

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Mlle : BENHAMIDA MARIA et Mlle : KEDDOU SARRA

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

**Régulation Automatique de Tension (AVR) d'un
Alternateur de la centrale Thermique de Cap-Djinet**

Soutenu le 01 /07/2024 devant le jury :

LARABI	Zina	MAA	UMBB	Président
RIACHE	Samah	MCB	UMBB	Examineur
KHELOUAT	Lila	MCB	UMBB	Promoteur

Année Universitaire : 2023/2024



Remerciements

Nous remercions le bon **Dieu** de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur **Mme KHELOUAT.L** qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi de notre projet de fin d'étude, et de ces conseils précieux apportés tout au long de ce travail

Nous tenons à remercier également **les membres du jury** qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail et d'apporter leurs réflexions et suggestions scientifiques.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre Co-encadreur **Mr KALAIS** pour son aide et son encouragement qui n'a épargné aucun effort pour que notre stage se déroule dans de meilleures conditions ainsi que **Mr AIMACHE. K** et tous les responsables et le personnel du central de Cap-Djinet.

Nous profitons de l'occasion à remercier **tous nos enseignants** de FT/ISE/UMBB.

Nous remercions évidemment **les parents**, sans qui nous ne serions pas là. Nous les remercions pour leur soutien, leur amour, leurs encouragements et tout.

Enfin, que toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin nous ont généreusement offert leur aide à l'élaboration de ce travail, trouvant ici l'expression de notre profonde sympathie.



Sarra & Maria



Dédicace

Louange à Dieu pour cette réalisation, louange à Dieu au commencement et à la fin.

À moi-même, qui ai persévéré et travaillé dur, surmontant les difficultés pour réaliser cet exploit remarquable.

À mon père, celui qui a embelli mon nom avec les plus beaux titres, et qui m'a soutenu sans contrepartie, qui a toujours été pour moi un modèle et une source de soutien inépuisable.

À ma mère, celle à qui Allah a placé le paradis sous ses pieds, à celle qui a facilité mes affaires par ses prières, à celle qui a été et restera mon soutien et ma bien-aimée ses soins et son encouragement continus, et qui a été mon soutien en toutes circonstances.

À ma chère sœur, qui a toujours été pour moi une amie et un soutien à chaque étape.

À mes chers frères, qui ont été pour moi un soutien et une aide, partageant avec moi les moments de joie et de défi.

À tous mes chers enseignants qui m'ont enseigné, guidé, ainsi qu'à mes collègues et mes amis, que Dieu les guide.

Je vous dédie à tous ce modeste travail, fruit de mes efforts, et je m'en remets à Dieu pour la réussite, merci à vous tous.



KEDDOU Sarra



Dédicace

C'est avec un grand plaisir que je dédie cet évènement marquant de ma vie :

A mon très cher père

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

Grâce à toi papa j'ai appris le sens de travail et la responsabilité ,je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité

Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation

Je t'aime papa et j'implore le tout puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il doit. Ton affection me couvre. Ta bienveillance, ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles

Je t'aime Maman et j'implore le tout puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse

Aux anges avec lesquels Dieu m'a béni pour que je puisse connaître à travers eux le goût de la belle vie, ces anges. Cela a changé les concepts d'amour, d'amitié et de soutien dans ma vie

*A mon unique frère **Abde raouf** et mes chers sœurs **Amale** et **Nesrine***

Que Dieu vous garde toujours à mes côtés.

À ma grand-mère et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

À ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès

BENHAMIDA MARIA

ملخص :

هذا العمل يعرض تحليلاً لتنظيم الألي للتوتر الكهربائي (AVR) لمولد متزامن في محطة الطاقة الحرارية في كاب جينات. تم عرض دورة إنتاج المحطة في هذه الدراسة، تلاه شرح لمبدأ عمل المولد ونموذجه الرياضي في وضع المولد. تم استخدام المحاكاة في حلقة مفتوحة على برنامج Matlab لتحديد ديناميكيات نظام الدراسة. تركز الدراسة بعد ذلك على التنظيم الألي للتوتر الكهربائي لمولد مجهز بمنظم PID. من خلال تحليل التردد والزمن، تمكنا من وصف نظام AVR-PID وتحسين أدائه. تم أيضاً إضافة حلقة تثبيت. وقد تم توضيح التصحيحات لهذا التوازن من خلال محاكاة أجريت على برنامج Matlab Simulink.

الكلمات الرئيسية: مولد متزامن ، تنظيم الألي للتوتر الكهربائي ، حلقة تثبيت مولد متزامن ، محطة الطاقة الحرارية في كاب جينات ، مولد ، منظم PID ،

Résumé :

Ce travail expose une analyse de la régulation automatique de tension (AVR) d'un alternateur synchrone dans la centrale thermique de Cap-Djinet. La présentation du cycle de production de la centrale a été effectuée dans cette étude, suivie d'une explication du principe de fonctionnement de l'alternateur et de son modèle mathématique en mode générateur. Les simulations en boucle ouverte sur Matlab ont été utilisées pour établir les dynamiques du système d'étude. L'étude se concentre ensuite sur la régulation automatique de la tension du générateur équipé d'un régulateur PID. Grâce à une analyse fréquentielle et temporelle, il a été possible de décrire le système AVR-PID en améliorant ses performances. Une boucle stabilisante est également ajoutée. Les mesures correctives de cette combinaison ont été illustrées par des simulations effectuées sur Matlab Simulink.

Mots clé : Alternateur synchrone, Boucle stabilisante, Centrale thermique de Cap-Djinet , Générateur, Régulateur PID, Régulation de tension automatique.

Abstract :

This work presents an analysis of the Automatic Voltage Regulation (AVR) of a synchronous alternator in the Cap-Djinet thermal power station. The presentation of the production cycle of the power plant was carried out in this study, followed by an explanation of the operating principle of the alternator and its mathematical model in generator mode. The dynamics of the system under study were established by Matlab open-loop simulations. The study then focuses on the automatic voltage regulation of the generator equipped with a PID regulator. Thanks to a frequency and temporal analysis, it was possible to describe the AVR-PID system by improving its performance. A stabilizing loop is also added. The corrective measures of this combination were illustrated by simulations carried out on Matlab Simulink.

Keywords: Automatic voltage regulation, Cap-Djinet thermal power plant, Generator, PID regulator, Stabilizing loop, Synchronous alternator.

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
Résumé :	iv
Table des matières	v
Liste des symboles et abréviations	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des figures.....	xiii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Présentation de la centrale thermique de Cap-Djinet	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 L’historique de la centrale.....	3
I.3 Constitution du site	4
I.3.1 Situation spatiale :	4
I.3.2 Choix du site	4
Le choix du site a été élaboré en suivant les critères suivants :	4
I.4. Les composants essentiels de la centrale	4
I.4.1. La chaudière (générateur de vapeur).....	5
I.4.1.1 Composition de la chaudière (générateur de vapeur).....	5
I.4.2. Turbine à vapeur	6
I.4.2.1 Corps HP	6
I.4.2.2Corps MP	7
I.4.2.3Corps BP	7
I.4.3. Le condenseur	8
I.4.4. Les pompes	9
I.4.5. La bêche alimentaire	9
I.4.6. Les réchauffeurs.....	10
I.4.6.1 Les trois réchauffeurs basse pression BP	10
I.4.6.2Les deux réchauffeurs haute pression HP	10
I.4.7. L’alternateur.....	10

I.4.7.1 Principe de fonctionnement.....	11
I.4.7.2 Constitution.....	12
I.4.7.2.1 Stator	12
I.4.7.2.2 Rotor.....	12
I.4.7.2.3.Circuit de refroidissement par hydrogène	13
I.4.7.2.4.Paliers de l'alternateur	13
I.4.7.2.5 Etanchéité de l'arbre	13
I.5. Fonctionnement du circuit eau-vapeur de la centrale thermique	14
I.6. Conclusion	16
Chapitre II : Modélisation de la Machine Synchrones Triphasée	17
II.1 Introduction.....	17
II.2 Présentation générale	17
II.3 Symboles de la machine synchrone	18
II.4 Composition de la machine synchrone	18
II.4.1. Le stator	19
II.4.2 Le rotor	19
II.4.3 Les amortisseurs	20
II.4.4 Le circuit d'excitation	21
II.5 Les types de machines synchrones	22
II.5.1 Machine synchrone à Rotor bobiné	22
II.5.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants	22
II.5.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné à pôles lisse	23
II.5.2 Machine Synchrones à aimant permanent (MSAP)	23
II.5.3 Machine synchrone à double excitation (MSDE).....	24
II.6 Principe de fonctionnement de la machine synchrone.....	24
II.6.1 Fonctionnement en alternateur.....	25
II.6.2 Fonctionnement en moteur	26
II. 7 Modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	26
II.7.1 Equations des tensions	27
II.7.1 .1 Tensions statoriques.....	27
II.7.1.2 Tensions rotoriques.....	27
II.7.2 Expressions des flux	28
II.7.3 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park (dqo)	29
II.7.3 .1 La matrice de Park	30
II.7.3.2 Equations des tensions	30

II.7.3 .3 Equations de flux	31
II.7.4 Alternateur en charge.....	33
II.7.5 Expression du couple électromécanique.....	34
II.7.6 Equation mécanique.....	34
II.8 Modèle (dq) de la génératrice synchrone à rotor bobiné sur Simulink/Matlab (essai à vide)	35
II.8 .1 Modèle de simulation	35
II.8.2. Résultats de simulation	37
II.9 Conclusion	40
Chapitre III : Etude de la régulation de tensions de l'alternateur	41
III.1. Introduction	41
III.2 Système actuel d'excitation adapté à la régulation de tension de l'alternateur de la station de CAP-DJINET	41
III.2.1 Principe d'excitation	42
III.2.1 .1 Excitatrice pilote à aimant permanent	42
III.2.1 .2 Excitatrice principale triphasé	43
III.2.1 .3 Roues à diodes.....	43
III.2.1 .4 Armoire de régulation JK	43
III.2.2 Principe de réglage	44
III.3. Description du dispositif de régulation actuel adapté par la station Cap-Djinet	44
III.3.1 Régulateur de tension	44
III.3.2 Régulateur de courant de champ	45
III.4. Régulateur PID	46
III.4.1 Principe de base du régulateur PID	46
III.4.2 Les actions du régulateur PID	46
III.4.3. Avantages et inconvénients des régulateurs PID.....	48
III.5. Techniques de calcul du régulateur PID.....	48
III.5.1 Méthodes classiques de réglage PID	49
III.5.1.1 Méthode de Ziegler-Nichols.....	49
III.5.1 2 Méthode de Cohen-Coon.....	49
III.5.1 3 Méthode de réglage manuel.....	49
III.5.2 Techniques avancé de calcul de régulateur PID	49
III.5.2.1 Optimisation des essais de particules (PSO) :	49
III.5.2.2 L' algorithme de recherche de coucou (CS).....	49
III.5.2.3 L' algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC).....	50
III.6. Régulateur de tension Automatique (AVR) de l'alternateur	50

III.6.1 Principe de fonctionnement de l'AVR	50
III.6.2. Les composants du système AVR	51
III.7.Conclusion.....	52
Chapitre IV : Simulations et Résultats	53
IV.1 Introduction.....	53
IV.2 Modèle fonctions de transfert du système AVR	53
IV.3 Etude de la stabilité de tension du système AVR.....	54
IV.3.1 Fonction de transfert du système AVR en boucle ouverte	55
IV.3.2 Fonction de transfert du système AVR en boucle fermée.....	55
IV.4 Etude fréquentielle et temporelle du système sans régulateur	56
IV.4.1 Etude fréquentielle	56
IV.4.2 Etude temporelle	57
IV.5 Etude fréquentielle et temporelle du système avec régulateur PID.....	58
IV.5.1 Régulation de tension à vide (sans charge)	58
IV.5.1.1 Fonction de transfert du régulateur PID utilisé	58
IV.5.1.2 Fonction de transfert en boucle ouverte avec régulateur.....	59
IV.5.1.3 Fonction de transfert en boucle fermée avec régulateur.....	59
IV.5.1.4 Etude fréquentielle	59
IV.5.1.5 Etude temporelle	61
IV.5.2 Régulation de tension en charge.....	62
IV.5.2.1 Cas ou $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$	62
IV.5.2.2 Cas ou $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$	64
IV.5.2.3 Cas ou $K_g = 0.9$ et $1s \leq T_g \leq 2s$	66
IV.5.2.4 Cas ou $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$	68
IV.6 Combinaison de l'AGC avec le système AVR-PID.....	70
IV.7.Système AVR avec Stabilisateur et PID	72
IV .8. Conclusion.....	75
Conclusion générale	76
Références bibliographiques	77

Liste des symboles et abréviations

n_s : Vitesse de rotation du champs tournant en trs. s – 1

f : Fréquence des courants alternatifs en Hz

p : Nombre de paires de pôles

E : F.é.m. induit (v)

K : Constante globale (caractéristique du moteur)

Φ : Flux maximum à travers un enroulement (Wb)

k_d : Facteur de distribution voisin de 0,7

k_f : Facteur de forme voisin de 1,05

R_q : Respectivement, résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et d'axe q.

R_s : Résistance d'une phase statorique

φ_k : Flux d'induction traversant l'enroulement k. (k=a, b, c, f, D, Q).

L_d : Inductance synchrone longitudinale.

L_q : Inductance synchrone transversale.

L_0 : Inductance homopolaire.

M_{Fd} : Inductance mutuelle entre inducteur F et bobinage d.

M_{Dd} : Inductance mutuelle entre amortisseur D et bobinage d.

M_{Qq} : Inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et bobinage q.

L_F : Inductance propre de l'inducteur.

L_D : Inductance propre de l'amortisseur D.

L_Q : Inductance propre de l'amortisseur Q.

M_{FD} : Inductance mutuelle entre inducteur F et amortisseur D.

V_d, V_q : Tensions statoriques de la machine dans le repère de Park.

R_c, L_c : Paramètres de la charge.

ω : Pulsation électrique de la machine.

I_d, I_q : Courants traversant la charge en convention récepteur.

p_{em} : Puissance électromécanique en w.

$\Omega = \omega_r / p$: est la vitesse angulaire du rotor en rad/s.

$\varepsilon(\infty)$: L'erreur de position

t_m : Temps de montée

t_r : Temps de réponse

K : Gain

T : Constants de temps

Δ_G : Marge de gain ΔG

Δ_φ : Marge de phase

ω_c : Pulsation de coupure marge de retard ΔR

BP : Bande passante

AVR : Régulation Automatique de Tension

BP : basse pression.

HP : haute pression

MP : moyenne pression

MSAP : Machine Synchrone à aimant permanent

MSRB : Machine synchrone à rotor bobiné

MSDE : Machine synchrone à double excitation

P : Action proportionnelle

I : Action intégrale

D : Action dérivée

PID : Proportionnel, Intégral, Dérivé

PSO : Optimisation des essaims de particules

CS : L'algorithme de recherche de coucou

ABC : L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles

AGC : Contrôle de Génération Automatique

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques de l'alternateur de la centrale de Cap-Djinet

Tableau II.1 : Paramètres de la MSRB utilisés pour la simulation

Tableau III.1 : Description des actions P, I et D du régulateur PID

Tableau III.2 : Avantages et inconvénients des régulateurs PID

Tableau IV.1: Fonctions de transfert et paramètres utilisés pour le système AVR

Tableau IV.2: Résultats de simulation du tracé de bode du système AVR sans régulateur

Tableau IV. 3 : Résultats de simulation du système AVR sans régulateur en boucle fermée

Tableau IV. 4 : Paramètres de régulateur PID avec plusieurs sélections

Tableau IV.5: Résultats de simulation du tracé de bode du système AVR avec régulateur PID

Tableau IV.6: Résultat d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée à vide

Tableau IV.7:Résultat d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Tableau IV.8 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée pour $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Tableau IV.9 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Tableau IV.10 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée pour $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Tableau IV.11 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.9$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Tableau IV.12 : Résultat d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée pour $K_g = 0.9$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Tableau IV.13 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte pour $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Tableau IV.14 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée pour $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Tableau IV.15: Fonctions de transfert et paramètres utilisés pour système électrique unique avec l'AGC

Tableau IV.16 : Résultats d'étude du système AVR seulement et AVR+Stabilisateur et AVR+Stabilisateur +PID

Liste des figures

- Figure I-1** : Station de la centrale thermique de Ras Djanet.
- Figure I-2** : Transformer l'eau en l'état liquide à vapeur sèche
- Figure I-3** : Composition du générateur à vapeur
- Figure I-4**: Corps HP
- Figure I-5**: Corps MP
- Figure I-6** : Corps BP
- Figure I-7** : Condenseur
- Figure I-8** : La bêche alimentaire
- Figure I-9**:L'alternateur
- Figure I-10** : Circuit de refroidissement par hydrogène
- Figure I-11**: Schéma principale de la composition d'une tranche thermique de la centrale de Ras-Djinet.
- Figure II.1** : Machine synchrone
- Figure II.2** : Symboles de la machine synchrone.
- Figure II.3** : Stator de la machine synchrone.
- Figure II.4.** : Rotor de la machine synchrone.
- Figure II.5** : Les Amortisseurs de la machine synchrone.
- Figure II-6** : Rotor d'une machine synchrone à pôle saillant
- Figure II-7** : Machine synchrone à rotor bobiné avec rotor à pôle lisse
- Figure II-8** : MSDE série avec sources d'excitation au rotor
- Figure II-9** : Schéma de la MSRB dans le repère a, b, c
- Figure II.10** : Schéma de la machine synchrone en diphasé (référentiel dqo).
- Figure II.11** : Modélisation de la génératrice synchrone à rotor bobiné du modèle (dq) sur MATLAB simulink
- Figure II.12** : Réponse du flux φ_f en fonction de temps
- Figure II.13** : Réponse du courant i_f en fonction de temps
- Figure II.14** : Les tensions statoriques ($V_{a,b,c}$) par la transformée inverse de Park en fonction de temps
- Figure II.15** : Zoom sur les tensions statoriques ($V_{a,b,c}$) en fonction de temps
- Figure II.16** : Réponse des tensions (V_d, V_q) en fonction de temps

Figure III-1 : Schéma de principe d'excitation pour l'alimentation de l'alternateur

Figure III-2 : Schéma fonctionnel de régulation de tension

Figure III-3 : Schéma fonctionnel de régulation de courant de champ

Figure III-4 : Régulateur PID

Figure III-5 : Circuit de régulation de la tension de sortie.

Figure III-6 Schéma de principe de la régulation AVR.

Figure IV.1 : Schéma bloc du système AVR de l'alternateur (sans régulateur)

Figure IV.2: Tracé de bode de système AVR en boucle ouverte ($G(s)$ sans régulateur)

Figure IV.3: Réponse indicielle de système AVR sans régulateur en boucle fermée

Figure IV.4 : Schéma bloc du système AVR de d'alternateur avec régulateur PID

Figure IV.5 : Tracé de bode du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte avec le paramétrage des sélections OF1, OF2, OF3 et OF4.

Figure IV.6: Réponse indicielle du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée avec les sélections OF1, OF2, OF3 et OF4 (essai à vide)

Figure IV.7 : tracé de bode du système AVR avec PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.7$ et

$$1s \leq T_g \leq 2s$$

Figure IV.8 : Réponse indicielle du système AVR avec PID en boucle fermée pour $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Figure IV.9 : tracé de bode du système AVR avec PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Figure IV.10: Réponse indicielle du système AVR avec PID en boucle fermée pour $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Figure IV.11: tracé de bode du système AVR avec PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.9$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Figure IV.12: Réponse indicielle du système AVR avec PID en boucle fermée pour $K_g = 0.9$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Figure IV.13 : tracé de bode du système AVR avec PID en boucle ouverte pour $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Figure IV.14: Réponse indicielle du système AVR avec PID en boucle fermée pour $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Figure IV .15 : Schéma fonctionnel de l'AGC pour un système électrique unique

Figure IV.16 : réponse en déviation de fréquence

Figure IV.17 : schéma bloc de Système AVR

Figure IV.18: schéma bloc de Système AVR avec Stabilisateur

Figure IV.19: schéma bloc de Système AVR avec Stabilisateur et PID

Figure IV.20: la tension terminale V

Introduction Générale

La production d'énergie électrique est un pilier fondamental du développement économique et social des nations. Parmi les différentes technologies de production d'électricité, les centrales thermiques jouent un rôle crucial en raison de leur capacité à fournir une énergie stable et fiable. La centrale thermique de Cap-Djinet, avec son parc d'alternateurs synchrones, est une installation clé dans ce contexte.

L'objectif principal de ce mémoire est d'analyser et d'optimiser la régulation de tension des alternateurs de cette centrale, un aspect critique pour garantir la stabilité et la qualité de l'énergie produite. Nous nous sommes alors orientés dans notre étude vers une régulation de tension automatique qu'on retrouve en littérature par l'appellation AVR : Automatic Voltage regulation en anglais. Cette technologie est essentielle pour maintenir la tension de sortie des alternateurs à des niveaux acceptables, en dépit des variations de charge et des perturbations externes.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire se structure en quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre présentera la centrale thermique de Cap Djanet, son fonctionnement et ses principaux équipements, en mettant l'accent sur les alternateurs synchrones qui y sont installés.

Le deuxième chapitre, nous nous concentrons sur la modélisation de la machine synchrone, en particulier le rotor bobiné. La modélisation mathématique de la machine est essentielle pour comprendre son comportement dynamique et pour développer des stratégies de régulation efficaces. Nous aborderons les équations différentielles qui régissent le fonctionnement de la machine synchrone, ainsi que les méthodes de simulation utilisées pour représenter ces dynamiques.

Le troisième chapitre explore le système d'excitation de la centrale de Cap-Djinet et la régulation de tension adaptée à cette installation. Il aborde la régulation PID, ses principes généraux, et les techniques de calcul des paramètres PID. De plus, il examine la régulation de tension automatique (AVR) et ses composants essentiels pour assurer une performance optimale du système.

Le quatrième et dernier chapitre sera consacré aux simulations et aux résultats des différentes stratégies de régulation développées sous Matlab/Simulink. Ces simulations permettront d'identifier les meilleures solutions techniques pour assurer une régulation de tension optimale de la centrale thermique de Cap-Djinet.

Enfin, ce mémoire vise ainsi à fournir une analyse approfondie des enjeux liés à la régulation de tension des alternateurs de cette centrale en combinant des approches théoriques et pratiques, en vue d'améliorer la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique de la région.

Chapitre I :
Présentation de la centrale thermique de Cap-
Djinet

Chapitre I : Présentation de la centrale thermique de Cap-Djinet

I.1 Introduction

La centrale thermique de Cap-Djinet est une installation de production d'électricité de premier plan en Algérie, cette centrale revêt une importance majeure dans le secteur énergétique du pays. Elle fonctionne à partir de la vapeur d'eau produite grâce à la chaleur dégagée par la combustion de gaz et des technologies de pointe, alimentant un large réseau électrique. Elle joue un rôle crucial dans la fourniture d'électricité à la région et est une composante essentielle du réseau électrique national.

Dans ce premier chapitre, nous présenterons les éléments clés de la centrale thermique de Cap-Djinet qui sont essentiellement : la chaudière, la turbine à vapeur, le condenseur, les pompes, la bêche alimentaire, les réchauffeurs et enfin l'alternateur dont l'objectif par la suite sera la régulation en tension de ce dernier. Le fonctionnement du cycle de vapeur sera aussi présenté afin de mieux comprendre le fonctionnement de cette centrale

I.2 L'historique de la centrale

En 1986, RAS-DJINET a mis en place une centrale thermique qui a couvert le manque de production d'électricité avec une puissance de 176MW dans chaque groupe de la centrale. La construction de la centrale a été réalisée par un groupe Austro-allemand : SIEMENS:KWU: KRAFTWERK-AG(RFA) :

- SGP: SIMMERING GRAZ PAUKER (Autriche)
- SIEMENS(Allemagne)

Ainsi des personnes ont été chargées des études, de la supervision du montage et du contrôle de l'ouvrage, ainsi que d'une entreprise espagnole (DRAGADOS) chargée de la réalisation de la collecte d'eau de mer.

