

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'
Ingénieur d'état en électrotechnique

Intitulé

**Modélisation et Régulation de la Tension et de la Vitesse de l'Ensemble
Turboalternateur d'une Centrale Electrique à Cycle Combiné**

Présenté par
Said BENSEBAA et Messaoud HAMZA

Sous la direction de **Pr. O. Touhami**
soutenu publiquement le 15 juin 2016

Membres du Jury

Président :	R. Ibtouen, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	O. Touhami, Professeur à l'ENP
Examineur :	A. Hellal, Professeur à l'ENP
Invité :	B. Berra, Operation Manager at GE (PGS)

ENP 2016

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

ملخص

الدراسة المطروحة في هذه المذكرة تتمحور حول نمزجه و تعديل شدة التوتر و سرعة المولد (9FB-450H) لضمان استقرار الشبكة الكهربائية و نوعية الخدمة المقدمة, لهذا الغرض قمنا بتقديم نموذج كامل انطلاقا من المعادلات الكهربائية و الميكانيكية لطاقت المولد, بهدف دراسة و تحليل سلوك المولد امام التذبذبات المستمرة للطلب على الطاقة الكهربائية. هذا النموذج قد تم تمثيله بواسطة برنامج Matlab/Simulink بغرض تحقيق التحكم في شدة التوتر و سرعة المولد (AVR, PID) النتائج المحصل عليها من النمذجة كانت مرضية .

كلمات مفتاحية: مولد , نموذج, AVR, PID, Matlab/Simulink,

Abstract

The study presented in this work focuses on modeling and regulating the terminal voltage and the speed of turbo-generator (9FB-450H) type GE, to ensure the stability of the electrical network and quality of service. For this, a comprehensive model of turbo-generator has been developed based on the electrical and mechanical equations to analyze Generator behavior against the load disturbances. This model has been implemented on Matlab / Simulink to establish a control based on voltage and speed regulators (AVR, PID). The results of our simulations are satisfactory.

Key-words: Turbo-Generator, model, AVR, PID, Matlab / Sumilink.

Résumé

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur la modélisation et la régulation de la tension et de la vitesse du turboalternateur (9FB-450H) type GE afin d'assurer la stabilité du réseau électrique ainsi que la qualité de service. A cet effet, un modèle complet de turboalternateur a été élaboré. Il est basé sur les équations électriques et mécaniques de l'ensemble, ce qui nous permet d'avoir une idée sur le comportement de l'alternateur lors des perturbations de charge. Ce modèle a été implémenté sur Matlab/Simulink, dans le but d'établir une commande à base de régulateurs (AVR et PID) permettant de contrôler la tension et la vitesse. Les résultats de simulation sont satisfaisants.

Mots-Clés : Turboalternateur, Modèle, AVR, PID, Matlab / Simulink.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail de fin d'études :

A ma chère maman, qui a sacrifié sa vie pour notre réussite, qui nous a éclairé le chemin par son amour et ses conseils judicieux.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour, mon respect, et mes profonds sentiments envers elle.

A mon frère, et mes sœurs.

A la grande famille **HAMZA & AMMAR MOUHOUB.**

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes professeurs :

Leurs générosités et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect.

A mon meilleur ami.....

A tous les gens qui m'aiment.

MESSAOU

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien et tous ses sacrifices, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie. Merci pour tout, ma mère chérie je t'aime.

Mon père, le Monsieur avec qui j'ai jamais manqué de quoi que ce soit, sans ses précieux conseils je ne serais jamais arrivé à ce stade, il a toujours été là pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi, que Dieu puisse te garder pour moi cher papa.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mon meilleur ami Amine ZAMOUCHE, je n'oublierais jamais les bons moments qu'on a passé ensemble. Je remercie Dieu de m'avoir donné un tel ami.

Toute la famille **BENSEBAA** et **BEZGHOU**

Mes professeurs de l'ENP qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

BENSEBAA Said

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord le Dieu tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions vivement, Mr **O. Touhami** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui a accepté d'être notre rapporteur, et surtout pour son aide à propos des observations concernant le travail effectué. Nous avons l'honneur d'avoir un professeur de telle qualité qui nous a toujours encouragés durant notre projet. Nous le remercions sincèrement pour le soutien et la confiance qu'il nous a accordé tout le long du notre projet.

Nous remercions notre chef de département Mr **R. Ibiouen** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, il a toujours était là pour nous aider et nous soutenir durant notre mémoire, avec lui on ne manque de rien.

Nous remercions également tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et plus particulièrement ceux du département d'Électrotechnique.

En second lieu, nous tenons à remercier **Mr B. Berra** de nous avoir donné l'opportunité de réaliser notre projet au sein de la centrale, pour sa disponibilité, son aide, ses conseils précieux, ses critiques constructives, ses explications et ses suggestions pertinentes ainsi que ses qualités humaines.

Nous tenons à remercier nos camarades, nos amis et toutes les personnes qui nous ont soutenus d'une façon ou d'une autre.

Nous terminons ces remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

Introduction générale	(07)
-----------------------------	------

Chapitre I : Généralités sur les centrales électriques à cycle combiné

I.1 Introduction.....	(10)
I.2 Centrales à cycle simple	(10)
I.3 Centrales à Cycle combiné	(12)
I.4 Centrale thermique à cycle combiné de Hadjret Ennous en Algérie.....	(12)
I.5 Principaux composants d'une centrale thermique à cycle combiné.....	(13)
I.5.1 Turbine à gaz (9FB)	(13)
I. 5.2 Turbine à vapeur.....	(18)
I.5.3 Chaudière de récupération de chaleur	(21)
I.5.4 Condenseur	(23)
I.5.5 Alternateur.....	(24)
I.6 Principe de fonctionnement d'une centrale thermique à cycle combiné	(27)
I.7 Conclusion	(29)
I. 8 Références utilisées.....	(29)

Chapitre II : Calcul et vérification des Paramètres de l'alternateur

II.1. Introduction	(31)
II.2 Calcul des paramètres	(32)
II.3 Tracé des caractéristiques de réponse en fréquence	(33)
II.4 Détermination du courant inducteur durant un court-circuit triphasé brusque.....	(38)
II.5 Détermination du courant de phase durant un court-circuit triphasé brusque.....	(39)
II.6 Conclusion	(41)
II. 7 Références utilisées.....	(41)

Chapitre III : Modélisation des sous-ensembles du groupe Turbine-alternateur

III.1 Introduction.....	(43)
-------------------------	------

III.2 Modèle de l’alternateur.....	(43)
III.3 Passage du système d’axes (abc) au système biphasé de Park	(45)
III.4 Modèle de l’alternateur relié à un réseau de puissance infinie	(50)
III.5 Modèle de la machine en grandeur relative, et en valeurs réduites.....	(52)
III.6 Modèle de la Turbine.....	(54)
III.7 Blocs Simulink	(56)
III.8 Conclusion.....	(62)
III.9 Références utilisées.....	(63)

**Chapitre IV : Régulation de la tension de sortie et de la vitesse de rotation
de l’ensemble turbine-alternateur**

IV.1 Introduction.....	(65)
IV.2 Système de contrôle.....	(65)
IV.3 Régulation de la tension de sortie de l’alternateur.....	(66)
IV.4 Régulation de la vitesse de rotation de l’ensemble turbo-alternateur.....	(69)
IV.5 Synthèse des régulateurs.....	(70)
IV.6 Schémas Blocs	(75)
IV.7 Résultats de simulation.....	(76)
IV.8 Conclusion.....	(79)
IV.9 Références utilisées.....	(80)
Conclusion générale.....	(81)
Annexes	(87)

Liste des figures

1.1	Le cycle simple de la turbine à vapeur.....	(11)
1.2	Le cycle simple de la turbine à gaz.....	(11)
1.3	Cycle combiné	(12)
1.4	Turbine à gaz 9FB(GE)	(14)
1.5	Compresseur à 18 étages ,modèle GE.....	(15)
1.6	Les 18 chambres de combustion.....	(16)
1.7	Les composants d'une turbine à gaz.....	(17)
1.8	Schéma d'une turbine à vapeur.....	(19)
1.9	Différents types de turbines à vapeur.....	(20)
1.10	Schéma descriptif d'un condenseur.....	(24)
1.11	Alternateur 450H,GE.....	(24)
1.12	Ensemble noyau-disque du stator.....	(26)
1.13	Rotor de 450H Generator (GE).....	(26)
1.14	Système d'excitation par brushless-DC.....	(27)
2.1	Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe direct.....	(35)
2.2	Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe direct.....	(35)
2.3	Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe quadrature.....	(36)
2.4	Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe quadrature.....	(37)
2.5	Courant d'inducteur de court-circuit (I_f).....	(39)
2.6	Courant de phase de court-circuit.....	(40)
3.1	Schéma équivalent de la machine synchrone muni d'amortisseur.....	(43)
3.2	Modèle de la machine synchrone dans le repère (dqo).....	(48)
3.3	Alternateur relié à un nœud de puissance infini.....	(51)
3.4	Turbine à gaz.....	(55)
3.5	Cycle idéalisé de la turbine à gaz.....	(56)
3.6	Réalisation du modèle de l'alternateur à vide sous environnement Simulink.....	(57)
3.7	Modèle simplifié de l'alternateur.....	(58)

3.8	Tension de l'alternateur à vide.....	(58)
3.9	Vitesse de rotation à vide.....	(59)
3.10	Les courants I_f , I_D et I_Q	(59)
3.11	Modèle de l'alternateur en charge sous Simulink.....	(60)
3.12	Bloc-simulink du couple électromagnétique.....	(61)
3.13	Courant des trois phases statoriques	(61)
3.14	Vitesse de rotation en charge.....	(61)
4.1	Circuit de contrôle.....	(65)
4.2	Représentation du groupe de régulation.....	(66)
4.3	Modèle schématique d'un régulateur.....	(67)
4.4	Modèle du système d'excitation IEEE-type ST1.....	(68)
4.5	Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1.....	(68)
4.6	Modèle schématique d'un régulateur AVR.....	(69)
4.7	Principe de régulation de la vitesse.....	(69)
4.8	Régulateur PID et servomoteur.....	(69)
4.9	Quelques systèmes à réguler.....	(70)
4.10	Schéma fonctionnel d'un correcteur PI.....	(71)
4.11	Schéma fonctionnel d'un correcteur PD.....	(72)
4.12	Schéma fonctionnel d'un correcteur PID.....	(73)
4.13	Structure combinée de la génératrice et les blocs de régulation sous Simulink.....	(75)
4.14	Structure du régulateur de tension de sortie sous Simulink.....	(75)
4.15	Structure du régulateur de la vitesse(W_r) sous Simulink.....	(76)
4.16	Courants des trois phases à $t=0s$ et tension d'une phase.....	(76)
4.17	Vitesse de rotation et angle interne δ de l'alternateur à $t=0s$	(77)
4.18	Courants des trois phases à $t=2s$	(78)
4.19	Tension de sortie (V_t) et Vitesse (W_r) de l'alternateur à $t=2s$	(78)
4.20	Angle interne (δ) et glissement de l'alternateur à $t=2s$	(79)

