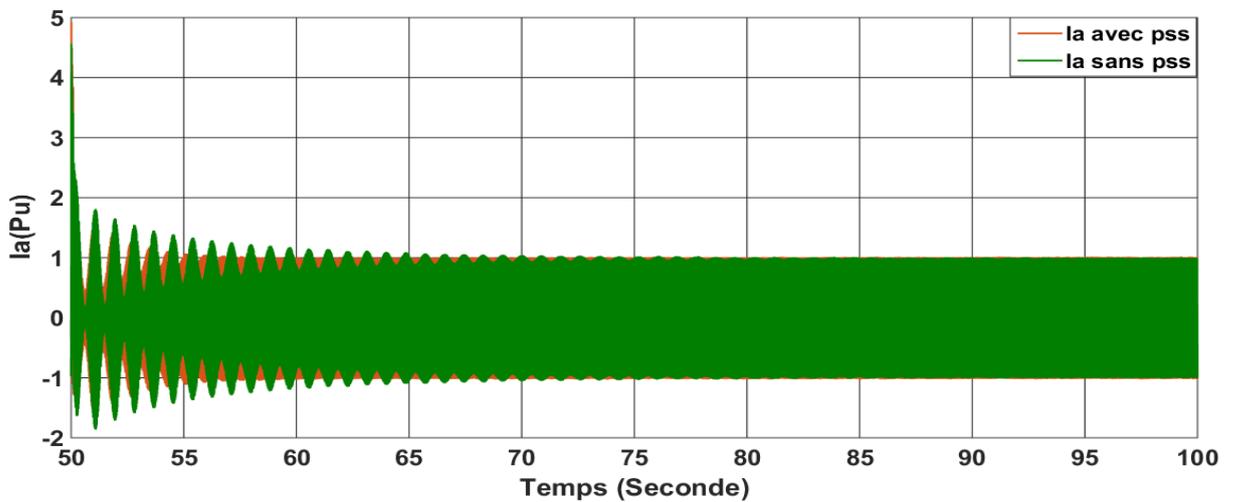


Figure (III.30): Zoom du courant statorique pour les deux régulateurs au point de défaut [13]

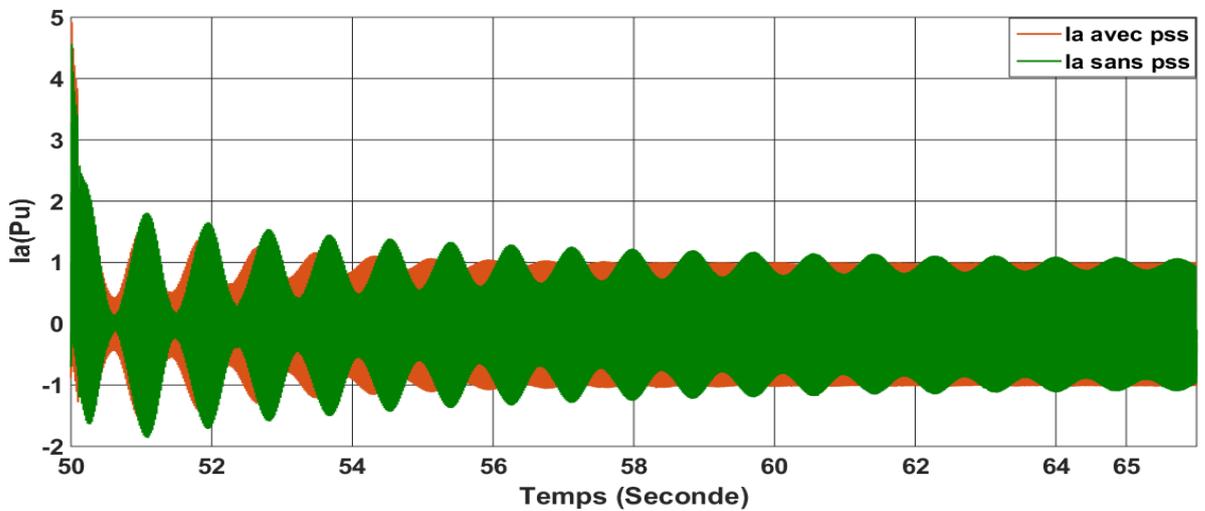


Figure (III.31): Zoom du courant statorique pour les deux régulateurs au point de défaut [13]

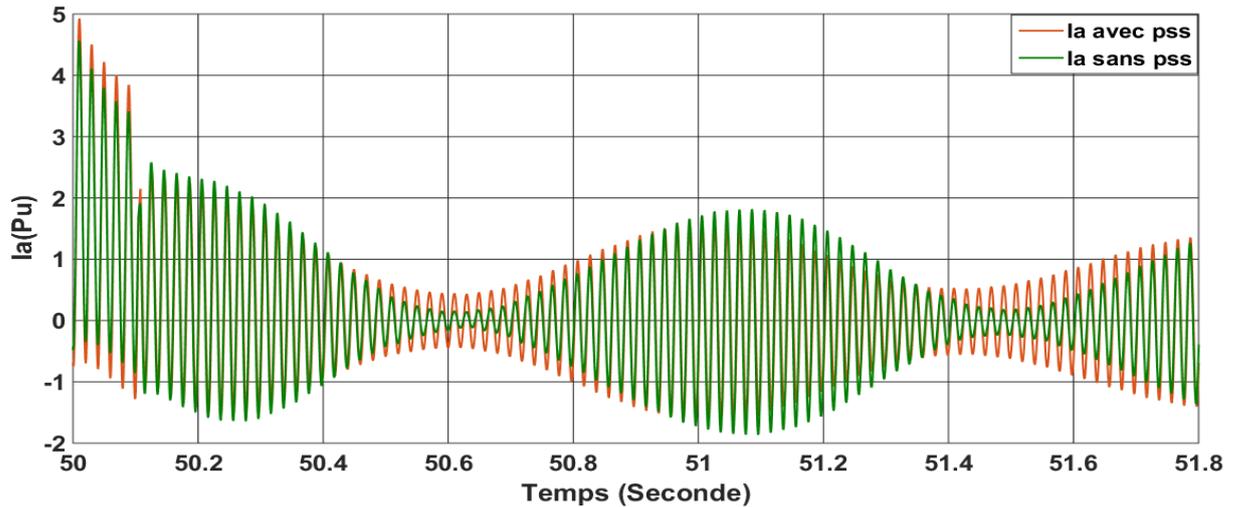


Figure (III.32): Zoom du courant statorique pour les deux régulateurs au point de défaut [13]

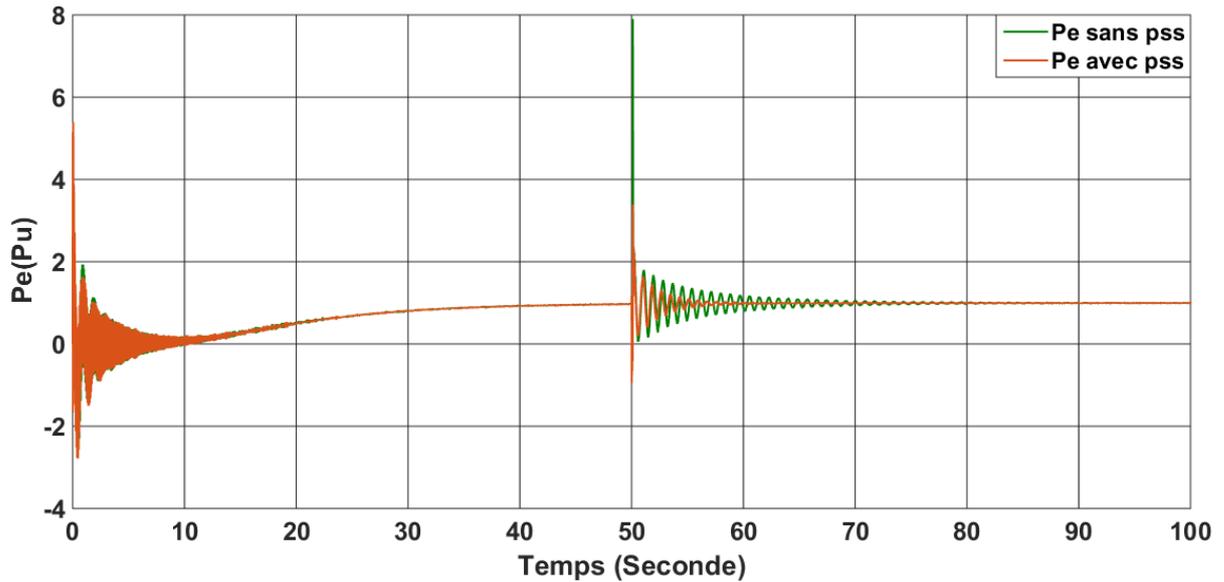
Lorsqu'on applique un court-circuit fugitif à l'instant ($t=50$ seconds) pendant une court durée ($t = 0,1$ seconds) on remarque une différence entre la réaction des deux régulateurs dans les figures (III.30) (III.31)(III.32), nous avons calculé l'amplitude de courant de court-circuit, ainsi le temps de stabilisation des courants après l'élimination de défaut, on a trouvé :

- Taux de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnel **AVR**= 456 % [13]
- Temps de stabilisation des courants statoriques pour le régulateur conventionnel **AVR** = 25secondes. [13]
- Taux de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnelle **AVR+PSS** = 490 %
- Temps de stabilisation des courants statoriques pour le régulateur conventionnelle **AVR+PSS**= 12 secondes

L'amplitude du courant de court-circuit avec le régulateur conventionnelle **AVR+PSS** est supérieure au celle avec le régulateur conventionnelle **AVR**, mais le temps de stabilisation après le défaut est beaucoup mieux pour le régulateur conventionnelle **AVR+PSS**.

III.1.7.3. Comparaison de la puissance active :

Cette fois nous allons analyser la puissance active entre les deux régulateurs :



Figure(III.33): la puissance électrique active pour les deux régulateurs [13]

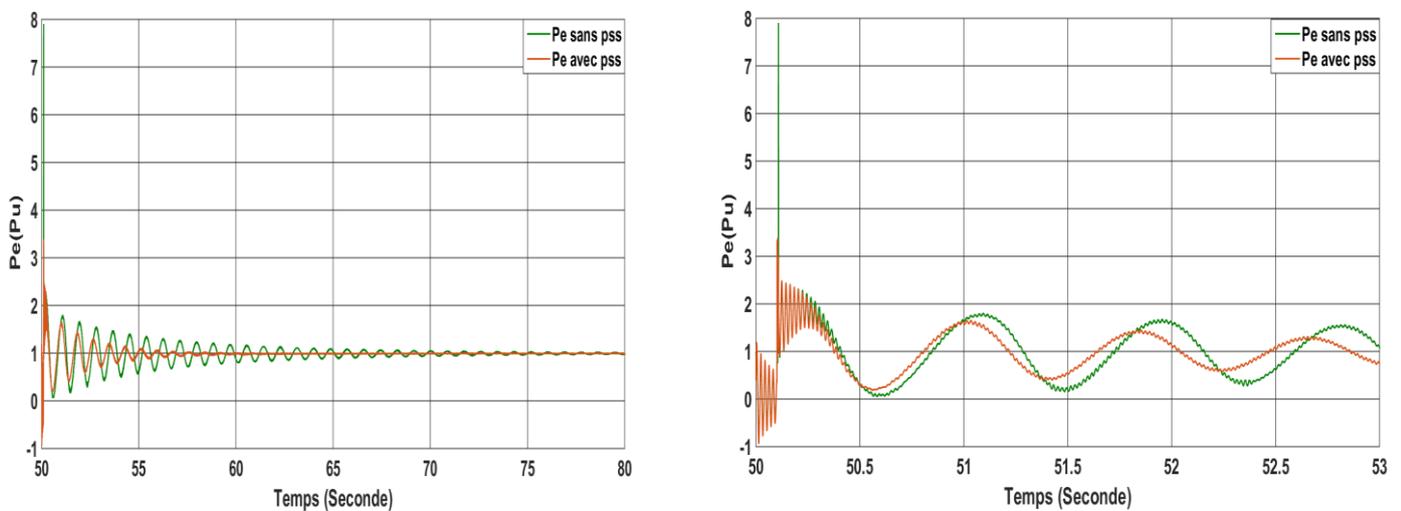


Figure (III.34): Zoom du puissance électrique active pour les deux régulateurs au point de défaut [13]

D'après la figure (III.33) on remarque bien qu'il existe une grande différence entre les deux réponses à l'instant de défaut, la puissance électrique active de la régulation conventionnelle **AVR** subit une grande perturbation et met une certaine période (35s) pour être stabilisé contrairement au régulateur conventionnelle **AVR+PSS** qui subit une légère perturbation pendant une période de 10s, d'après ces résultats nous remarquons la différence de rapidité entre les des régulateurs.

En déduit que le régulateur conventionnel **AVR+PSS** est plus rapide et performant pour la stabilisation des courants après un défaut fugitif. La rapidité de régulation des courants après le défaut fugitif affecte tous les grandeurs de l'alternateur.

III.2. Simulation de régulation d'excitation AVR+PSS neuronal :

III.2.1. Modèle de simulation :

Le modèle global de notre simulation, sous Matlab-Simulink, est constitué d'une machine synchrone (alternateur), d'une turbine à vapeur et d'une excitation conventionnel à courant continue pour le rotor, un stabilisateur de puissance neuronal, un disjoncteur et une transformateur élévateur, une source de tension pour modélisé le réseau et des charge en parallèle. Les paramètres réels des équipements sont indiqués en annexe.