La réalisation de la centrale a été financée par les entreprises algériennes les plus importantes telles que : ENCC, ETTERKIB, BATIMETAL, GENISIDER, INERGA, SNLB, PROSIDER, ENATUB, SNIC, GTP, SONATRAM et SOGEP.[1]



Figure 1-1 : Station de la centrale thermique de Ras Djinet [1]

I.3 Constitution du site

I.3.1 Situation spatiale :

Située à proximité de la ville de RAS-DJINET dans la wilaya de Boumerdes, la centrale est située en bord de mer à l'est d'Alger. Elle couvre une superficie de 35 ha [2].

I.3.2 Choix du site

Le choix du site a été élaboré en suivant les critères suivants :

- Proximité des principaux consommateurs, notamment la zone industrielle de ROUIBA-REGHAIA.
- Conditions favorables du sous-sol, ne nécessitant pas de fondations profondes [2] .
- Possibilité d'expansion.

I.4. Les composants essentiels de la centrale

Différents équipements dans une centrale thermique exploitent les principes de la thermodynamique afin de convertir l'énergie chimique du combustible en énergie calorifique dans la chaudière. Par la suite, cette énergie calorifique se métamorphose en énergie mécanique, qui est ensuite convertie en énergie électrique par l'alternateur. Cela se produit au sein d'un ensemble ou d'une zone thermique. Un groupe se compose principalement de : la chaudière, la turbine à vapeur, le condenseur, les pompes, la bêche alimentaire, les réchauffeurs et enfin l'alternateur.

I.4.1. La chaudière (générateur de vapeur)

Le générateur de vapeur est un dispositif qui transforme l'eau d'alimentation de la forme liquide en vapeur surchauffée, sous une pression élevée. Celui-ci circule naturellement. Le principe de ce procédé est donné par la figure ci-dessous :



Figure I-2 : Transformer l'eau en l'état liquide à vapeur sèche [4]

I.4.1.1 Composition de la chaudière (générateur de vapeur)

La composition de ce générateur de vapeur comprend : une chambre de combustion constituée de tubes écrans, un ballon (réservoir) et un économiseur.

- ✓ Il y a trois chauffeurs supplémentaires et deux autres.
- ✓ La régulation de la température de vapeur est assurée par trois surchauffeurs par injection d'eau, deux pour les corps HP (Haut Pression) et un pour les corps MP (Moyenne Pression).
- ✓ Quatre niveaux de chute.
- ✓ Huit brûleurs mixtes de combustion gaz/fuel.
- ✓ Deux ventilateurs pour la récupération.
- ✓ Le rôle de deux ventilateurs de soufflage est de fournir l'air nécessaire à la combustion.
- ✓ Un récipient rotatif pour récupérer l'air de combustion a pour fonction de chauffer l'air de combustion en utilisant la chaleur des fumées.
- ✓ Deux dispositifs de préchauffage d'air à vapeur sont utilisés pour augmenter la température de l'air de combustion avant de passer au réchauffeur rotatif. [3]

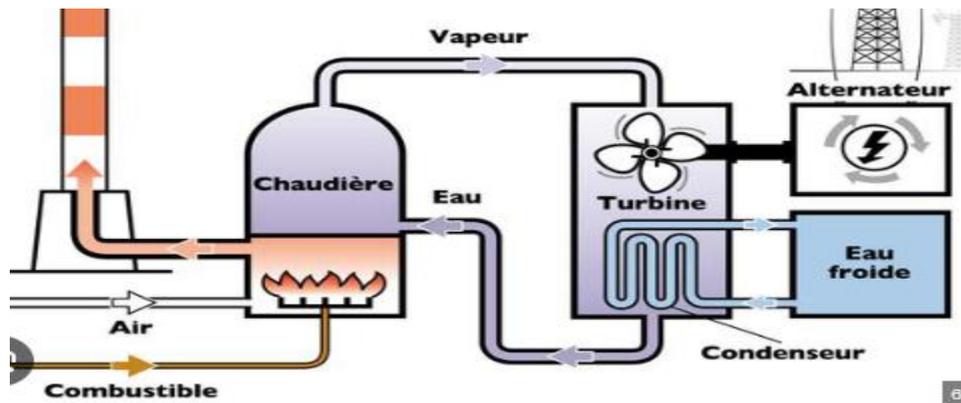


Figure I-3 : composition du générateur à vapeur [3]

I.4.2. Turbine à vapeur

C'est le composant le plus crucial de la centrale, car il convertit l'énergie thermique présente dans la vapeur provenant de la chaudière en un mouvement de rotation de l'arbre. Cette rotation permet d'entraîner l'alternateur. La turbine est une machine à trois corps constitués d'une ligne d'arbres : haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP). Elle est constituée de six (06) soutirages qui alimentent (03) réchauffeurs (BP), (02) réchauffeurs (HP) et la bêche alimentaire. L'alternateur est connecté au rotor de la turbine, et l'ensemble tourne à une vitesse réglée à 3000 tr/mn. [4]

I.4.2.1 Corps HP

Le corps HP le principal de la turbine est fabriqué en tonneau. Il est muni d'un étage dérégla pour ajuster les tuyères par groupe. [4]

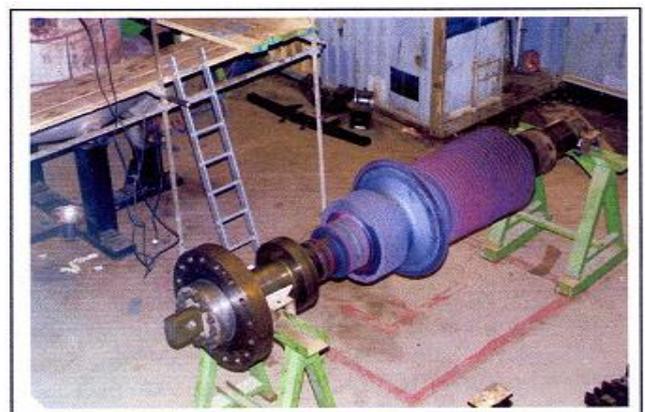
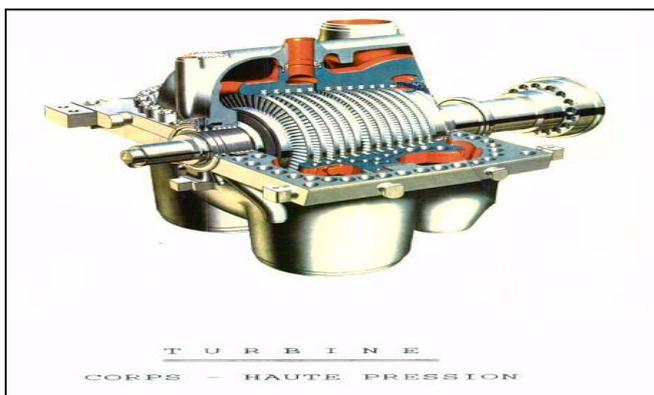


Figure I-4 : Corps HP [4]

I.4.2.2 Corps MP

Deux vannes d'interception et deux soupapes modératrices sont installées de manière symétrique de chaque côté du corps MP. Les soupapes modératrices reçoivent la vapeur resurchauffée qui est transportée par les tuyauteries après avoir traversé les vannes d'interceptions.[4]

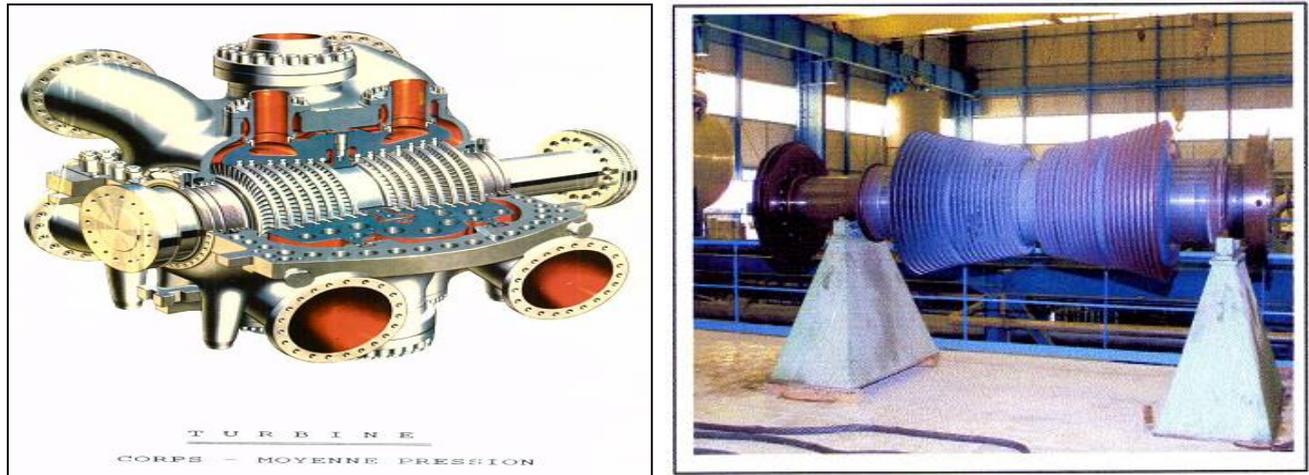


Figure I-5 : Corps MP[4]

I.4.2.3 Corps BP

Le corps BP se caractérise par un flux double. C'est une structure mécano-soudée qui comprend une structure principale et une double enveloppe. [4]

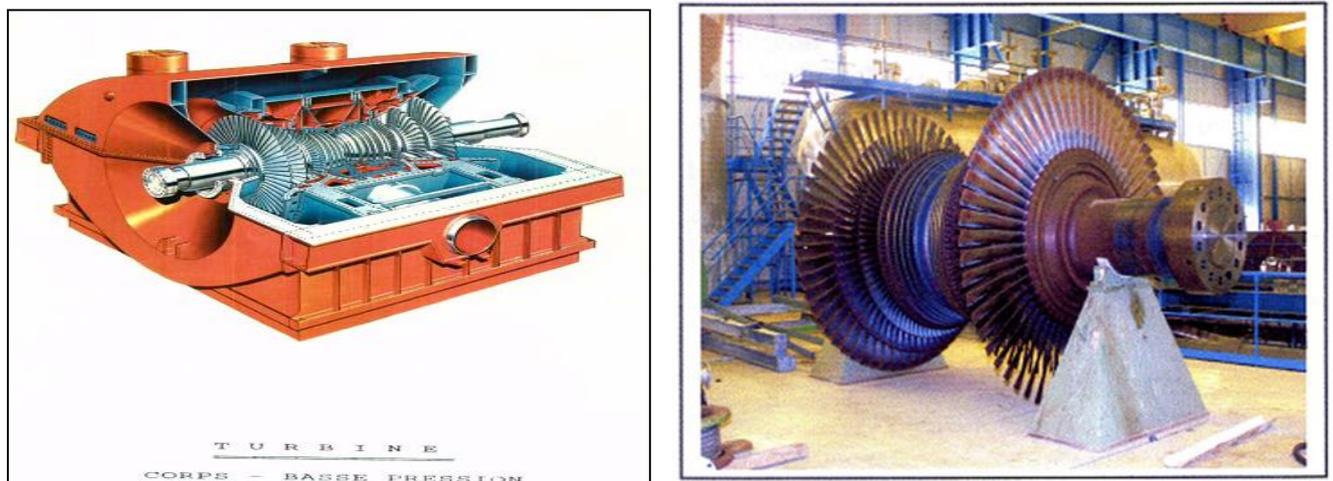


Figure I-6 : Corps BP [4]

I.4.3. Le condenseur

Le condenseur se trouve sous la partie BP de la turbine. Le condenseur est un échangeur de fluides séparés avec des faisceaux tubulaires de chaleur. Il a pour principale fonction :

- Garantir la condensation de la vapeur d'eau évacuée de la turbine par le biais de la circulation de l'eau de mer de refroidissement dans les 14850 tubes en titane présents dans le condenseur.
- Maximiser le rendement de la turbine en augmentant la chute d'enthalpie de la vapeur détendue en instaurant une dépression atmosphérique.
- Éliminer le gaz condensé et évacuer les substances non condensées (principalement de l'air)
- Reçoit également le condensat provenant des réchauffeurs BP

Plusieurs purges de vapeur de contournement (HP) sont incluses. Ses principales caractéristiques sont :

- Superficie de remplacement **10101m²**.
- Epaisseur des tubes de *0,7 mm*.
- Composants des tubes en titane.
- Le débit d'eau dans les tubes est de *1,8m/s*.
- Vitesse de vapeur de *98.25 kg/s*.
- Le flux d'eau de refroidissement atteint *6500 kg/s*.
- Un total de 14850 tubes.
- La taille des tubes est de *11490 mm*.
- L'enveloppe à vapeur a une longueur de *6700 mm*.
- Le condenseur à vide a une masse de *285,51 tonnes*.
- Pression de *0.05 bar* dans le condenseur.
- La température de refroidissement de l'eau est de *20°C*. [5]

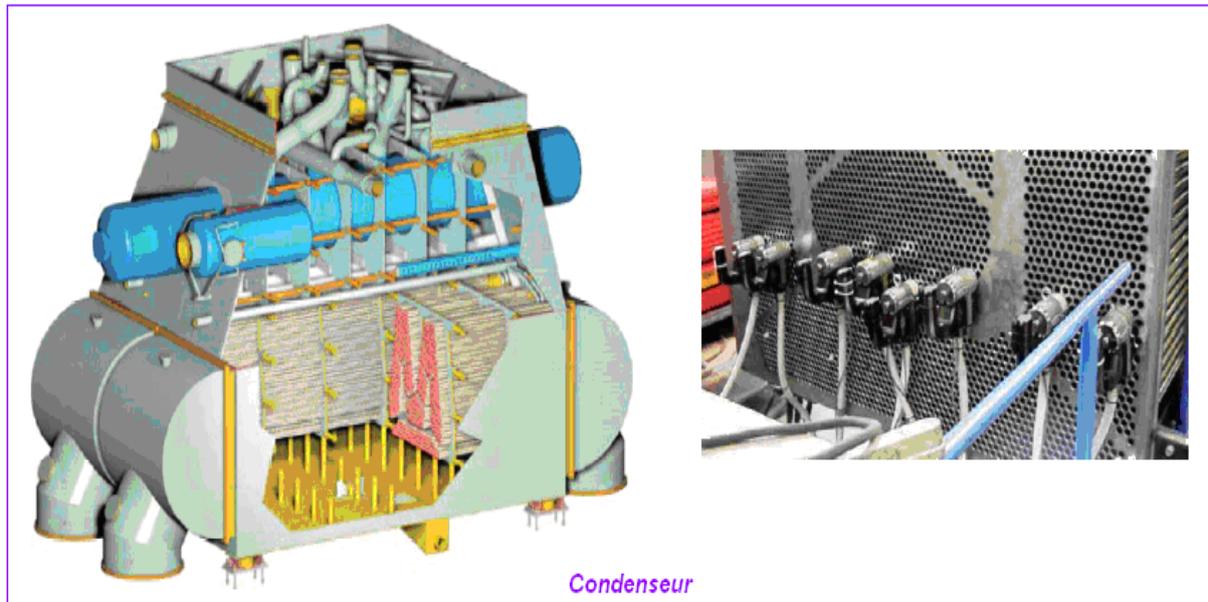


Figure I-7:Le condenseur [5]

I.4.4. Les pompes

L'eau est transportée du puits du condenseur jusqu'à la bêche alimentaire grâce à deux pompes d'extraction (une en service et l'autre en réserve), en passant par les trois réchauffeurs BP (avec un débit nominal de $414 \text{ m}^3/\text{h}$).

La chaudière est alimentée par trois pompes d'alimentation, dont deux sont en service et l'autre est en réserve, avec un débit d'une pompe de $261,6 \text{ m}^3/\text{h}$. [6]

I.4.5. La bêche alimentaire

Son rôle est de réchauffer et conditionner la pression à l'aspiration de la pompe alimentaire. C'est un réservoir cylindrique combiné avec le dégazeur. Il reçoit de l'eau à partir des pompes d'extraction qui traverse les réchauffeurs (basse pression) BP. Il reçoit également de la vapeur à partir du soutirage S4 (vanne) qui vient du corps MP (moyenne pression). L'eau se réchauffe jusqu'à la température de saturation correspondant à la pression du soutirage, en condensant la vapeur qui est prélevée à la turbine.. [4]



Figure I-8 : La bêche alimentaire [4]

I.4.6. Les réchauffeurs

I.4.6.1 Les trois réchauffeurs basse pression BP

Cela fonctionne comme des échangeurs de chaleur par surface. Ils sont alimentés par les soutirages S1, S2 et S3 du corps basse pression de la turbine et leur rôle est d'augmenter progressivement la température des condensats lors de leur transfert dans la bêche alimentaire. [4]

I.4.6.2 Les deux réchauffeurs haute pression HP

Ce sont des échangeurs de chaleur qui augmentent la température de l'eau lors de son transfert vers la chaudière. Ils ne sont pas alimentés par les soutirages HP5 et HP6 du corps de turbine à haute pression. [4]

I.4.7. L'alternateur

L'alternateur de la centrale de Ras-Djinet, est une *machine synchrone triphasée* qui transforme l'énergie mécanique produite par l'arbre de la turbine en énergie électrique dont le fonctionnement est basé sur la loi de l'induction électromagnétique. [3]

L'hydrogène circule en circuit fermé et présente des avantages par rapport à l'air pour le refroidir. Ces avantages incluent une faible densité et une grande conductibilité thermique, ce

qui permet de réduire les pertes de chaleur lors de la ventilation, ainsi que la chaleur dégagée par l'alternateur et la chaleur récupérée par l'eau d'alimentation. [4]

Ses caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant: [3]

Tableau 1.1 : Caractéristiques de l'alternateur de la centrale de Cap-Djinet

La puissance maximale produite	176 MW
Puissance nominale	220 MV
Puissance active	176 MW
Facteur de puissance	0,8 ($\cos Q$)
La tension	15.5 KV
La fréquence	50 Hz
L'intensité du courant	8195 A

L'alternateur doit être refroidit car cette transformation produit beaucoup de chaleur. Un circuit fermé à hydrogène est utilisé pour le refroidissement, qui est lui-même refroidi à l'eau déminéralisée. [4]



Figure I-9 : L'alternateur [4]

I.4.7.1 Principe de fonctionnement

L'alternateur fonctionne selon la loi de l'induction électromagnétique. Cette loi montre que quand on déplace un conducteur dans un champ magnétique, de façon à « couper » des lignes

de force, une tension est induite entre les extrémités du conducteur. Les lignes de force sont appelées flux magnétique du champ. La tension induite varie en fonction de la vitesse à laquelle les lignes de force sont coupées, et elle augmente proportionnellement à cette vitesse. Le courant obtenu est un courant alternatif, dont la courbe est sinusoïdale. Il change de sens plusieurs fois par seconde.

Les alternateurs alimentent les réseaux triphasés, dans lesquels l'énergie est distribuée avec 03 ou 04 fils. L'induit du stator se compose donc de 03 bobines décalées de 120° , dont les extrémités sont réunies sur un fil commun (montage en étoile).

Les trois tensions produites sont décalées d'un tiers de période dans les cas où le rotor ne porte qu'un électro-aimant (1 paire de pôle). L'alternateur synchrone est caractérisé par le rapport proportionnel entre la fréquence f et de la tension induite et sa vitesse n :

$$f = p n \quad (\text{I.1})$$

p : est le nombre de paires de pôles.

L'alternateur d'une fréquence de 50 Hz et d'une vitesse de 3000 tr/min est donc réalisé avec un rotor portant une paire de pôles (alternateur bipolaire).[4]

I.4.7.2 Constitution

L'alternateur comprend les principaux éléments suivants [3] : stator, rotor, réfrigérant, palier et étanchéité. Leur description est donnée ci-dessous :

I.4.7.2.1 Stator

Le stator est l'induit de l'alternateur (la partie fixe), le stator se compose des principales parties suivantes : L'enveloppe du stator, Pâlies flasques, Circuit magnétique, Enroulement du stator [3]

I.4.7.2.2 Rotor

Le rotor est l'inducteur de l'alternateur (c'est la partie tournante), le rotor se compose des principales parties suivantes : Arbre du rotor, Enroulement de rotor, Frettes du rotor, Ventilateur du rotor.[3]

I.4.7.2.3. Circuit de refroidissement par hydrogène

L'hydrogène circule en circuit fermé à l'intérieur de l'alternateur Il est refoulé par deux ventilateurs axiaux montés aux deux extrémités de l'arbre du rotor. Les ventilateurs aspirent l'hydrogène des réfrigérants. Le flux d'hydrogène se divise en trois parties au refoulement de chaque ventilateur comme le montre le schéma de circulation du gaz de refroidissement dans l'alternateur, ci-dessous :

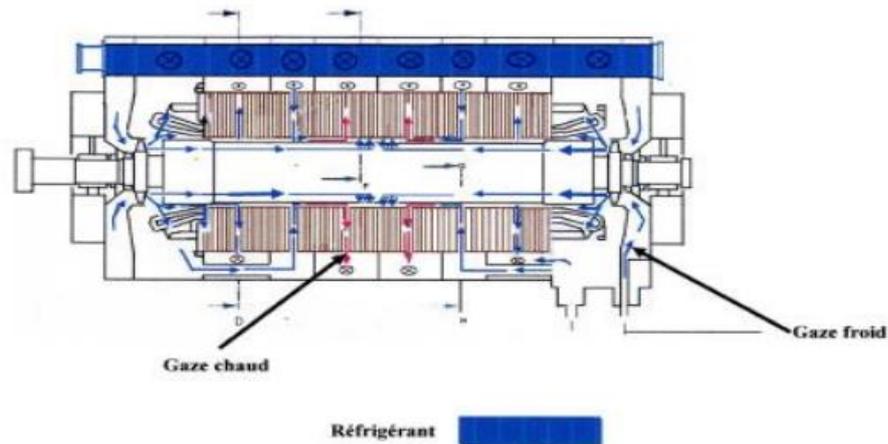


Figure I-10: Circuit de refroidissement par hydrogène[3]

I.4.7.2.4. Paliers de l'alternateur

Les paliers de l'alternateur sont logés dans les flasques et utilisent un système de graissage à circulation d'huile sous pression provenant du circuit de la turbine. Le demi-coussinet inférieur sphérique assure un ajustement automatique et est isolé électriquement pour prévenir les courants parasites. L'huile est acheminée par des canaux usinés dans le coussinet. Pour réduire le frottement au démarrage, un dispositif hydraulique soulève l'arbre du rotor, permettant à l'huile de former un film lubrifiant. La température des paliers est surveillée par des thermocouples. De plus, un système maintient la pression de l'huile d'étanchéité juste au-dessus de la pression interne de l'hydrogène pour garantir une bonne étanchéité.[3]

I.4.7.2.5 Etanchéité de l'arbre

L'arbre du rotor traverse l'enveloppe de l'alternateur à chacune de ses extrémités sans laisser échapper le gaz grâce au système d'étanchéité. Le système d'étanchéité de l'arbre du rotor de l'alternateur empêche la fuite de gaz, notamment d'hydrogène, en maintenant un film d'huile constant entre l'arbre et un anneau d'étanchéité flottant. Cet anneau, composé de métal

antifriction et monté avec un faible jeu, est alimenté en huile par un circuit fermé. La pression de cette huile est maintenue supérieure à celle de l'hydrogène pour assurer une étanchéité efficace. L'huile d'étanchéité et une huile d'équilibrage, injectée à travers des orifices, forment un film ininterrompu, crucial pour l'étanchéité entre l'arbre et l'anneau. La pression des huiles est réglée pour équilibrer la pression interne de l'hydrogène, assurant ainsi la fonctionnalité et la sécurité du système.[3]

I.5. Fonctionnement du circuit eau-vapeur de la centrale thermique

À un certain niveau, le puits du condenseur est rempli d'eau, ce qui équivaut à 900mm. L'eau est aspirée du puits du condenseur par la pompe d'extraction, puis elle est refoulée vers les réfrigérants d'hydrogène :

- En passant par trois réchauffeurs basse pression (BP), une pression de 18 bars sera acheminée vers la bêche alimentaire.
- En passant par les deux réchauffeurs haute pression (HP) et l'économiseur, l'eau est refoulée jusqu'au ballon chaudière, où elle est refoulée à une température de 284°C et une pression de 175 bars.
- En descendant vers les colonnes de descente en bas du ballon, l'eau se vaporise dans le foyer de la chaudière, puis revient au ballon sous forme d'émulsion (eau-vapeur). L'eau sera réutilisée dans le circuit de séparateurs cyclones, ce qui permettra de la séparer.
- Pendant que la vapeur traverse une série de trois surchauffeurs, elle atteint une température de 540°C et une pression de 155 bars.
- Le corps de la turbine sera chauffé à une température de 540°C et une pression de 155 bars par la vapeur surchauffée (vive). Elle sera réglée par les soupapes régulatrices et entraînera une rotation de la turbine à une vitesse de 3000 tr/min. Avec une température de 535 °C et une pression de 138 bars, la transformation est adiabatique et retournable.
- Après avoir quitté le corps (HP), la vapeur ressent une détente intense. Avant d'atteindre la pression moyenne (MP), elle doit passer par deux resurchauffeurs à haute pression afin d'atteindre une fois de plus les 540°C. Le cycle recommence lorsque la vapeur quitte le corps (MP) et se dirige directement vers le corps (BP) ou s'évacue vers le condenseur à une température de 33°C et une pression de 0,05 bars.