Liste des tableaux

I.1	Fiche technique de la centrale Hadjret Ennous.....	(13)
I.2	Caractéristiques des Turbine(HP), (MP) et(BP).....	(21)
I.3	Propriétés de la vapeur à chaque niveau de la chaudière de récupération.....	(22)
II.1	Récapitulatif des résultats obtenus.....	(38)

Liste des symboles

r_a	La résistance d'enroulement statorique.
r_f	La résistance d'excitation.
r_D, r_Q	La résistance de l'enroulement amortisseur sur l'axe d et q respectivement.
X_a	La réactance de fuite par phase d'enroulement statorique.
X_f	La réactance de fuite d'enroulement d'excitation.
X_D, X_Q	La réactance d'enroulement -amortisseur sur l'axe d et q respectivement.
X_{ad}, X_{aq}	La réactance mutuelle magnétisante sur l'axe d et q de l'alternateur respectivement.
X_d, X_q	Réactances synchrones respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
X'_d, X'_q	Réactances transitoires respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
X''_d, X''_q	Réactances sub_transitoires respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
T'_{d0}, T'_{q0}	Constantes de temps transitoires à circuit ouvert respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
T''_{d0}, T''_{q0}	Constantes de temps sub_transitoires à circuit ouvert respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
T'_d, T'_q	Constantes de temps transitoires de court-circuit respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
T''_d, T''_q	Constantes de temps sub_transitoires de court-circuit respectivement d'axe direct et d'axe quadrature.
T_a	La constante de temps en court-circuit de l'induit.
T_{kd}	La constante de temps sub_transitoire du circuit inducteur.
$V_{a,b,c}$	Les Tensions des phases a,b,c respectivement.
$\Psi_{a,b,c}$	Les flux magnétiques des trois enroulement statorique a,b,c respectivement.

$i_{a,b,c}$	Les courants des phases a,b,c respectivement.
$V_{f,D,Q}$	Les Tensions d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement.
$\Psi_{f,D,Q}$	Les flux magnétiques d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement.
$i_{f,D,Q}$	Les courant d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement.
T_m	Le couple mécanique.
T_e	Le couple électromagnétique.
P_e	Puissance électrique.
w_s	La vitesse de synchronisme.
w_r	La vitesse de rotation.
δ	L'angle interne de l'alternateur
g	Le glissement de rotor
L_d	L'inductance propre d'axe direct.
L_q	L'inductance propre d'axe quadrature.
L_f	L'inductance propre d'excitation.
L_D	L'inductance propre d'amortisseur d'axe direct.
L_Q	L'inductance propre d'amortisseur d'axe quadrature.
$M_{df}, M_{Dd}, M_{fD},$	Mutuelle inductance d'axe direct.
$M_{Qq},$	Mutuelle inductance d'axe quadrature.
V_r	La tension de référence
V_t	Tension de la sortie de l'alternateur
PSS	Stabilisateur de puissance

Introduction générale

Les centrales électriques produisent de l'énergie électrique en transformant l'énergie mécanique, chimique ou nucléaire en énergie électrique ou calorifique. Les centrales électriques, à cycle combiné, représentent le modèle le plus performant en matière de production d'énergie électrique avec un rendement élevé, un coût d'exploitation réduit et un impact faible sur l'environnement. Les premières réalisations de ce type de centrales datent des années 1950 mais ce n'est que vers 1975 que leur développement a réellement commencé.

Les centrales utilisent des turboalternateurs de grande puissance pour la production de l'énergie électrique. Le problème, le plus important dans l'analyse de ces systèmes est incontestablement leur stabilité. En effet, les variations de charge, les défauts de court-circuit ou encore la perte de synchronisme peuvent affecter le système de puissance à tout instant et peuvent, dans certains cas, l'emmener en dehors des zones de stabilité ce qui peut conduire alors à un déséquilibre du réseau. Les perturbations sont à l'origine de l'apparition d'une différence entre la puissance mécanique et la puissance électrique. L'écart se traduit donc par une variation au niveau de la vitesse de rotation de l'alternateur ainsi qu'une variation au niveau de la tension de sortie. Les turboalternateurs dans les centrales de production doivent adapter en permanence leur point de fonctionnement à des valeurs nominales. Ils sont le plus souvent soumis à de fortes contraintes pour maintenir la vitesse et la tension à leurs valeurs assignées.

Pour assurer la stabilité du réseau électrique ainsi que la sécurité au niveau des installations, il faut mettre en œuvre des dispositifs de régulation. Ces derniers doivent également garantir le fonctionnement de ces machines dans des limites acceptables. C'est ce à quoi nous nous intéressons pour garantir la stabilité du système par l'insertion des régulateurs de type PID (Proportionnel Intégral Dérivé) dans les systèmes de commande. L'étude du système en régime dynamique nécessite un modèle mathématique. Afin d'analyser le fonctionnement du turboalternateur de la centrale électrique de la société de production de Hadjret Ennous à Tipaza, nous développons donc un modèle après avoir déterminé les paramètres nécessaires.

Après avoir présenté la centrale à cycle combiné de Hadjret Ennous ainsi que son fonctionnement, on procède à la détermination des paramètres (réactances et constantes de temps du turboalternateur). Ensuite, on développe des modèles numériques de chaque élément du groupe turboalternateur avec un rappel sur les différentes équations mécaniques et électriques de l'ensemble. Enfin, nous réalisons une régulation pour la tension de sortie par application d'un régulateur "AVR" (Régulateur Automatique de Tension) au niveau du système d'excitation et un système de régulation PID permettant de réguler la vitesse de rotation de l'ensemble turboalternateur.

CHAPITRE I

Généralités sur les centrales électriques à cycle combiné

I.1 Introduction

L'électricité est l'une des formes d'énergie les plus utilisées. Elle a marqué de façon considérable le mode de vie des hommes et elle est devenue l'une des sources d'énergie les plus courantes dans la vie quotidienne.

Il existe en effet différents moyens de production d'énergie électrique. On a les centrales dites classiques, incluant les centrales thermiques à gaz ou au fuel, les centrales à vapeur et les centrales nucléaires. On a également les centrales dites de sources renouvelables, à savoir : éolienne, hydraulique, photovoltaïque, géothermique, etc. En Algérie, l'énergie électrique est produite principalement à partir du gaz naturel. La puissance installée dans l'ensemble des centrales utilisant cette énergie dépasse les 96% ; le reste des énergies employées se répartit principalement entre le gasoil dans les centrales Diesel et hydraulique dans les centrales hydroélectriques. Le gaz est quant à lui utilisé dans des centrales thermiques à vapeur, à gaz ainsi que dans les centrales à gaz et à vapeur appelées centrales à cycle combiné.

I.2 Centrales à cycle simple

Les centrales à cycle simple existent sous deux formes :

- La première concerne les centrales thermiques à vapeur dans lesquelles l'énergie calorifique du gaz est utilisée pour produire de la vapeur qui actionne une turbine reliée à un alternateur Fig.I.1. Mais à part les combustibles, une telle installation doit disposer d'une source d'alimentation en eau afin de compenser les pertes d'eau inévitables dans le circuit et de refroidir (condenser) la vapeur d'échappement de la turbine afin qu'elle puisse servir de nouveau dans le cycle de génération de vapeur. Le rendement de ce type de centrale varie entre 45 et 47%, mais avec un lent démarrage. En Algérie ces centrales sont situées sur la côte.
- La deuxième concerne les centrales thermiques à gaz dans lesquelles le fluide moteur n'est autre que les gaz chauds produits par la combustion du gaz naturel avec l'air comprimé provenant du compresseur, Fig.I.2. À l'échappement de la turbine à gaz, la température des fumées dépasse les 500°C. Une grande partie de la chaleur, soit environ 67% de celle-ci, est

ainsi perdue dans l'atmosphère. Le rendement de la turbine à gaz la plus performante fabriquée à ce jour est de 40,5% [1].