Le travail consiste à comparer la stabilité du système (MS-RI) on utilisant un système de commande avec PSS conventionnel et autre système de commande avec PSS neuronal. On tient à préciser que pour cette étude concernant les PSS neuronal, on a utilisé des modèles *Simulink*, le choix de ces derniers dépend de nos compétences.

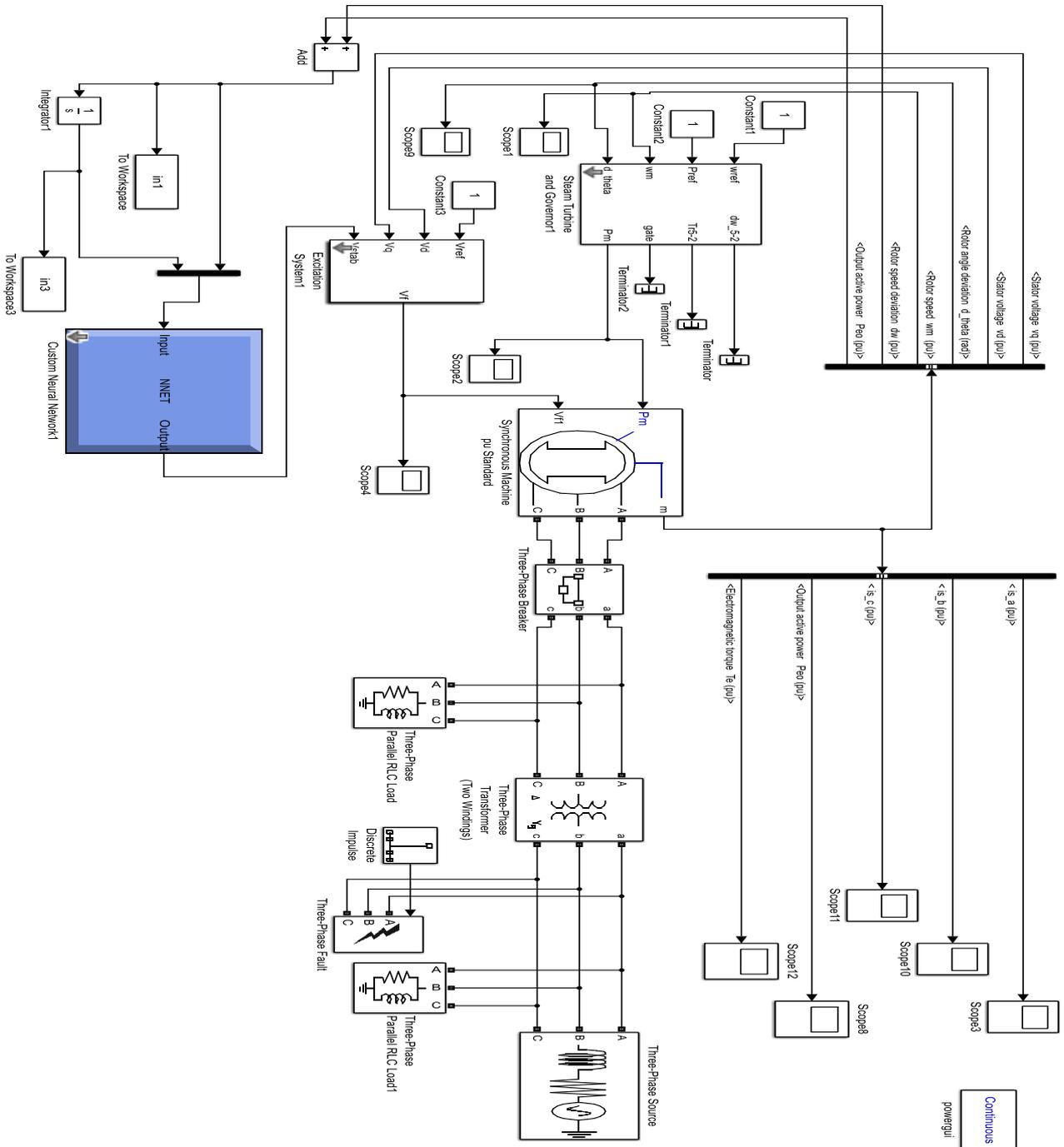


Figure (III.35) : modèle globale de simulation

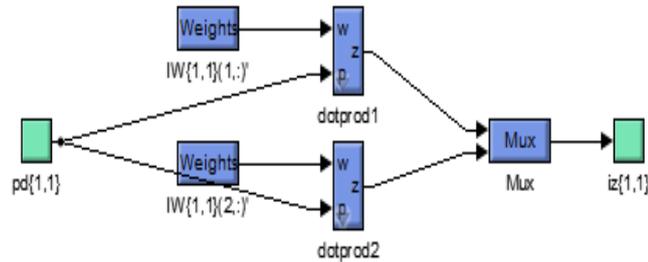


Figure (III.36): bloc du PSS neuronal

III.2.2. Simulation en fonctionnement normal :

Après l'introduction des paramètres de notre système dans le schéma pour la simulation avec un régulateur neuronal (AVR+PSS), nous avons simulé notre système d'étude sous différents régimes de fonctionnements normale (démarrage, la décroissance de la courbe et le régime permanent).

On sait théoriquement que l'intégration de l'intelligence artificielle (réseau de neurone) dans la régulation (AVR+PSS) élimine les oscillations du rotor d'une machine synchrone par le meilleur contrôle de leur excitation. Ce qui donne une parfaite résultat de stabilisation du système par rapport à la régulation classique, et pour confirmer cette hypothèse on s'intéresse sur la simulation des courbes suivants: La tension d'excitation de l'Alternateur (V_{exc}) ; les courants statoriques (I_a - I_b - I_c) ; La puissance électrique active de l'alternateur (P_e) ; L'angle interne 'Delta'; la puissance mécanique de la turbine (P_m) ; le couple électromagnétique (C_{em}) ; la vitesse angulaire du rotor (Ω).

Le temps de la simulation est 100 secondes, les résultats obtenus en (Pu) sont :