[4]

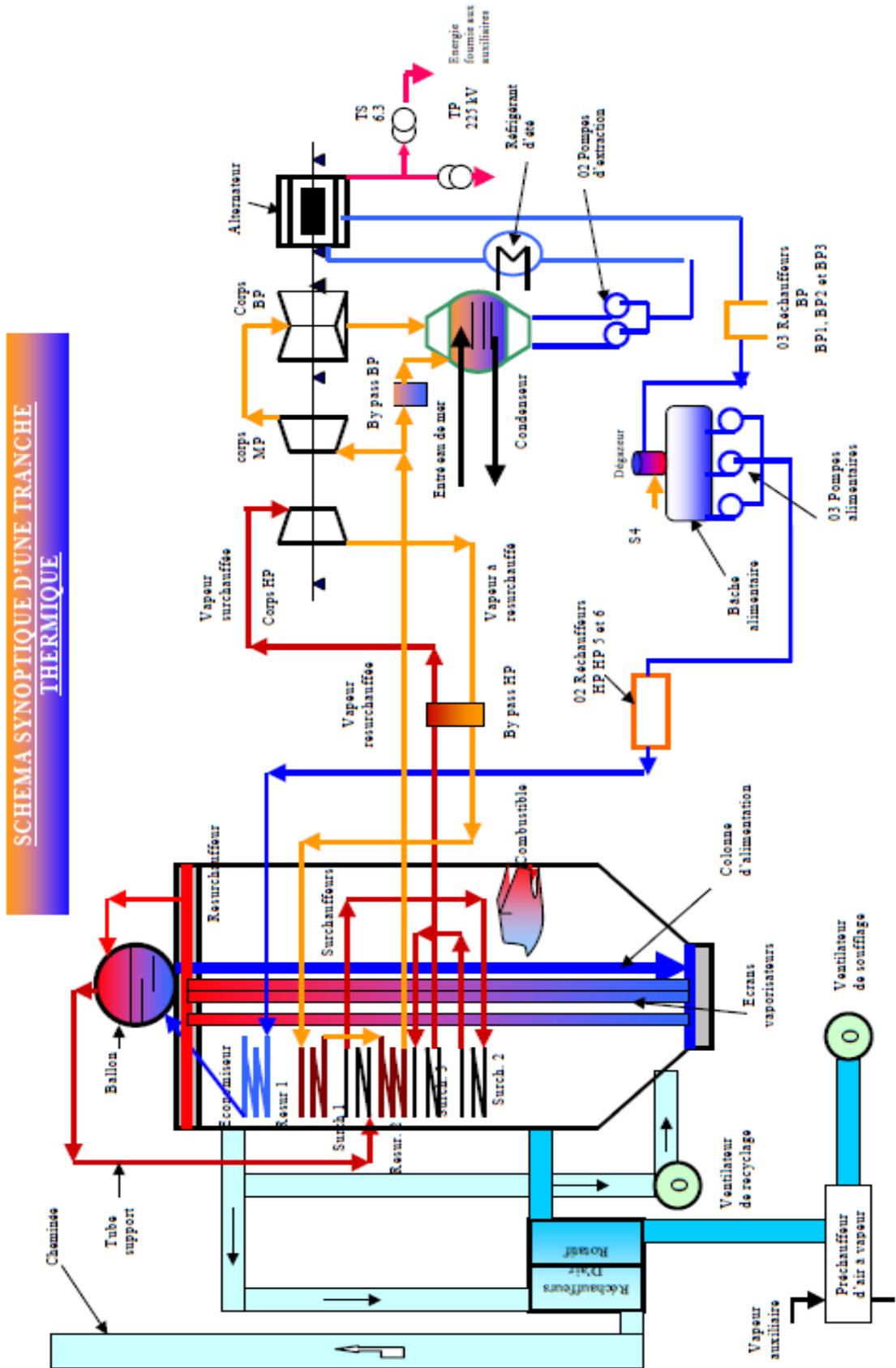


Figure I-11: Schéma principale de la composition d'une tranche thermique de la centrale de Ras-Djinet. [4]

I.6. Conclusion

La centrale thermique de Cap Djinet est une composante essentielle du paysage énergétique actuel. Cependant, elle est confrontée à des défis environnementaux importants qui nécessitent une attention continue. Les décisions prises concernant son fonctionnement futur auront un impact majeur sur la durabilité environnementale et la sécurité énergétique de la région.

Ce chapitre a permis d'aborder en détail les composantes essentielles de cette centrale thermique mettant en lumière son fonctionnement. L'un des objectifs majeurs recherchés à travers notre étude sera la régulation automatique en tension de l'alternateur de cette centrale, dont la modélisation mathématique sera développée dans le prochain chapitre.

Chapitre II :
Modélisation de la Machine Synchrone Triphasée

Chapitre II : Modélisation de la Machine Synchrones Triphasées

II.1 Introduction

La machine synchrone triphasée joue un rôle crucial dans plusieurs applications telles que : la génération d'énergie, la propulsion électrique, et la conversion d'énergie etc. Cette technologie se décline en divers types, chacun étant adapté à des utilisations spécifiques, reflétant la versatilité et l'importance de ces machines dans le secteur industriel

La modélisation de la machine synchrone triphasée, cependant, s'avère complexe. Elle nécessite l'élaboration d'un système d'équations mathématiques sophistiqué pour en permettre une analyse précise. Pour rendre cette tâche gérable, il est essentiel d'introduire des hypothèses simplificatrices et d'appliquer la transformation de Park.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons effectuer une étude générale de la machine synchrone triphasée et en particulier la *Machine Synchrones à Rotor Bobiné* (MSRB) en donnant sa modélisation mathématique. Des simulations du modèle développé seront réalisées sur Simulink/Matlab.

II.2 Présentation générale

La machine synchrone est une machine rotative électrique couramment employée dans différentes utilisations. Sa particularité réside dans sa régulation de la vitesse de rotation de son rotor et de la fréquence du courant électrique appliqué à son stator.

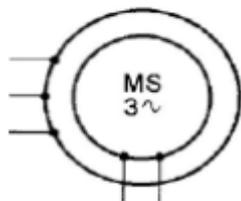


Figure II-1 : Machine synchrone [7]

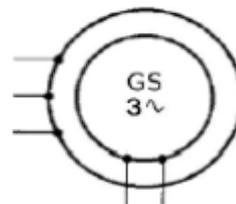
Le concept de machine synchrone englobe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est équivalente à celle du champ tournant. Afin d'atteindre une telle performance, le champ magnétique rotorique est produit soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Le champ magnétique du rotor est donc fixé par rapport au rotor, ce qui nécessite une vitesse de rotation constante entre le rotor et le champ tournant du stator pendant le fonctionnement normal. Effectivement, cette catégorie de machines comprend différentes catégories, allant de l'*alternateur* de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Cependant, la configuration de toutes ces machines est plutôt similaire. En général, le stator est composé de trois enroulements triphasés répartis, de sorte que les forces électromotrices produites par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales [7]

II.3 Symboles de la machine synchrone

Les symboles suivants sont employés pour représenter la machine synchrone, qu'elle soit utilisée comme moteur ou comme génératrice (alternateur) [8].



(a) Symbole d'un moteur synchrone triphasé à rotor bobiné



(b) Symbole d'un alternateur synchrone triphasé à rotor bobiné

Figure II-2 : Symboles de la Machine Synchrone [8]

II.4 Composition de la machine synchrone

Une machine synchrone est composée essentiellement du stator qui est la partie fixe de la machine, le rotor, quant à lui, est la partie mobile de la machine, des amortisseurs peuvent être intégrés à la structure ainsi que d'un circuit d'excitation qui est chargé de fournir le courant nécessaire pour créer le champ magnétique dans la machine.

II.4.1. Le stator

Le stator est constitué d'un circuit magnétique en forme de feuilles qui a un enroulement triphasé réparti dans des encoches. Il est constitué d'un bobinage distribué triphasé, de manière à ce que les forces électromotrices (f.é.m.) produites par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Les trois axes (a, b, c) de ce bobinage sont déphasés l'un par rapport à l'autre d'un angle électrique de 120° [9].



Figure II-3 : Stator de la machine synchrone [9]

II.4.2 Le rotor

En général, le rotor d'une machine est équipé d'un bobinage situé dans des encoches ou sur des pôles ouverts. Ce bobinage, qui est alimenté en permanence, joue le rôle d'inducteur de la machine en générant le champ magnétique nécessaire pour entraîner le balayage des conducteurs. Il est également possible de générer de l'excitation en utilisant des aimants montés en surface ou enterrés. Une autre variante spécifique ne possède pas de rotor excité et utilise les variations de réluctance. Dans notre étude, nous nous concentrerons principalement sur la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB).



Figure II-4 : Rotor de la machine synchrone [9].

Les MSRB peuvent être équipées soit d'un entrefer constant (pôles lisses), ou variable (pôles saillants). Les rotors à pôles saillants conviennent parfaitement aux machines ayant un grand nombre de paires de pôles et une vitesse de rotation basse ou moyenne, comme les alternateurs des centrales hydrauliques, dans ce cas, la machine a un diamètre plus grand que sa longueur. Les rotors à pôles lisses, quant à eux, sont destinés pour les machines avec un faible nombre de paires de pôles (une ou deux) et une vitesse de rotation élevée, comme les turbo-alternateurs des centrales classiques ou nucléaires ; la machine quant-à-elle, a une longueur nettement supérieure à son diamètre [9].

II.4.3 Les amortisseurs

Les amortisseurs sont des éléments présents dans les rotors bobinés des machines, qui sont souvent utilisés pour atténuer les mouvements brusques causés par les changements de fonctionnement. Ces amortisseurs consistent en des barres de cuivre placées dans des encoches autour des pôles et reliées entre elles pour former une cage similaire à celle d'un moteur asynchrone. Ils permettent également de démarrer la machine comme un moteur asynchrone. Dans les machines à rotor massif, l'effet d'amortissement est obtenu grâce à la circulation des courants de Foucault. Cependant, les moteurs à aimants n'ont pas besoin d'amortisseurs dans leur rotor, car ils sont constamment alimentés par une source électronique, ce qui assure leur stabilité de fonctionnement et leur démarrage en tant que moteur asynchrone [9].

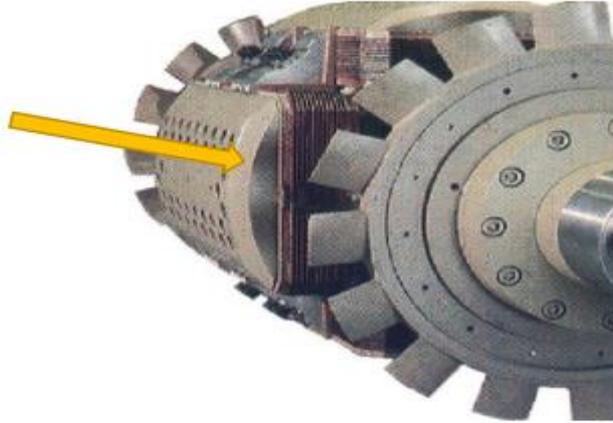


Figure II-5 : Les amortisseurs de la machine synchrone [9] .

II.4.4 Le circuit d'excitation

La bobine d'excitation de la MSRB est alimentée par une tension continue afin de générer une f.é.m. Il existe deux types de circuit d'excitation, nous citons :

- a. Excitation par source de tension continue extérieure : Dans ce cas de figure, un redresseur est généralement utilisé pour générer une tension continue, qu'il soit connecté au réseau pour un moteur ou à sa sortie pour un alternateur. Un dispositif de bagues et de balais garantit la connexion avec le moteur. Cependant, ce genre de dispositif comporte des désavantages, notamment en raison de la maintenance plus exigeante associée à la présence de contacts mobiles.
- b. Excitation par un alternateur auxiliaire et un redresseur : Pour éviter l'utilisation d'un système de bagues et de balais, on peut utiliser un alternateur inversé pour générer l'excitation. Cela signifie qu'un alternateur avec un induit rotatif est fixé à l'arbre de la machine principale, tandis que l'inducteur est fixe. L'excitation de l'inducteur de la machine principale est directement alimentée par un redresseur à diodes situé sur la partie tournante. Cependant, ce schéma doit faire face à des contraintes mécaniques importantes, en particulier à des vitesses de rotation élevées. Les machines connectées au réseau électrique principal sont alimentées par un redresseur connecté directement au réseau, mais les diodes sont situées sur la partie fixe du système. Cela permet d'obtenir une configuration autonome lorsque la machine principale est un alternateur qui ne fonctionne pas [8].

II.5 Les types de machines synchrones

Les machines synchrones sont divisées en plusieurs catégories : machine synchrone à rotor bobiné, machine synchrone à aimant permanent et machine synchrone à double excitation (MSDE)

II.5.1 Machine synchrone à Rotor bobiné

Cette catégorie de machines est composée d'un rotor qui est équipé de bobines. Ces bobines sont alimentées par des courants continus grâce aux contacts glissants entre les balais et les bagues, ce qui permet de générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. Deux catégories de machines synchrones à rotor bobiné sont identifiées : Les machines utilisant des pôles lisses et des pôles saillants [10].

II.5.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants

L'enroulement inducteur monophasé de ces machines est composé de bobines enroulées autour de pôles ferromagnétiques et mises en série pour garantir l'alternance des pôles. En modifiant la forme de l'épanouissement polaire, on ajuste la répartition de l'induction dans l'entrefer pour qu'elle soit similaire à une sinusoïde. La particularité de cette structure réside dans sa facilité de mise en place et de maintenance. Cependant, en raison de problèmes mécaniques, elle est généralement réservée à des applications où la vitesse ne dépasse pas 1000 tr/min. L'étude de ces machines présente principalement des difficultés en raison de l'anisotropie géométrique (entrefer variable), ainsi que de la magnétique du rotor. Cela entraîne une dépendance des différentes mutuelles et de la plupart des inductances à la position θ du rotor par rapport au secteur. La réaction de la machine varie donc en fonction de son état de charge [10].

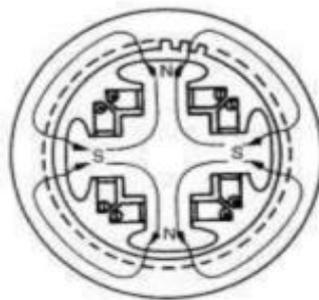


Figure II-6 : Rotor d'une machine synchrone à pôle saillant [10]

II.5.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné à pôles lisse

Ce genre de machine est couramment employé dans des applications nécessitant une puissance élevée et une grande vitesse. Il est possible d'utiliser des frettes en acier amagnétique pour maintenir les têtes de bobines en position. Les machines à pôles lisses se distinguent par la distance constante entre les deux parties ferromagnétiques du stator et/ou du rotor le long de la périphérie de l'entrefer ; l'encochage du stator et/ou du rotor est considéré comme un entrefer constant en termes de magnétique.

Les machines synchrones bipolaires ou tétras polaires utilisent un rotor à pôles lisses qui tourne à des vitesses de 3000 ou 1500 tr/mn. Il n'est pas recommandé d'utiliser un rotor à pôles saillant pour de telles machines en raison des problèmes rencontrés lors de la fixation des enroulements d'excitation concentrés en cas de petit nombre de pôles (en particulier dans les machines bipolaires). C'est la raison pour laquelle les machines bipolaires et tétra polaires fonctionnent uniquement avec des rotors lisses, même si les rotors à pôles saillants sont moins coûteux. En général, on injecte le courant inducteur au rotor en utilisant des bagues sur lesquelles des balais frottent [10].

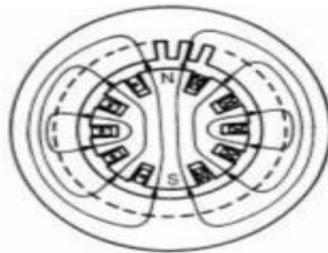


Figure II-7 : Machine synchrone à rotor bobiné avec rotor à pôles lisses [10].

II.5.2 Machine Synchrone à aimant permanent (MSAP)

La partie tournante des machines synchrones à aimant permanent est également équipée d'aimants permanents. Le stator est composé d'un enroulement triphasé distribué sinusoïdalement. En ce qui concerne son fonctionnement, il repose sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor, d'où le nom des machines synchrones à aimants permanents. Il est possible de construire des MSAP en utilisant différentes configurations rotoriques [10]. Leur classification globale en termes de placement des aimants est le suivant :

- Aimants en surface

- Aimants insérés
- Aimants enterrés
- Aimants à concentration de flux

II.5.3 Machine synchrone à double excitation (MSDE)

Ce genre de machines font partie d'une catégorie de machines synchrones. Si elles sont correctement dimensionnées, celles-ci offrent alors les bénéfices des machines à aimants permanents en améliorant le rendement. Et elles offrent de la souplesse de commande grâce au contrôle du flux d'excitation des machines à excitation bobinée.

La présence d'une seconde source électromagnétique (bobinages) dans cette famille de machines permet de réguler le flux d'énergie généré par les aimants permanents. Selon la configuration des aimants permanents et des sources auxiliaires, on peut classer les MSDE en machines parallèles et machines séries. [12]

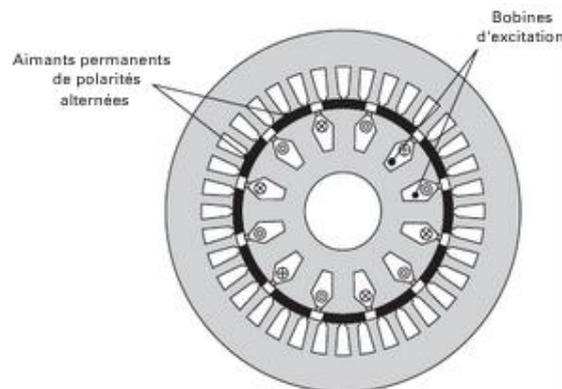


Figure II-8 : MSDE série avec sources d'excitation au rotor [12]

II.6 Principe de fonctionnement de la machine synchrone

La machine synchrone a la capacité de changer de mode, qu'elle soit en mode alternateur ou en mode moteur. Son fonctionnement dans les deux cas est décrit comme suit :

II.6.1 Fonctionnement en alternateur

L'inducteur sur le rotor entraîné par une turbine qui tourne à une vitesse n_s , génère un champ tournant à la même vitesse dans l'entrefer de la machine. Selon la loi de Faraday, chaque modification des champs magnétiques à travers une bobine fabriquée aux bornes de la bobine est considérée comme une $feme(t)$ induite. De cette manière, ce champ de rotation produit aux bornes de l'inducteur (stator) [13].

La vitesse n_s du rotor et du champ tournant est identique. Ils sont en conjonction. La relation suivante relie la fréquence f de la fem du courant de l'induit (stator) à la vitesse de synchronisme n_s :

$$n_s = f/p \quad (\text{II.1})$$

n_s : vitesse de rotation du champ tournant en tr/s

f : Fréquence des courants alternatifs en Hz

p : Nombre de paires de pôles

La vitesse de la turbine qui l'entraîne, détermine le nombre de pôles. Si le sens de rotation du rotor est inversé dans un alternateur, cela entraîne une modification de l'ordre de succession des phases du système triphasé de tensions créé au stator.

La fem induite : L'enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. $e(t)$ de valeur efficace E [13].

$$E = K \Phi n_s \quad (\text{II.2})$$

E : fem Induit (v)

K : Constante globale (caractéristique du moteur)

Φ : Flux maximum à travers un enroulement (Wb)

L'enroulement du stator est disposé de telle façon que la f.é.m. $e(t)$ soit le plus possible deforme sinusoïdale.

$$K = 2.22k_d k_f \quad (\text{II.3})$$

k_d : Facteur de distribution voisin de 0,7

k_f : Facteur de forme voisin de 1,05

$K = 2.22$ est idéal.

En réalité $K = 2.22$ car les spires sont bobinées sur plusieurs encoches, elles n'embrassent pas le même flux (facteur d'enroulement k_{d1} en général)

II.6.2 Fonctionnement en moteur

Les courants alternatifs de fréquence f dans l'inducteur (stator) génèrent un champ magnétique qui tourne à la vitesse n_s dans l'entrefer de la machine. Le mouvement du rotor, qui est soumis à un champ magnétique constant, suit le mouvement du champ à la même vitesse n_s . Le stator reçoit une alimentation triphasée qui génère un champ de rotation. Les bobinages du rotor sont alimentés en continu, ce qui entraîne une aimantation du rotor. Le rotor se déplace à la même vitesse que le champ qui tourne, ce qui signifie que $\Omega = \Omega_s$

Pour changer le sens de rotation du rotor dans un moteur synchrone, il suffit d'inverser deux phases du bobinage triphasé. Les deux champs (l'un formé par l'aimant en forme d'U, l'autre formé par le petit aimant) sont en mouvement à la même vitesse. Néanmoins, la distance entre ces deux zones de rotation diffère en fonction de la charge du moteur. La machine synchrone crée donc, un couple directement en raison de l'interaction entre ces deux champs [13].

II. 7 Modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Nous allons examiner à travers cette partie, la conception de la machine synchrone traditionnelle, dont le modèle de référence est actuellement assez bien établi. Selon une perspective électromagnétique

Il y a p paires de pôles au rotor et un enroulement statorique triphasé, avec des enroulements a, b etc. Le rotor de la machine présente un enroulement inducteur en fonction de l'axe de la saillance, également connu sous le nom d'axe direct ou axe longitudinal de la machine (enroulement F "field").

Deux circuits amortisseurs équivalents sont utilisés pour représenter la présence de grilles ou de cages d'amortissement au rotor, ainsi que l'éventuel effet amortisseur du fer. L'un est situé sur l'axe direct (enroulement D) et l'autre sur l'axe perpendiculaire appelé axe en

quadrature ou axe transversal de la machine (enroulement Q). Les amortisseurs empêchent toute fluctuation rapide du flux à travers la cavité [14].

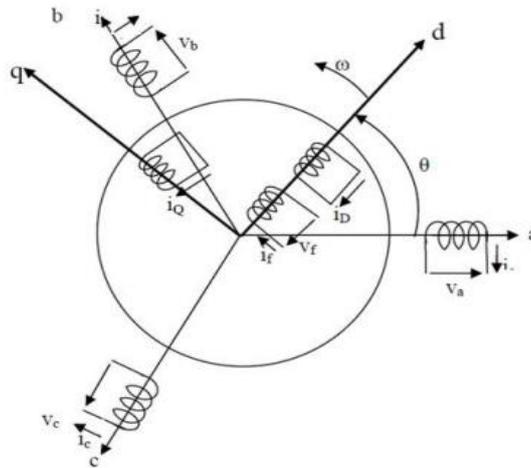


Figure II-9 : Schéma de la MSR dans le repère a, b et c [14]

II.7.1 Equations des tensions

La machine peut être décrite dans le repère abc en utilisant la convention {récepteur} pour le rotor et la convention {générateur} pour le stator, en utilisant les équations suivantes [14] :

II.7.1.1 Tensions statoriques

Les tensions statoriques sont les tensions de l'induit (stator), celles-ci sont données comme suit :

$$\begin{cases} v_a = -R_s i_a - \frac{d\phi_a}{dt} \\ v_b = -R_s i_b - \frac{d\phi_b}{dt} \\ v_c = -R_s i_c - \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

II.7.1.2 Tensions rotoriques

Les tensions rotoriques sont les tensions de l'inducteur (rotor), celles-ci sont données comme suit :

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 = R_q i_q + \frac{d\phi_q}{dt} \\ 0 = R_d i_d + \frac{d\phi_d}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

R_s : Résistance d'une phase statorique

R_q : Respectivement, résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et d'axe q.

φ_k : Flux d'induction traversant l'enroulementk. (k = a, b, c, f, D, Q).