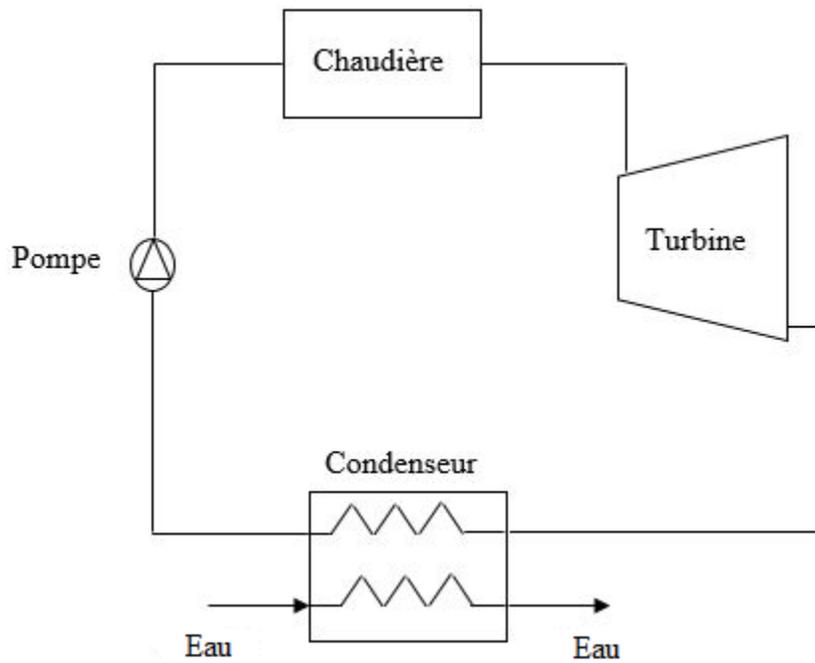


Fig.I.1. Cycle simple de la turbine à vapeur

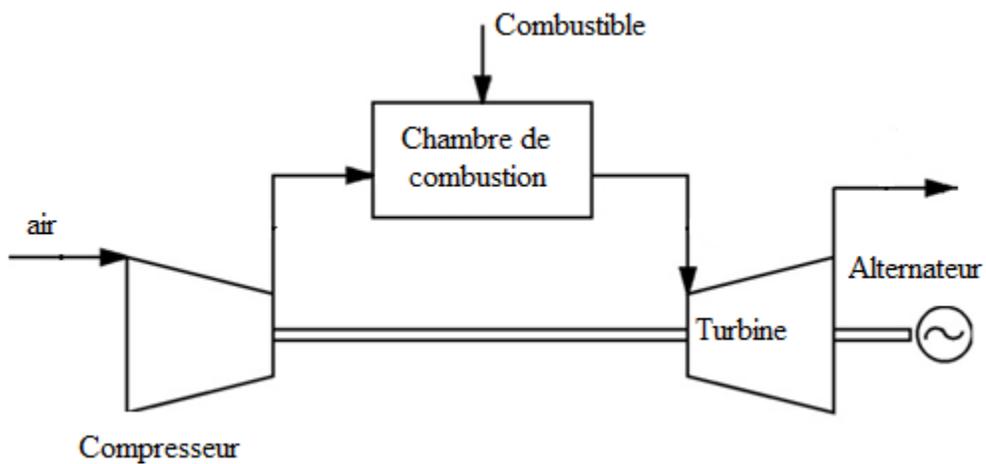


Fig.I.2. Cycle simple de la turbine à gaz

I.3 Centrales à cycle Combiné

Afin d'améliorer le rendement des turbines à gaz et de récupérer l'énergie perdue par échappement, on introduit le cycle combiné qui consiste à faire usage de cette chaleur perdue pour générer de la vapeur qui sert de fluide moteur pour une turbine à vapeur. Le cycle consiste à brûler les combustibles dans une turbine à gaz, récupérer les fumées d'échappement pour produire de la vapeur dans une chaudière de récupération et finalement la développer dans une turbine à vapeur qui entraîne l'alternateur. Malgré la complexité technique et le coût élevé, les centrales thermiques à cycle combiné sont plus économiques avec un rendement qui peut atteindre 60% [1], [2].

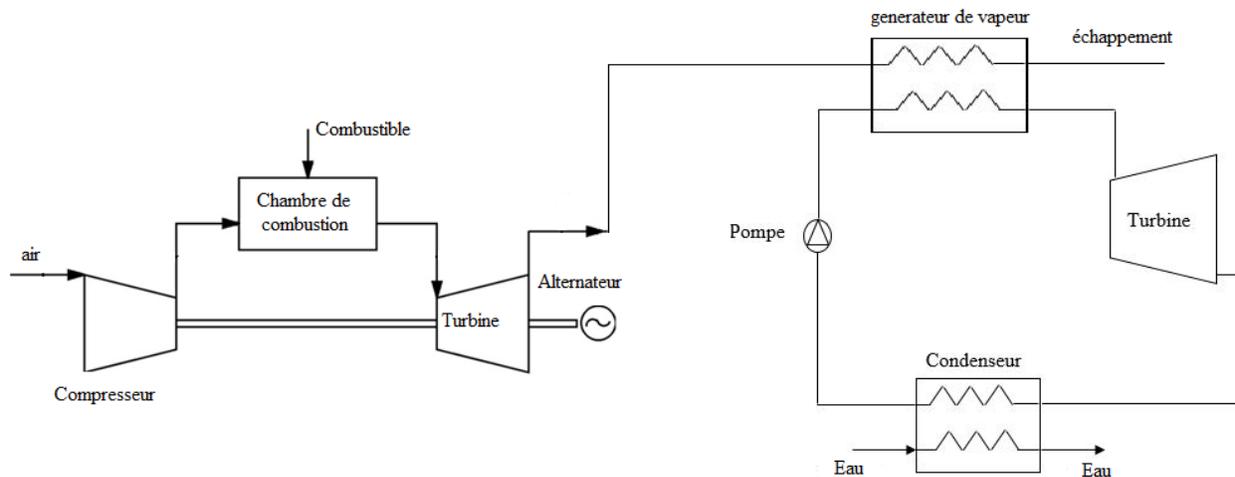


Fig.I.3. Cycle combiné [1]

I.4 Centrale thermique à cycle combiné de Hadjret Ennous en Algérie

Cette centrale est située à l'ouest de Cherchell sur la méditerranée dans la wilaya de Tipaza. Elle relève de Shariket kaharabaa Hadjret Ennous (SKH), de type "single shaft" et a commencé à produire de l'électricité en décembre 2008.

La centrale à cycle combiné de Hadjret Ennous possède une puissance de 1200 MW. Elle comprend trois tranches de production d'électricité en cycle combiné générant plus de 400 MW chacune. Chaque tranche est constituée d'une turbine à gaz de type (9FB), d'un alternateur de

type (450H), d'une turbine à vapeur de type (A15), d'une chaudière de récupération de chaleur et d'un condenseur de vapeur, Tableau I.1.

La centrale possède un système de refroidissement muni d'une prise d'eau de mer, d'une station de pompage et d'une unité de dessalement permettant de produire une eau déminéralisée nécessaire pour le fonctionnement de la centrale (cycle de vapeur).

Tableau I.1. Fiche technique de la centrale Hadjret Ennous [3]

Constructeur et opérateur	SNC LAVALIN CONSTRUCTORS INTERNATIONAL INC. « SLCI »
Type de centrale	Cycle combiné en Single Shaft
Puissance totale	3 X 409 MW
Source de refroidissement	Eau de mer
Combustible principal	Gaz naturel de Hassi R'Mel
Combustible de secours	GASOIL
Evacuation d'énergie	A travers un avant-poste blindé 400 kV Vers le Poste d'El Affroun
Durée du contrat d'exploitation par SNC LAVALIN « SLCI »	20 Ans

I.5 Principaux composants d'une centrale thermique à cycle combiné

La centrale thermique à cycle combiné est constituée essentiellement des équipements suivants :

- I.5.1 Turbine à gaz (9FB)

La turbine à gaz, appelée turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique à partir de l'énergie thermique des combustibles, Fig. 1. 4.

La turbine à gaz (9FB) de General Electric [4] comprend les éléments suivants [5] :

- Un compresseur

- Un système de combustion
- Une turbine
- Un système d'échappement

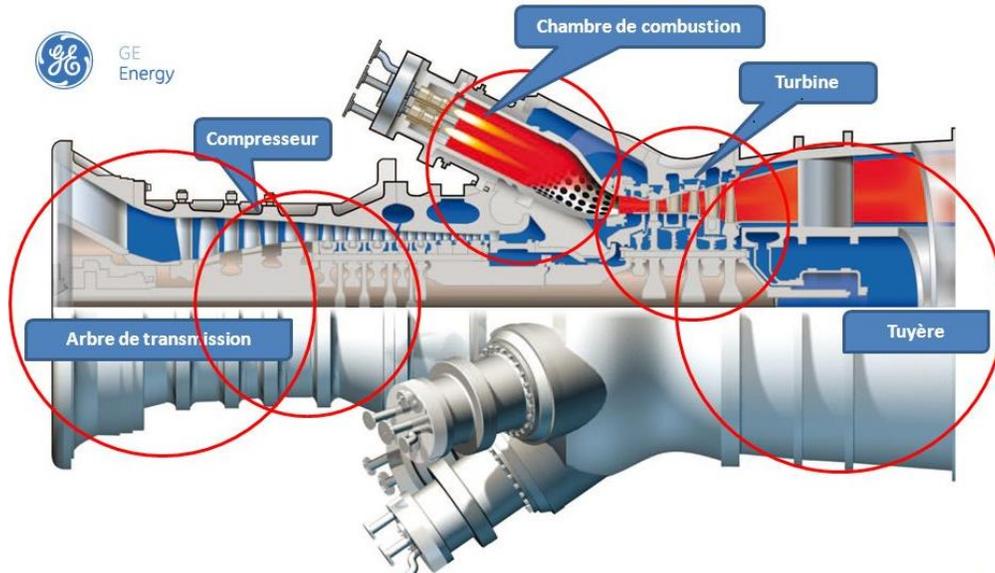


Fig.I.4. Turbine à gaz 9FB (GE) [4]

- Compresseur

Le compresseur permet d'alimenter en air sous pression la chambre de combustion de la turbine à gaz pour garantir un bon mélange air/combustible pour récupérer une énergie utile selon un cycle thermodynamique. Le compresseur est de type axial, à 18 étages, le taux de compression est 18.3 et le débit d'air est de 600 kg/s environ, Fig.1.5. Le compresseur absorbe 2/3 du travail produit par la turbine à gaz.-

Dans le compresseur, l'air est mis en rotation par une rangée circulaire d'aubes mobiles (Rotor) et subit une augmentation de vitesse. En franchissant ensuite une rangée d'aubes fixes (Stator), la vitesse de l'air diminue et sa pression augmente. Les aubes du rotor fournissent l'énergie nécessaire à la compression de l'air dans chaque étage et les aubes du stator guident l'air suivant une direction bien définie vers l'étage suivant.

À la sortie du corps d'échappement du compresseur, l'air est dirigé vers les chambres de combustion. Une partie de l'air du compresseur est utilisée pour le refroidissement de la turbine, l'étanchéité des paliers et la commande du dispositif anti-pompage.



Fig.I.5. Compresseur à 18 étages, modèle GE [4]

- Système de combustion DLN 2.6 + (Dry low NOx technology)

Le système de combustion est de type à flux inversé avec 18 chambres de combustion réparties autour de la périphérie du corps de décharge du compresseur. Les chambres de combustion sont numérotées dans le sens inverse de l'horloge en partant du coin supérieur gauche de la machine. Ce système comprend également des injecteurs de combustion, un système d'allumage par bougie, des détecteurs de flammes et les tubes "cross-fire", Fig.I.6. Toutes les chambres de combustion sont interconnectées au moyen de tubes Crossfire.

General Electric a modernisé les turbines à gaz 9FB de la centrale thermique de Hadjret Ennousse grâce à son tout nouveau système de combustion "dry low NOx" qui est un système de combustion à sec avec basses émissions d'oxyde d'azote. Cette technologie de contrôle des émissions de GE peut réduire d'au moins 40 % les émissions d'oxyde d'azote (NOx) et de monoxyde de carbone (CO) sans utiliser d'eau ni de produit chimique [4].