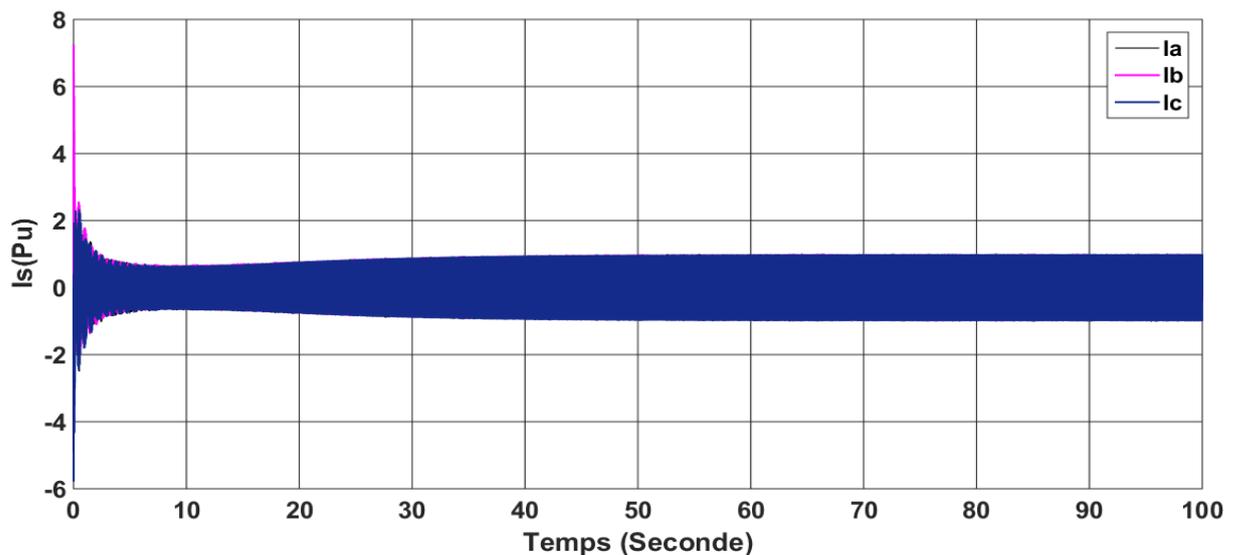


Figure (III.37) : Les courants statoriques

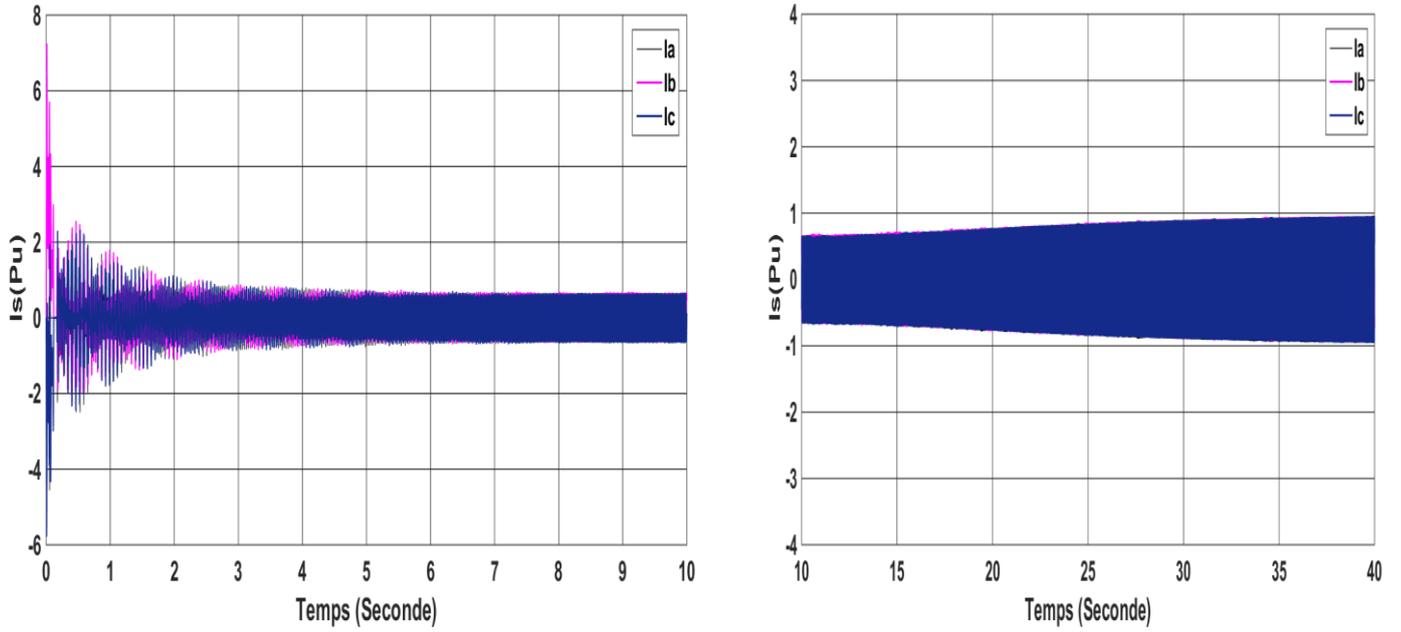


Figure (III.38) : zoom des courants statoriques en régime transitoire

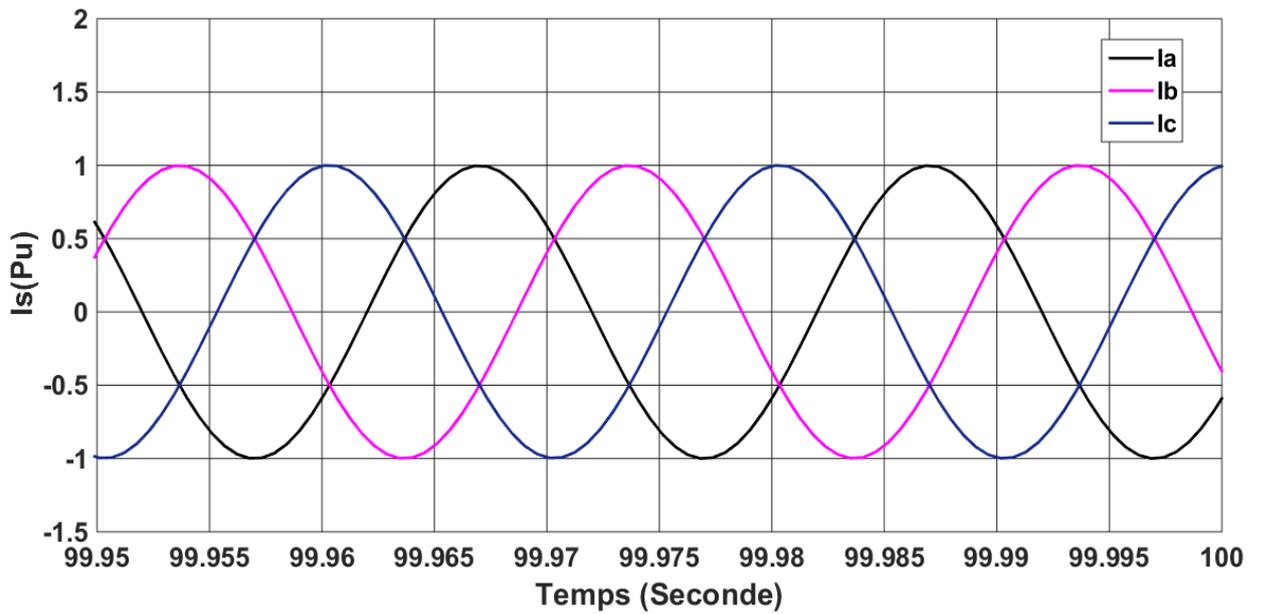


Figure (III.39): zoom des courants statoriques en régime permanent

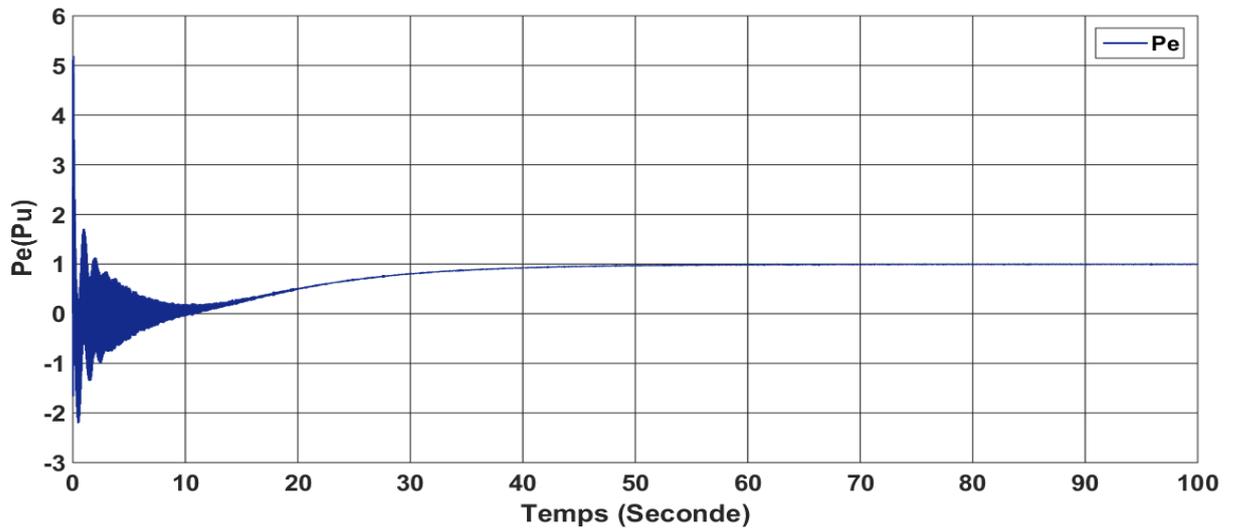


Figure (III.40) : La puissance électrique active

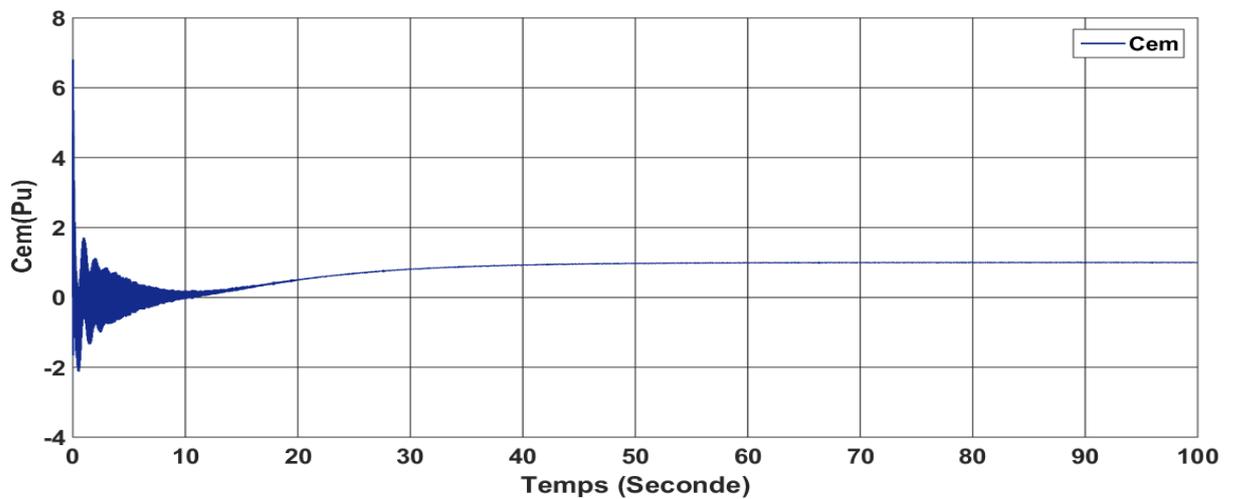


Figure (III.41) : Le couple électromagnétique

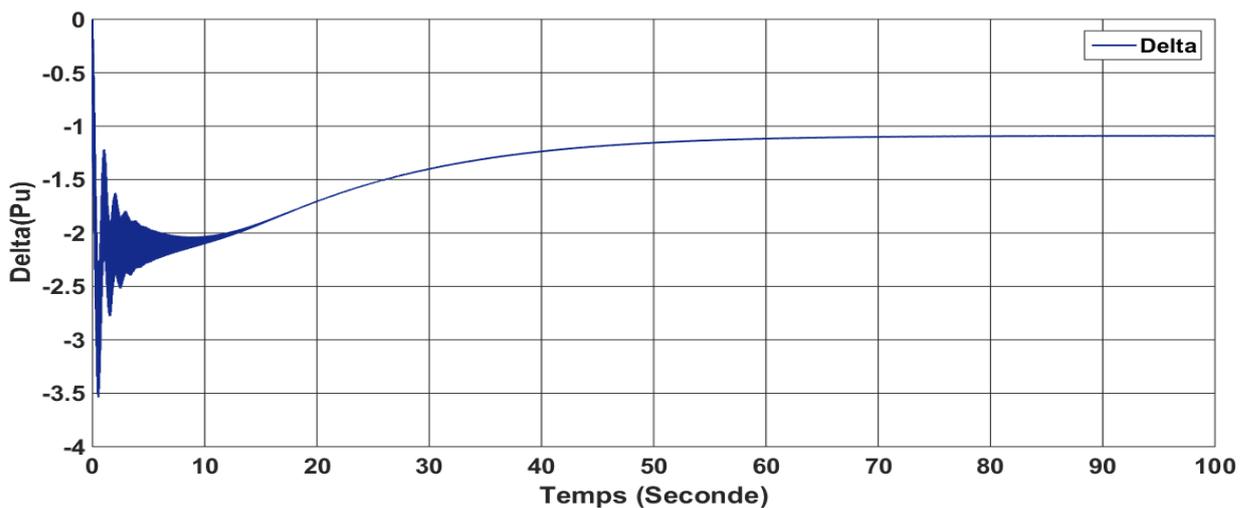


Figure (III.42) : l'angle interne Delta

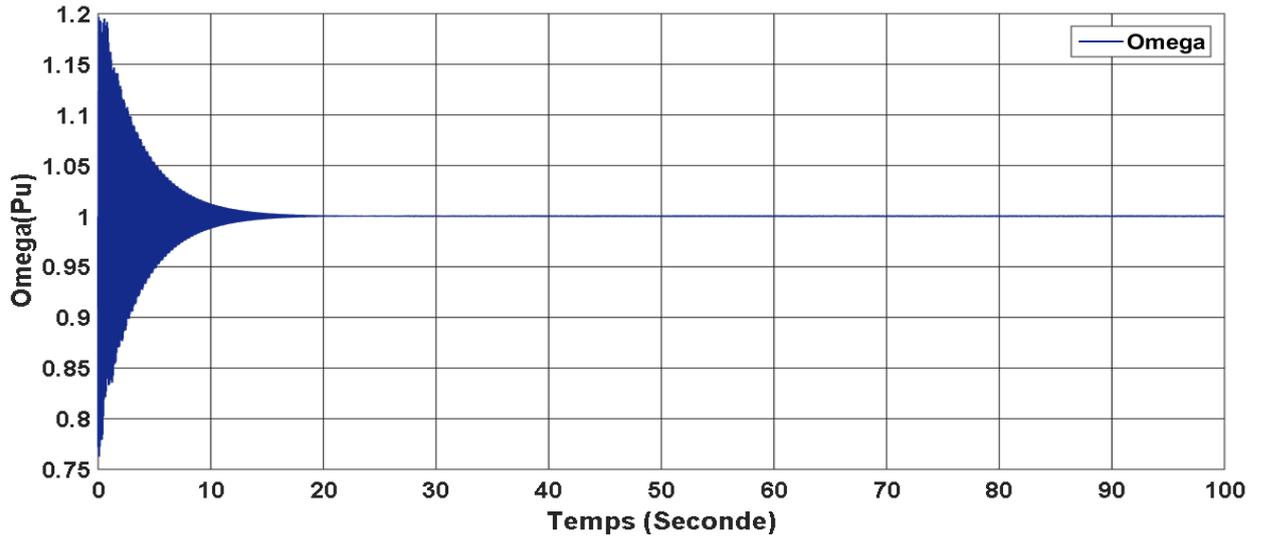


Figure (III.43) : La vitesse angulaire du rotor

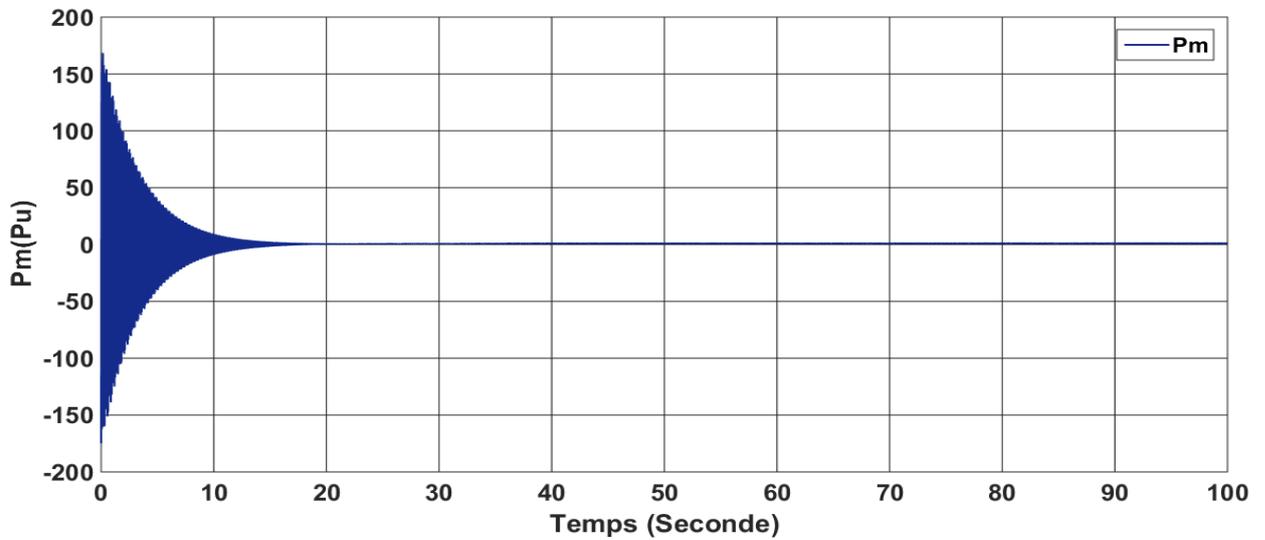


Figure (III.44) : La puissance mécanique

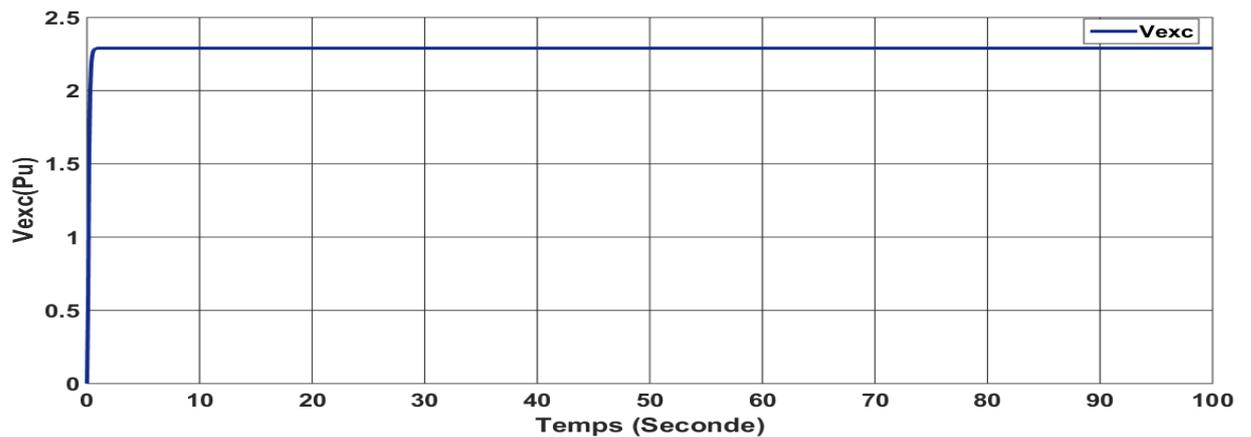


Figure (III.45) : La tension d'excitation

III.2.3. Interprétation des résultats :

Dans la phase de démarrage on aperçoit une forte oscillation des courants statoriques d'après les figure (III.37) et (III.38) à cause de la grande vitesse de rotation de l'arbre de rotor figure (III.43) et aussi à cause du manque de régulation. Ensuite la courbe des courants décroît exponentiellement vers une valeur d'amplitude inférieure dans un temps approximativement très court de 6s. Cependant et à ce moment les régulateurs commencent à réagir puisque il y a un retour des mesures des paramètres de sorties du système (tension statorique (V_d, V_q), la variation de la vitesse de l'arbre de rotor (ω) et la puissance électrique active (P_{eo})) vers l'AVR+PSS neuronal. Alors l'intervention de la régulation AVR+PSS neuronal ajuste cette perturbation et augmente l'amplitude de courant exponentiellement et se rapproche du régime permanent pendant une durée de 24s. La tension d'excitation figure (III-45) et la puissance mécanique figure (III-44) augmentent proportionnellement et simultanément ce qui augmente l'amplitude des courants et stabilise l'alternateur dans le régime permanent pour un temps maximal de 18s. Dans notre analyse des courbes nous avons remarqué que l'ensemble des caractéristiques tracées atteint leurs valeurs nominales au même temps (48s) et avec la même forme d'oscillations. Les courbes de la puissance active et celle de couple électromagnétique ont les mêmes formes. Bien que l'ensemble des courbes tracé présentent les mêmes perturbations de démarrage, le régime permanent établi reflète bien les amplitudes de notre machine, les courants de phase et le couple électromagnétique se stabilisent aux valeurs :

$$I_{ABC} = 9204,13 \text{ (A)}, C_{EM} = 560509,6 \text{ (Nm)}, P = 176 \text{ (MW)}$$

En plus du temps, nous avons fait une comparaison au niveau de l'amplitude entre les trois étapes du signal de courant obtenu (démarrage, la décroissance de la courbe et le régime permanent), cette opération nous a donné :

- Taux de décroissance = $I_{\text{Démarrage}} / I_{\text{Transitoire}} = 7.25/0.73 = 9,9315 = 993.15\%$.
- Taux de croissance = $I_{\text{Transitoire}} / I_{\text{Permanent}} = 0.73/1 = 73 = 73\%$.