Les tensions appliquées aux circuits D et Q sont nulles, puisqu'ils sont en court-circuit.[14]

II.7.2 Expressions des flux

Afin de trouver la représentation d'état du modèle de la génératrice nous adopterons les écritures suivantes :

$$\varphi_s = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}; \varphi_r = \begin{bmatrix} \varphi_f \\ \varphi_D \\ \varphi_Q \end{bmatrix}; i_s = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad ; \quad i_r = \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} L_{ss} = \begin{bmatrix} L_a(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ba}(\theta) & L_b(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ca}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$M_{sr} = \begin{bmatrix} M_{af}(\theta) & M_{ad}(\theta) & M_{aq}(\theta) \\ M_{bf}(\theta) & M_{bd}(\theta) & M_{bq}(\theta) \\ M_{cf}(\theta) & M_{cd}(\theta) & M_{cq}(\theta) \end{bmatrix} \quad M_{rs} = \begin{bmatrix} M_{af}(\theta) & M_{bf}(\theta) & M_{cf}(\theta) \\ M_{ad}(\theta) & M_{bd}(\theta) & M_{cd}(\theta) \\ M_{aq}(\theta) & M_{cb}(\theta) & M_{cq}(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Grâce à ces expressions, les relations entre flux et courants peuvent être réécrite de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}(\theta) & M_{sr}(\theta) \\ -M_{rs}(\theta) & L_{rr}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Sous forme matricielle les équations de tensions sont écrites comme suit :[14]

$$V = RI + \frac{d}{dt}(\varphi) \leftrightarrow \begin{pmatrix} v_s \\ v_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Telles que :

$$v_s = [v_a \quad v_b \quad v_c]^T; v_r = [v_f \quad 0 \quad 0]^T \quad (\text{II.11})$$

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} R_r = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{pmatrix} v_s \\ v_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} -L_{ss}(\theta) & M_{sr}(\theta) \\ -M_{rs}(\theta) & L_{rr}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \right) \quad (\text{II.13})$$

II.7.3 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park (dqo)

La transformation de Park implique la transformation des enroulements des phases a, b, c , de la machine originelle en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon les axes d et q . Cette transformation a pour effet de rendre, les inductances mutuelles du modèle de l'alternateur (génératrice), indépendantes de la rotation [15].

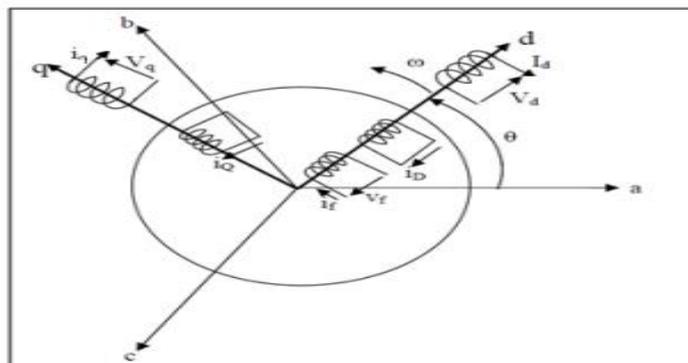


Figure II.10. : Schéma de la machine synchrone en diphasé (référentiel dqo)[15].

II.7.3.1 La matrice de Park

Dans la transformation de Park, on définit une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux, à savoir : [15]

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Le coefficient $\frac{2}{3}$ correspond à un changement naturel de bases dans des repères orthonormés. Ce type de changement de base présente également l'avantage d'obtenir une matrice de transformation inverse qui est transposée de la matrice de transformation direct.

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

On a ainsi :

$$[i_{dqo}] = [p(\theta)] [i] \quad (\text{II.16})$$

$$[V_{dqo}] = [p(\theta)] [v] \quad (\text{II.17})$$

$$[\varphi_{dqo}] = [p(\theta)] [\varphi] \quad (\text{II.18})$$

II.7.3.2 Equations des tensions

Dans le repère de Park, la machine synchrone en mode génératrice est régie par les équations de tensions suivantes [16] :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & -R_s \end{bmatrix} P^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + P \frac{d}{dt} + P^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} \frac{d}{dt} + P^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} + PP^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r & 0 \\ \omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Par conséquent, les tensions de la machine synchrone à rotor bobiné dans le fonctionnement alternateur sont données par les expressions suivantes [15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = -R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} + \omega_r \varphi_q \\ V_q = -R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_r \varphi_d \\ V_o = -R_s i_o + \frac{d\varphi_o}{dt} \\ V_f = R_f i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \\ V_D = R_D i_D + \frac{d\varphi_D}{dt} \\ V_Q = -R_Q i_Q + \frac{d\varphi_Q}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.22})$$

II.7.3.3 Equations de flux

En appliquant la transformée dq aux équations de flux, on obtient : [15]

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} = [P][\varphi_{abc}] = [P][L_{ss}][P^{-1}] \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + [P][M_{sr}] \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

En faisant appel aux équations d'inductances développées précédemment, on aura :

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 0 \\ 0 & -L_q & 0 \\ 0 & 0 & -L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & 0 & M_{Qq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Où

L_d : Inductance synchrone longitudinale.

L_q : Inductance synchrone transversale.

L_0 : Inductance homopolaire.

M_{Fd} : Inductance mutuelle entre inducteur F et bobinage d.

M_{Dd} : Inductance mutuelle entre amortisseur D et bobinage d.

M_{Qq} : Inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et bobinage q.

En exprimant dans la matrice des flux rotoriques les inductances par leur expression en fonction de θ , on obtient :

$$\begin{bmatrix} \varphi_f \\ \varphi_D \\ \varphi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_{fd} & 0 & 0 \\ -M_{Dd} & 0 & 0 \\ 0 & -M_{Qq} & -L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{Df} & L_D & M_{Qq} \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Où ;

L_F : Inductance propre de l'inducteur.

L_D : Inductance propre de l'amortisseur D.

L_Q : Inductance propre de l'amortisseur Q.

M_{FD} : Inductance mutuelle entre inducteur F et amortisseur D.

Donc, les expressions des flux statoriques et rotoriques s'écrivent dans le modèle de Park sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_d = -L_d i_d + M_{fd} i_f + M_{fDd} i_D \\ \varphi_q = -L_q i_q + M_{Qq} i_Q \\ \varphi_f = L_f i_f - M_{fd} i_d + M_{fD} i_D \\ \varphi_D = L_D i_D - M_{Dd} i_d + M_{fD} i_f \\ \varphi_Q = L_Q i_Q - M_{Qq} i_q \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

En remplaçant les équations des flux obtenues dans les équations de tensions de Park, on obtient l'écriture matricielle suivante [15]:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \\ i'D \\ i'Q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \\ i'D \\ i'Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$$R = \begin{bmatrix} -R_s & \omega L_q & 0 & 0 & -\omega M_{Qq} \\ -\omega L_d & -R_s & \omega M_{Fd} & \omega M_{Dd} & 0 \\ 0 & 0 & R_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$$L = \begin{bmatrix} -L_q & 0 & M_{Fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{Qq} \\ -M_{Fd} & 0 & L_F & M_{Fd} & 0 \\ -M_{Dd} & 0 & M_{Fd} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{Qq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

II.7.4 Alternateur en charge

En utilisant une charge RL couplée en étoile pour exprimer le modèle de la charge et à réaliser le couplage, les tensions dans le repère de Park sont données comme suit [16]:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c & -\omega L_c \\ \omega L_c & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_c & 0 \\ 0 & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

En mode générateur, V_d et V_q changent de signes, où le changement de signe est effectué au niveau de la charge. Donc

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_c & \omega L_c \\ -\omega L_c & -R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_c & 0 \\ 0 & -L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Où

V_d, V_q : Tensions statoriques de la machine dans le repère de Park.

R_c, L_c : Paramètres de la charge.

ω : Pulsation électrique de la machine.

I_d, I_q : Courants traversant la charge en convention récepteur.

Grâce à l'équation(II.30) nous pouvons récrire l'équation générale de la machine comme suit :
[16]

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_o \\ i_Q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_o \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega(L_q - L_c) & 0 & 0 & -\omega M_{Qq} \\ \omega(L_c - L_d) & R_c - R_s & \omega M_{Fd} & \omega M_{Dd} & 0 \\ 0 & 0 & R_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} -L_q - L_d & 0 & M_{Fd} & M_{Dd} & 0 \\ 0 & L_c - L_q & 0 & 0 & M_{Qq} \\ -M_{Fd} & 0 & L_F & M_{Fd} & 0 \\ -M_{Dd} & 0 & M_{Fd} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{Qq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

II.7.5 Expression du couple électromécanique

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

$$T_{em} = \frac{p_{em}}{\Omega} = \frac{3}{2} p (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{Nm}) \quad (\text{II.35})$$

Où :

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

$\Omega = \frac{\omega_r}{p}$: est la vitesse angulaire du rotor en rad/s.

p : Nombre de paires de pôles

Le couple électromécanique est positif lorsque le fonctionnement est en mode moteur et négatif lorsque le fonctionnement est en mode la génératrice [17].

II.7.6 Equation mécanique

L'équation qui définit le mouvement du rotor est :

$$T_{em} + T_{mec} - T_{amor} = J \frac{d\Omega}{dt} \text{ (Nm)} \quad (\text{II.36})$$

Le rotor est orienté dans la direction de rotation du couple électromécanique T_{em} et du couple mécanique T_{mec} . En revanche, la direction de rotation du rotor est inversée par le couple d'amortissement T_{amor} [17].

II.8 Modèle (dq) de la génératrice synchrone à rotor bobiné sur Simulink/Matlab (essai à vide)

La modélisation et la simulation des alternateurs synchrones sont essentielles pour comprendre et optimiser leur fonctionnement dans différentes conditions. Dans cette partie, nous nous concentrons sur la modélisation d'une génératrice à rotor bobiné en utilisant le modèle (dq) sur MATLAB Simulink, avec un essai à vide. Ce modèle permettra d'analyser le comportement de la génératrice dans des conditions d'absence de charge, fournissant ainsi des informations précieuses pour son fonctionnement optimal.

II.8.1 Modèle de simulation

Pour le modèle d'équation (dq) simplifié suivant :

$$\begin{cases} V_d = -RI_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \left(\frac{d\theta}{dt}\right) \varphi_q \\ V_q = -RI_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \left(\frac{d\theta}{dt}\right) \varphi_d \\ V_f = R_f I_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

$$\begin{cases} \varphi_d = -L_d I_d + M_f I_f \\ \varphi_q = -L_q I_q \\ \varphi_f = L_f I_f - M_f I_d \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Nous substituons φ_d et φ_q et φ_f du système d'équation (II.38) dans les équations (II.37), nous obtenons :

$$\begin{cases} V_d = -RI_d - L_d \frac{dI_d}{dt} + M_f \frac{dI_f}{dt} + \omega L_q I_q \\ V_q = -RI_q - L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega(-L_d I_d + M_f I_f) \\ V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} - M_f \frac{dI_d}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Nous représentons ces équations sous forme de matrices pour plus de simplicité :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_f \\ 0 & -L_q & 0 \\ -M_f & 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 \\ -L_d & 0 & M_f \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_f \\ 0 & -L_q & 0 \\ -M_f & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Qui peut s'écrire par l'écriture simplifiée suivante :

$$[V] = -[R][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] + \omega [A][I] \quad (\text{II.42})$$

Puisque nous simulons un essai à vide On a : $I_d=0$ et $I_q = 0$

Donc, le système d'équation (II.40) devient:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_f \\ 0 & -L_q & 0 \\ -M_f & 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 \\ -L_d & 0 & M_f \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Nous utilisons la forme matricielle ci-dessous pour avoir des simulations plus simples :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \end{bmatrix}}_R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_f \\ 0 & -L_q & 0 \end{bmatrix}}_L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} + \omega \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 \\ -L_d & 0 & M_f \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} - M_f \frac{dI_d}{dt} \quad (\text{II.45})$$

L'équation (II.45) peut aussi se mettre sous la forme suivante :

$$V_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M_f & 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

Les paramètres que nous avons utilisés pour réaliser l’essai à vide sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Paramètres de la MSRB utilisés pour la simulation [15]

V_f	220 v
R_s	0.48Ω
p	3
R_f	10 Ω
M_f	0.05 H
L_d	0.0231 H
L_q	0.0924 H

Nous dressons le schéma de simulation sur Matlab/Simulink ci-dessous :

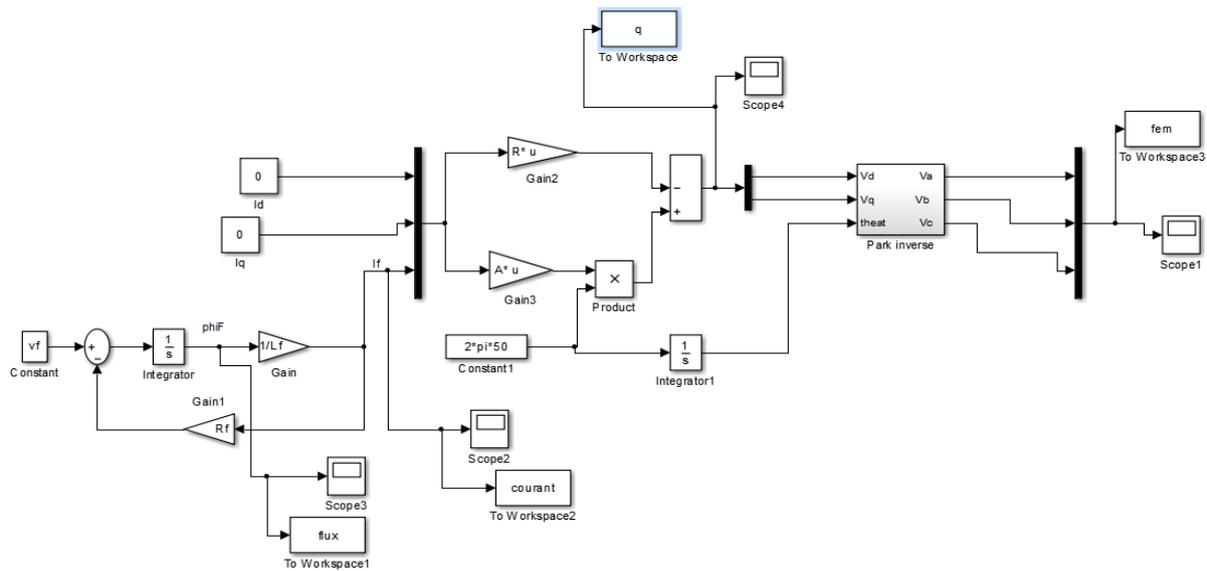


Figure II.11 : Schéma block du modèle (dq) de la génératrice synchrone à rotor bobiné sur Matlab/Simulink

II.8.2. Résultats de simulation

Dans cette partie, nous donnons les réponses du flux, du courant et des tensions, pour un essai à vide :

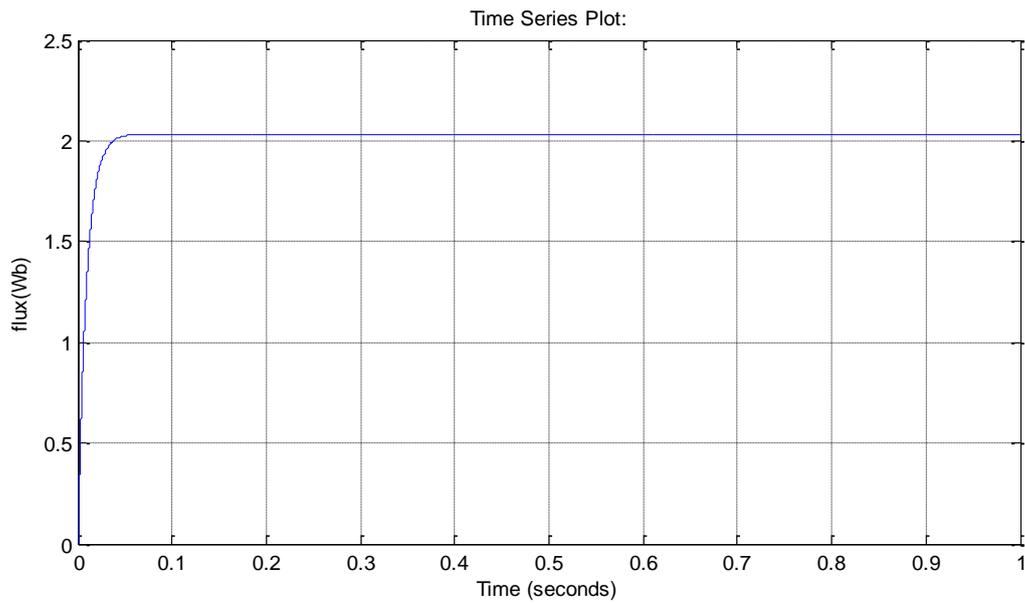


Figure II.12 : Réponse du flux ϕ_f en fonction de temps

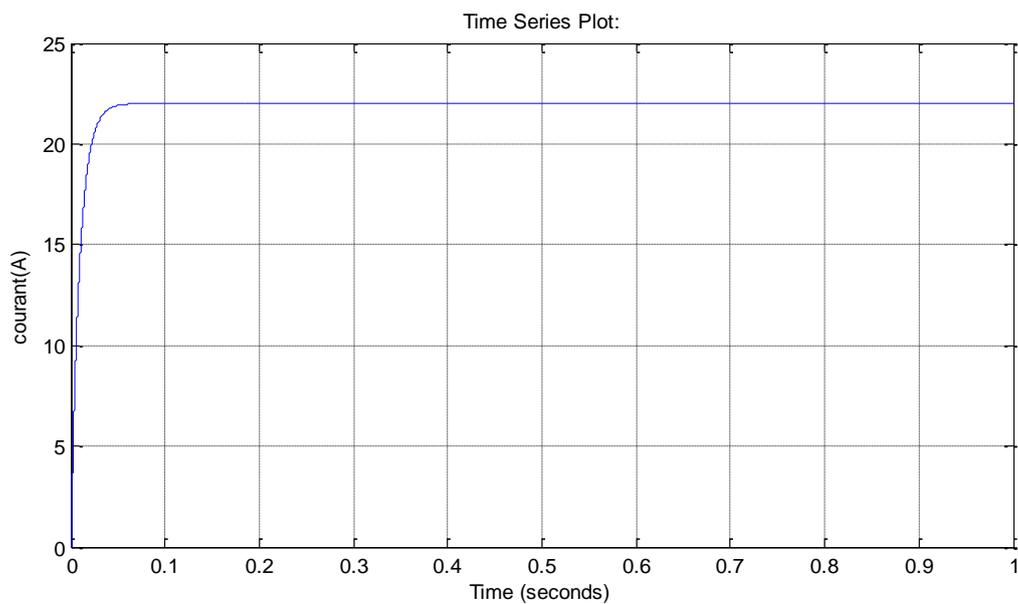


Figure II.13 : Réponse du courant i_f en fonction de temps

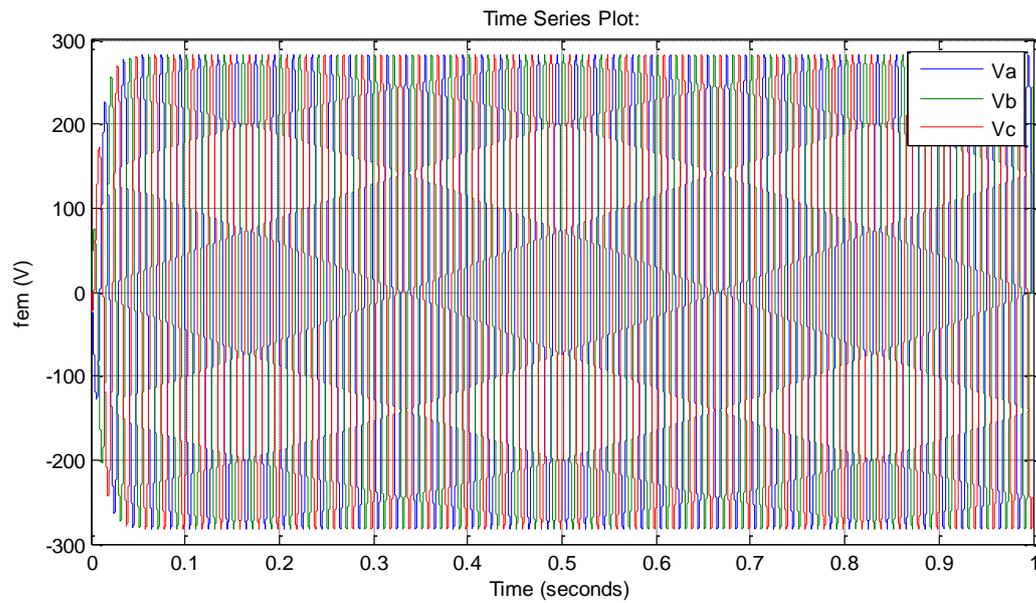


Figure II.14 : Les tensions statoriques ($V_{a,b,c}$) par la transformée inverse de Park en fonction de temps

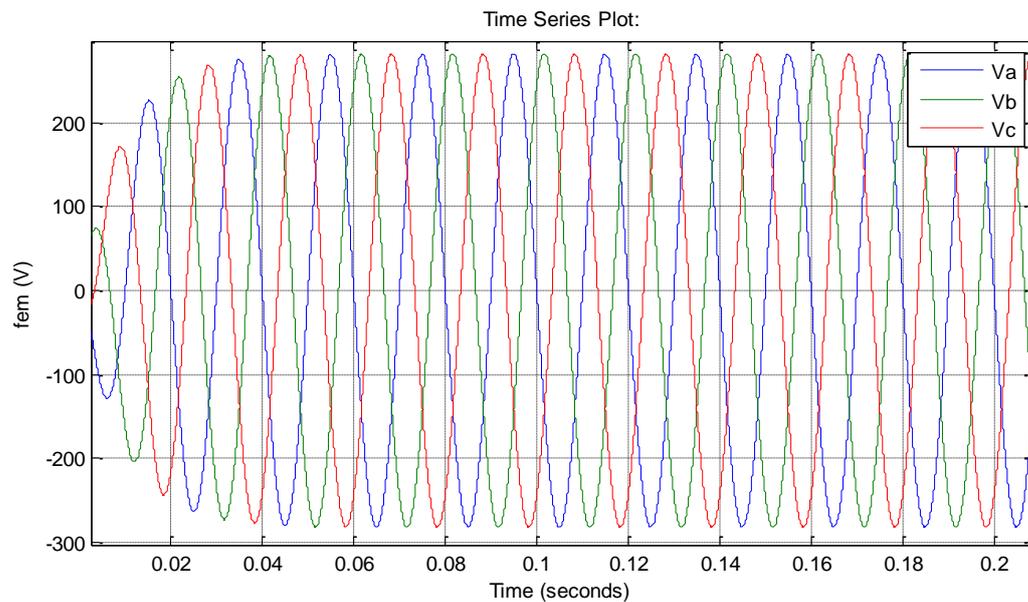


Figure II.15 : Zoom sur les tensions statoriques ($V_{a,b,c}$) en fonction de temps

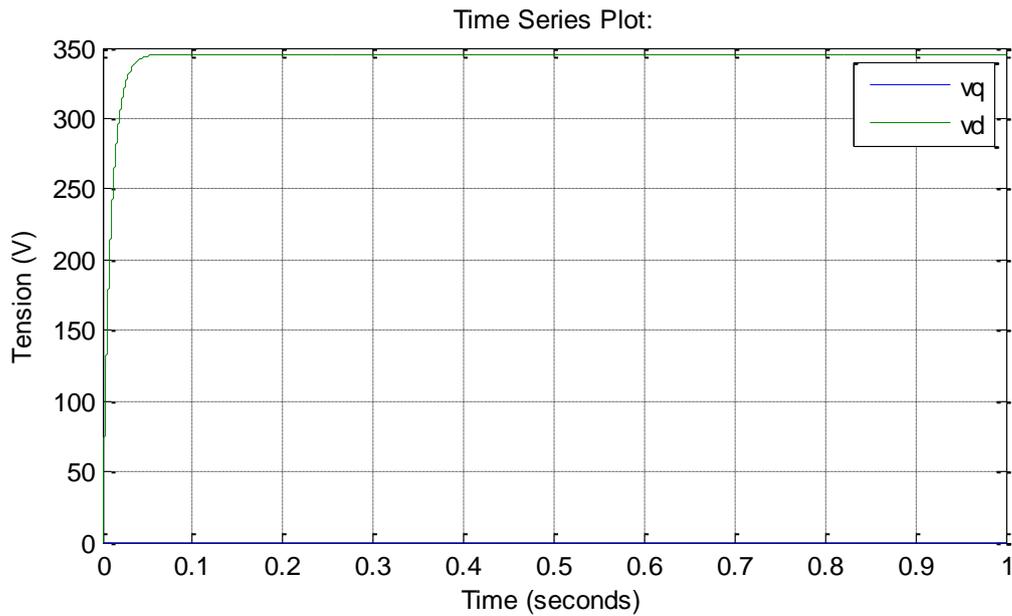


Figure II.16 : Réponse des tensions (V_d, V_q) en fonction de temps

II.9 Conclusion

La modélisation de la machine synchrone triphasée est une étape essentielle pour comprendre en profondeur le fonctionnement et les performances de cette dernière. Grâce à une analyse détaillée de sa composition ainsi que de son fonctionnement, il est possible de mettre en lumière ses différents types, et d'explorer ses diverses applications dans l'industrie. Ainsi, la compréhension approfondie de cette machine permet de tirer le meilleur parti de ses capacités et de concevoir des systèmes plus efficaces et performants à commander. En somme, dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu complet de la machine synchrone en se basant sur son mode de fonctionnement en mode génératrice (alternateur) et sa modélisation simplifiée sur MATLAB/Simulink, pour un essai à vide.