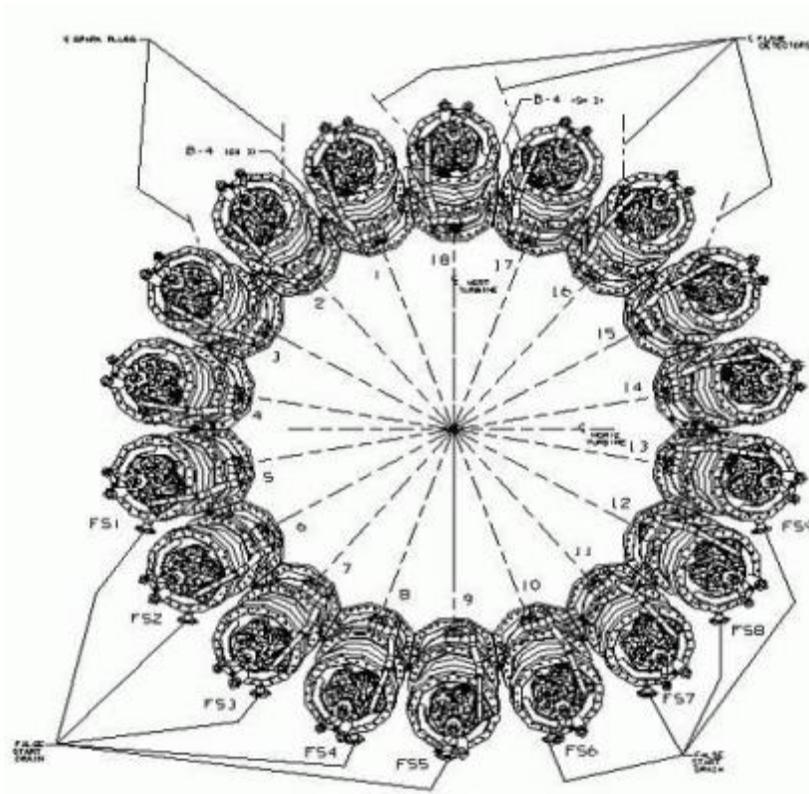


Fig. I.6. Les 18 chambres de combustion [4]

Les chambres extérieures sont reliées à un tube de raccordement externe et le tube interne de crossfire connecte les chemises de combustion des zones primaires. Ces tubes permettent la propagation de la flamme dans les 18 chambres.

Chaque chambre de combustion comporte six injecteurs combustibles disposés dans une configuration en forme de cercle de cinq injecteurs autour d'un injecteur au milieu. L'injecteur de fuel du milieu possède un passage de pré-mélange et un passage de diffusion d'air au milieu de ce dernier. Cependant, le passage de diffusion d'air est toujours purgé durant le fonctionnement de la chambre de combustion et le passage de pré-mélange est alimenté indépendamment du dispositif d'injecteur externe.

La combustion est initiée au moyen d'une décharge à partir des bougies d'allumage qui sont fixées aux brides sur les chambres de combustion et centrées à l'intérieur du liner et dans le flow sleeve à l'intérieur des chambres de combustions. Au cours de la séquence de démarrage, il est essentiel qu'une indication de la présence ou de l'absence de la flamme soit transmise au système de commande. Pour cette raison, un système de surveillance de flamme est utilisé.

Celui-ci est constitué de multiples détecteurs de flammes qui ont des jackets de refroidissement à l'eau pour maintenir des températures acceptables.

Le détecteur de flamme à ultra-violet se compose d'un capteur de flamme contenant un gaz. Le gaz dans ce détecteur est sensible à la présence du rayonnement ultraviolet émis par une flamme d'hydrocarbure. Une tension continue, envoyée par l'amplificateur, est appliquée aux bornes du capteur. Si une flamme est présente, l'ionisation du gaz à l'intérieur du détecteur entraîne la conduction du circuit commandant l'amplificateur et fournit un signal approprié indiquant la présence de flamme. De même, l'absence de flamme entraîne l'apparition d'un signal opposé signalant cette condition. Les signaux provenant des quatre détecteurs sont envoyés au système de commande qui utilise un système logique interne afin de déterminer la présence de la flamme ou sa perte [4].

- Section turbine

La section turbine est celle où les gaz chauds venant de la section de combustion sont convertis en énergie mécanique. Cette section comprend les éléments suivants : le corps de la turbine, la directrice du premier étage, la roue de la turbine du premier étage (appelée également turbine haute pression), la directrice à aubes variables du deuxième étage et la roue de la turbine de ce même étage (appelée turbine moyenne pression), la directrice à aubes variables et la turbine du troisième étage et sa roue (appelée turbine basse pression), Fig. I.7.

La roue de la turbine du premier étage entraîne le compresseur. Celle du troisième étage entraîne la charge.

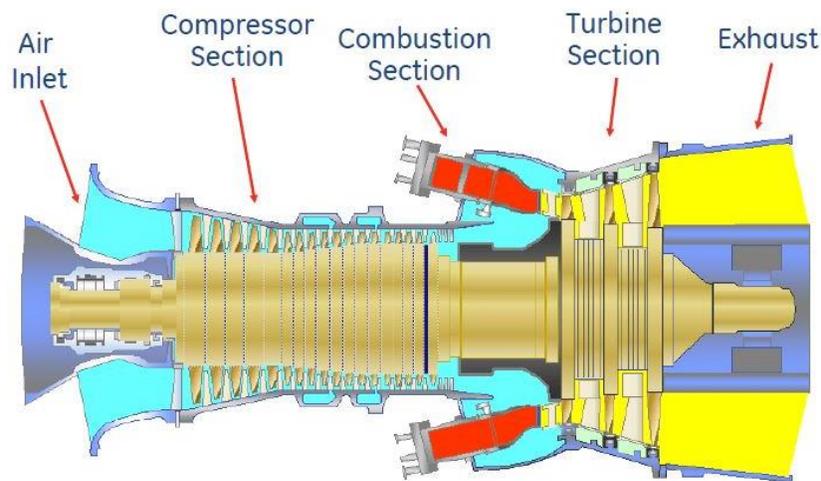


Fig.I.7. Composants d'une turbine à gaz [5]

- Section échappement

La section échappement se compose essentiellement d'un cadre d'échappement ainsi que du caisson d'échappement où le cadre d'échappement est une structure rectangulaire en forme de boîte dans laquelle les gaz d'échappement de la turbine sont évacués avant d'être conduit au silencieux qui représente le caisson d'échappement et, ensuite dans l'atmosphère située à l'extrémité arrière de la base de la turbine. Les deux parties d'échappement sont reliées par des joints de dilatation. La conception de l'échappement est assez complexe afin de minimiser le bruit au maximum. La charnière doit être assez élevée pour permettre un refroidissement progressif des fumées et le dégagement de celle-ci dans des endroits sécurisés [5].

- 1.5.2 Turbine à vapeur

La turbine à vapeur a comme fonction de transformer l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique pour faire tourner un arbre solidaire. La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de "Claudius-Rankine". Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est de la vapeur d'eau. La turbine a été construite par GE et comprend trois corps de détente : HP, MP et BP [6].

Description de la turbine à vapeur

La turbine à vapeur comprend une partie fixe appelée stator qui porte des aubages directeurs. La vapeur en provenance du générateur de vapeur est admise dans un collecteur où elle s'écoule dans des canaux mobiles (les énergies se succèdent les unes après les autres dans le sens de l'écoulement). La vapeur en provenance du générateur de vapeur est introduite dans les premiers étages de la turbine, à travers des vannes d'admission et des soupapes de réglage servant aux dispositifs de sécurité et de réglage de la turbine, où elle sera détendue adiabatiquement en produisant un travail mécanique. Bien que les turbines à vapeur soient construites selon deux configurations différentes (à action ou à réaction), leurs éléments essentiels sont similaires. Elles se composent de tuyères ou de jets et d'ailettes (aubes), Fig.I.8.

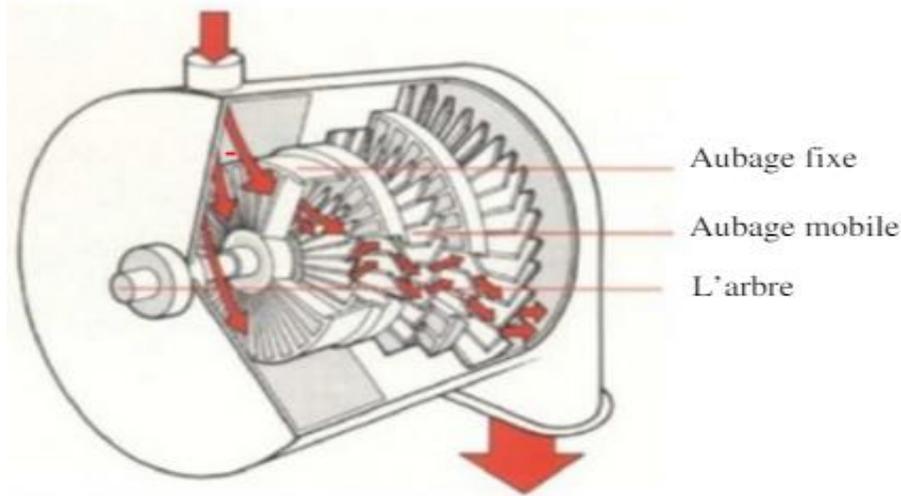


Fig.I.8. Schéma d'une turbine à vapeur [6]

- Principe de fonctionnement

La vapeur en mouvement exerce une pression contre les aubes entraînant leur rotation. La disposition des jets et des aubes dépend du type de la turbine. À la sortie du corps **BP**, la vapeur est récupérée dans un condenseur. L'eau ou la vapeur récupérée en sortie est ramenée vers la chaudière par des pompes où elle peut être de nouveau vaporisée et surchauffée. La turbine à vapeur utilise les principes de la thermodynamique. Lorsque la vapeur se dilate, sa température et donc son énergie interne diminuent. Cette diminution d'énergie interne est accompagnée d'une augmentation d'énergie cinétique. Lorsque la pression de la vapeur d'eau en sortie de la turbine est égale à la pression atmosphérique, la turbine est dite à condensation. Aujourd'hui, les turbines à vapeur sont généralement limitées à une température maximale de 580°C dans le premier étage, et à une pression maximale d'admission de 170 à 180 bars.

- Différents types de turbines à vapeur

En fonction de leur utilisation, on distingue trois grandes catégories de turbines à vapeur, Fig.I.9.

- Les turbines à condensation

La vapeur est complètement détendue jusqu'à une pression voisine de 0,02 à 0,04 bar, puis liquéfiée dans un condenseur refroidi soit par l'air ambiant, soit par de l'eau. La pression de

sortie de la vapeur étant basse, ce qui fait apparaître des condensats dans la turbine qu'il faut évacuer par le biais d'un purgeur. Le rendement global est de l'ordre de 30%.

- **Les turbines à contre-pression**

La vapeur est détendue de la pression HP (> 40 bars) jusqu'à une pression BP (de l'ordre de 4 bars). Ce type de turbine permet de produire de la puissance mécanique ou de l'électricité grâce aux hautes températures et pressions que l'on peut obtenir dans une chaudière. Dans ce type de turbine, la vapeur reste strictement en phase gazeuse après la détente. L'intérêt est de délivrer de la vapeur à un niveau d'enthalpie suffisant pour qu'elle soit utilisable (exemple: séchage). L'inconvénient de ce type de turbines est qu'avec une pression de sortie de 3 bars, il est difficile d'atteindre un rendement thermodynamique supérieur à 18 %.