D'après ces résultats nous avons constaté que la décroissance est moins importante ce qui ne demande pas beaucoup de temps à la régulation neuronal AVR+PSS pour rétablir le régime permanent.

Enfin les graphes que nous avons obtenus dans cet essai présentent un bon indice de fonctionnement de l'alternateur et que les régulateurs utilisés réagissent aux normes exigés.

III.2.4. Simulation en présence d'un court-circuit fugitif :

A partir de $t = 50s$ dans le régime permanent, on applique un défaut dans le réseau pour voir la réaction des régulateurs neuronaux (PSS+AVR) face à un défaut fugitif. Dans cette étude, on considère, par

exemple, un court-circuit triphasé provisoire qui dure 0.1s (durée nécessaire pour la commutation du disjoncteur de protection).

Nous avons simulé notre système d'étude sous différents régimes de fonctionnements perturbés (défaut, et le régime permanent), le temps de la simulation est 100 secondes, les résultats obtenus en (Pu) sont :

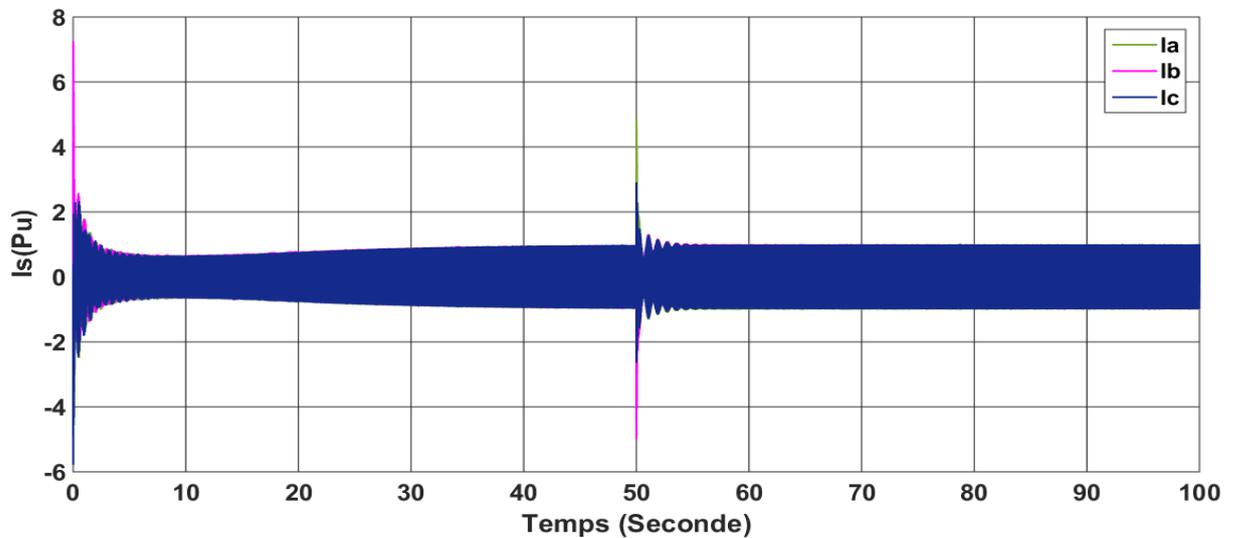


Figure (III.46) : Les courants statoriques

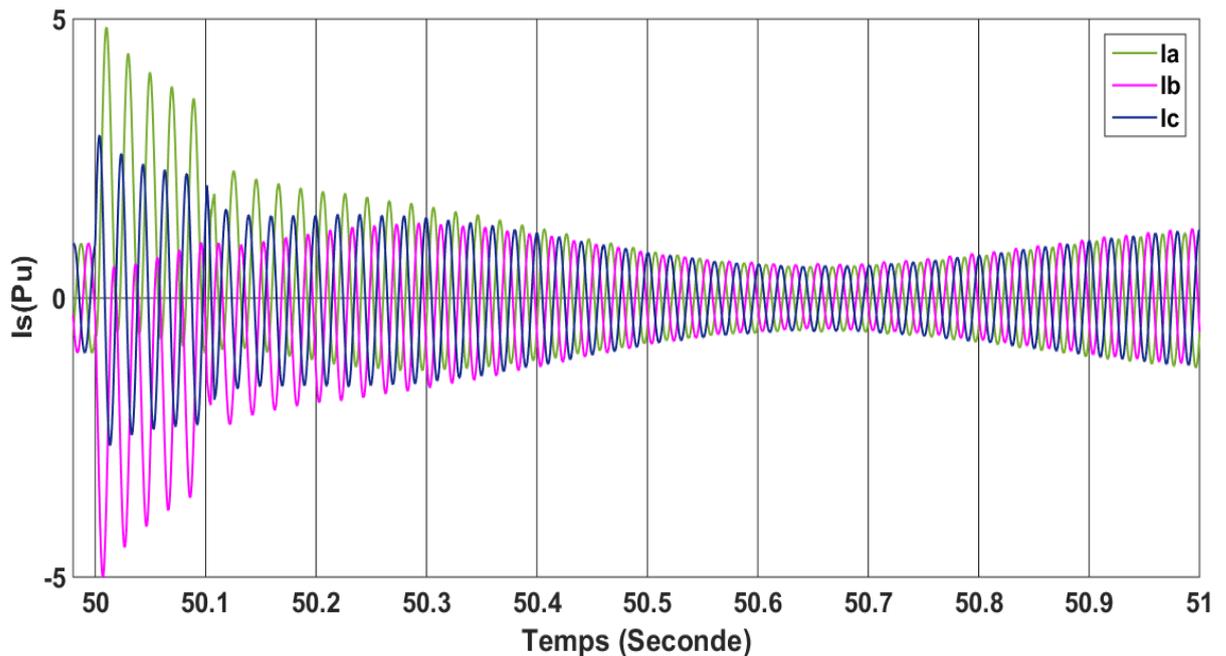


Figure (III.47) : zoom des courants statoriques

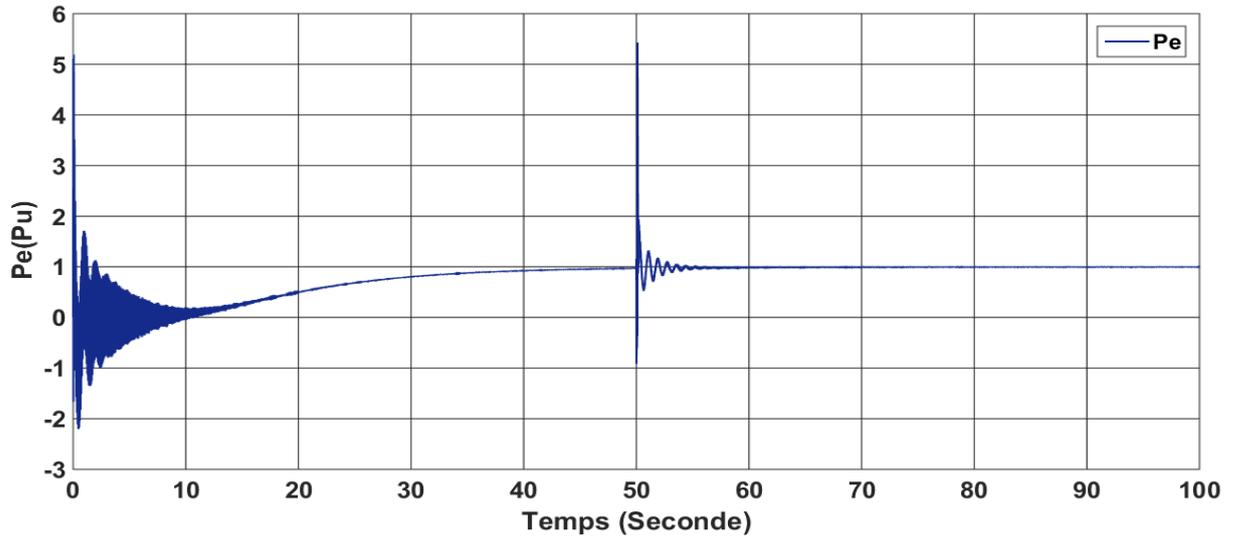


Figure (III.48) : La puissance électrique

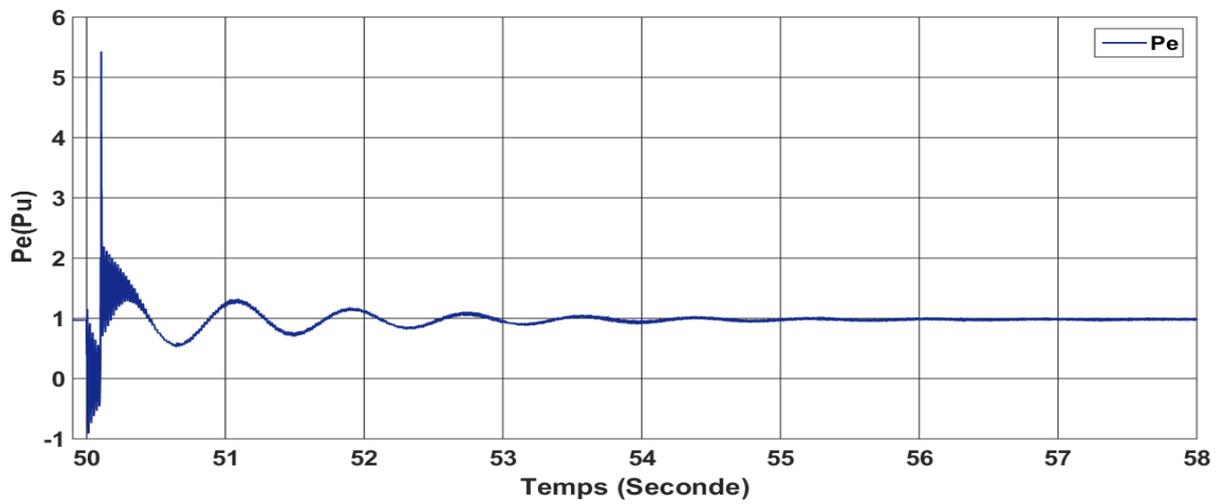


Figure (III.48.a) : zoom de la puissance électrique

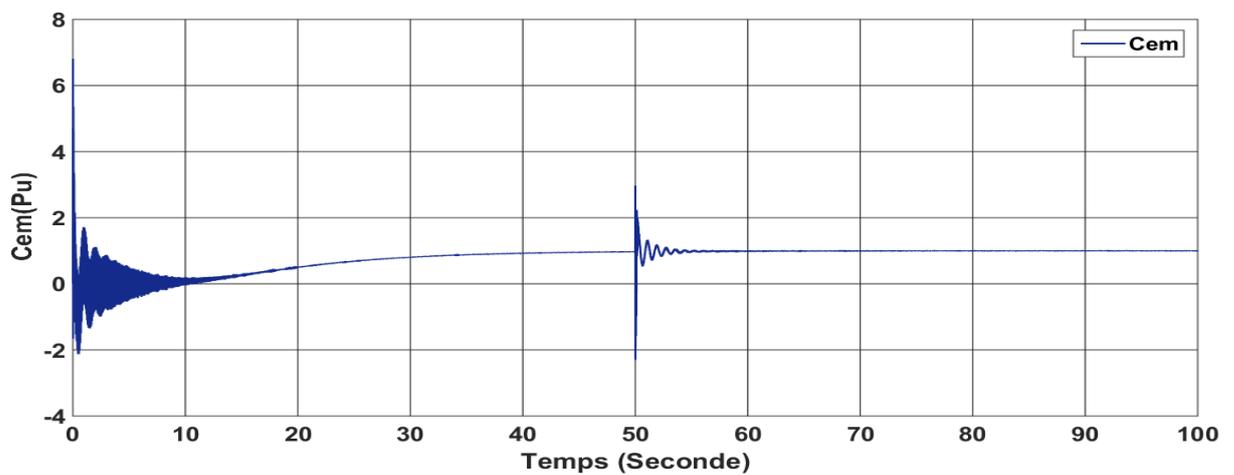


Figure (III.49) : Le couple électromagnétique

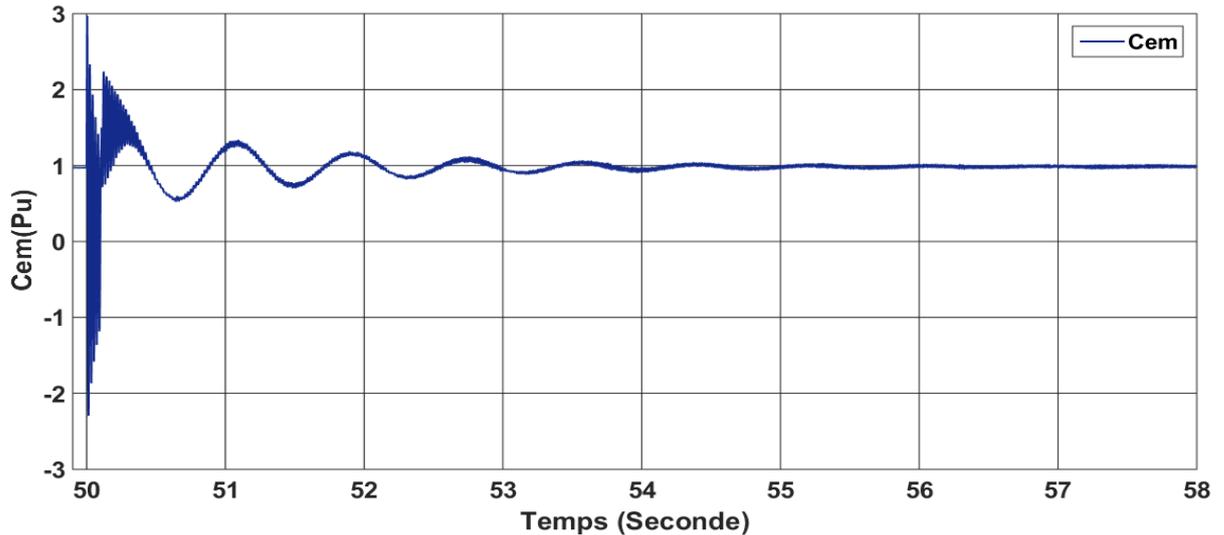


Figure (III.49.a) : zoom du couple électromagnétique

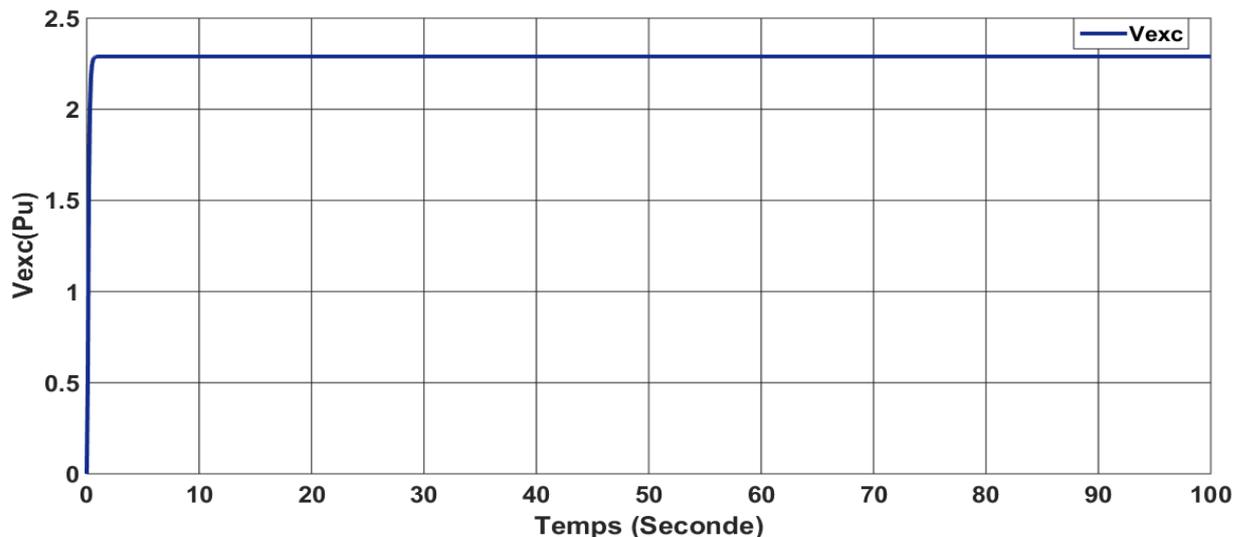


Figure (III.50) : La tension d'excitation

III.2.5. Interprétation des résultats :

On a déjà discuté dans l'interprétation précédente des résultats du passage de l'état de démarrage à l'état de fonctionnement permanent. Cependant, nous avons réalisé un court-circuit triphasé à la terre de courte durée ($t = 0.1$ seconds) à l'instant $t = 50$ seconds pendant le fonctionnement normal de la machine pour voir le comportement de l'alternateur contre cette perturbation. On remarque d'après la figure (III.46) une grande oscillation dans la courbe des courants grâce au courant de court-circuit à l'instant de défaut, ces oscillations selon la figure (III.47) dure pendant 8 secondes et diminue d'amplitude rapidement à cause de l'intervention du régulateur neuronal (AVR+PSS). En plus, nous avons fait une comparaison au niveau de l'amplitude entre deux