Le chapitre suivant, mettra en avant l'étude et l'élaboration d'une régulation automatique de tension (AVR) de cette machine, en mode alternateur qui est l'élément crucial de notre étude au sein de la centrale thermique de Cap-Djanet.

Chapitre III :

Etude de la régulation de tensions de l'alternateur

Chapitre III : Etude de la régulation de tensions de l'alternateur

III.1. Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous allons dresser une description générale de la situation actuelle de la régulation de tension de l'alternateur disponible au niveau de la station de Cap-Djinet. Nous allons pour cela, explorer en détail les différentes méthodes de régulation utilisées actuellement dans cette centrale, notamment les approches P, PI. Cette étude introductive, nous permettra de mieux comprendre les enjeux et les principes clés de la régulation de tension et ceci dans le but de l'amélioration du dispositif de contrôle et de régulation de l'alternateur.

La régulation de la tension des alternateurs est un défi complexe, qui nécessite de prendre en compte de nombreux facteurs tels que les variations de charge, les perturbations du réseau et les conditions environnementales. La méthode que nous allons alors développer se base essentiellement sur le régulateur PID combiné à un système AVR, permettent d'ajuster finement la tension de sortie de l'alternateur afin de maintenir une alimentation électrique stable et de haute qualité pour les consommateurs. Un circuit stabilisateur peut être rajouter à ce dispositif de contrôle.

III.2 Système actuel d'excitation adapté à la régulation de tension de l'alternateur de la station de CAP-DJINET

Le système d'excitation de l'alternateur est un système à diode tournante qui utilise une excitatrice inversée, où le circuit d'excitation, alimenté par l'excitatrice pilote, est fixé sur le stator.

Le pilote de l'excitatrice est positionné à l'extrémité de l'arbre de l'excitatrice, en face de l'attaque de l'alternateur dominant. L'excitatrice pilote est équipé d'un inducteur composé d'aimants permanents en rotation, tandis que le stator est équipé d'une bobine triphasée. On réduit cette tension de sortie statorique en utilisant un pont à thyristors. La tension persistante ainsi créée encourage le déroulement de l'excitatrice. Le rotor de l'excitatrice génère une tension triphasée qui est appliquée à un pont de diodes tournantes fixé sur l'arbre de l'excitatrice principale.[18]

III.2.1 Principe d'excitation

Les principaux éléments du groupe d'excitation de Cap-Djinet sont les suivants (voir **Figure III-1**):

- Une excitatrice pilote a aimant permanent
- Une excitatrice principale triphasée
- Une roue à diode
- Une armoire de régulation de tension

Un régulateur à thyristor situé dans l'armoire de régulation alimente l'excitatrice principale par l'excitatrice pilote. Le courant d'excitation est fourni par l'excitatrice principale à l'alternateur à travers les diodes tournantes. Si le régulateur électronique ou l'excitatrice pilote ne sont pas disponibles, l'excitatrice principale est alimentée par le réseau des auxiliaires en utilisant le régulateur manuel de tension [18].

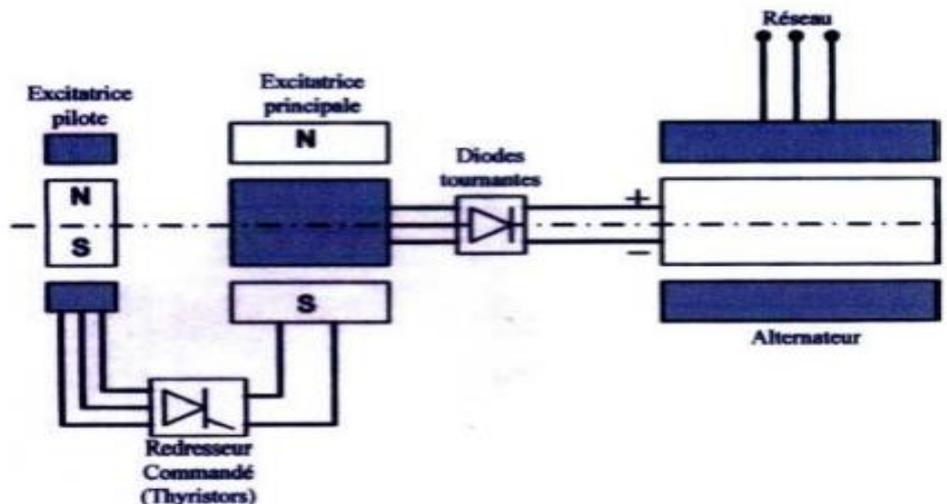


Figure III-1 : Schéma de principe d'excitation pour l'alimentation de l'alternateur [18].

III.2.1 .1 Excitatrice pilote à aiment permanent

L'excitatrice pilote est un alternateur à 16 pôles internes, l'enveloppe contient le paquet de tôles et l'enroulement triphasé, le rotor est constitué par la roue et les pôles saillants. Chaque pôle se compose d'aimants permanents revêtus de métal amagnétique et traversé par des tiges d'assemblage allant de la roue, l'épanouissement polaire pour assurer leur fixation. La roue du rotor est calée à chaud sur l'extrémité libre de l'arbre [19].

III.2.1 .2 Excitatrice principale triphasé

L'excitatrice principale est un alternateur à 6 pôles externe ; l'enveloppe abrite les pôles, l'enroulement inducteur et l'enroulement amortisseur, l'enroulement inducteur est placé sur les pôles magnétiques feuilletés. L'enroulement amortisseur est un ensemble de barres (spires) logé sur l'épanouissement polaire, la mesure du courant d'excitation d'induction se fait par une bobine de flux de mesure du champs transversale montée entre deux pôles.

Le rotor se compose d'un empilage de tôles, l'enroulement rotorique triphasé est logé dans les encoches ; les têtes des bobines sont attachées à l'aide d'un fil d'acier qui forme un anneau collecteur auquel se raccorde les roues à diodes.

Le rotor complet est calé à chaud sur l'arbre ; le palier est monté entre l'excitatrice principale et pilote, il s'agit d'un palier lisse à graissage forcé qui est raccordé au circuit d'alimentation en huile de l'alternateur [19].

III.2.1 .3 Roues à diodes

Les principaux éléments de la roue à diode sont : des diodes au silicium qui constituent un pont triphasé, derrière chaque diode un fusible monté en série qui sert à éliminer la voie de défaillance afin d'éviter les brèves pointes de tension. Les roues transmettent le courant continu à l'arbre par l'intermédiaire de prise radiale [19].

III.2.1 .4 Armoire de régulation JK

Elle est installée dans la salle des armoires électronique. Elle comprend les organes de commande et de régulation de l'excitation. Elle se compose principalement des organes suivants [19] :

- Un régulateur de tension.
- Un régulateur de courant de champ.
- Un régulateur manuel.
- Blocs d'alimentation en courant continu.
- Deux (02) générateurs d'impulsions d'allumage.
- Deux (02) ponts redresseurs triphasés à thyristor.
- Un (01) pont redresseur triphasé à thyristor.

- Un commutateur de sélection du type de commande local/distance.
- Un commutateur de sélection du type de régulation automatique/manuelle/essais.

III.2.2 Principe de réglage

La régulation de tension et du courant de champ et consiste en un régulateur multi canal avec une sécurité de fonctionnement particulière pour grands alternateur avec excitatrice à courant triphasé. Le dispositif de réglage possède trois circuits complètement séparés avec leurs propres convertisseurs :

- Réglage de la tension
- Réglage du courant de champ
- Régime de secours avec transformateur de réglage

On peut commuter à la main ou automatiquement sans à-coup entre les modes de service de réglage de la tension et le réglage du courant de champ, lorsque certaines conditions sont remplies. Les perturbations des régulateurs sont délectées et évaluées dans un appareil de surveillance. Les régulateurs sont entièrement électroniques et composés de cartes à circuit imprimé remplaçables et d'ensembles de pièces détachées enfichables

III.3. Description du dispositif de régulation actuel adapté par la station Cap-Djinet

Le dispositif de réglage possède deux circuits séparés avec leurs propres convertisseurs. Le premier circuit est destiné pour la régulation de tension et le second pour la régulation du courant de champ [18].

III.3.1 Régulateur de tension

Le régulateur est réalisé en tant que régulateur de tension U_{ef} avec régulateur de courant de roue polaire inséré I_R et régulateur de courant de champ inséré I_F . Ce régulateur règle la tension aux bornes de l'alternateur. La tension de consigne est fournie par afficheur de consigne. La mise au point du potentiomètre de consigne peut se faire manuellement sur place ou moyennant la commande à moteur à partir du poste de commande. Le régulateur possède une chaîne de régulation à trois boucles fermées :

- Une boucle fermée de la régulation de tension d'alternateur U_{ef} avec un régulateur à caractéristique PI.
- Une boucle fermée pour la régulation de courant de rotor I_R (courant d'excitation) avec Régulateur à caractéristique P.
- Une boucle fermée pour la régulation du courant de champ I_F (courant inducteur de l'excitation principale) avec un régulateur à caractéristique PI

Le régulateur possède un générateur d'impulsions (générateur de courant de gâchette) pour allumage des thyristors pour le réglage de la tension. Ce système de réglage se distingue par :

- Une grande stabilité et une vitesse de réglage dans tous les cas de charge
- Un accessoire de stabilisation de puissance active est raccordé au régulateur de tension pour amortir le groupe des machines en cas de condition de secteur critiques, c'est un dispositif électronique qui envoie des signaux additionnels au régulateur de tension afin que celui-ci tienne compte des variations de puissance active dues aux variations de tension d'excitation.[18]

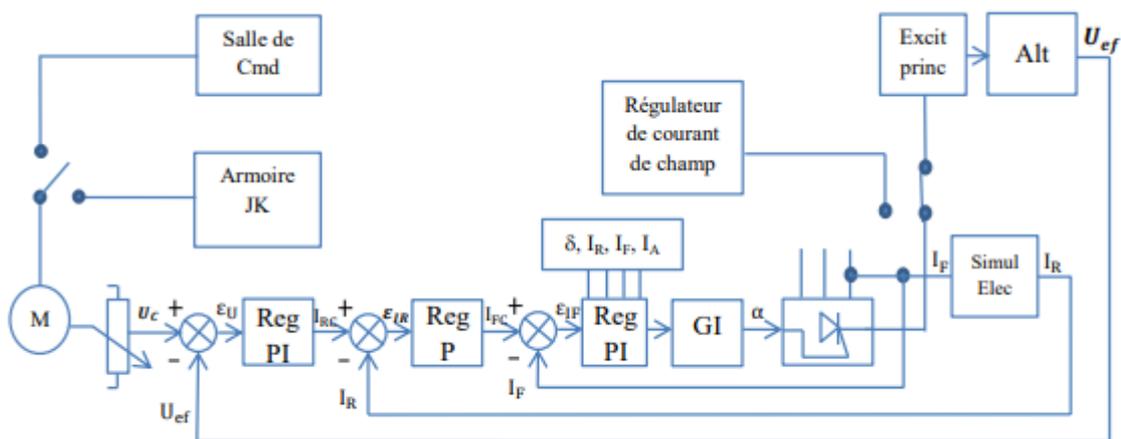


Figure III-2 : Schéma fonctionnel de régulation de tension [18]

III.3.2 Régulateur de courant de champ

Il prend en charge le réglage de tension en cas de défaillance du circuit du régulateur de tension. Dans ce cas, la régulation de tension est opérée manuellement. Le régulateur de courant de champ se compose dans une large mesure des mêmes composants que le régulateur de tension. Lors d'une défaillance du régulateur de tension, l'installation commute

automatiquement au régulateur de courant de champ. Le régulateur par poursuite permet la commutation sans à-coups du régulateur de tension au régulateur de courant de champ. Ce dernier est tout le temps informé des données du régulateur de tension.[18]

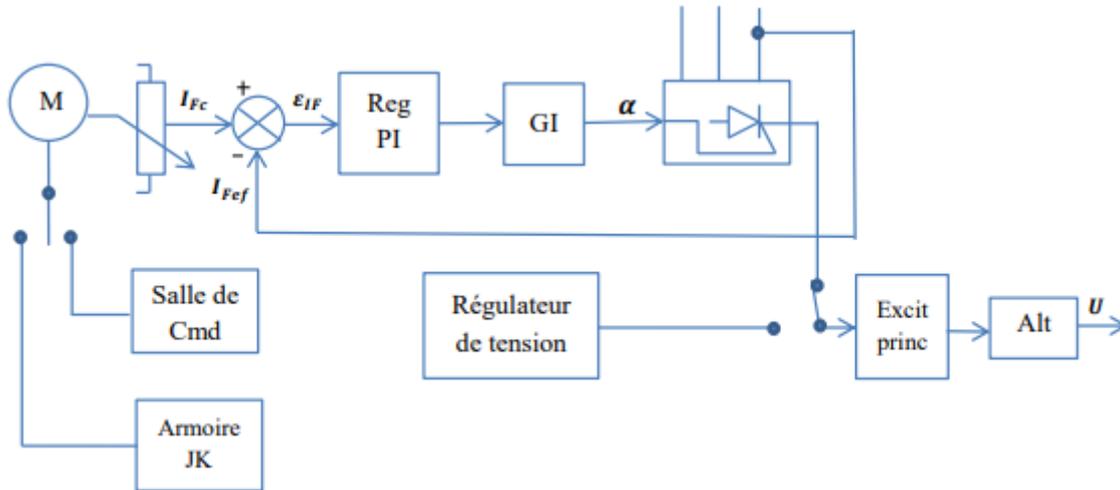


Figure III-3 : Schéma fonctionnel de régulation de courant de champ [18]

III.4.Régulateur PID

III.4.1Principe de base du régulateur PID

Un régulateur PID est une structure de régulation qui tente de réguler une certaine grandeur (pression, température, etc.) en fonction d'une valeur de consigne prédéfinie. Pour ce faire, le régulateur a besoin d'informations sur l'état actuel du système sous la forme d'une valeur de mesure (capteur de pression, capteur de température, etc.). Ce signal est appelé retour PID[21].

III.4.2 Les actions du régulateur PID

Les régulateurs standards les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de la famille PID, car ils permettent de régler à l'aide de ces trois paramètres (P, I et D) les performances (amortissement, temps de réponse, dépassement...) d'un système généralement modélisé par une transmittance de premier ordre ou du deuxième ordre. Les trois actions du régulateur PID sont ([21][22]) :

- P : Action proportionnelle.
- I : Action intégrale.

- D : Action dérivée.

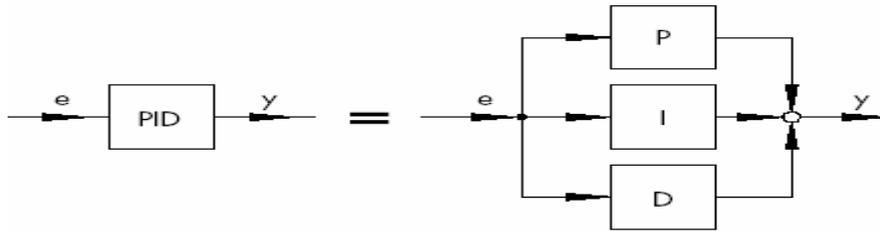


Figure III-4 : Régulateur PID [21]

La description des trois actions du régulateur PID est résumée dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Description des actions P, I et D du régulateur PID [23]

P	Correction proportionnelle à l'erreur	La correction à appliquer au processus doit augmenter proportionnellement à l'augmentation de l'erreur entre la valeur réelle et la valeur souhaitée.
I	Correction proportionnelle au produit erreur × temps	Les petites erreurs, mais qui existent depuis longtemps, nécessitent une correction plus intensive.
D	Correction proportionnelle au taux de variation de l'erreur	Si l'erreur évolue trop rapidement, ce taux de variation doit être réduit pour éviter les oscillations

La fonction de transfert d'un régulateur PID monté en parallèle peut avoir deux formes :

- PID sans filtre :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (III.1)$$

- PID avec filtre :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{T_f s + 1} \quad (III.2)$$

L'adaptation de ce régulateur aux différents systèmes s'effectue par le réglage des coefficients (paramètres) de l'algorithme PID qui sont donnés par [22] :

- Paramètre K_p pour le réglage de l'action proportionnelle.
- Paramètre K_i pour le réglage de l'action intégrale.

- Paramètre K_d pour le réglage de l'action dérivée.

Avec la constante de temps $T_f = \frac{1}{N}$ et N représente le coefficient du filtre pour la deuxième forme.

III.4.3. Avantages et inconvénients des régulateurs PID

Dans ce tableau, nous examinerons les avantages et les inconvénients des régulateurs PID (proportionnel-intégral-dérivé) dans différents systèmes de contrôle. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre les performances et les limitations de ces régulateurs :

Tableau III.2 : Avantages et inconvénients des régulateurs PID [22]

Avantages	Inconvénients
Précision : Le PID est efficace pour maintenir un système à une valeur désirée avec précision.	Complexité : Le réglage des paramètres PID peut être complexe et nécessite une expertise.
Adaptabilité : Il peut s'adapter à différents types de systèmes et de conditions de fonctionnement.	Sensibilité aux perturbations : Dans certains cas, le PID peut être sensible aux perturbations externes, nécessitant une réadaptation fréquente des paramètres.
Réponse rapide : Le PID peut ajuster rapidement les paramètres de contrôle pour répondre aux changements dans le système	Sur-réaction : Le contrôleur PID peut réagir de manière excessive aux changements rapides, provoquant des oscillations ou un dépassement.
Stabilité : Il peut aider à stabiliser les systèmes instables ou sujets aux oscillations.	Limitations : Dans certains cas, le PID peut ne pas être suffisamment flexible pour contrôler des systèmes non linéaires ou complexes.

III.5. Techniques de calcul du régulateur PID

Nous allons à travers de ce paragraphe, citer brièvement les méthodes existantes dans la littérature pour le calcul des paramètres (P, I et D) du régulateurs PID qui reposent principalement sur les méthodes classiques et les méthodes avancées.

III.5.1 Méthodes classiques de réglage PID

III.5.1.1 Méthode de Ziegler-Nichols

La méthode de Ziegler-Nichols est l'une des approches les plus connues pour le réglage des paramètres PID. Elle se base sur l'obtention de la réponse en boucle ouverte du système, à partir de laquelle on peut déterminer les valeurs optimales des paramètres K_p , K_i et K_d . [24]

III.5.1.2 Méthode de Cohen-Coon

La méthode de Cohen-Coon est similaire à celle de Ziegler-Nichols, mais elle se concentre sur les processus avec des retards importants. Elle permet d'obtenir des réglages plus robustes, en particulier pour les systèmes avec des dynamiques complexes. [24]

III.5.1.3 Méthode de réglage manuel

Le réglage manuel des paramètres PID, bien que plus fastidieux, permet d'ajuster finement le comportement du système en fonction des spécificités de l'application. Cette approche est souvent utilisée en complément des méthodes automatiques pour obtenir des performances optimales. [24]

III.5.2 Techniques avancé de calcul des paramètres de régulateur PID

III.5.2.1 Optimisation des essaims de particules (PSO) :

L'algorithme d'optimisation des essaims de particules (PSO : Particle Swarm Optimization en anglais) est une technique d'optimisation inspirée du comportement social des oiseaux ou des poissons en groupe. Cet algorithme évolutif est connu par son utilisation dans le domaine de commande et de contrôle des systèmes à travers le paramétrage efficace du régulateur PID offrant ainsi une performances des systèmes de contrôle en termes de stabilité, de précision et de rapidité de réponse. [25] [26]

III.5.2.2 L'algorithme de recherche de coucou (CS)

L'algorithme de recherche de coucou (CS : Coucou Search en anglais) est une méthode d'optimisation métaheuristique inspirée du comportement de reproduction des coucous. Cette approche a été appliquée avec succès au réglage des paramètres d'un régulateur PID afin d'optimiser ses performances. L'algorithme CS permet d'explorer efficacement l'espace de recherche des paramètres du PID (K_p, K_i, K_d) et de trouver les valeurs optimales qui

minimisent une fonction objective telle que l'erreur quadratique moyenne ou le dépassement. [27]

III.5.2.3 L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC)

L'ABC est un algorithme d'optimisation inspiré du comportement des abeilles dans une colonie. Il peut être utilisé pour calculer les paramètres optimaux d'un régulateur PID afin d'améliorer le contrôle d'un système. L'ABC simule le comportement de recherche de nourriture des abeilles ouvrières, des abeilles spectatrices et des abeilles exploratrices pour trouver la meilleure solution, qui correspond aux paramètres optimaux du régulateur PID. Cet algorithme est efficace et relativement simple à mettre en œuvre, ce qui en fait un outil intéressant pour l'optimisation des régulateurs PID dans de nombreuses applications. [28]

III.6. Régulateur de tension Automatique (AVR) de l'alternateur

En charge, la tension de sortie de l'alternateur diminue en raison de son impédance interne, qui est constituée de la réactance de fuite et de la résistance de l'induit. Afin de maintenir une tension de sortie acceptable, un régulateur automatique de tension est utilisé. Le régulateur de tension automatique (AVR : Automatic voltage regulator en anglais) se compose de divers éléments électroniques tels que : des diodes, des condensateurs, des résistances, des potentiomètres ou même des microcontrôleurs. L'AVR ne dépend que de la tension terminale pour sa sortie. Il intervient sur l'excitatrice du générateur (l'alternateur) pour maintenir une tension terminale stable. [29]

III.6.1 Principe de fonctionnement de l'AVR

Le régulateur veille tout d'abord à la tension de sortie et régule la tension d'entrée de l'excitatrice de l'alternateur. L'augmentation ou la diminution de la tension de commande du générateur (l'alternateur) entraîne une augmentation ou une diminution de la tension de sortie. Le régulateur détermine combien de tension doit être transmise à l'excitatrice à plusieurs reprises par seconde, ce qui permet de stabiliser la tension de sortie à une valeur de consigne préétablie. [29]

Les principes fondamentaux utilisés dans la stabilisation de la tension de sortie d'un alternateur auto-excité sont illustrés dans le circuit présenté dans la **Figure III-5** suivante :

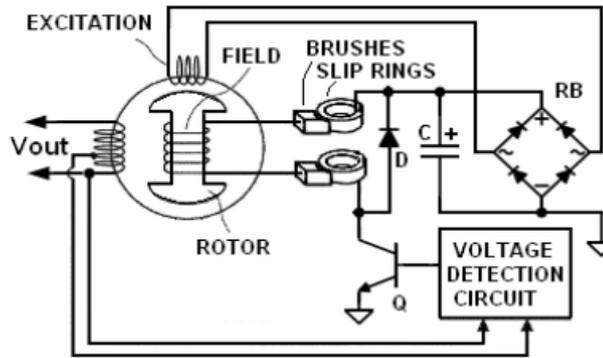


Figure III-5 : Circuit de régulation de la tension de sortie. [29]

Quand le moteur tourne le rotor, une tension supplémentaire est produite dans l'enroulement d'excitation. Il est converti en courant continu grâce à l'utilisation du pont redresseur, "RB", ainsi qu'à un condensateur de filtrage, "C". La comparaison d'une tension de sortie V avec une valeur de consigne permet au circuit de détection d'activer ou de désactiver le transistor "Q". Quand "Q" est activé, un courant traverse le champ de rotation (rotorique). En désactivant "Q", le courant de champ continue de circuler à travers la diode de roue libre "D". Le rotor est équipé d'un petit aimant permanent afin de fournir une alimentation continue.[29]

III.6.2. Les composants du système AVR

La **Figure III-6** ci-dessous représente le schéma de principe de la régulation AVR, la boucle de régulation en boucle fermée comprend principalement : un amplificateur, une excitatrice, l'alternateur (génératrice) et d'un capteur. D'autres éléments peuvent intervenir dans la régulation tel que le rajout d'un stabilisateur et d'un régulateur PID

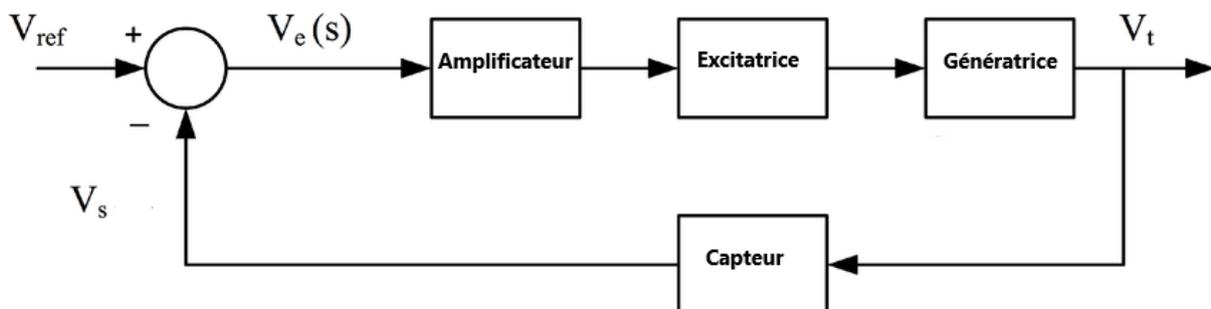


Figure III-6 Schéma de principe de la régulation AVR.[30]

Les éléments clés de cette régulation sont décrits comme suit :

- **L'amplificateur** : son rôle est d'amplifier le signal de référence pour contrôler la quantité de courant de l'excitatrice.
- **L'excitatrice** : Génère un courant pour le stator de l'alternateur, contrôlant ainsi le champ magnétique.
- **L'alternateur (génératrice)** : Transforme une petite partie de la tension de sortie de l'alternateur en un signal de référence pour le régulateur.
- **Le Capteur** : Mesure la tension de sortie de l'alternateur.