- **Les turbines à soutirage et condensation**

La vapeur subit une détente partielle jusqu' à une moyenne pression (environ 20 bars) dans un corps haute pression. Ensuite, une partie est dirigée vers un réseau d'utilisation tandis que le reste de la vapeur est détendu dans un corps basse pression comme dans une turbine à condensation. Ce type de turbine trouve un champ d'application important dans les usines de cogénération dont les demandes de chaleur sont susceptibles de varier fortement au cours du temps [6].

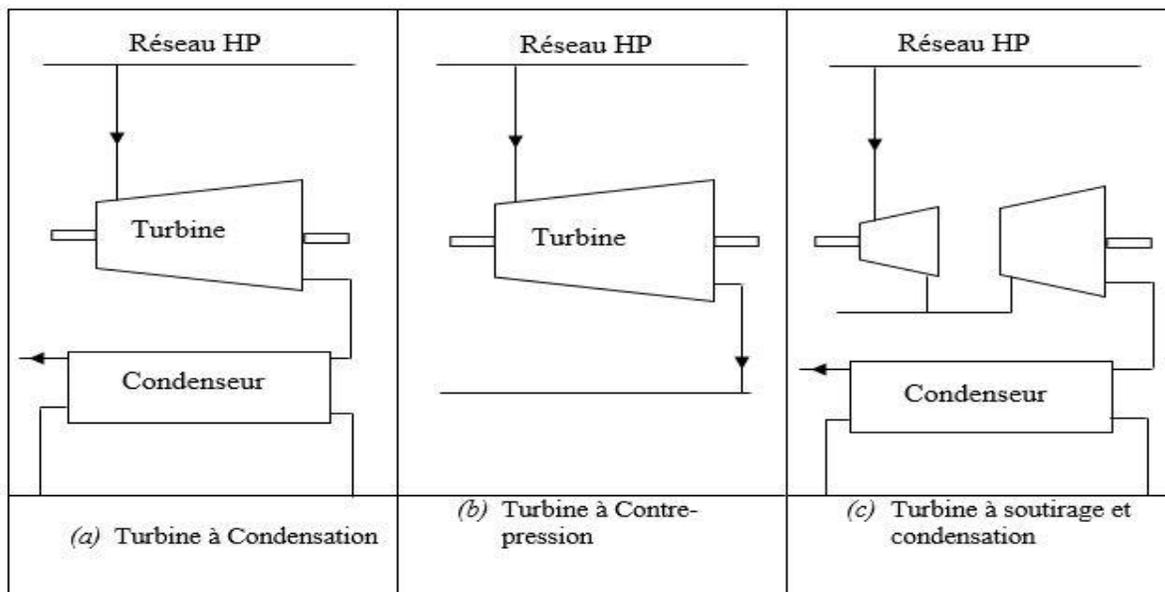


Fig.I.9. Différents types de turbines à vapeur [6]

La turbine à vapeur A15 General Electric

La turbine à vapeur de General Electric modèle A15 est composée de 3 corps : un corps de haute pression et un corps de moyenne pression de flux opposés pour équilibrer les impulsions axiales et un autre corps de basse pression à double flux, Tableau 2.

Tableau I.2. Caractéristiques des Turbines (HP), (MP) et (BP) [7]

Turbine	Turbine Haute	Turbine Moyenne	Turbine Basse
Caractéristiques	Pression HP	Pression MP	Pression BP
Étages	30 a réaction	11 a action	6 a action et réaction
Pression d'entrée	147 bar	147 bar	3,654 bar
Température d'entrée	565,5 C	565,5 C	312,8 C
Débit de vapeur d'entrée	78,83 Kg/s	78,83 Kg/s	100,33 Kg/s
Rendement	78 à 84 %	78 à 84 %	78 à 84 %
Le pourcentage de puissance produite	25 à 30 %	25 à 30 %	25 à 30 %

- 1.5.3 Chaudière de récupération de chaleur

La chaudière de récupération est considérée comme étant un échangeur de chaleur qui permet de récupérer l'énergie thermique, d'un écoulement de gaz chaud, avec laquelle elle produit de la vapeur qui sera utilisée pour alimenter la turbine à vapeur.

La chaudière utilisée au niveau de la centrale est de type (HRSG) fabriquée par le constructeur Doosan. Elle produit de la vapeur à trois niveaux de pression différents avec surchauffeur et réchauffeur intermédiaire ce qui permet d'avoir un bon rendement de récupération d'énergie thermique avec un minimum de perte. Avec ce modèle le rendement global du cycle combiné atteint 58%.

La chaudière est constituée d'un ensemble d'échangeurs tubulaires de chaleur où le transfert de chaleur se fait par convection ; au passage du gaz chaud d'échappement de la turbine à gaz, il réchauffe l'eau et la vapeur qui circulent à l'intérieur des tubes. Les propriétés de la vapeur à chaque niveau de la chaudière de récupération sont présentées au Tableau I.3 [8]

Tableau I.3. Propriétés de la vapeur à chaque niveau de la chaudière de récupération

Niveau de pression	Pression	Température	Débit
Bas	4.085 bar	296.9 C	10.77 kg/s
Intermédiaire	22.09 bar	566.2C	86.69 kg/s
Haut	98.57 bar	566.5 C	78.83 kg/s

- Différentes composantes de la chaudière de récupération

La séparation de l'eau et de la vapeur est effectuée dans les ballons de vapeur. Par l'action de la force centrifuge les séparateurs dirigent la vapeur vers la zone supérieure du ballon et l'eau vers la zone inférieure

Circuit basse pression

Le circuit de basse pression (BP) réchauffe le condensat (l'eau provenant du condenseur) et produit de la vapeur surchauffée (296.9 °C, 3.14 bar) pour le corps basse pression de la turbine de vapeur. Il est composé principalement de :

- Réchauffeur BP.
- Évaporateur BP.
- Économiseur de BP avec sa pompe de recyclage.

Circuit moyenne pression

La fonction du circuit moyenne pression (MP) est de réchauffer une deuxième fois le mélange issu du circuit basse pression de la vapeur surchauffée aux environs de 300.9 °C à un niveau de température semblable à la vapeur qui sort de la turbine Haute pression appelée vapeur réchauffée froid (VRF) (367.5 °C). Ensuite on procède à un autre réchauffement de ce dernier jusqu'à obtenir les conditions de température requises (566.2 °C), pour pouvoir être fourni au corps MP de la turbine à vapeur qui prend le nom de vapeur réchauffée chaude (VRC). Ce système est composé de [8] :

- Réchauffeur HT/LT.
- Surchauffeur MP.
- Évaporateur BP.
- Économiseur BP.

Circuit haute pression

Le circuit de haute pression (HP) réchauffe la vapeur issue du circuit moyenne pression et produit de la vapeur surchauffée (566.2 °C) possédant les caractéristiques d'un gaz parfait. Ce système est composé de :

- Surchauffeur CV pour HT/IT/LT
- Évaporateur CV
- Économiseur CV Eco.1, Eco.2, Eco.3, Eco.4

Économiseur

La fonction de l'économiseur est d'élever la température de l'eau de basse pression jusqu'à des valeurs proches de la température de saturation tout en s'assurant de ne pas commencer la vaporisation avant le ballon de vapeur.

Évaporateur

Sa fonction fondamentale est celle d'assurer le changement de phase de l'eau, de liquide à vapeur, à travers un circuit de circulation naturelle.

Surchauffeur

Son rôle est de chauffer la vapeur saturée afin d'obtenir une vapeur sèche se comportant comme un gaz parfait.

Resurchauffeur

Les propriétés physicochimique des matériaux utilisés dans la construction des chaudières et turbines limitent la température de surchauffe pour augmenter le travail fourni par la vapeur. Cette dernière est resurchauffée à pression constante.

- 1.5.4 Condenseur

Le condenseur a comme mission principale de condenser la vapeur déchargée par la turbine de vapeur et fournir une chambre de stockage pour l'eau condensée (puits chaud ou puits du condenseur). L'autre fonction est le dégazage de l'eau (soustraction des gaz dissous) et la réchauffe de la vapeur condensée qui tombe des tubes et des fluides issus des purges et des différents drainages jusqu'à la température de saturation.

Le corps du condenseur peut être de forme circulaire ou rectangulaire. Il peut être de corps unique, de double corps ou corps triple en fonction de la turbine et des dimensions de la base. Le

corps du condenseur peut être à une seule pression, double pression ou triple pression dépendant de la conception habituelle. Le reste des possibilités dépend du type et de la taille de la turbine de vapeur, Fig.I.10.

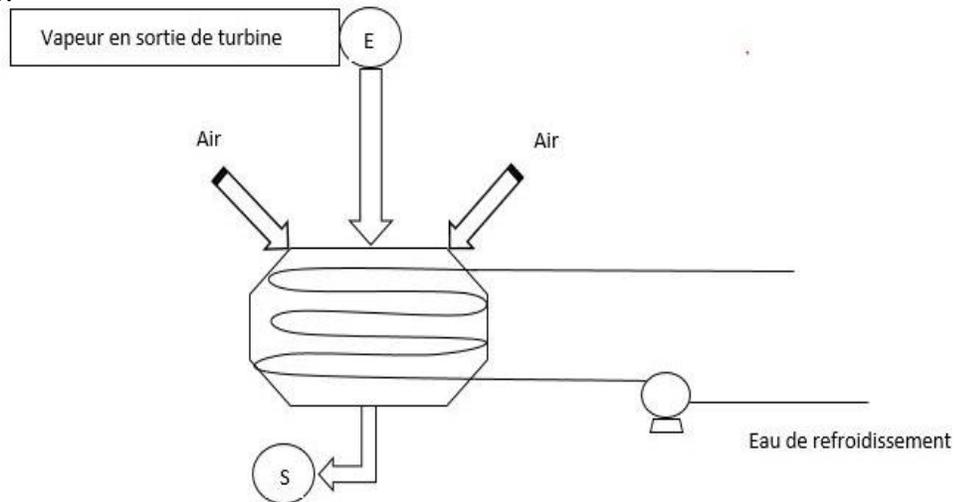


Fig.I.10. Schéma descriptif d'un condenseur

- 1.5.5 Alternateur

L'alternateur est une machine tournante qui convertit l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif. Plus de 95 % de l'énergie électrique est produite par des alternateurs à courant alternatif qui sont moins coûteux et ont un meilleur rendement que les machines à courant continu, Fig.I.11. Dans les plans conventionnels de production d'énergie les générateurs sont synchrones et la fréquence de synchronisation en Algérie est de 50 Hz.