étapes du signal de courant obtenu (l'instant de défaut, stabilisation de courant), cette opération nous a donné :

$$\text{Taux de croissance} = \mathbf{D}_{\text{défaut}} / \mathbf{I}_{\text{Permanant}} = 4.93 / 1 = 4.93 = 493 \%$$

Nous avons remarqué que la diminution après défaut est moins importante par rapport au régime de démarrage parce que la machine été en état de marche et aussi à cause de l'intervention et l'efficacité de la régulation neuronal (AVR+PSS).

III.2.6. Comparaison entre AVR+PSS conventionnelle et AVR+PSS neuronal :

Dans cette partie de notre travail, nous allons analyser la différence entre les deux régulateurs **AVR avec PSS conventionnelle** et **AVR avec PSS neuronal** pour voir l'impact de la **PSS neuronal** dans la stabilité du système.

Nous allons comparer la tension d'excitation, les courants statoriques et la puissance électrique active pour les deux régulateurs.

Les légendes utilisées dans cette comparaison sont comme suit :

Vexc N : la tension d'excitation avec une régulation AVR+PSS par le réseau de neurone.

Vexc C : la tension d'excitation avec une régulation conventionnelle AVR+PSS.

Ia N : courant statorique avec une régulation AVR+PSS par le réseau de neurone.

Ia C : courant statorique avec une régulation conventionnelle AVR+PSS.

Pe N : la puissance active avec une régulation AVR+PSS par le réseau de neurone.

Pe C : la puissance active avec une régulation conventionnelle AVR+PSS.

III.2.7. Comparaison pour le fonctionnement normal :

III.2.7.1. Comparaison des tensions d'excitation :

Cette fois nous allons analyser les tensions d'excitation entre les deux régulateurs :

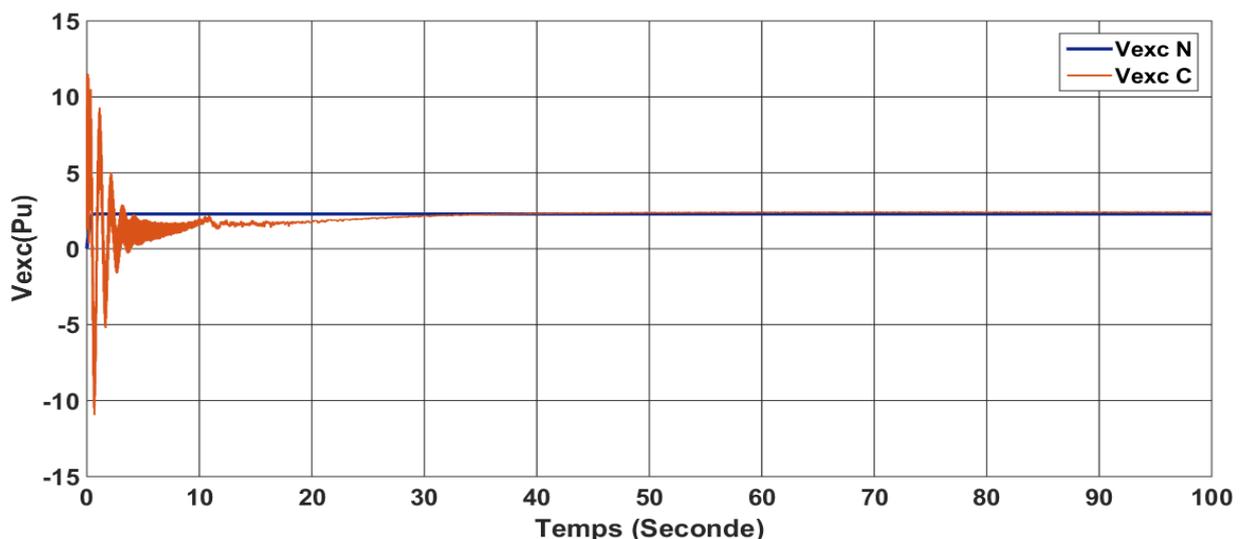


Figure (III.51) : la tension d'excitation pour les deux régulateurs

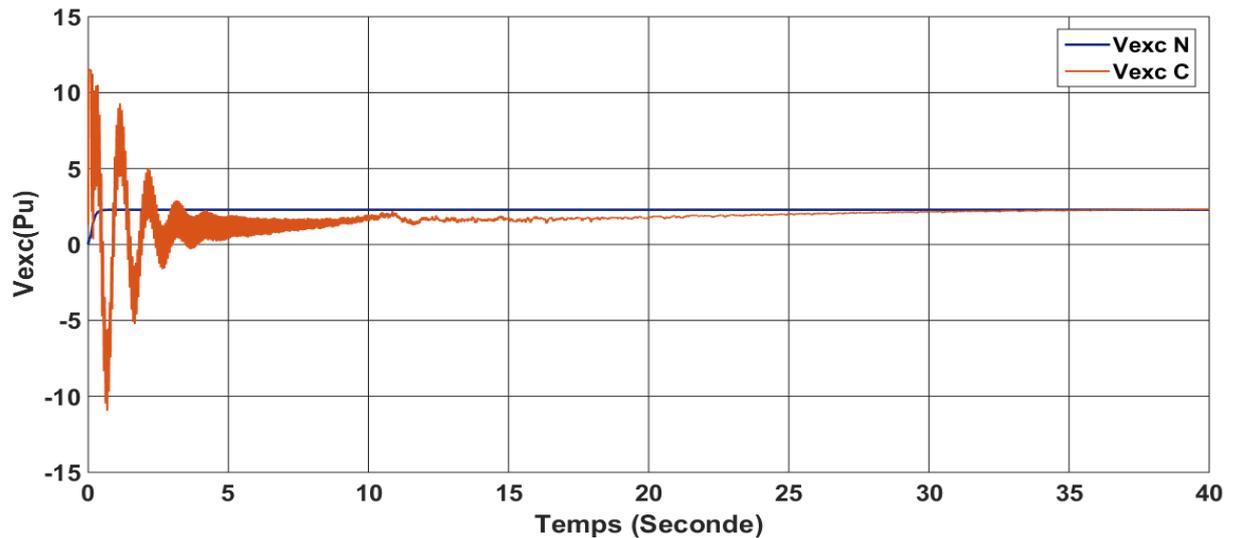


Figure (III.52) : zoom de la tension d'excitation pour les deux régulateurs

On remarque bien la différence entre les deux tensions dans la phase de démarrage en termes de rapidité et stabilité dans la figure (III.53). On remarque que la tension d'excitation qui utilise un régulateur conventionnelle **AVR+PSS** augmente exponentiellement et rapidement vers sa valeur nominale pendant une période de 30 secondes, contrairement la tension d'excitation avec une régulateur neuronal **AVR+PSS** qui subit une légère perturbation de 0.5s et augmente très rapidement à sa valeur nominale.

En déduit que la régulation neuronal **AVR+PSS** est plus rapide que la régulation conventionnelle **AVR+PSS**.