Ces composants fonctionnent en harmonie, ensemble afin de maintenir la tension de sortie de l'alternateur à une valeur stable et constante.[30]

III.7.Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'illustrer le système d'excitation et de régulation de tension actuel de la station de Cap-Djinet qui est basé principalement sur des boucles de régulation P et PI. Par la suite, le régulateur PID a été présenté, ainsi que les méthodes liées au calcul de ses paramètres. De plus, la chapitre a abordé l'étude du système de régulation automatique de tension (AVR) pour analyser la régulation de la tension de sortie d'un alternateur.

Les principaux éléments à retenir sont :

- Le système d'excitation joue un rôle crucial dans la régulation de la tension de sortie de l'alternateur. Il permet de contrôler le courant d'excitation et donc la tension générée.
- Le régulateur PID est un régulateur très utilisé dans l'excitation et la régulation de la tension de sortie. Sa structure et ses paramètres ont été détaillés, permettant de comprendre son fonctionnement et sa mise en œuvre.
- L'AVR complète le système d'excitation en assurant une régulation fine et automatique de la tension de sortie de l'alternateur. Son analyse a mis en évidence les enjeux de cette régulation.

Ce chapitre a donc offert une vue d'ensemble complète des problématiques liées à l'excitation et à la régulation de tension de sortie de l'alternateur dans la centrale électrique de Cap-Djanet.

Chapitre IV
Simulations et Résultats

Chapitre IV : Simulations et Résultats

IV.1 Introduction

Dans ce quatrième et dernier chapitre, nous allons illustrer le modèle fonctions de transfert du système AVR afin de contrôler la tension de sortie de l'alternateur. Une étude en boucle fermée sans régulateur (sans et avec charge) de ce système permettra de déterminer les performances de ce dispositif de contrôle. L'étude de la combinaison du régulateur PID avec le système AVR sera entreprise par la suite. Une étude fréquentielle et temporelle permettra un paramétrage efficace pour le régulateur PID. Une possibilité d'intégration d'un circuit stabilisateur sera aussi investiguée. Nous verrons enfin, la combinaison du système AVR avec un système de contrôle de fréquence (AGC) afin d'améliorer les performances de l'alternateur.

IV.2 Modèle fonctions de transfert du système AVR

La variation de l'amplitude de la tension du système AVR dépend de la réactance de la machine pendant la durée de la variation décidée par la constante de temps du générateur. Étant un appareil statique, l'AVR offre un délai minimum et apporte la tension du système à sa valeur nominale rapidement. Les composants de base d'un AVR comme vu précédemment sont : l'amplificateur, l'excitatrice, le générateur et le capteur. Le modèle fonctions de transfert complet d'un système AVR (sans régulateur) est représenté par la **FigureIV.1** suivante :[31]

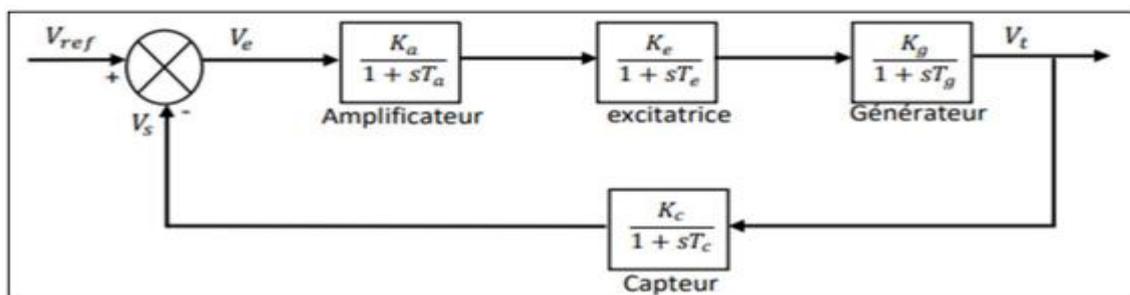


Figure IV.1 : Schéma bloc du système AVR de l'alternateur (sans régulateur) [31]

Les valeurs des gains, les constantes de temps des fonctions de transfert des différents composants de l'AVR utilisés dans notre étude sont décrites dans le **Tableau IV.1** suivant [25] :

Tableau IV.1: Fonctions de transfert et paramètres utilisés pour le système AVR [32]

Eléments	Fonction de transfert	Gain	Constants de temps
Amplificateur	$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + T_a s}$	$10 < K_a < 400$	$0.02 < T_a < 0.1$
Excitatrice	$G_e(s) = \frac{K_e}{1 + T_e s}$	$1 < K_e < 400$	$0.5 < T_e < 1.0$
Générateur	$G_g(s) = \frac{K_g}{1 + T_g s}$	$0.7 < K_g < 1.0$	$1.0 < T_g < 2.0$
Capteur	$G_c(s) = \frac{K_c}{1 + T_c s}$	$K_c = 1$	$0.001 < T_c < 0.06$

IV.3 Etude de la stabilité de tension du système AVR

La stabilité de tension, par définition, se réfère à la capacité d'un système de puissance, dans une condition de fonctionnement donnée initiale, à maintenir des valeurs de tension acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. Elle dépend aussi de la capacité à maintenir ou à restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et l'approvisionnement en puissance à la charge. L'instabilité qui en résulte se manifeste souvent par une diminution progressive des tensions à certains nœuds. En général, cette instabilité survient lorsque la perturbation entraîne une demande de puissance réactive supérieure à ce qui est possible. Il est aussi à noter que la stabilité de tension peut être divisée en deux catégories selon la perturbation en : stabilité de tension pour de grandes perturbations et stabilité de tension pour des petites perturbations [31].

IV.3.1 Fonction de transfert du système AVR en boucle ouverte

La fonction de transfert du système AVR en boucle ouverte sans régulateur est donnée par la relation entrée/sortie suivante :

$$G(s) = \frac{V_t(s)}{V_e(s)} = G_a(s)G_e(s)G_g(s) = \frac{250}{(s+10)(s+2.5)(s+1)} \quad (\text{IV.1})$$

qui est un système stable en boucle ouverte car les pôles : $P_1 = -10$, $P_2 = -2.5$ et $P_3 = -1$ de la fonction de transfert $G(s)$ sont des réels strictement négatifs.

IV.3.2 Fonction de transfert du système AVR en boucle fermée

La fonction de transfert du système AVR en boucle fermée sans régulateur reliant la tension terminale $V_t(s)$ à la tension de référence $V_{ref}(s)$ est décrite par la transmission suivante :

$$F(s) = \frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{G_a(s)G_e(s)G_g(s)}{1+G_a(s)G_e(s)G_g(s)G_c(s)} = \frac{K_a K_e K_g}{(1+T_a s)(1+T_e s)(1+T_g s)(1+T_c s)+K_a K_e K_g K_c} \quad (\text{IV.2})$$

La fonction de transfert en boucle fermée calculée sur Matlab en ayant les paramètres donnés dans le **Tableau IV.1** est la suivante :

$$F(s) = \frac{0.1s+10}{0.0454s^3+0.0004s^2+0.555s^2+1.51s^1+11} \quad (\text{IV.3})$$

qui peut s'écrire sous forme gain, zéro, pôles (zpk.m) comme suit :

$$F(s) = \frac{250 (s+100)}{(s+99.97)(s+12.49)(s^2+1.04s+22.03)} \quad (\text{IV.4})$$

Les pôles de cette fonction de transfert sont : $P_1 = -99.9712$, $P_2 = -12.4892$ qui sont des pôles réels strictement négatifs et les pôles $P_{3,4} = -0.5198 \pm 4.6642i$ qui sont des pôles complexes à partie réelle strictement négative. Donc, le système AVR sans régulateur est stable en boucle fermée.

IV.4 Etude fréquentielle et temporelle du système sans régulateur

IV.4.1 Etude fréquentielle

Pour le système AVR de la **Figure IV.1** avec les paramètres mentionnés dans le **Tableau IV.1**, nous allons effectuer une étude fréquentielle par le tracé de bode de la fonction de transfert en boucle ouverte $G(s)$ de l'équation (1). Le tracé de bode est donné ci-dessous :

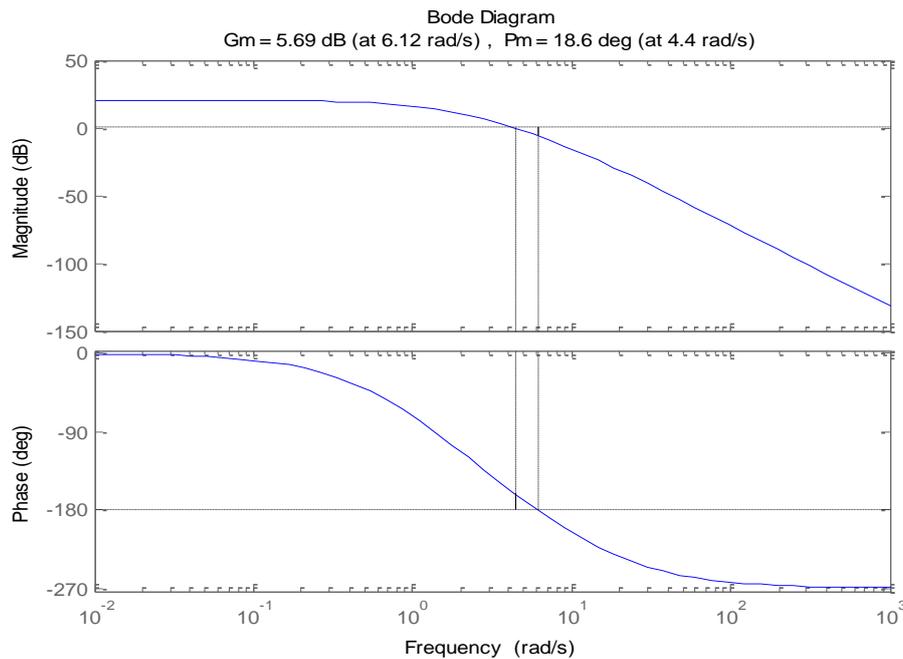


Figure IV.2: Tracé de bode du système AVR en boucle ouverte ($G(s)$) sans régulateur

A partir de la **Figure IV.2**, nous prélevons les résultats de la simulation dans le tableau suivant :

Tableau IV.2: Résultats de simulation du tracé de bode du système AVR sans régulateur

Système AVR Sans régulateur	$\Delta G(\text{dB})$	$\omega_{-\pi}(\text{rad/s})$	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$\omega_c(\text{rad/s})$	$\Delta R(s)$	BP ((rad/s))
$G(s)$	5.69	6.12	18,6	4,44	0.0737	5.26

D'après le tracé de bode, la marge de gain est de $\Delta G = 5.69 \text{ dB}$, celle-ci est positive et elle est obtenue à la pulsation $\omega_{-\pi} = 6.12 \text{ rad/s}$ et la marge de phase $\Delta\varphi = 18,6^{\circ}$ qui est aussi positive et elle est obtenue à la pulsation de coupure $\omega_c = 4,44 \text{ rad/s}$ (cette dernière est

obtenue à 0 dB). Nous avons aussi une marge de retard $\Delta R = 0.0737$ s et une bande passante (à -3dB) $BP=5.26$ rad/s.

Puisque les marges de gain et de phase obtenues sont positives, alors le système sera stable en boucle fermée. Mais les résultats sont loin d'être les meilleurs, car un système industriel est dit performant si la marge de gain est assez grande $\Delta G \geq 6$ dB et la marge de phase $45^\circ \leq \Delta\varphi < 60^\circ$. En outre, il faut avoir une marge de retard ΔR la plus petite possible, car celle-ci nous informe de la rapidité du système (plus ΔR est petite et plus le temps de montée t_m sera petit) et avoir une large bande passante qui nous permet d'avoir un système précis.

IV.4.2 Etude temporelle

Une étude temporelle par la réponse indicielle du système en boucle fermée de la fonction de transfert $F(s)$ de l'équation (4) est aussi réalisée. La réponse est donnée par la figure suivante :

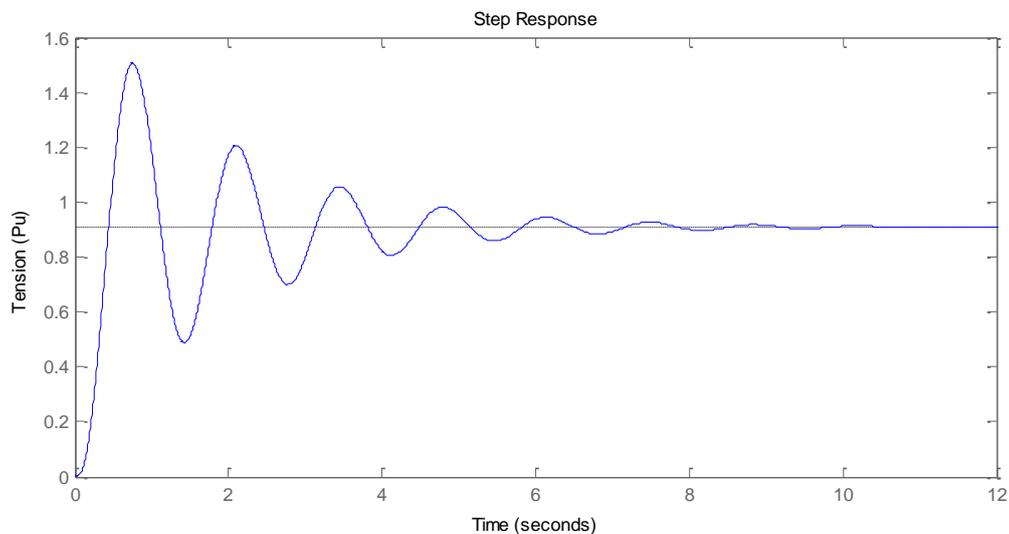


Figure IV.3: Réponse indicielle de système AVR sans régulateur en boucle fermée

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 3 : Résultats de simulation du système AVR sans régulateur en boucle fermée

	Dépassement (%)	t_m (s)	$t_r(\pm 5\%)(s)$	$\varepsilon(\infty)$
AVR seulement	65.7%	0.261	5.57	0.0910

D'après les résultats obtenus, le système AVR sans régulateur en boucle fermée est non précis, le régime transitoire est oscillatoire et comprend un grand dépassement. Le système est aussi non rapide.

Notre objectif par la suite sera d'améliorer les performances du système AVR en le combinant à un régulateur PID et ceci afin d'éliminer l'erreur de position $\varepsilon(\infty)$, réduire le temps montée t_m et de réponse $t_r(\pm 5\%)$ et avoir une réponse apériodique (réduire au maximum les oscillations et le grand dépassement du régime transitoire).

IV.5 Etude fréquentielle et temporelle du système avec régulateur PID

IV.5.1 Régulation de tension à vide (sans charge)

La boucle de régulation comprend un correcteur PID qui donne la loi de commande $U(s)$ au système série des trois fonctions de transfert d'amplificateur, d'excitatrice et du générateur. Le retour de la boucle n'est que le capteur de sortie $V_s(s)$.

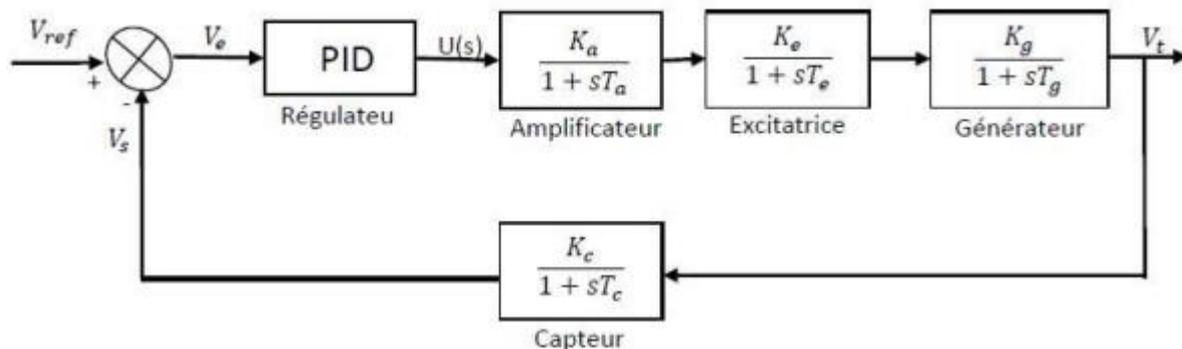


Figure IV.4 : Schéma bloc du système AVR de d'alternateur avec régulateur PID

IV.5.1.1 Fonction de transfert du régulateur PID utilisé

L'objectif du régulateur PID est d'éliminer l'écart de tension $V_e(s)$ afin que la tension terminal $V_t(s)$ rejoigne la tension d'entrée de référence $V_{ref}(s)$.

Reprenons la fonction de transfert du PID *sans filtre* (vue dans le chapitre III) comme suit :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (IV.5)$$

Une sélection manuelle des paramètres du PID qui sont (K_p, K_i, K_d) , permettra d'ajuster finement le comportement du système AVR en boucle fermée en fonction des spécificités demandées.

Les différents réglages sont donnés par les sélections OF1, OF2, OF3 et OF4 du tableau suivant :

Tableau IV. 4 : Paramètres de régulateur PID avec plusieurs sélections

Paramètres	OF1	OF2	OF3	OF4
K_p	0.5878	0.6022	1.2930	0.6190
K_i	0.4062	0.3763	0.9828	0.4222
K_d	0.1843	0.1841	0.6303	0.2058

IV.5.1.2 Fonction de transfert en boucle ouverte avec régulateur

$$G_r(s) = \frac{V_t(s)}{V_e(s)} = C(s)G_a(s)G_e(s)G_g(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s\right) \times \frac{250}{(s+10)(s+2.5)(s+1)} \quad (IV.6)$$

$$G_r(s) = \frac{250(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{((s+10)(s+2.5)(s+1))(s)} = \frac{250(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{s^4 + 13.5s^3 + 37.5s^2 + 25s} \quad (IV.7)$$

IV.5.1.3 Fonction de transfert en boucle fermée avec régulateur

$$F_r(s) = \frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{C(s)G_a(s)G_e(s)G_g(s)}{1 + C(s)G_a(s)G_e(s)G_g(s)G_c(s)} = \frac{\frac{250(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{((s+10)(s+2.5)(s+1))(s)}}{1 + \frac{250(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{((s+10)(s+2.5)(s+1))(s)} \cdot \frac{1}{1+0.01s}} \quad (IV.8)$$

$$F_r(s) = \frac{0.1K_d s^3 + (0.1K_p + 10K_d)s^2 + (0.1K_i + 10K_p)s + 10K_i}{0.0004s^5 + 0.0454s^4 + 0.555s^3 + (1.51 + 10K_d)s^2 + (1K_i + 10K_p)s + 10K_i} \quad (IV.9)$$

IV.5.1.4 Etude fréquentielle

Dans ce qui suit, un tracé de bode du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte avec le paramétrage des sélections OF1, OF2, OF3 et OF4 sera réalisé :

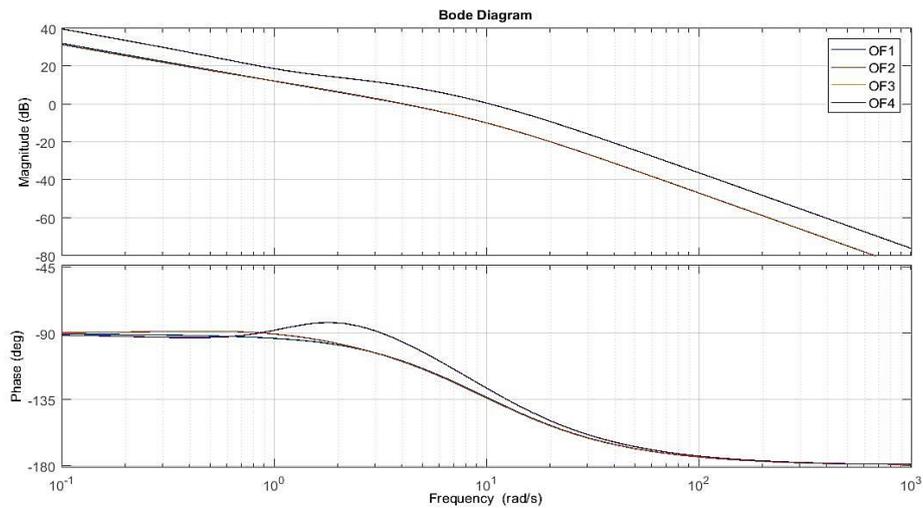


Figure IV.5: Tracé de bode du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte avec le paramétrage des sélections OF1, OF2, OF3 et OF4.

A partir de la simulation réalisée, nous prélevons les résultats dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.5: Résultats de simulation du tracé de bode du système AVR avec régulateur PID

Système AVR Sans régulateur	ΔG (dB)	$\omega_{-\pi}$ (rad/s)	$\Delta\varphi$ (°)	ω_c (rad/s)	ΔR (s)	BP((rad/s))
$G_r(s), OF1$	∞	∞	70.8	4.12	0.3	5.57
$G_r(s), OF2$	∞	∞	70.1	4.18	0.293	5.61
$G_r(s), OF3$	∞	∞	51	10.6	0.0844	13.2
$G_r(s), OF4$	∞	∞	51	10.6	0.0844	13.2

Selon l'analyse du tracé de Bode, étant donné que les marges de gain et de phase sont positives ($\Delta G = \infty dB, \omega_{-\pi} = \infty rad/s$), cela indique que le système sera stable en boucle fermée. De plus, avec une marge de gain suffisamment grande ($\Delta G \geq 6dB$) et une marge de phase comprise entre 45° et 60° ($45^\circ \leq \Delta\varphi < 60^\circ$), les performances sont optimales. Cela se traduit par des marges de retard ΔR plus petites, donc un temps de montée t_m réduit et un système plus rapide, avec une large bande passante assurant une précision accrue. En conclusion, les résultats suggèrent que le système AVR avec régulateur en boucle fermée sera plus rapide, plus stable et plus précis que le système AVR en boucle fermée sans régulateur.