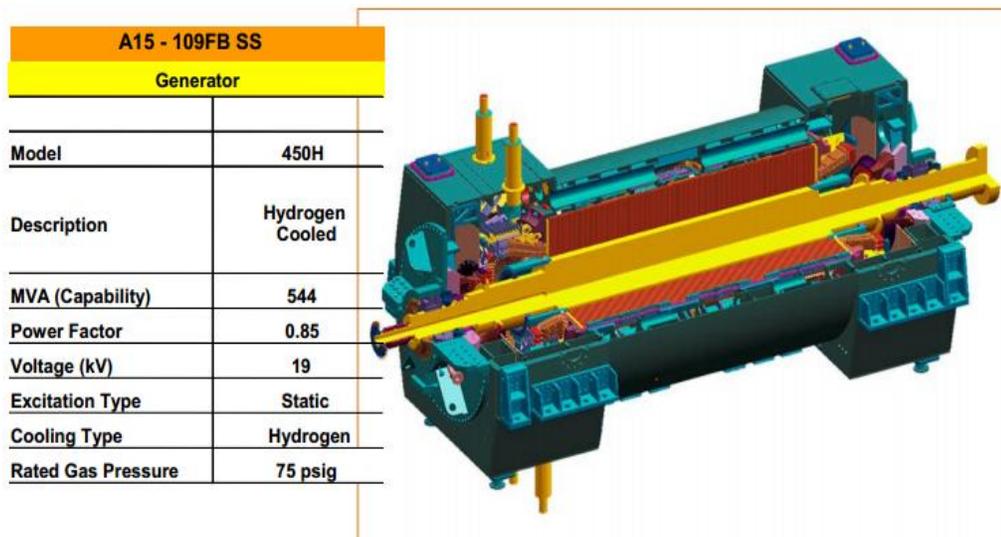


Fig.I.11. Alternateur 450H, GE [9]

Description

L'alternateur de General Electric 450H est une machine synchrone AC triphasée, Fig.I.11, d'une puissance apparente de 544 MVA et d'une tension aux bornes de 19 kV. La machine est conçue pour être exploitée de manière continue en fournissant de l'énergie depuis les bornes d'induit. Le refroidissement de cet induit est assuré par le maintien de la pression et de la pureté de l'hydrogène et d'apport d'eau de réfrigération et d'huile de lubrification.

Il est composé des éléments suivants :

- Enroulements stationnaires du stator
- Rotor.
- Enroulement du champ du rotor

Structure du stator

L'armature du stator est suspendue à la structure par des barres soudées aux plaques de la structure. Les disques du noyau du stator sont maintenus sous pression axialement par des ailes vissées aux extrémités des barres (ou le noyau du stator est réalisé à partir de disques isolés, segmentés, en acier à silice de haute qualité pour minimiser les pertes électriques). Pour les disques, ils sont séparés en paquets à travers des blocs écarteurs pour avoir des passages de ventilation.

Enroulements du stator

Ils se composent de barres isolées assemblées dans les rainures du stator. Ces barres sont connectées à la bande de phase adéquate par des anneaux. Chaque phase est divisée en groupes de bobines.

Les barres de cuivre sont isolées les unes des autres et transposées selon la méthode **Roebel** [9]. Cette disposition évite la perte de courant circulant qui serait, sous certaines conditions de charge, présent et dû à la distribution auto-inductive des flux magnétiques dans les rainures du stator, Fig.I.12.



Fig.I.12. Ensemble noyau-disque du stator [9]

Rotor

Le rotor se compose d'un axe tournant et de groupes d'enroulement de cuivre fixés à cet axe formant les enroulements d'excitation de l'Alternateur. Quand ils sont énergisés, ces enroulements inducteurs agissent comme un électroaimant qui tourne à l'intérieur du stator (roue polaire).

Les rainures longitudinales, radialement usinées dans le corps contiennent les bobines inductrices. Des rainures additionnelles, usinées dans les dents permettent la ventilation du corps du rotor. Les bobines inductrices sont maintenues dans les rainures par des cales d'acier pour assurer une distribution de flux adéquate.



Fig.I.13. Rotor de 450 H Generator (GE) [9]

Système excitation

L'excitatrice est un alternateur (machine synchrone à aimants permanents (BDCM « Brushless Direct Current Machine ») inversé dont le circuit d'excitation, alimenté par l'alternateur pilote, est placé sur le stator. L'alternateur pilote est monté à l'extrémité de l'arbre de l'excitatrice du côté opposé à l'attaque de l'alternateur principal. L'inducteur de l'alternateur pilote est constitué d'aimants permanents en rotation et l'induit placé au stator est triphasé. Cette tension de sortie statorique est redressée à l'aide d'un pont à thyristors. La tension continue ainsi obtenue alimente l'enroulement d'excitation de la brushless, Fig. I. 14. La tension triphasée produite au rotor de la brushless est appliquée à un pont de diodes tournantes calé sur l'arbre de l'alternateur principal.

Ventilation et refroidissement de l'alternateur

L'hydrogène est mis en circulation par des ventilateurs dans l'espace du gaz et aussi autour du noyau du stator. Le gaz de refroidissement est conduit à travers des tubes ou des conduites spéciales, puis se dirige vers les refroidisseurs pour pouvoir échanger la chaleur reçue, afin de le réutiliser.

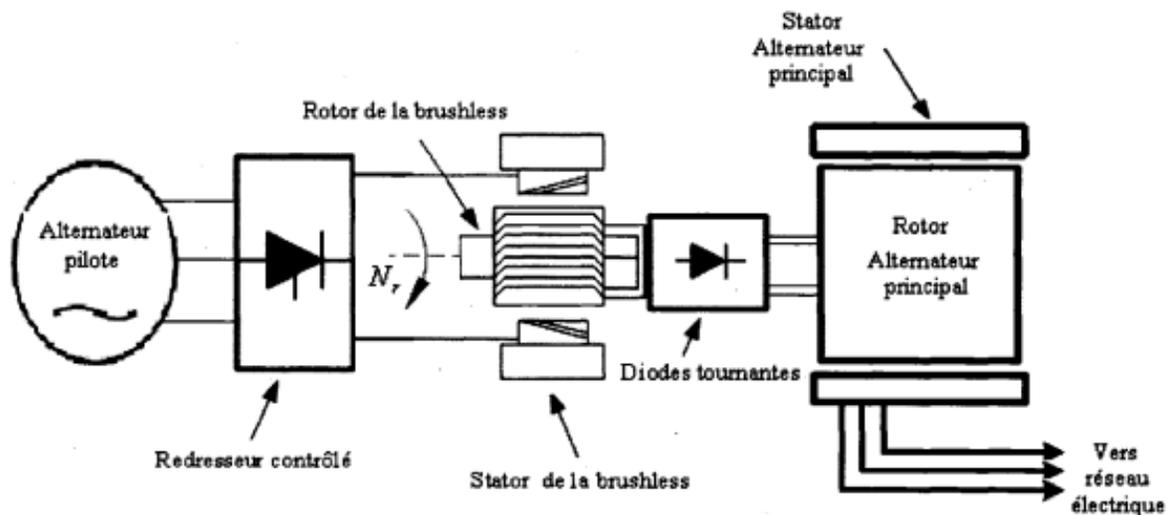


Fig.I.14. Système d'excitation par BDCM [9]

I.6 Principe de fonctionnement d'une centrale thermique à cycle combiné

La technologie des cycles combinés est apparue à la fin des années 1970. Elle permet de réduire de 50 % les émissions de CO₂ et de diviser par trois les oxydes d'azote (NO_x) et de

supprimer les rejets d'oxydes de soufre (SO_2) par rapport aux moyens de production thermique à flamme.

Les centrales à cycle combiné utilisent le gaz naturel comme combustible dans un système de production d'électricité en deux étapes. Une première turbine est mise en mouvement suite à la combustion de gaz naturel. La chaleur des gaz d'échappement de la première turbine est récupérée pour produire de la vapeur qui actionne une seconde turbine.

Un mélange de gaz naturel et d'air comprimé est brûlé dans une chambre à combustion, à une température d'environ 1500 degrés. Les gaz chauds issus de la combustion actionnent la turbine à gaz qui entraîne à son tour l'arbre de l'alternateur et permet de produire de l'électricité. Le rendement de la turbine à gaz simple n'est pas très élevé. Il est compris entre 35 et 38% car une grande partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur dans les gaz d'échappement. Ce rendement peut être augmenté en élevant la température de la chambre à combustion mais on se heurte au problème de tenue des matériaux. Une meilleure solution consiste à récupérer la chaleur des gaz d'échappement à la sortie de la turbine à gaz car les gaz d'échappement possèdent une énergie thermique très importante. L'installation d'une chaudière de récupération associée à une boucle eau-vapeur permet de convertir 21 % de l'énergie primaire en plus (énergie thermique perdue du gaz d'échappement de la turbine à gaz) en électricité en produisant de la vapeur qui se détend dans la turbine à vapeur à trois corps : HP, MP, BP. La vapeur à base pression à la sortie de la turbine à vapeur est refroidie par le condenseur à l'aide de l'eau de mer. La turbine à gaz et la turbine à vapeur sont couplées au même générateur sur un même arbre « single shaft ». Ceci conduit à un rendement net d'ordre de 55 % ou plus pour le cycle combiné pour les machines de technologie actuelle, [9].

Le rendement du cycle combiné augmente avec la complexité du cycle eau-vapeur. Le passage d'un cycle à 2 pressions à un cycle à 3 pressions (subit une resurchauffe de plus) permet de gagner environ 1,2 % de rendement mais l'investissement est plus élevé. Le choix du cycle se fait donc par un calcul technico-économique tenant compte de ces paramètres ainsi que du coût du combustible, du prix de vente de l'électricité, de la durée de fonctionnement annuel de la centrale, etc.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a abordé les centrales électriques à cycle simple et à cycle combiné. Ces dernières présentent un rendement plus important par rapport aux centrales à cycle simple.

Dans un premier temps, on a présenté la configuration de « single shaft » de la centrale thermique de Hadjret Ennous de General Electric, ensuite on a expliqué les différentes composantes de la centrale (turbine à gaz, alternateur, générateur de vapeur, condenseur, etc.).

Ensuite, on sait intéresser au principe de fonctionnement de la centrale électrique à cycle combiné en détaillant les différentes étapes de production d'énergie électrique.