III.2.7.2. Comparaison des courants statoriques :

Nous allons analyser le courant statorique I_a (une seule phase) entre les deux régulateurs :

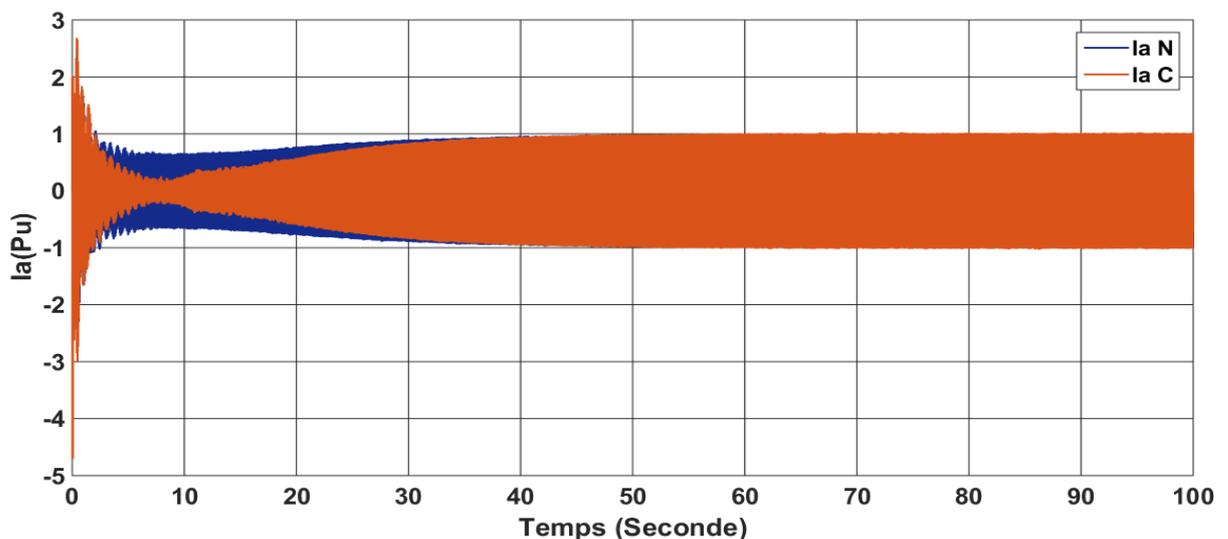


Figure (III.53) : le courant statorique I_a pour les deux régulateurs

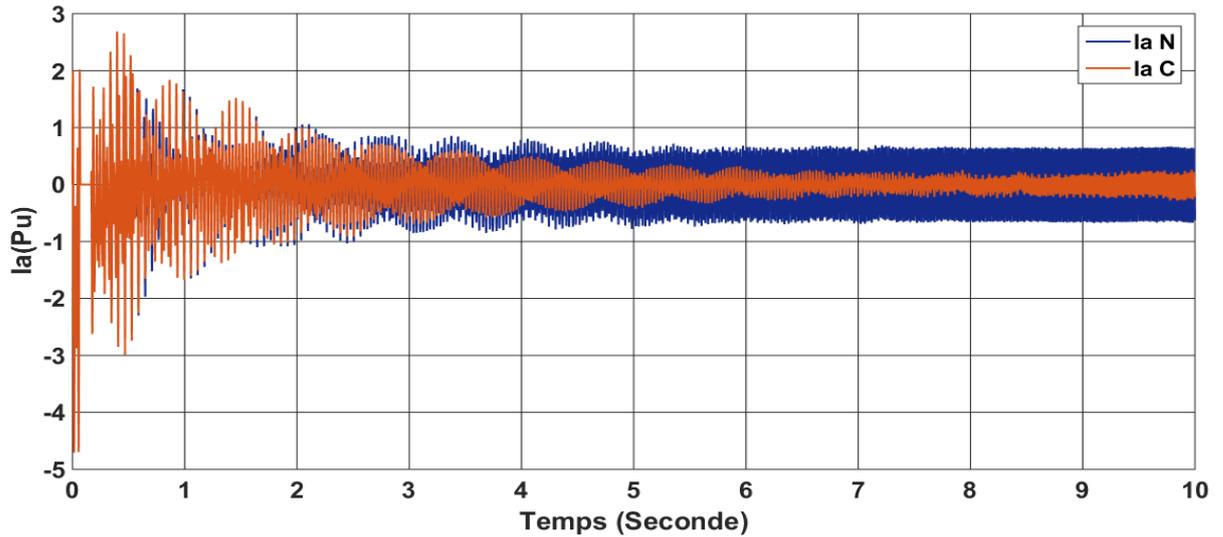


Figure (III.54) : zoom du courant statorique I_a pour les deux régulateurs en régime transitoire

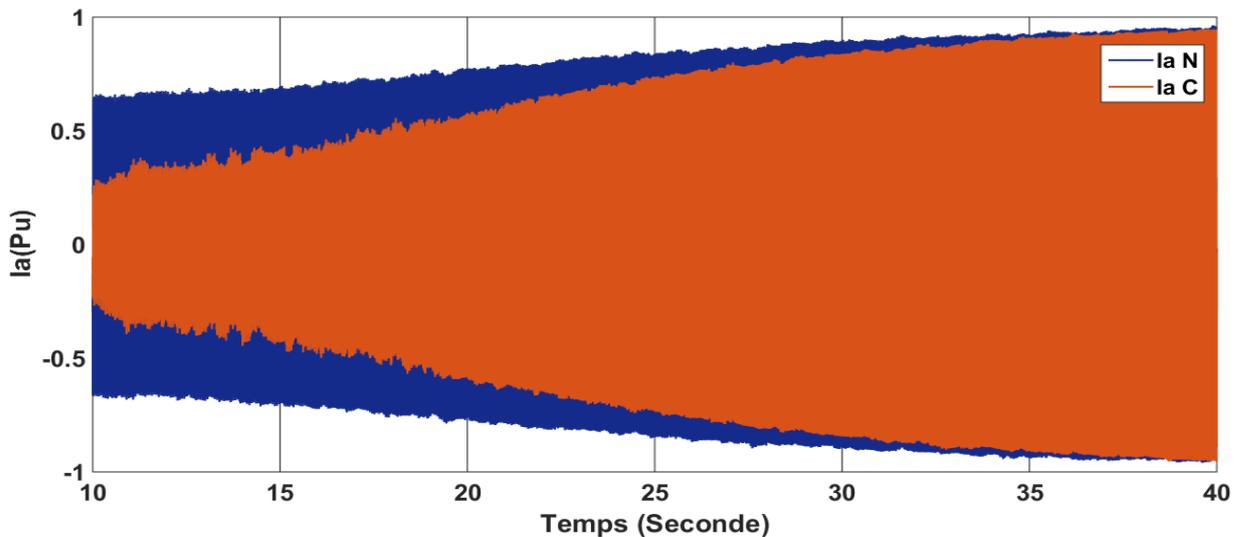


Figure (III.55) : zoom du courant statorique I_a pour les deux régulateurs en régime transitoire

D'après les figures (III.53), (III.54) et (III.5) et les calculs que nous avons fait avant sur les taux de croissance de décroissance des courants statoriques, on remarque une grande différence entre les deux :

- Taux de décroissance de courant statorique pour le régulateur conventionnel AVR+PSS

$$\text{Taux} = \mathbf{I}_{\text{Démarrage}} / \mathbf{I}_{\text{Transitoire}} = 3625\%$$

- Taux de décroissance de courant statorique pour le régulateur neuronal AVR+PSS

$$\text{Taux} = \mathbf{I}_{\text{Démarrage}} / \mathbf{I}_{\text{Transitoire}} = 993.15\%$$

En déduit que le courant d'excitation avec le régulateur neuronal **AVR+PSS** minimise l'amplitude de décroissance exponentielle d'une façon plus performante que le régulateur conventionnelle **AVR+PSS**.

On a calculé le temps de décroissance des deux courant et on a trouvé que :

- Temps de décroissance de courant statorique pour le régulateur conventionnel **AVR+PSS**
Taux = 8 secondes
- Temps de décroissance de courant statorique pour le régulateur neuronal **AVR+PSS**
Taux = 6 secondes

En déduit que le courant d'excitation avec le régulateur neuronal **AVR+PSS** minimise non seulement l'amplitude mais aussi le temps de décroissance d'une façon plus performante que le régulateur conventionnel **AVR+PSS**.

Ces propriétés sont très importantes puisqu'elles affectent le retour vers le régime permanent. Dans le régime transitoire toujours on remarque que le courant avec le régulateur neuronal **AVR+PSS** maintien une valeur supérieur que celle avec un régulateur conventionnelle **AVR+PSS**. Cette propriété aide à accélérer le passage vers la stabilité de fonctionnement de l'alternateur. On a calculé aussi le taux de croissance du régime transitoire au régime permanent ainsi le temps nécessaire pour l'opération, on a trouvé :

- Taux de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnel **AVR+PSS**= 20%
- Temps de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnel **AVR+PSS**=54
secondes
- Taux de croissance de courant statorique pour le régulateur neuronal **AVR+PSS** = 73 %
- Temps de croissance de courant statorique pour le régulateur neuronal **AVR+PSS** =
48secondes

On remarque une grande différence entre l'amplitude et le temps de croissance des courants statoriques du régime transitoire vers le régime permanent de fonctionnement de l'alternateur. On déduit par cela que le régulateur neuronal **AVR+PSS** est plus performant que le régulateur conventionnel **AVR+PSS**.

Dans le régime permanent les courants pour les deux régulateurs sont identiques.

III.2.7.3. Comparaison de la puissance active :

D'après la figure (III.56) on remarque bien qu'il n'y a aucune différence entre les deux régulateurs pour la puissance active dans l'état de fonctionnement normal.

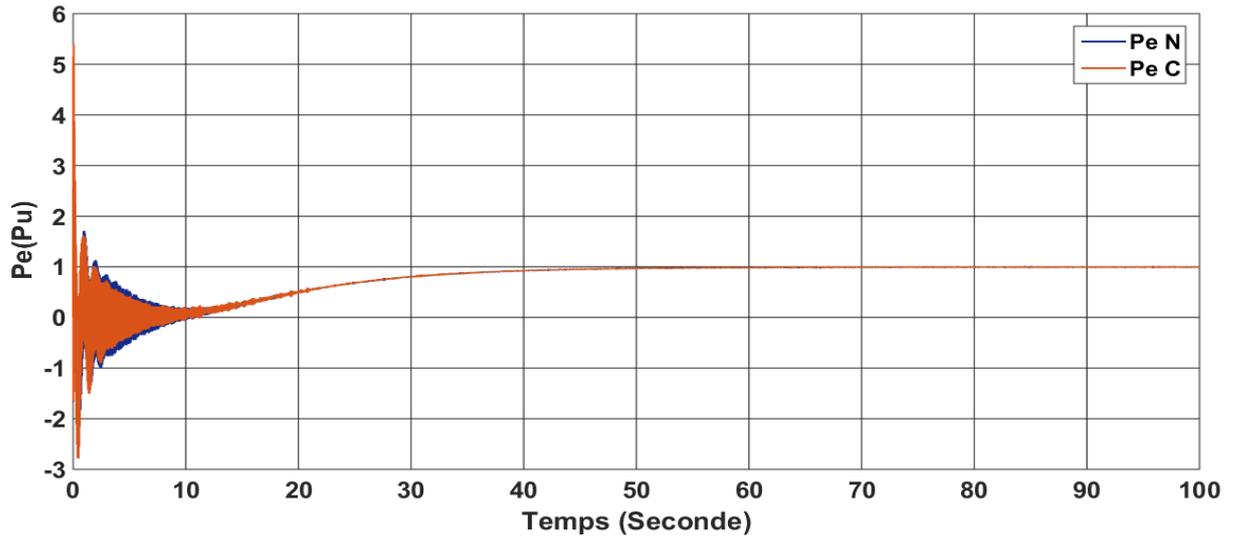


Figure (III.56) : la puissance électrique active pour les deux régulateurs

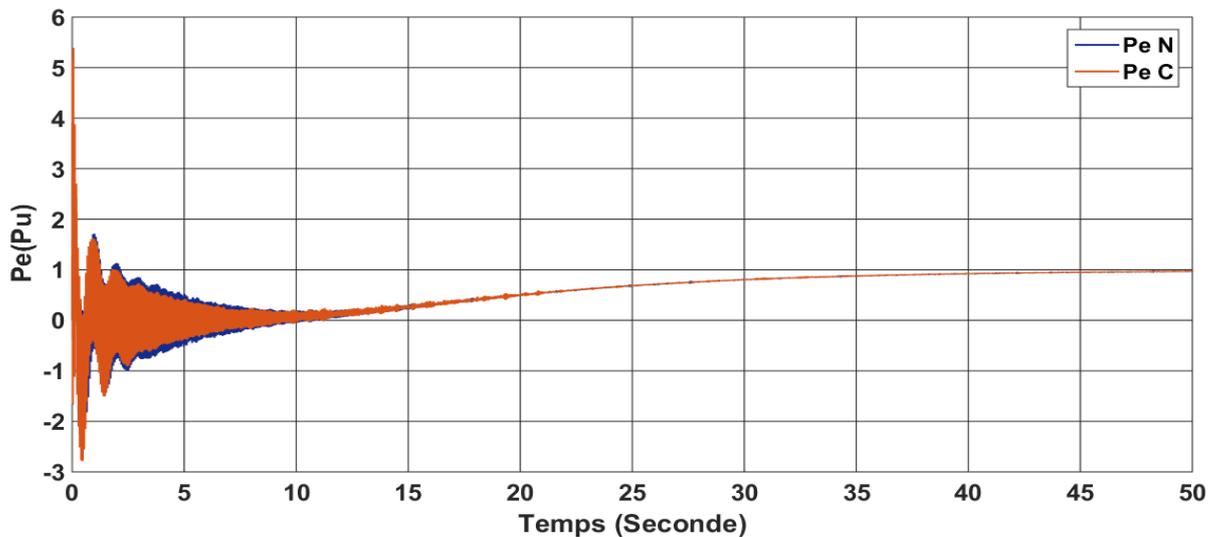


Figure (III.57) : zoom de la puissance électrique active pour les deux régulateurs

III.2.8. Comparaison entre AVR avec PSS conventionnelle et AVR avec PSS neuronal en cas de défaut (court-circuit triphasé fugitif) :

Dans cette partie de notre travail, nous allons analyser la différence entre les deux régulateurs AVR avec PSS conventionnelle et AVR avec PSS neuronal pour voir la réaction du PSS neuronal dans la stabilité du système en cas de perturbation (défaut fugitif).

Nous allons comparer la tension d'excitation, les courants statoriques et la puissance électrique active pour les deux régulateurs.