IV.5.1.5 Etude temporelle

Dans ce qui suit, un tracé de la réponse indicielle du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée avec le paramétrage des sélections OF1, OF2, OF3 et OF4 sera réalisé :

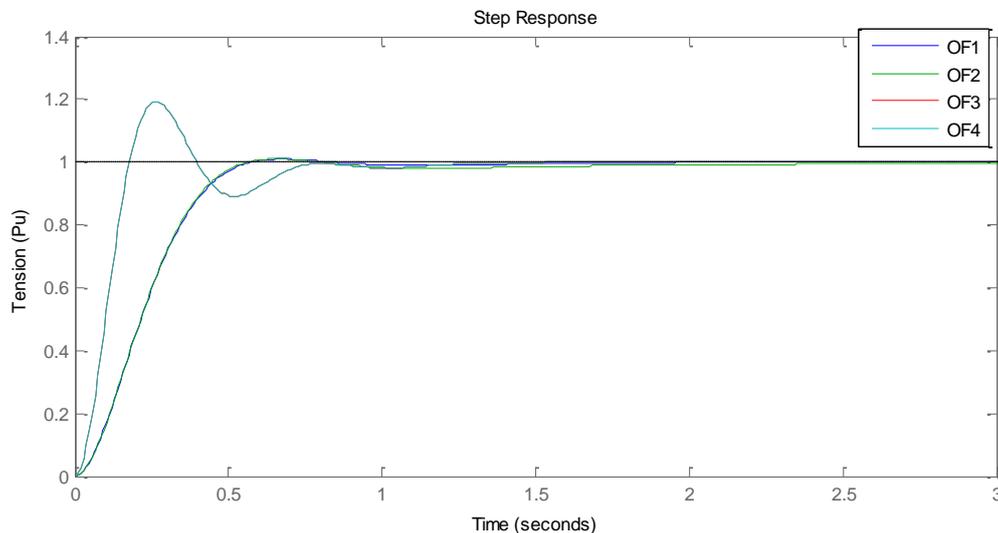


Figure IV.6: Réponse indicielle du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée avec les sélections OF1, OF2, OF3 et OF4 (essai à vide)

A partir de la réponse indicielle, nous obtenons les résultats du tableau suivant :

Tableau IV.6: Résultat d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée à vide

Paramètres PID	Dépassement (%)	t_m (s)	$t_r(\pm 5\%)$ (s)	$\varepsilon(\infty)$
OF1	0.954	0.339	0.467 s	0
OF2	0.988	0.335	0.462 s	0
OF3	19.3	0.12	0.648 s	0
OF4	19.3	0.12	0.648 s	0

D'après les résultats obtenus, le système AVR avec régulateur en boucle fermée est précis car celui-ci a pu éliminer l'erreur de position $\varepsilon(\infty)$, il a notamment réduit au maximum les oscillations et le grand dépassement du régime transitoire. Le système est devenu rapide (temps de montée t_m et de réponse sont réduits considérablement).

Comparaison et conclusion

Lorsqu'on dispose d'une large bande passante, le système tend à être plus précis. Cependant, à partir des réponses indicielles des quatre (04) cas étudiés, on observe que le système reste

toujours précis. Néanmoins, parmi eux, le cas OF2 se distingue avec le plus faible dépassement, le temps de montée t_m le plus court, et le temps de réponse le plus court $t_r(\pm 5\%)$. Ces performances dénotent une réponse plus rapide et plus stable du système, même si, selon le tracé de Bode, sa bande passante est relativement plus petite que les autres options, telles qu'OF1, OF3, et OF4. Ainsi, OF2 se présente comme le choix privilégié en raison de ses avantages en termes de réactivité et de stabilité, malgré sa bande passante apparente plus restreinte

IV.5.2 Régulation de tension en charge

Afin d'avoir la robustesse du système AVR avec régulateur PID (par la dernière sélection des paramètres OF2) vis-à-vis des incertitudes paramétriques, nous allons supposer que le gain de générateur K_g et la constante de temps T_g dépendent de la tension en charge. Nous limitons ces deux variables comme suit : $0.7 \leq K_g \leq 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$.

Une étude fréquentielle et temporelle seront réalisées pour chaque variation :

IV.5.2.1 Cas où $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

a. Tracé de Bode

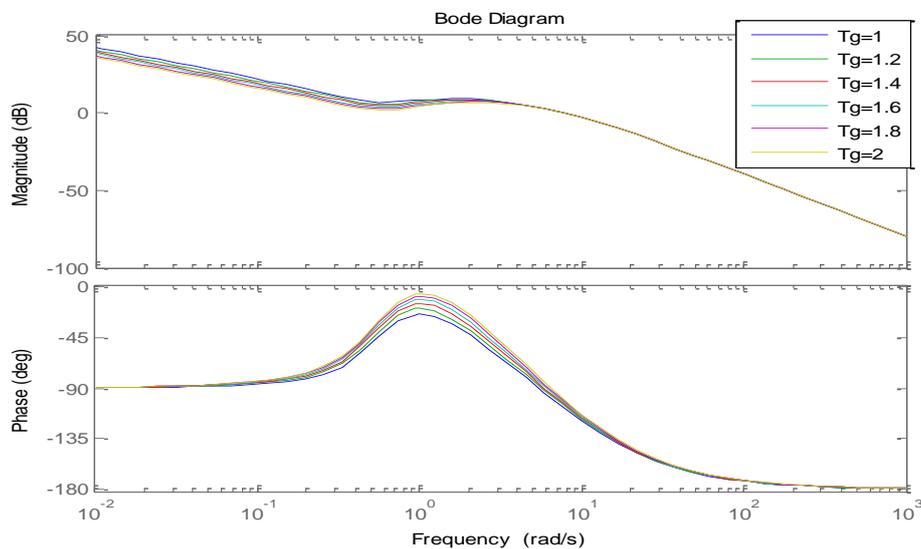


Figure IV.7 : tracé de bode du système AVR avec PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau IV.7: Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

T_g	$\Delta G(\text{dB})$	$\omega_{-\pi}(\text{rad/s})$	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$\omega_c(\text{rad/s})$	$\Delta R(s)$
$T_g = 1$	∞	∞	72.4	7.83	0.161
$T_g = 1.2$	∞	∞	73.9	7.8	0.165
$T_g = 1.4$	∞	∞	75.7	7.78	0.169
$T_g = 1.6$	∞	∞	77.1	7.75	0.174
$T_g = 1.8$	∞	∞	78.8	7.71	0.178
$T_g = 2$	∞	∞	80.5	7.67	0.183

b. Réponse indicielle

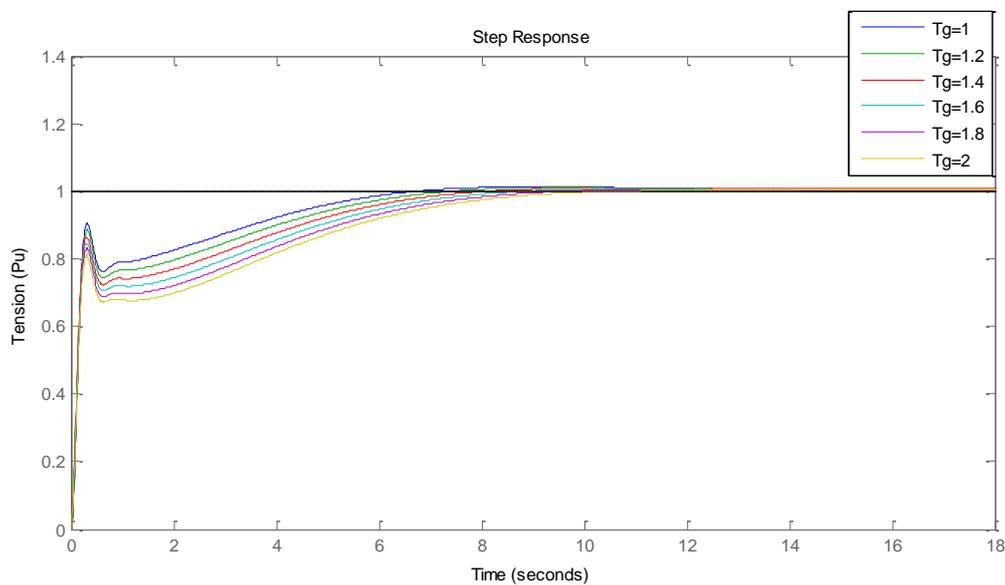


Figure IV.8 : Réponse indicielle du système AVR avec PID en boucle fermée pour $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée pour $K_g = 0.7$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

T_g	Dépassement (%)	t_m (s)	$t_r(\pm 5\%)$ (s)	$\varepsilon(\infty)$
$T_g=1$	1.32	0.244	4.71	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.2$	1.11	3.99	5.53	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.4$	0.897	4.43	5.7	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.6$	0.69	4.82	6.13	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.8$	0.497	5.18	6.54	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=2$	0.327	5.51	6.95	$ 1 - 1 = 0$

IV.5.2.2 Cas ou $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

a. Tracé de Bode

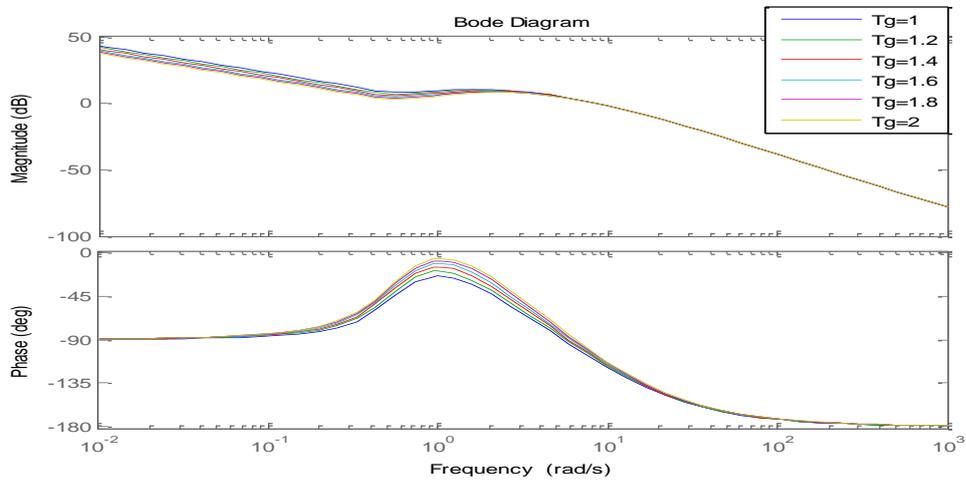


Figure IV.9 : Tracé de bode du système AVR avec PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau IV.9 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

T_g	$\Delta G(\text{dB})$	$\omega_{-\pi}(\text{rad/s})$	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$\omega_c(\text{rad/s})$	$\Delta R(\text{s})$
$T_g = 1$	∞	∞	67.6	8.67	0.136
$T_g = 1.2$	∞	∞	69	8.65	0.139
$T_g = 1.4$	∞	∞	70.4	8.63	1.142
$T_g = 1.6$	∞	∞	71.8	8.61	0.146
$T_g = 1.8$	∞	∞	73.3	8.58	0.149
$T_g = 2$	∞	∞	74.8	8.54	0.153

b. Réponse indicielle

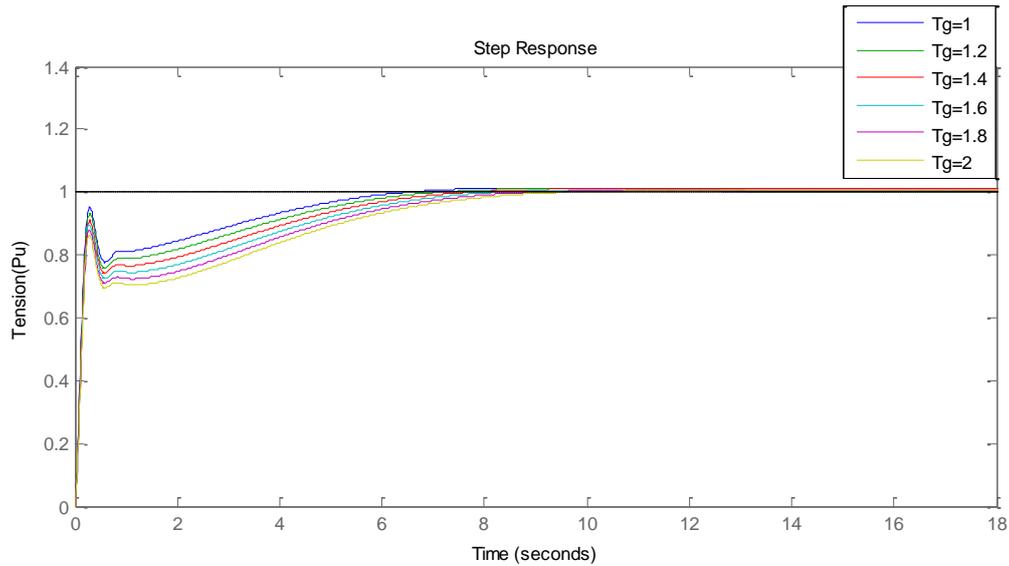


Figure IV.10: Réponse indicielle du système AVR avec PID en boucle fermée pour $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau IV.10 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée pour $K_g = 0.8$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

T_g	Dépassement (%)	t_m (s)	$t_r(\pm 5\%)$ (s)	$\varepsilon(\infty)$
$T_g = 1$	1.32	0.244	4.71	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.2$	1.15	0.196	4.94	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.4$	0.98	0.211	5.37	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.6$	0.811	4.48	5.77	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.8$	0.641	4.82	6.14	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=2$	0.48	5.13	6.5	$ 1 - 1 = 0$

IV.5.2.3 Cas ou $K_g = 0.9$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

a. Tracé de Bode

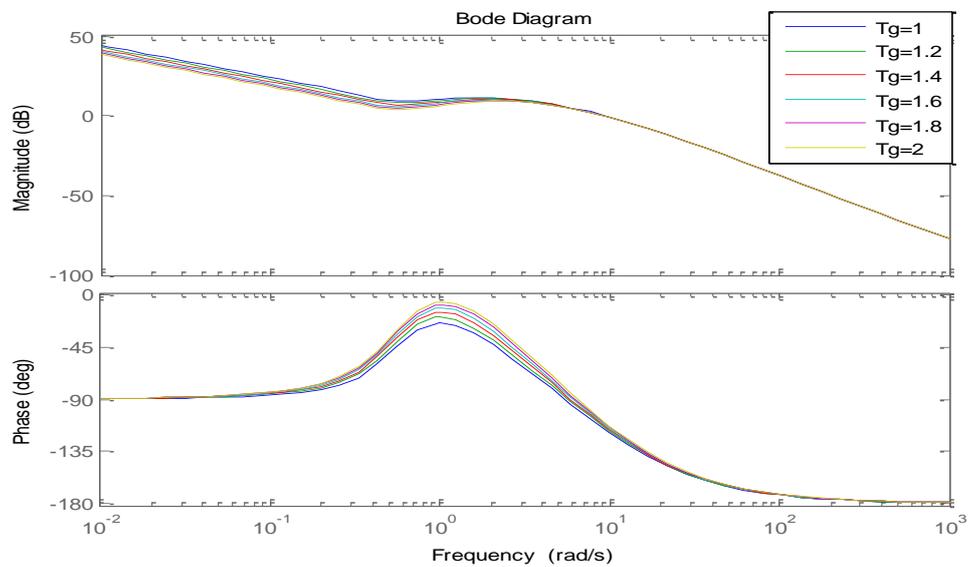


Figure IV.11 : Tracé de bode du système AVR avec PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.9$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau IV.11 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte pour $K_g = 0.9$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

T_g	$\Delta G(\text{dB})$	$\omega_{-\pi}(\text{rad/s})$	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$\omega_c(\text{rad/s})$	$\Delta R(\text{s})$
$T_g = 1$	∞	∞	63.7	9.45	0.118
$T_g = 1.2$	∞	∞	64.9	9.44	0.12
$T_g = 1.4$	∞	∞	66.2	9.42	0.123
$T_g = 1.6$	∞	∞	67.5	9.4	0.125
$T_g = 1.8$	∞	∞	68.8	9.37	0.128
$T_g = 2$	∞	∞	70.2	9.34	0.131

b. Réponse indicielle

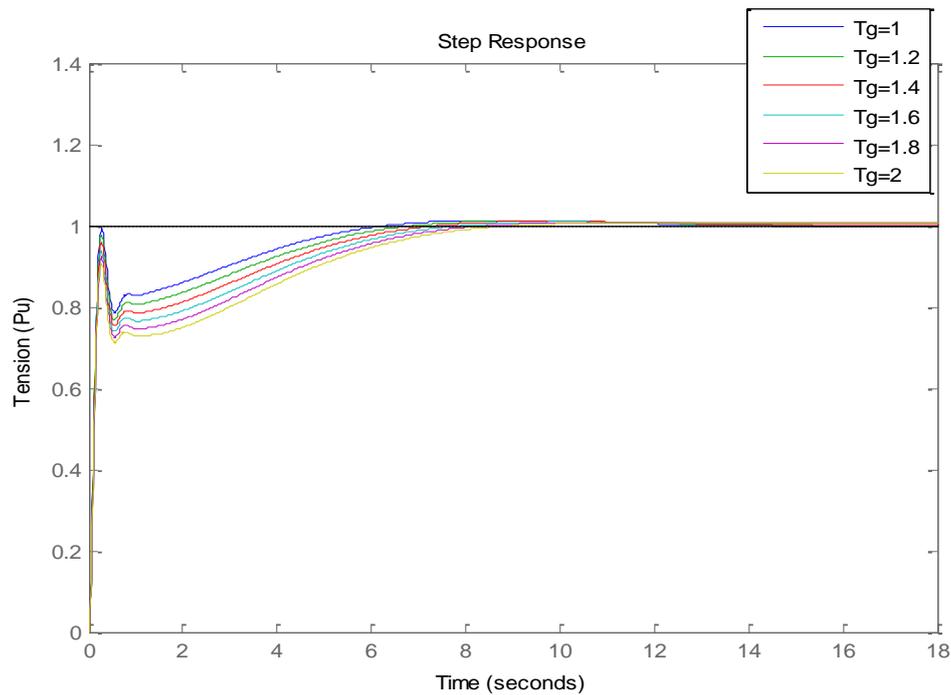


Figure IV.12: Réponse indicielle du système AVR avec PID en boucle fermée pour $K_g = 0.9$ et $1\text{s} \leq T_g \leq 2\text{s}$

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau IV.12 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée pour $K_g = 0.9$ et $1\text{s} \leq T_g \leq 2\text{s}$

T_g	Dépassement (%)	t_m (s)	$t_r(\pm 5\%)$ (s)	$\varepsilon(\infty)$
$T_g=1$	1.27	0.161	4.22	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.2$	1.15	0.165	4.7	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.4$	1.03	0.172	5.11	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.6$	0.891	0.179	5.48	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.8$	0.748	0.188	5.82	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=2$	0.605	0.205	6.15	$ 1 - 1 = 0$

IV.5.2.4 Cas ou $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

a. Tracé de Bode

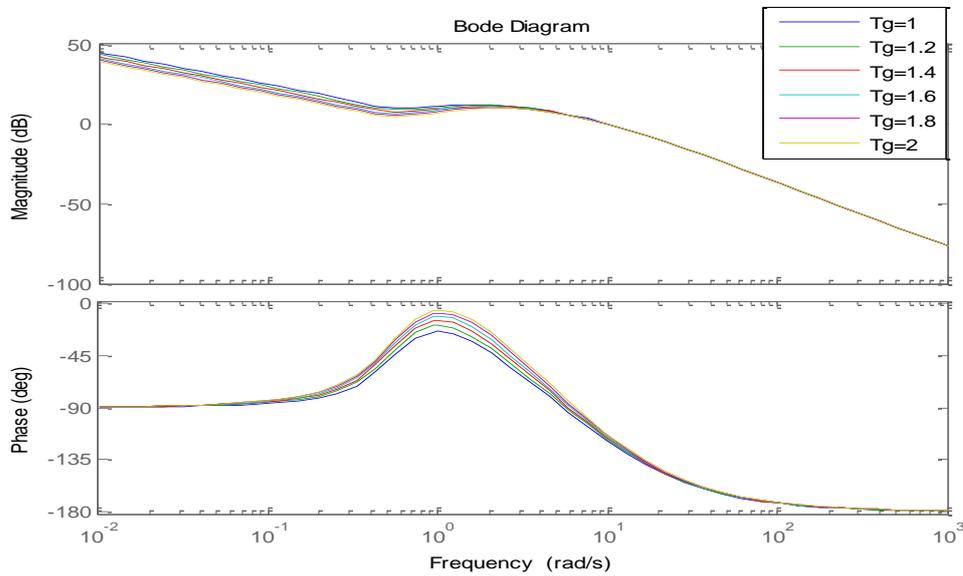


Figure IV.13 : Tracé de bode du système AVR avec PID en boucle ouverte pour $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$.

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau IV.13 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle ouverte pour $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

T_g	$\Delta G(\text{dB})$	$\omega_{-\pi}(\text{rad/s})$	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$\omega_c(\text{rad/s})$	$\Delta R(s)$
$T_g = 1$	∞	∞	60.4	10.2	0.104
$T_g = 1.2$	∞	∞	61.6	10.2	0.106
$T_g = 1.4$	∞	∞	62.7	10.1	0.108
$T_g = 1.6$	∞	∞	63.9	10.1	0.11
$T_g = 1.8$	∞	∞	65.1	10.1	0.113
$T_g = 2$	∞	∞	66.4	10.1	0.115

b. Réponse indicielle

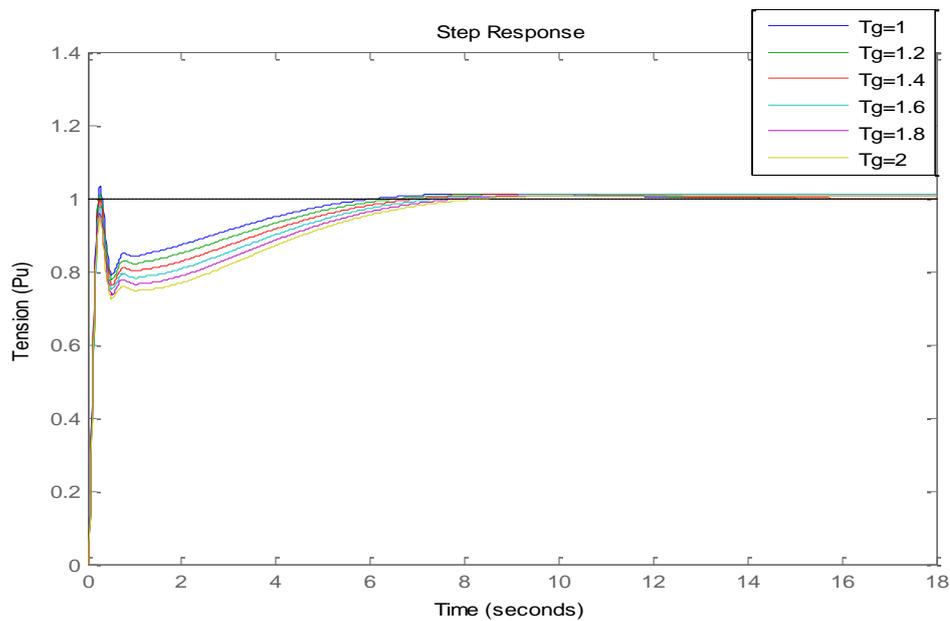


Figure IV.14: Réponse indicielle du système AVR avec PID en boucle fermée pour $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

Les résultats de la simulation sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau IV.14 : Résultats d'étude du système AVR avec régulateur PID en boucle fermée pour $K_g = 1$ et $1s \leq T_g \leq 2s$

T_g	Dépassement(%)	t_m (s)	$t_r(\pm 5\%)$ (s)	$\varepsilon(\infty)$
$T_g=1$	3.12	0.143	4.02	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.2$	1.3	0.147	4.49	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.4$	1.05	0.15	4.89	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.6$	0.941	0.155	5.24	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=1.8$	0.824	0.159	5.57	$ 1 - 1 = 0$
$T_g=2$	0.701	0.165	5.87	$ 1 - 1 = 0$

Interprétation des résultats de la réponse en fréquence et la réponse temporelle :

- Pour une valeur fixe du gain K_g ($K_g \in [0.7, 1]$) et une variation de la constante de temps T_g entre $1s$ et $2s$, nous remarquons l'augmentation de la marge de phase $\Delta\varphi$ une marge de gain $\Delta G = \infty$ ce qui veut dire que le PID utilisé maintient la stabilité du système. Par contre, nous avons un temps de retard ΔR qui augmente, ce qui nous informe que le temps de montée t_m sera lent.