I.8 Références

- [1] Nikolai V. Khartchenko, Vadym M. Kharchenko, 'Advanced Energy Systems', CRC Press Taylor and Francis Group, Second Edition, 2010, pp 169-196.
- [2] Jianqiang Gao, Junyou Zhao, Xiaoying Fan, Wei Zhang, 'Research on On-line Calculating Methods of Steamgas Power Ratio for Single-shaft Gas-steam Combined-cycle Unit', IEEE Power & Energy Society and Wuhan University 2005, pp 1
- [3] Shariket Kahraba Hadjret En Nouss Spa (SKH): <http://skh-dz.com/qui-sommes-nous.html>.
- [4] David J. Taylor Olivier Crabos, 2003, 'GE Power Systems Gas Turbine and Combined Cycle Products Technology-Experience-Innovation', Gas turbine and Combined Cycle-GE Power Systems 2003.
- [5] Arseny Kvrivishvili, 'High-Temperature Turbocompressor Set of Combined Steam-Cycle Power Units', Proceedings of IFOST 2008, pp 1-2.
- [6] Jianqiang Gao, Junyou Zhao, Xiaoying Fan, Wei Zhang, 'Research on On-line Calculating Methods of Steamgas Power Ratio for Single-shaft Gas-steam Combined-cycle Unit', IEEE Power & Energy Society and Wuhan University 2005, pp 1
- [7] General Electric International, "Steam Turbine A15 ". Operation and Maintenance Manual, GEK 111530. August 2005
- [8] Frank Wicks, Justin Maleszweski, Colin Wright, Jan Zarybnicky, "thermodynamic analysis of an enhanced gas and steam cycle", 2002 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), pp 2-4
- [9] General Electric International, 'Alternateur 450H Cycle combinée de Hadjret Ennous ', Operation and Maintenance Manual, GEK 111242. August 2005.
- [10] Charles KEMPF, "Les centrales électriques à cycle combiné", ABB ALSTOM POWER, REE N° 11 décembre 1999.

Chapitre II

Calcul et Vérification des paramètres de l'alternateur

II.1 Introduction

Les paramètres de fonctionnement d'un alternateur synchrone sont très importants. Ils permettent d'effectuer une étude en dynamique et d'avoir également une idée sur le comportement du système. Ils peuvent être calculés ou estimés à partir des mesures provenant du système physique. Les essais de court-circuit sont utilisés pour estimer un grand nombre de paramètres de la machine synchrone.

Les paramètres électriques d'un alternateur sont : la résistance de l'enroulement statorique par phase (r_a), celle de l'enroulement d'excitation (r_f), celles de l'enroulement amortisseur sur les axes d et q (r_D , r_Q) respectivement, la réactance de fuite par phase de l'enroulement statorique (X_a), la réactance de fuite de l'enroulement d'excitation (X_f), les réactances de l'enroulement -amortisseur sur les axes d et q (X_D et X_Q) respectivement, la réactance mutuelle magnétisante sur les axes d et q de l'alternateur (X_{ad} et X_{aq}) respectivement.

Cependant ces paramètres peuvent être obtenus facilement à partir des paramètres standards de l'alternateur synchrone (X_d , X'_d , X''_d , X_q , X'_q , X''_q) et (T'_{d0} , T''_{d0} , T'_d , T''_d , T'_{q0} , T''_{q0} , T'_q , T''_q), avec lesquels on peut connaître le fonctionnement et le comportement d'un générateur, tel que :

- X_d , X_q Réactances synchrones respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- X'_d , X'_q Réactances transitoires respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- X''_d , X''_q Réactances sub-transitoires respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- T'_{d0} , T'_{q0} Constantes de temps transitoires à circuit ouvert respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- T''_{d0} , T''_{q0} Constantes de temps sub-transitoires à circuit ouvert respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- T'_d , T'_q Constantes de temps transitoires de court-circuit respectivement d'axe direct et d'axe quadrature
- T''_d , T''_q Constantes de temps sub-transitoires de court-circuit respectivement d'axe direct et d'axe quadrature

Dans ce chapitre on procède à une vérification des paramètres du générateur de la centrale de Hadjret Ennous (Model 450 H General Electric). Pour cela on calcule ces paramètres par une méthode et on les compare avec ceux donnés par la centrale.

II.2 Calcul des paramètres

Notre étude porte sur la vérification des paramètres, en régime non saturé, donnés par la centrale de Hadjret Ennous pour l'alternateur de type (450 H) GE. Ces paramètres sont :

Les réactances synchrones, transitoires et sub-transitoires (en p.u.) :

Axe direct

$$X_d = 2.28$$

$$X'_d = 0.33$$

$$X''_d = 0.265$$

Axe quadrature

$$X_q = 2.19$$

$$X'_q = 0.52$$

$$X''_q = 0.265$$

Les constantes de temps transitoires et sub-transitoires (en p.u.) :

- à vide

Axe direct

$$T'_{d0} = 6.9$$

$$T''_{d0} = 0.042$$

Axe quadrature

$$T'_{q0} = 0.64$$

$$T''_{q0} = 0.076$$

- en court-circuit

$$T'_d = 1.69$$

$$T''_d = 0.031$$

$$T'_q = 0.15$$

$$T''_q = 0.031$$

Remarque

A première vue, les paramètres donnés par la centrale électrique présentent une certaine ambiguïté en ce qui concerne les valeurs des réactances transitoires et sub-transitoires (X'_d , X''_d et X'_q , X''_q) sur les deux axes. En fait, le rotor présente une légère saillance qui se manifeste par l'obtention d'une réactance synchrone d'axe-direct X_d légèrement plus grande que la réactance synchrone d'axe-quadrature X_q . Ce qui n'est pas le cas pour les réactances transitoires des deux axes obtenus par la centrale. En effet, la réactance transitoire d'axe quadrature est supérieure à celle d'axe direct. Ce qui laisse penser que la valeur de l'une des deux réactances n'est pas correcte.

- Détermination des réactances transitoires et sub-transitoires par calcul

Les réactances transitoires et sub-transitoires peuvent être calculées par les relations suivantes:

Sur l'axe direct nous avons :

$$X'd = Xd * \frac{T'd}{T'd0} \quad (2.1)$$

$$X''d = Xd * \frac{T'd * T''d}{T'd0 * T''d0} = X'd * \frac{T''d}{T''d0} \quad (2.2)$$

Sur l'axe quadrature nous avons :

$$X'q = Xq * \frac{T'q}{T'q0} \quad (2.3)$$

$$X''q = Xq * \frac{T'q * T''q}{T'q0 * T''q0} = X'q * \frac{T''q}{T''q0} \quad (2.4)$$

d'où :

$$X'd \text{ (calculée)} = 2.28 * \frac{1.69}{6.9} = 0.558$$

$$X''d \text{ (calculée)} = 0.558 * \frac{0.031}{0.042} = 0.0411$$

$$X'q \text{ (calculée)} = 2.19 * \frac{0.15}{0.64} = 0.513$$

$$X''q \text{ (calculée)} = 0.513 * \frac{0.031}{0.076} = 0.209$$

Remarque

On remarque que les réactances transitoire et sub-transitoire calculées suivant l'axe direct sont plus grandes que celles suivant l'axe quadrature. Ces résultats concordent avec l'effet de la saillance positive.

II.3 Tracé des caractéristiques de réponse en fréquence

Pour le tracé de la caractéristique des réponses en fréquence, sur le plan Gaussien, nous avons besoin de la fonction de transfert de la réactance opérationnelle qui s'écrit sous la forme suivante :

- Selon l'axe direct :

$$Xd(p) = Xd * \frac{(1+p*T'd)(1+p*T''d)}{(1+p*T'd0)(1+p*T''d0)} \quad (2.5)$$

- Selon l'axe quadrature

$$Xq(p) = Xq * \frac{(1+p*T'q)(1+p*T''q)}{(1+p*T'q0)(1+p*T''q0)} \quad (2.6)$$

Le tracé des caractéristiques des réponses en fréquence est donné par la partie imaginaire de l'admittance opérationnelle en fonction de la partie réelle de l'admittance opérationnelle, tel que:

- Selon l'axe direct

$$Imag\left(\frac{1}{Xd(jgw)}\right) = f\left(Re\left(\frac{1}{Xd(jgw)}\right)\right) \quad (2.7)$$

- Selon l'axe quadrature

$$Imag\left(\frac{1}{Xq(jgw)}\right) = f\left(Re\left(\frac{1}{Xq(jgw)}\right)\right) \quad (2.8)$$

1. Axe direct

Nous présentons sur les Figs II.1 et II.2 ces tracés. Les résultats permettent d'obtenir les deux réactances : synchrone (X_d), et sub-transitoire (X''_d). Pour cela on détermine les deux points d'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses ($Y=0$), on obtient : $X_1=0.4386$ et $X_2=2.426$. Le calcul de l'inverse de ces deux valeurs nous donne les réactances synchrone (X_d), et sub-transitoire (X''_d).

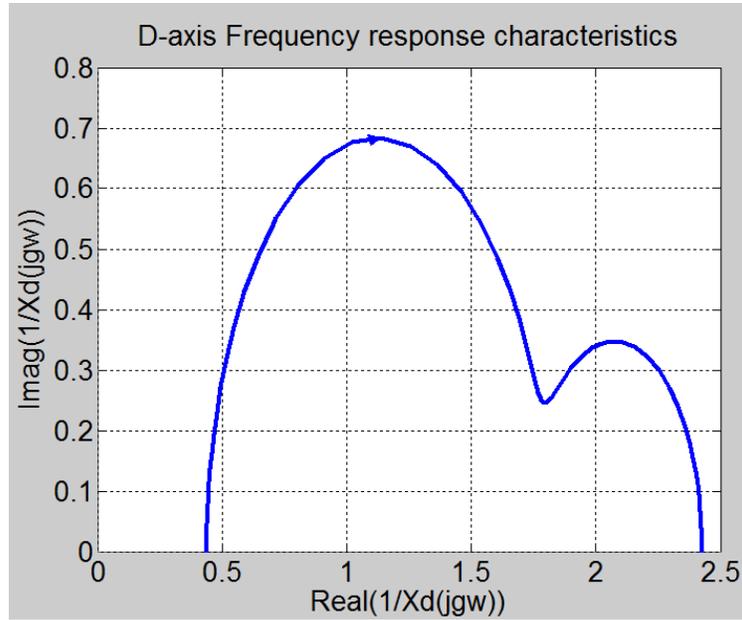


Fig. II.1. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe direct

Pour obtenir la réactance transitoire ($X'd$), il est nécessaire d'utiliser la méthode de séparation des réactances dynamiques. Cette méthode permet de séparer les deux réactances dynamiques transitoire et sub-transitoire par l'utilisation de la relation suivante :