III.2.8.1. Comparaison des tensions d'excitation :

Cette fois nous allons analyser les tensions d'excitation entre les deux régulateurs :

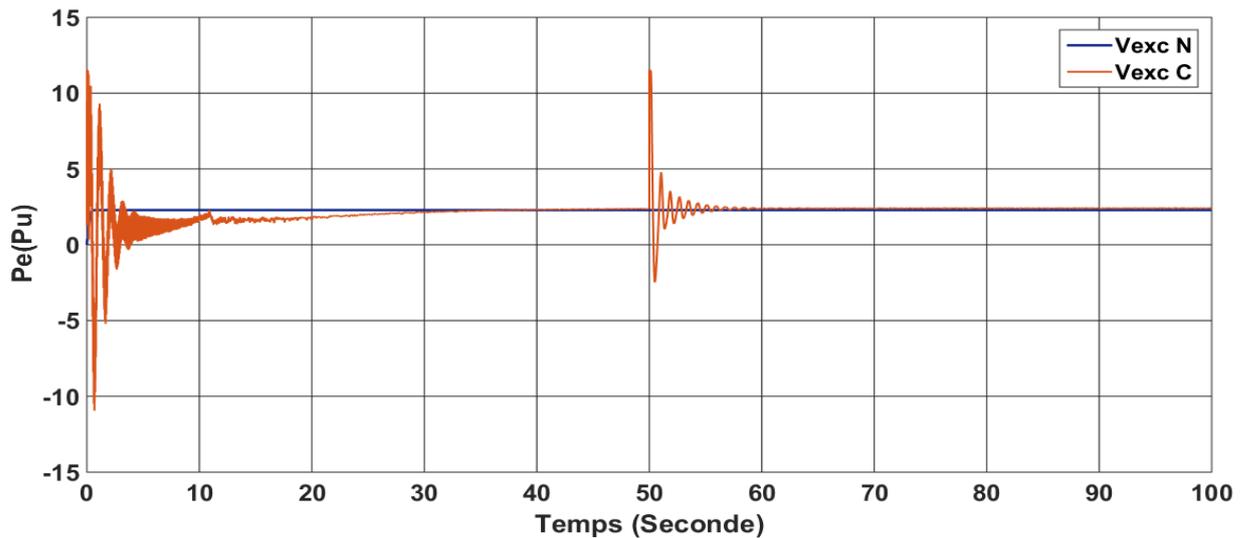


Figure (III.58) : la tension d'excitation pour les deux régulateurs

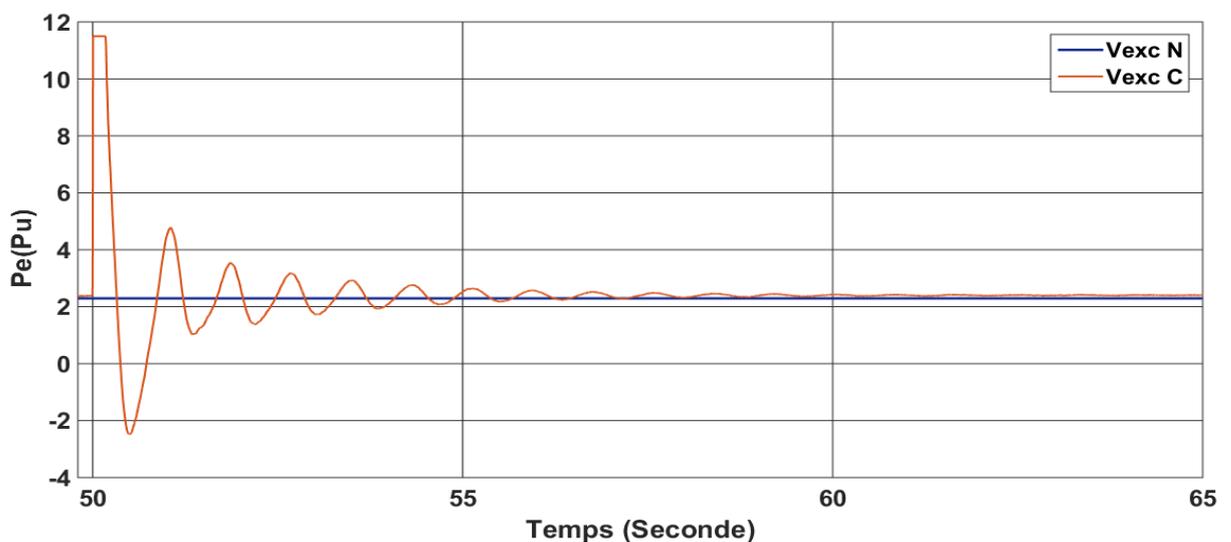


Figure (III.59) : zoom de la tension d'excitation pour les deux régulateurs au point de défaut

Il existe une grande différence entre les deux réponses à l'instant de défaut, comme il est indiqué dans la figure (III.58), la tension d'excitation de la régulation conventionnelle **AVR+PSS** subit une grande perturbation et met une certaine période (10s) pour être stabilisé contrairement au régulateur neuronal **AVR+PSS** qui n'a subi aucune perturbation.

D'après ces résultats nous remarquons la différence de rapidité entre les des régulateurs est très grande.

III.2.8.2. Comparaison des courants statoriques :

Nous allons analyser le courant statorique I_a (une seule phase) entre les deux régulateurs :

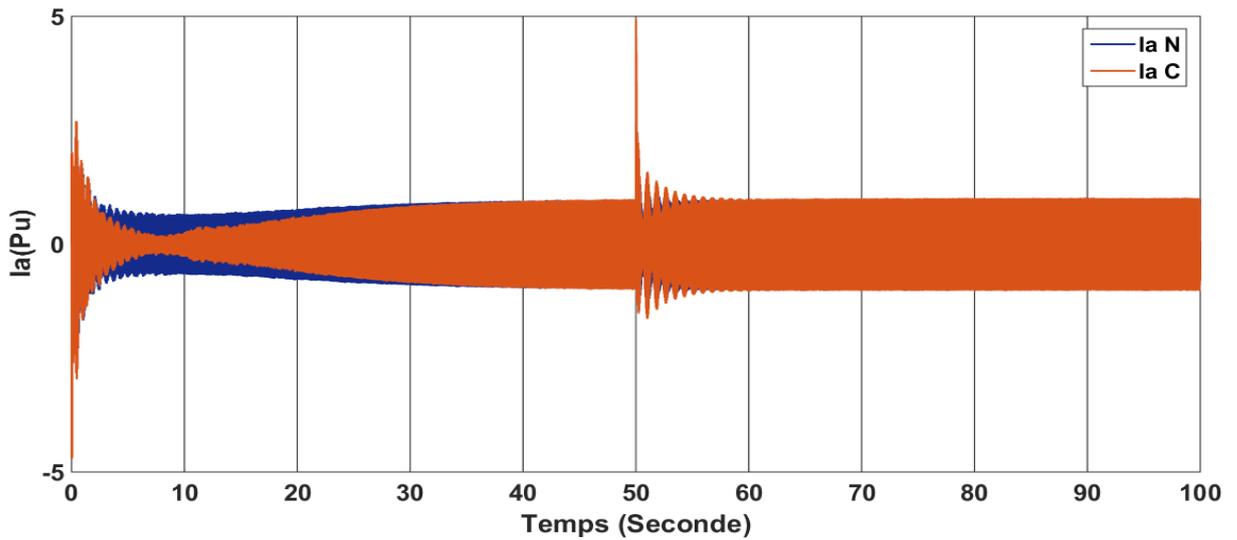


Figure (III.60) : le courant statorique I_a pour les deux régulateurs

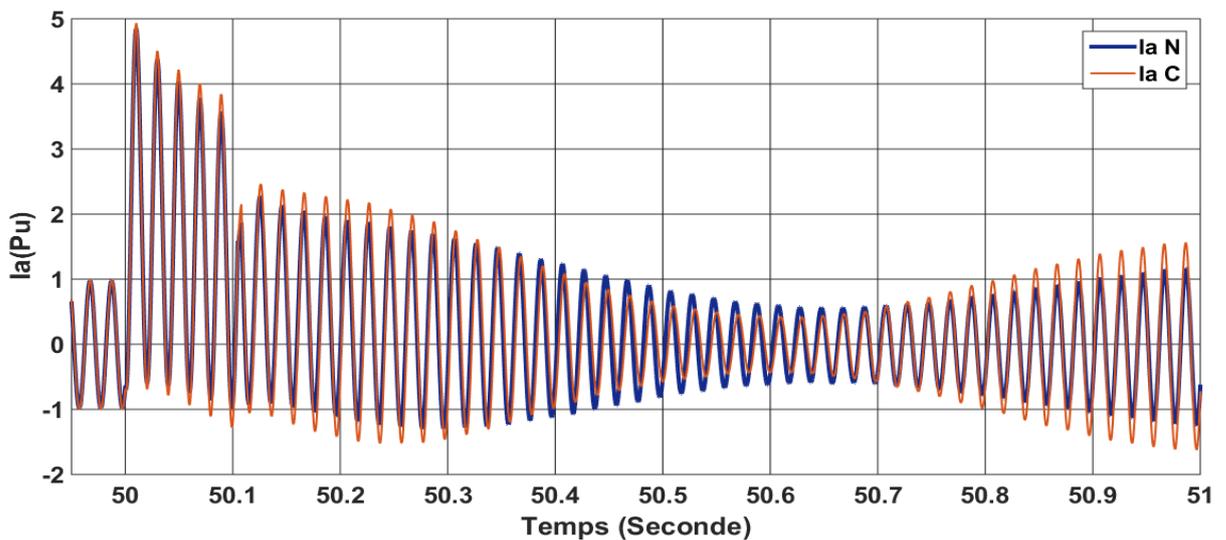


Figure (III.61) : zoom du courant statorique I_a pour les deux régulateurs au point de défaut.

Lorsqu'on applique un court-circuit fugitif à l'instant ($t=50$ seconds) pendant une court durée ($t = 0,1$ seconds) on remarque une différence entre la réaction des deux régulateurs dans les figures (III.60) (III.61), nous avons calculé l'amplitude de courant de court-circuit, ainsi le temps de stabilisation des courants après l'élimination de défaut, on a trouvé :

- Taux de croissance de courant statorique pour le régulateur conventionnel AVR+PSS= 490 %

- Temps de stabilisation des courants statoriques pour le régulateur conventionnel **AVR+PSS**= 12 secondes
- Taux de croissance de courant statorique pour le régulateur neuronal **AVR+PSS** = 493 %
- Temps de stabilisation des courants statoriques pour le régulateur neuronal **AVR+PSS** = 8 secondes

L'amplitude du courant de court-circuit avec le régulateur neuronal **AVR+PSS** est supérieure à celle avec le régulateur conventionnelle **AVR+PSS**, mais le temps de stabilisation après le défaut est beaucoup mieux pour le régulateur neuronal **AVR+PSS**.

III.2.8.3. Comparaison de la puissance active :

Nous allons analyser la puissance électrique active entre les deux régulateurs :

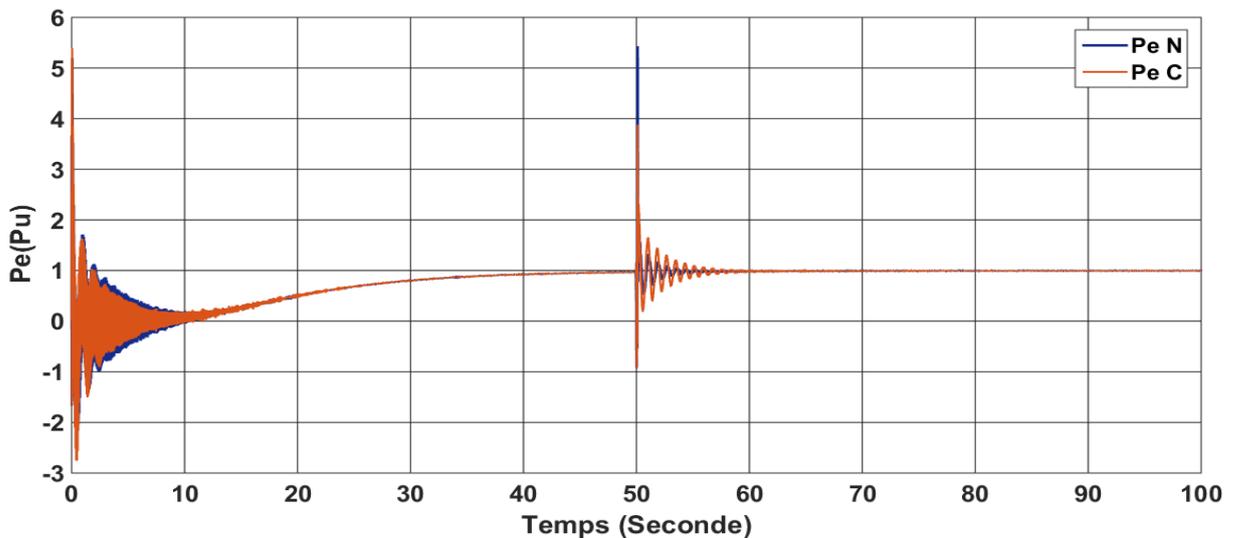


Figure (III.62) : la puissance électrique active pour les deux régulateurs

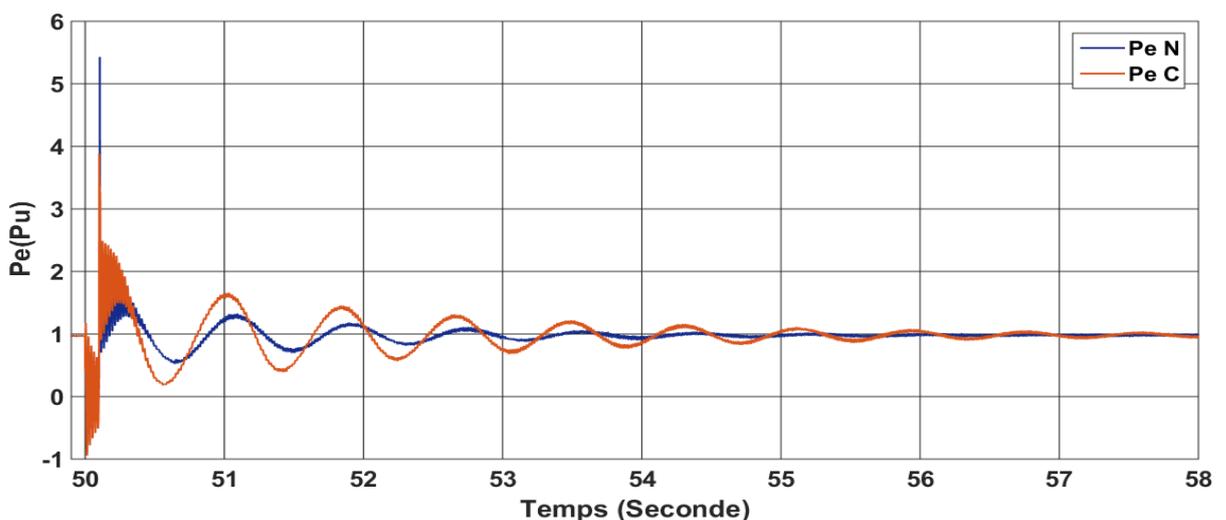


Figure (III.63) : zoom de la puissance électrique active pour les deux régulateurs au point de défaut

D'après les figures (III.62) (III.63) on remarque bien qu'il existe une grande différence entre les deux réponses à l'instant de défaut, la puissance électrique active de la régulation conventionnelle **AVR+PSS** subit une grande perturbation et met une certaine période (10s) pour être stabilisé contrairement au régulateur neuronal **AVR+PSS** qui subit une légère perturbation pendant une période de 5 s, d'après ces résultats nous remarquons la différence de rapidité entre les deux régulateurs.