- Pour une valeur fixe du gain K_g ($K_g \in [0.7, 1]$) et en variant la constante de temps T_g entre 1s et 2s, nous remarquons qu'à l'augmentation de T_g , la stabilité du régime transitoire est améliorée (réduction du dépassement) tout en maintenant une bonne précision, mais le système devient moins rapide (t_m et t_r augmentent).

Comparaison et conclusion

On constate d'après les résultats obtenus que lorsqu'on augmente K_g de 0.7 à 1, cela entraîne une diminution du dépassement et des temps de montée t_m , rendant ainsi le système plus rapide. De plus, lorsque T_g est plus petit, on observe des temps de montée t_m et des temps de réponse t_r ($\pm 5\%$) plus courts, ce qui rend le système rapide. Ainsi, le système reste toujours précis et rapide. Nous concluons que la variation du gain K_g et de la constante de temps T_g montre que le système à l'aide du PID (sélection Of2), maintient ses performances. Un K_g élevé et un T_g très petit peuvent être préférés pour garantir des temps de réponses rapides tout en réduisant le dépassement.

IV.6 Combinaison de l'AGC avec le système AVR-PID

Le Contrôle de Génération Automatique (AGC), également connu sous le nom de "Automatic Generation Control" en anglais, est un système de régulation intelligent de la production d'électricité. Son rôle principal est de maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande en ajustant en temps réel la production des centrales électriques. L'objectif fondamental de l'AGC est de minimiser les écarts transitoires et d'assurer une correction rapide pour atteindre un état stable sans erreur sur ces variables critiques.[33]

L'AGC implique un contrôle de fréquence de charge (LFC : Load Frequency Control) pour atteindre un véritable équilibre de puissance en ajustant la puissance de la turbine et la boucle supplémentaire pour maintenir un écart de fréquence nul. Le schéma fonctionnel de l'AGC pour un système d'alimentation unique est illustré à la **figure III.15** suivante :

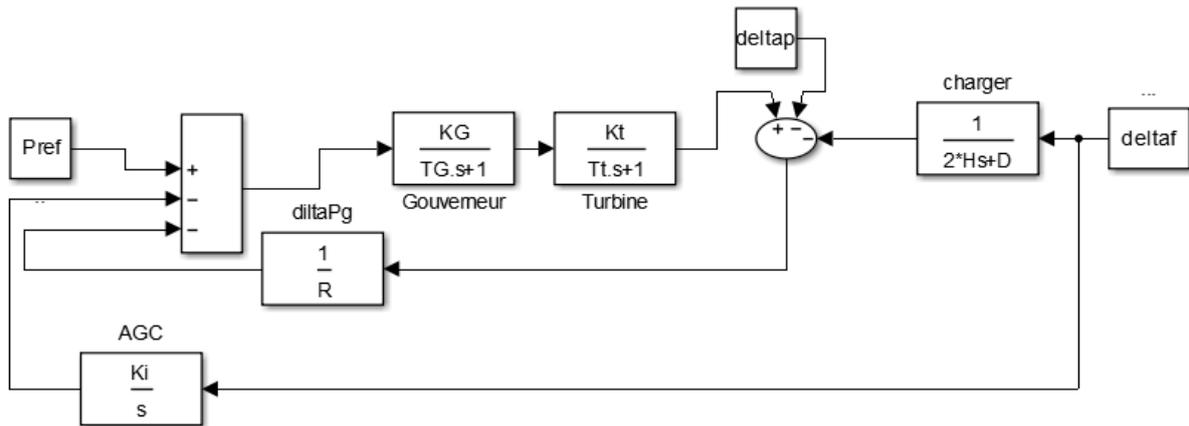


Figure IV .15 : Schéma fonctionnel de l'AGC pour un système électrique unique Δ

Les valeurs des gains, les constantes de temps des fonctions de transfert des différents composants du système électrique unique avec l'AGC, utilisées dans notre étude sont décrites dans le **Tableau IV.15** suivant :

Tableau IV.15: Fonctions de transfert et paramètres utilisés pour système électrique unique avec l'AGC [33]

Eléments	Fonction de transfert		
Gouverneur	$G_G(s) = \frac{K_G}{1 + T_G s}$	$K_G = 1$	$T_G = 0.3$
Turbine	$G_e(s) = \frac{K_t}{1 + T_t s}$	$K_t = 1$	$T_t = 0.2$
charger	$G_L(s) = \frac{1}{2H_S + D}$	$H_S = 2.5$	$D = 0.6$
ΔP_G	$G_\Delta(s) = \frac{1}{R}$	1	$R = 0.04$
AGC	$\frac{K_i}{s}$	$K_i = 6$	

La variation de la fréquence de charge est présentée par la figure ci-dessous :

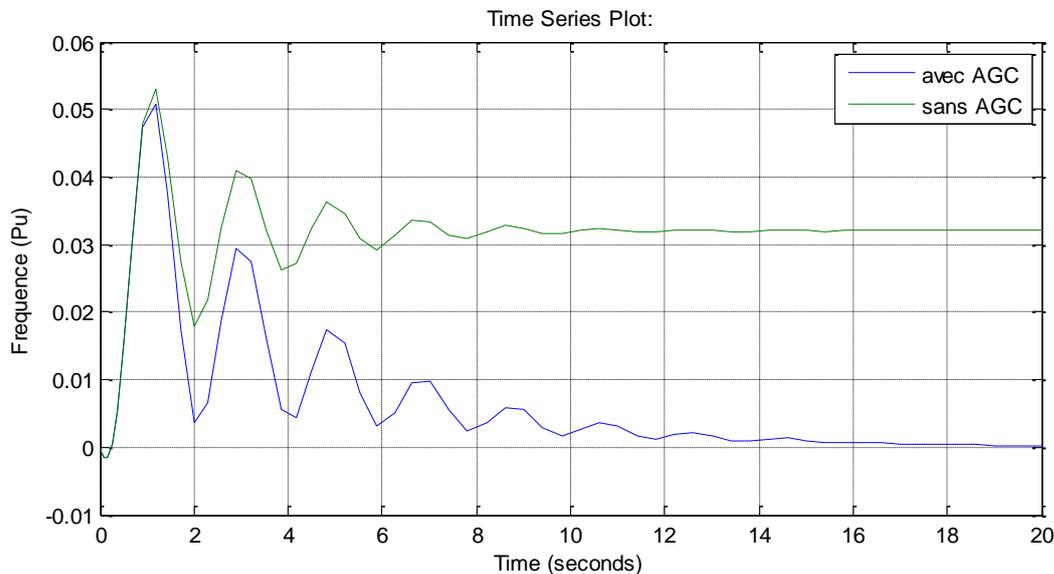


Figure IV.16 : Réponse en déviation de fréquence

Commentaire :

- Avec uniquement LFC, l'écart (changement) de fréquence n'est pas contrôlé à la valeur souhaitée (0 Pu = 50 Hz), c'est-à-dire. 0,03 Pu (1,5 Hz), il y a une erreur après presque 8 s et la valeur de dépassement est de 0,056 Pu.
- Cependant, le LFC avec des moyens supplémentaires avec l'AGC est contrôlé, ce qui signifie que l'erreur en régime permanent est nulle Pu (nouvelle fréquence = 50 Hz) après 10 s et le dépassement est diminué de près de 0,05 Pu.

IV.7.Système AVR avec Stabilisateur et PID

Dans ce qui suit, nous allons voir l'impact de rajout d'un stabilisateur dans une deuxième boucle de régulation dans la boucle de régulation AVR, nous allons notamment voir la combinaison de ces trois parties : AVR-Stabilisateur- PID.

Comme nous l'avons constaté auparavant, un régulateur automatique de tension (AVR) stabilise la tension de sortie d'un générateur malgré les variations de charge. Nous allons voir que le rajout d'un stabilisateur améliorera encore plus la réponse dynamique du système en réduisant les oscillations. Nous allons notamment combiner un régulateur PID au système AVR-Stabilisateur afin d'avoir une régulation encore plus précise et réactive.

Ci-dessous nous présentons trois simulations. La première simulation correspond au système AVR seulement (**Figure IV.16**), la deuxième simulation correspond au système AVR-Stabilisateur (**Figure IV.18**) et enfin le système AVR-Stabilisateur-PID (**Figure IV.19**):

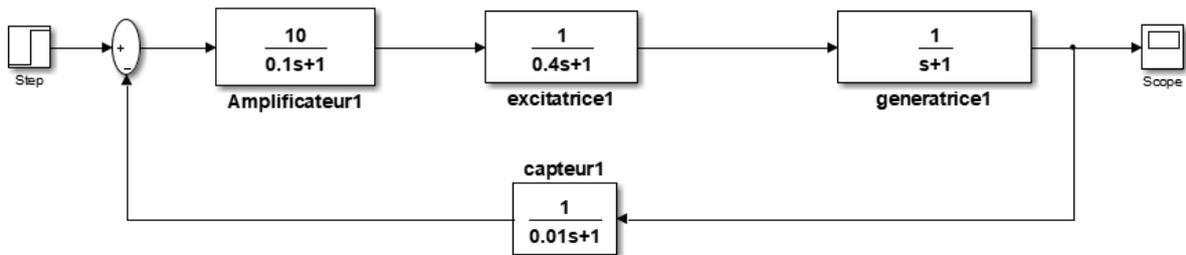


Figure IV.17 : Schéma bloc du système AVR

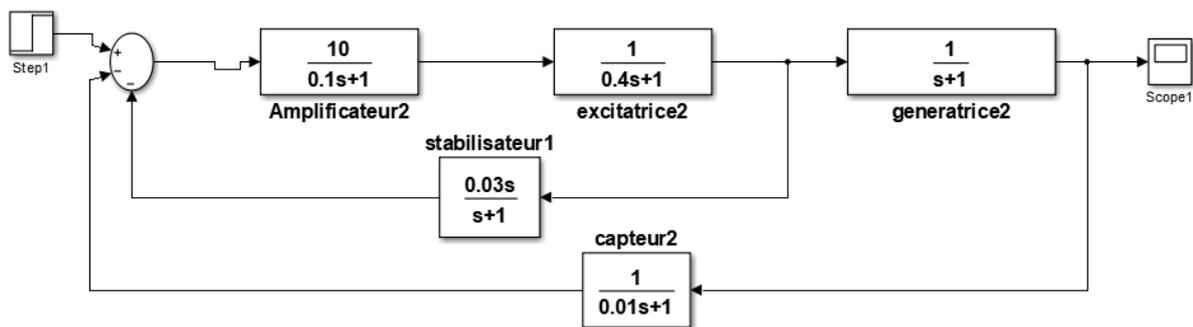


Figure IV.18: Schéma bloc de Système AVR avec Stabilisateur

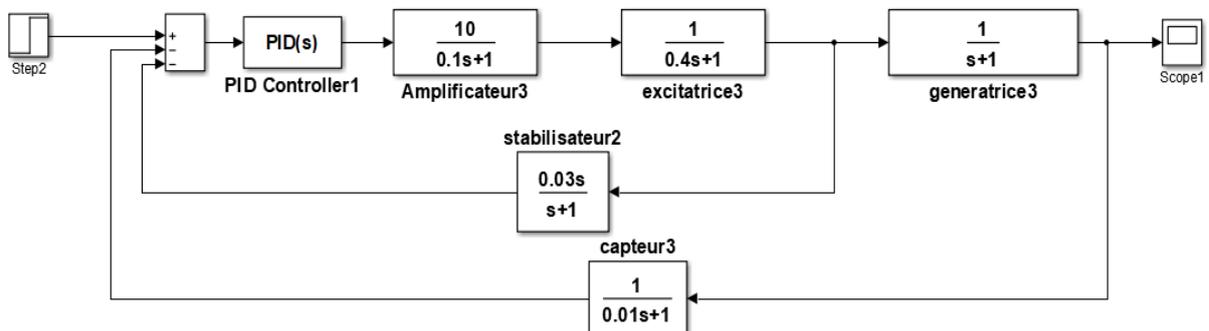


Figure IV.19: Schéma bloc de Système AVR avec Stabilisateur et PID

Dans ce qui suit, nous traçons dans le même graphe, les tensions terminales V_t des trois systèmes : AVR seulement, AVR-Stabilisateur et AVR-Stabilisateur-PID

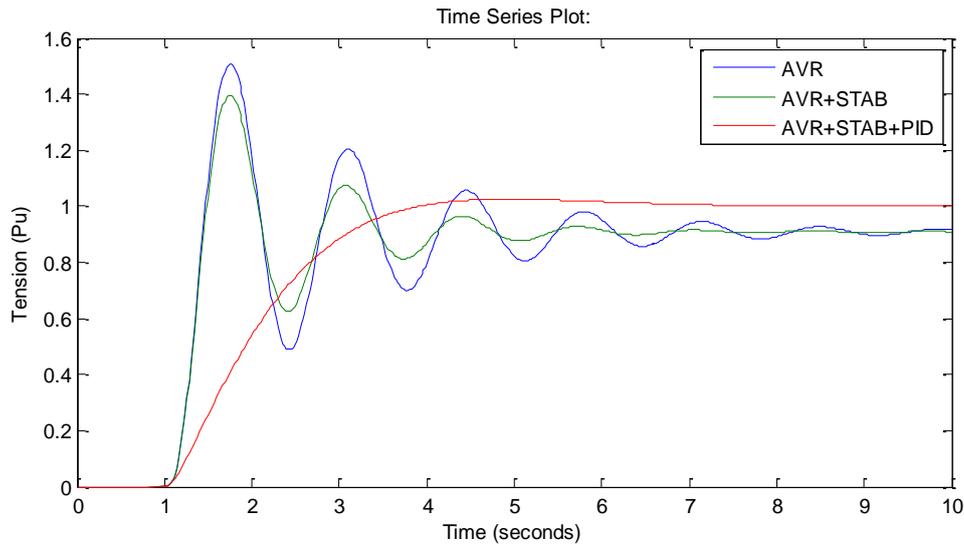


Figure IV.20:La tension terminale V_t

Le paramétrage du PID que nous avons utilisé pour la simulation est obtenu par la méthode ‘Tuning parameter ‘ de Matlab avec les paramètres suivants :

Forme du PID utilisé : forme PID avec filtre

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

- Controller parameters

Source:	internal
Proportional (P):	0.106957984420471
Integral (I):	0.103030498190406
Derivative (D):	0.0250741712656984
Filter coefficient (N):	169.638857810672

Tune...

Nous obtenons les résultats affichés dans le tableau suivant :

Tableau IV.16 : Résultats d’étude du système AVR seulement et AVR+Stabilisateur et AVR+Stabilisateur +PID

	Dépassement	Tr (+5%)	$\varepsilon(\infty)$
AVR seulement	1.5065	6.6228s	$ 1 - 0.9157 = 0.0828$
AVR+ Stabilisateur	1.4	4.53s	$ 1 - 0.9093 = 0.0907$
AVR+Stabilisateur +PID	1.0247	3.37 s	0

Interprétation des résultats :

- Système AVR seulement : système non précis, avec un grand dépassement (RT) et non rapide.
- Système AVR + Stabilisateur : système non précis, avec un grand dépassement (RT), rapidité améliorée.
- Système AVR + Stabilisateur +PID : système stable, précis et rapide

Donc, afin de satisfaire les trois performances de stabilité, rapidité et précision, nous choisissons la dernière simulation qui correspond à la combinaison du système AVR au stabilisateur et PID

IV .8. Conclusion

En conclusion, l'étude comparative des différents systèmes de régulation de tension (AVR) nous a permis de comprendre l'impact significatif des régulateurs PID dans le maintien de la stabilité du système électrique. En examinant ces systèmes du point de vue fréquentiel et temporel, nous avons observé que l'ajout d'un régulateur PID améliore les performances du système AVR en réduisant les oscillations et en minimisant les temps de réponse, assurant ainsi une régulation plus rapide et précise de la tension. En outre, l'intégration de l'AGC dans le système AVR renforce sa capacité à répondre aux fluctuations de la demande d'électricité, en assurant un équilibre continu entre l'offre et la demande. Comparativement, les systèmes AVR seuls peuvent présenter des performances acceptables mais peuvent être moins réactifs aux variations de charge. L'ajout d'un stabilisateur améliore la stabilité du système en minimisant les oscillations indésirables, tandis que l'incorporation simultanée d'un régulateur PID renforce encore davantage cette stabilité en optimisant la réponse du système aux perturbations. En somme, le choix du système AVR dépend des exigences spécifiques en termes de réactivité, de stabilité et de précision de la régulation de tension, avec une attention particulière portée à l'intégration de régulateurs PID et d'autres dispositifs de contrôle pour optimiser les performances globales du système électrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'étudier en détail la régulation de tension automatique d'un alternateur synchrone de la centrale thermique de Cap-Djinet.

Dans un premier temps, une présentation de la centrale thermique de Cap-Djinet a été effectuée, mettant en lumière ses caractéristiques techniques et son rôle dans la production d'électricité pour la région. Cela a permis de bien cadrer le contexte de l'étude.

Ensuite, une modélisation approfondie de la machine synchrone (l'altérateur) à rotor bobiné utilisée dans cette centrale a été réalisée. Cela a impliqué l'étude de la structure de la machine, de ses paramètres électriques et magnétiques, ainsi que de son comportement dynamique. Cette étape était cruciale pour pouvoir ensuite analyser efficacement les systèmes de régulation.

Puis, nous avons réalisé une étude sur les systèmes d'excitation et leurs principaux composants. L'étude a porté sur les différentes techniques de régulation automatique de la tension, notamment les régulateurs PID, les AVR classiques.

Enfin, des stratégies de contrôle plus avancées. Des simulations effectuées sous Matlab/Simulink ont permis de tester et d'évaluer les performances de ces différents systèmes de régulation dans les conditions de fonctionnement de la centrale.

Au terme de ce travail, il ressort que le système de régulation de tension automatique actuellement implémenté dans la centrale thermique de Cap-Djinet est bien adapté et permet un contrôle efficace de la tension de sortie de l'alternateur, assurant ainsi une qualité de l'énergie électrique fournie. Néanmoins, des pistes d'amélioration ont également été identifiées, notamment concernant la robustesse du système face aux perturbations et les possibilités d'optimisation des paramètres de régulation.

Ce mémoire constitue donc une étude approfondie et détaillée de la régulation de tension automatique dans le contexte spécifique de la centrale thermique de Cap-Djinet, pouvant servir de référence pour d'autres centrales thermiques similaires.

Références bibliographiques

- [1] Document interne de la centrale thermique de Cap-Djinet : « KWU service de formation professionnel, Référence de la section 5501 », 1984.
- [2] MELIANI.Met TOUZI M.L : « Etude et maintenance d'une pompe d'eau de mer WE de la centrale de Ras-Djinet », mémoire de fin d'étude, institut national specialise en formation professionnelle i.n.s.f.p. ex : i.t.e.e.mbeaulieu – el harrach,2013
- [3]Document interne de la centrale thermique de Cap-Djinet «formation technicien principal conduit central TV(FMT.1) « alternateur » (fascicule 1/5) réalisé par Ghersallah.A et Saada.D», 1995
- [4] Document interne de la centrale thermique de Cap-Djinet «Documentation technique des constructeurs de la centrale réalisé par klai.s»
- [5] Document interne de la centrale thermique de Cap-Djinet «KWU service de formation professionnel, Référence de la section 5522», 1984.
- [6] Document interne de la centrale thermique de Cap-Djinet «formation technicien principal conduit central TV(FMT.1) « alternateur » (fascicule 1/2) réalisé par Ghersallah.A et Saada.D», 1995
- [7] : Document intitulé « Machine Synchrone » : du site « <http://www.elharzli.com/MS.php> », disponible en ligne : Avril 2024.
- [8] Document intitulé« ElectricalSymbols » du site «<https://gallery.proficad.com/symboles/installations-electriques/machines>», disponible en ligne :Avril 2024
- [9] Anis OTMANE-CHERIF « Observation de la Machine Synchrone à Rotor Bobiné Sans Capteurs (Sensorless) », Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou ,2016.
- [10] AIT AMARA Nassim « Etude Comparative des Machines Synchrones Excitées par Aimants et courants électriques », Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira –BEJAIA, 2014.
- [11] Document intitulé« Machines synchrones à double excitation MSDE » du site « <https://www.techniques-ingenieur.fr/> »disponible en ligne : en avril 2024.
- [12] Sami HLIOUI « Étude d'une Machine Synchrone à Double Excitation Contribution à la mise en place d'une plate-forme de logiciels en vue d'un dimensionnement optimal, Energie électrique ». Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2008.

- [13] LAKHAL AMEUR « Etude et Modélisation de la Machine Synchrone » Mémoire de fin d'étude, Université Badji Mokhtar – ANNABA, 2020.
- [14] B.Adkins, R.G.Harley, “The theory of alternating current machines: Application to practical problems”, Chapman and Hall, London, 1975.
- [15] Document intitulé «Modélisation fonctionnelle de la machine synchrone » du site « <https://www.techniques-ingenieur.fr/> » disponible en ligne :Avril 2024
- [16] Francisco Javier POZA LOBO « Modélisation, Conception et Commande d'une Machine synchrone sans Balais Doublement Alimentée pour la Génération à Vitesse Variable », thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2003.
- [17] HADJI Athmanet BOUGUERRA Ben Youcef Mohamed « Régulation de Tension d'un Alternateur Triphasé » Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2019
- [18] Document interne de la centrale thermique de Cap-Djinet : Ghersallah.A et Saada.D, « formation technicien principal conduit central TV(FMT.2) : alternateur excitation (fascicule 2/11)», 1995.
- [19] Document interne de la centrale thermique de Cap-Djinet : « ELIN Alternateur description, groupe d'excitation »
- [20] BABA ARBI Idriss : « Régulation Industrielle » Cours de 3^{ème} année Licence Electrotechnique, 2019/2020
- [21] Document de site « <https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/principes-de-regulation-p-pi-pid/> Principes de régulation : P – PI – PID » disponible en mai 2024.
- [22] Document de site «<https://www.sourcetric.com/fr/glossaire/regulation-pid/> » disponible en avril 2024.
- [23] BOUTANA Walid et YKHELFOUNE Nedjmeddine ««Etude comparative en simulation entre un régulateur PID et un régulateur flou», Mémoire de master, Université Mohammed Seddik BENYAHIA – Jijel,2019
- [24] Document de site «https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur_PID/ » disponible en mai 2024.
- [25] Zouhir AMOKRANE «Evaluation des paramètres électriques des convertisseurs photovoltaïques»,Thèse de Doctorat Ecole Nationale Polytechnique, 2019
- [26] Khedidja AYACHE « Amélioration de la productivité et de la fiabilité d'un système photovoltaïque sous ombrage partiel », Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DUQUÉBEC, MONTRÉAL, LE 7 AOÛT 2020
- [27] HASSENI Seif El Islam «Commande Robuste Non-linéaire d'un Quadrotor», , Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra ,2019/2020

[28] Document intitulé « Three-Channel Cost Function Based Artificial Bee Colony Algorithm for PID Tuning », disponible en ligne : en mai 2024.

[29] Chafa Aliane, Aziz Zerioul, Etude d'un groupe électrogène par simulation numérique, Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2016.

[30] Document de site « <https://www.genpowerusa.com/content/files/MANUAL-LEROY-SOMER-AVR-R129> » disponible en mai 2024.

[31] Yahia Amina, Banali Khadojaet Anes Zobire : « Etude de la commande de régulation de tension d'une machine synchrone » Mémoire de fin d'étude, Université Saad DAHLAB de BLIDA, 2020

[32] Zafer Bingul and Oguzhan Karahan: 'A Novel Performance Criterion Approach to Optimum Design of PID Controller Using Cuckoo Search Algorithm for AVR System', Journal of the Franklin Institute, V(35), N°13, September 2018, Pages 5534-5559.
<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.05.056>

[33] Ali, A., Belachew, B. (2020). Designing and Modeling of a Synchronous Generator Using AGC, PSS, and AVR Case Study on Tis Abay II Hydroelectric Power System. In: Advances of Science and Technology. ICAST 2019, vol 308. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-43690-2_25