En déduit que le régulateur neuronal **AVR+PSS** est plus rapide et performant pour la stabilisation des courants après un défaut fugitif. La rapidité de régulation des courants après le défaut fugitif affecte tous les grandeurs de l'alternateur.

Conclusion :

Ce dernier chapitre a présenté l'ensemble des résultats de notre étude de simulation avec leurs interprétations. Donc nous avons décidé de comparer le régulateur **conventionnel AVR+PSS** avec le régulateur **neuronal AVR+PSS** en fonctionnement normal de l'alternateur, on a trouvé que le régulateur neuronal **AVR+PSS** est beaucoup plus rapide et performant dans le passage du régime transitoire de démarrage vers le régime permanent.

Ensuite nous avons introduit un défaut de court-circuit fugitif dans le fonctionnement normal de l'alternateur pour voir la réaction des deux régulateurs, on a trouvé que le régulateur **neuronal AVR+PSS** est aussi beaucoup plus rapide et performant que le régulateur **conventionnel AVR+PSS** dans la stabilité des courants, tensions et puissance électrique active dans le cas d'une perturbation.

D'après notre comparaison en déduit que le régulateur **neuronal AVR+PSS** est beaucoup plus rapide et performant que le régulateur **conventionnel AVR+PSS**. Cependant le régulateur **AVR+PSS NEURONAL** donne presque les mêmes résultats par rapport au régulateur **AVR floue** utilisé par nos collègues l'année passée.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé concerne, essentiellement, l'exploitation des techniques de l'intelligence artificielle pour la stabilisation de la tension d'excitation et de fréquence de l'alternateur.

On a commencé par une étude générale sur la centrale de production de Marsat El Hadjadj qui était le lieu de notre stage pratique. Cette partie nous a permis d'acquérir beaucoup de compétences sur le fonctionnement de ces complexes industriels de production d'électricité. Cependant nous avons conclu d'une part que les systèmes de ces centrales sont dépassés technologiquement et leur modernisation est obligatoire. D'autre part, on a vu que la diversité des consommateurs fait que le réseau électrique est toujours exposé à des défauts qui influent directement sur les centrales de production ; d'où la nécessité de la régulation très avancée du point de vue technologique.

Dans ce contexte nous avons choisi de 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 (AVR) et la vitesse de rotation transmise à partir de la turbine (PSS). Alors après l'étude des circuits de régulation classiques et un apprentissage sur la méthode des réseaux de neurone pour une familiarisation avec ces opérations. Nous avons exécuté une simulation avec le logiciel de simulation Matlab-Simulink en vue de valider le 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 normal et le cas d'un fonctionnement perturbé en présence d'un court-circuit fugitif, nous avons déduit que le régulateur neuronal AVR+PSS permet de stabiliser les tensions statoriques, les courants statoriques et la puissance électrique active de l'alternateur pendant le démarrage ainsi que dans le cas d'un défaut temporaire.

En outre nous avons fait une comparaison entre le régulateur conventionnel AVR+PSS et un régulateur intelligent AVR+PSS de type neuronal. Donc, les résultats obtenus montrent l'efficacité de ce dernier par rapport au premier. Néanmoins, les capacités d'optimisation des réseaux de neurones ont donné des résultats meilleurs tels que la rapidité de régulation et la réduction des perturbations.

Enfin notre mission a été achevée par la rédaction de ce mémoire au niveau de la centrale. Ce projet de fin d'étude, nous a permis d'apprendre beaucoup de connaissances dans le secteur industriel et d'enrichir nos savoirs théoriques et pratiques.

Finalement nous recommandons les cadres de la centrale de passer à la régulation intelligente à cause de leurs avantages et de la sensibilité de ce système industriel pour l'économie.

Annexe

Annexe A

Les paramètres réels des équipements de simulation :

L'alternateur :

Tension nominal : 13,8 (kV)

Puissance nominal : 220 (MW)

Fréquence nominal : 50 (HZ)

La turbine à vapeur :

Fréquence : 50 (HZ)

Nombre de tours par minute : 3000 (tr/min)

Transformateur élévateur :

Tension primaire : 13,8 (kV)

Tension secondaire : 235 (kV)

Source de tension :

Tension nominal : 235 (kV)

Fréquence : 50 (HZ)

1^{ère} charge :

Représente les auxiliaires du central :

Tension nominal : 13,8 (kV)

Puissance active : 8 (MW)

Puissance réactive: 4 (MVAR)

2^{ème} charge :

Représente une charge dans le réseau :

Tension nominal : 235 (kV)

Puissance active : 168 (MW)

Puissance réactive : 30 (MVAR)

Les paramètres du PSS :

$$G_s(s) = K_s \frac{(1+T_1s)(1+T_3s)}{(1+T_2s)(1+T_4s)}$$

Avec :

$$K_s = 20 \quad , \quad T_1 = 50e-3, \quad T_2 = 20e-3 \quad , \quad T_3 = 3 \quad , \quad T_4 = 5.4$$

Les paramètres du régulateur PI :

$$C(s) = \frac{TCS+1}{TCS}$$

Avec : $TC = 2$

Les paramètres de l'AVR :

- Le redresseur :

$$G_{\text{Redresseur}}(S) = \frac{1}{TrS+1}$$

Avec : $TR = 20e-3$

- Le régulateur :

$$G_{\text{Régulateur}}(S) = \frac{Ka}{TaS+1}$$

Avec : $KA = 300$ et $TA = 0.001$

- Le stabilisateur :

$$G_{\text{Stabilisateur}}(S) = \frac{KfS}{TfS+1}$$

Avec : $Kf = 0.001$ et $Tf = 0.1$

- L'excitatrice :

$$G_{\text{Excitatrice}}(S) = \frac{1}{TeS+Ke}$$

Avec :

$KE = 1$ et $TE = 0$

Les paramètres du bloc neuronal :

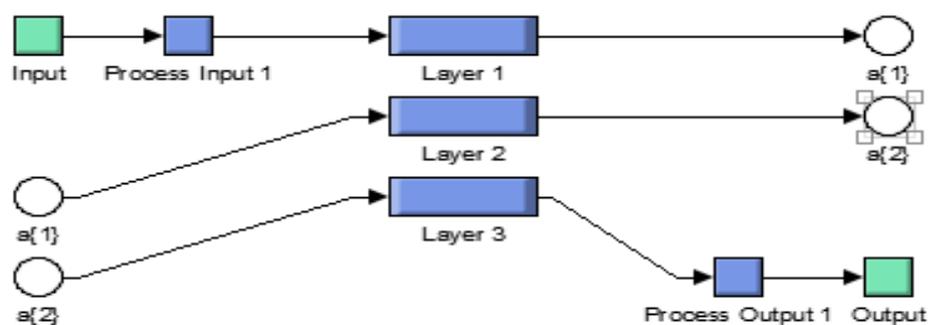


Figure (1) : Bloc PSS neuronal

Annexe A

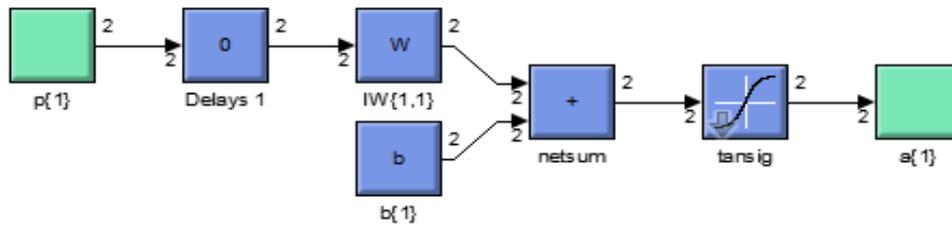


Figure (2) : La 1^{ère} couche cachée

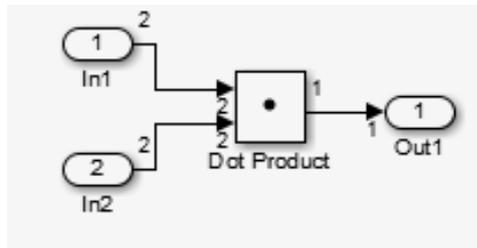


Figure (3) : les entrées et les sorties du produit scalaire

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Rapport centrale, (Document interne de la centrale thermique de Marsat El Hadjadj).
- [2] : Formation sur les centrales thermiques. (Document interne de la centrale thermique de Marsat El Hadjadj).
- [3] : A.BLAJKINE, Electrotechnique générale, traduction français, Edition Mir 1977
- [4] : Claude CHEVASSU, Machines Electriques. Cours et Problèmes, O1MM 2^e année, version n°2,71-05/02/2014
- [5] : D.Jolevski, Excitation System of Synchronous Generator, University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, plit, 2009.
- [6] : P.Kunder, "Power System Transient Stability and Control", Mc grawhill, 1994
- [7] :A.Fouad, Vijay.Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using The Transient Energy Function Method", Prentice Jersey, 1992
- [8] : P. Kundur, J. Paserba, V. Ajarapu, G. Andersson, A.Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T.V. Cutsem , and V. Vittal, Definition and classification of power system stability, IEEE Trans, actions on Power System.,19(2)(2004)1387-1401.
- [9] : KWU service de formation professionnel, Référence de la section 5521 (document interne de la centrale thermique de Cap-Djinet) 1984
- [10] : A. Fouad, Vijay. Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using The Transient Energy Function Method", Prentice Jersey 07632, 1992.
- [11] : P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", JOHN WILEY and SONS, 2003.
- [12] : Charef Youcef, Chelouti Bilal « Optimisation de la stabilité dynamique d'un alternateur de puissance liée à un réseau infini », Mémoire fin d'étude UMBB 2016.
- [13] : Kellal Mohamed et Saadaoui Mouad «Etude Du Systeme De Controle De La Tension Des Alternateurs De Grande Puissance Application : Alternateur De La Centrale De Marsat El Hadjadj », Mémoire fin d'étude FST 2019.
- [14] : D.GHOURAF, Z.BELAKHDER, "Etude analytique des comportements dynamiques d'une machine synchrone sous Toolbox-Matlab" mémoire PFE ingénieur Université de SBA 2008.
- [15] : Houos abdel oiahed & Zeghoud Med alaeddine & Ouabri Ahmed "Contrôle de la puissance active du réseau électrique", Centre universitaire d'EL-OUED 2007

Bibliographie

[16] : Youcef Bekakra & Gacem abd Elmalek Mini projet de magister d'étude "Amélioration de la stabilité dynamique Power System Stabilizer (PSS)", Centre universitaire d'EL-OUED 2008.

[17] : C. Touzet, "Les réseaux de neurones artificiels. Introduction au connexionnisme Cours, exercices et travaux pratiques", laboratoire d'études et recherches, Nîmes, 1992.

[18] : A. Aussem, "Théorie et applications des Réseaux de Neurones Récurents et Dynamiques à la Prédiction, à la Modélisation et au contrôle Adaptatif des Processus Dynamiques", Thèse Doctorat, Université Paris V, Juin 1995.

[19] : J. Hernandez, R. Parra, J. Alvarez, J. Alarcon, J. Ibarra, "A Neural Network structure and learning algorithm for control of dynamic systems", Journal of Mexican Society of Instrumentation, Vol. 3, n° 9, pp 62-68, 1998.

[20] : B. Mendil, K. Benmahammed, "Model Free Approach for Learning Control Systems", International Journal of Computer Research, Vol. 11, n° 2, pp 239-247.

[21] : Tony Abou-Assaleh, "Evolution of Recurrent Neural Network to control Autonomous Life Agents", Rapport technique, Département des Sciences de l'Ordinateur, Université de Waterloo, Canada, 2001

[22] : bibliothèque de Matlab-Simulink.