$$Xd(p) = Xd * \frac{(1+p*T'd)}{(1+p*T'd0)} \tag{2.9}$$

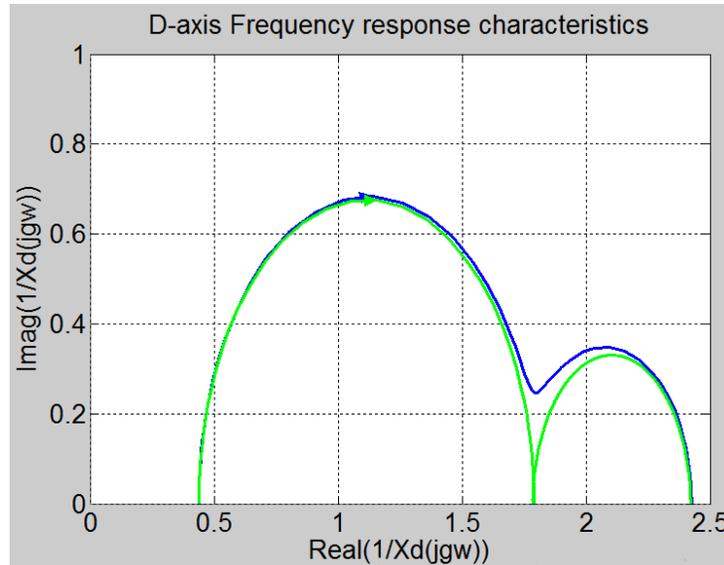


Fig. II.2. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe direct

Interprétation des résultats

Pour déduire les valeurs des réactances d'axe direct à partir des Figs. 2.1 et 2.2, on tire les points d'intersection des courbes avec l'axe des abscisses ($Y=0$) puis on calcule leurs inverses et on obtient les valeurs suivantes :

$$\frac{1}{X_d} = 0.4386, \text{ d'où } X_d = 2.2799.$$

$$\frac{1}{X'_d} = 1.791, \text{ d'où } X'_d = 0.5583.$$

$$\frac{1}{X''_d} = 2.426, \text{ d'où } X''_d = 0.4122.$$

2. Axe quadrature

De la même façon, à partir de la caractéristique de réponse en fréquence d'axe de quadrature, on détermine les réactances synchrone (X_q) et sub-transitoire (X''_q) toutefois pour déterminer la réactance transitoire (X'_q), il est nécessaire de faire la séparation des dynamiques, c'est-à-dire séparer les deux dynamiques transitoire et sub-transitoire, en utilisant l'équation suivante :

$$X_q(p) = X_q * \frac{(1+p*T'_q)}{(1+p*T''_q)} \quad (2.10)$$

Les Figures 2.3 et 2.4 donnent ces représentations. Cependant, on remarque que la réactance transitoire d'axe quadrature fausse complètement l'allure de ces caractéristiques.

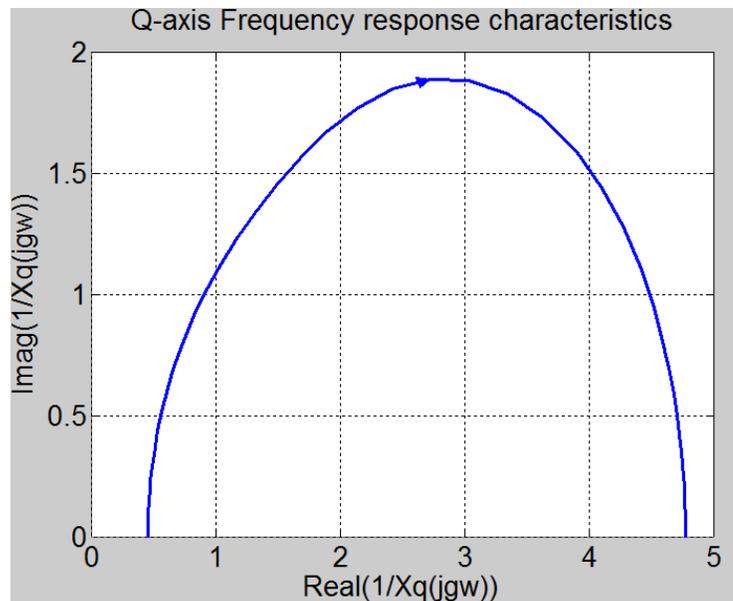


Fig. II.3. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe quadrature

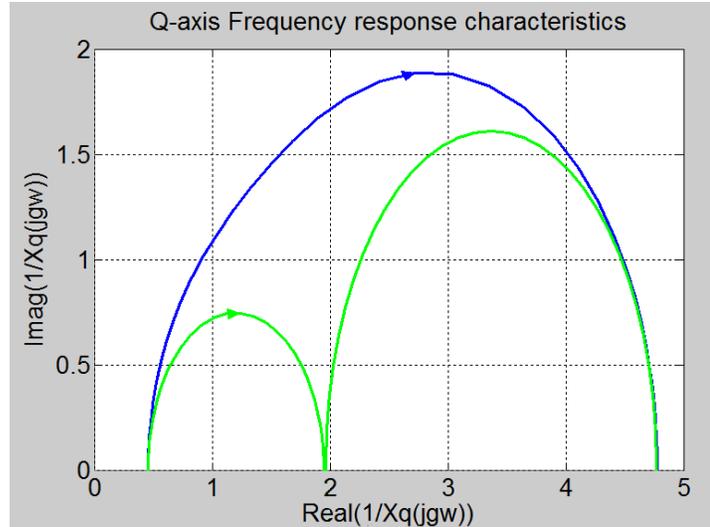


Fig. II.4. Caractéristiques de réponse en fréquence selon l'axe quadrature

Interprétation des résultats

De manière identique, pour déduire les valeurs des réactances d'axe quadrature à partir des Figs. 2.3 et 2.4, on tire les points d'intersection des courbes avec l'axe des abscisses ($Y=0$) puis on calcule leurs inverse et on obtient les valeurs suivantes :

$$\frac{1}{X_q} = 0.4566, \text{ d'où } X_q = 2.1901.$$

$$\frac{1}{X'_{q}} = 1.948, \text{ d'où } X'_{q} = 0.5133$$

$$\frac{1}{X''_{q}} = 4.776, \text{ d'où } X''_{q} = 0.209.$$

Conclusion

Les valeurs déterminées à partir des tracés des caractéristiques en fréquence, montrent que respectivement les réactances synchrones, transitoires et sub-transitoires suivant les deux axes ($X_{d,q}$; $X'_{d,q}$; $X''_{d,q}$) par calcul sont meilleures.

Tableau II.1. Récapitulatif des résultats obtenus

	Expressions	Valeurs données par le constructeur GE	Valeurs calculées	Ecart en %
Réactance synchrone d'axe direct X_d	X_d	2.28	2.2799	1%
Réactance transitoire d'axe direct X'_d	$X_d * \frac{T'd}{T'd0}$	0.33	0.558	22.8%
Réactance sub_transitoire d'axe direct X''_d	$X_d * \frac{T'd * T''d}{T'd0 * T''d0}$	0.265	0.411	14.6%
Réactance synchrone d'axe quadrature X_q	X_q	2.19	2.1901	0%
Réactance transitoire d'axe quadrature X'_q	$X_q * \frac{T'q}{T'q0}$	0.52	0.513	0%
Réactance sub_transitoire d'axe quadrature X''_q	$X_q * \frac{T'q * T''q}{T'q0 * T''q0}$	0.265	0.209	5%

II.4 Détermination du courant inducteur durant un court-circuit triphasé brusque

L'expression du courant inducteur durant le court-circuit (I_f) est :

$$I_f = I_f0 * \left(1 + \frac{X_d + X'_d}{X'_d} \left(e^{-\frac{t}{T'd}} - \left(1 - \frac{Tkd}{T''d} \right) e^{-\frac{t}{T''d}} - \frac{Tkd}{T''d} e^{-\frac{t}{T'a}} \cos(\omega t) \right) \right) \quad (2.11)$$

où :

Ta : représente la constante de temps en court-circuit de l'induit. D'ordinaire elle est comprise entre 0.1 et 0.2s

Tkd : est la constante de temps sub-transitoire du circuit inducteur lorsque la machine synchrone présente un amortisseur par axe.

La Figure II.5 montre la variation du courant inducteur lors d'un court-circuit triphasé brusque.

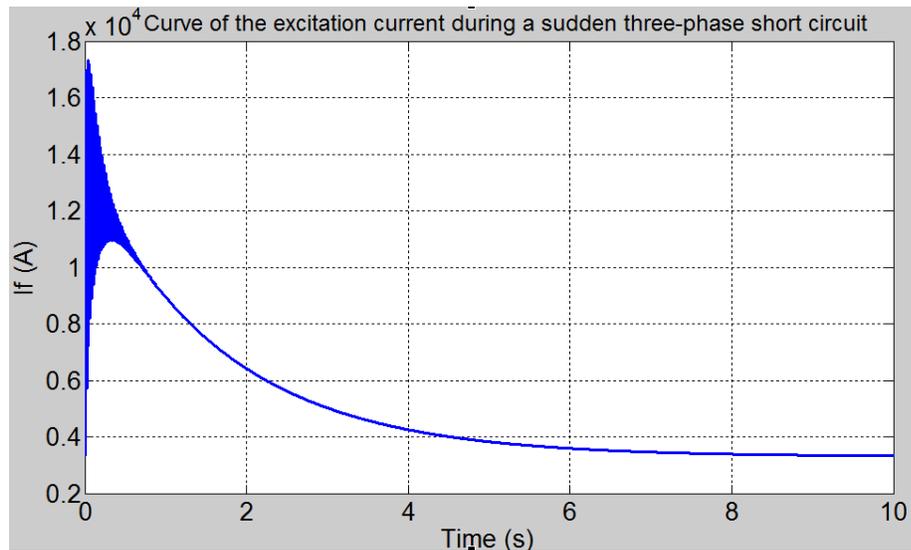


Fig. II. 2. Courant inducteur de court-circuit I_f

Interprétation des résultats

Le courant inducteur subit un régime transitoire important du aux constantes de temps sub-transitoires et transitoires, puis il retrouve sa valeur initiale lorsque le régime permanent est atteint.

On voit bien que le courant inducteur I_f est la somme de quatre termes (Eq.2.11) :

- Le premier terme représente le courant d'excitation initiale (I_{f0}) qui subsiste seul à la fin du régime transitoire.
- un courant sub-transitoire s'amortissant très vite, qui est associé à la constante de temps sub-transitoire (T''_d).
- un courant transitoire s'amortissant assez lentement, qui est associé à la constante de temps transitoire (T'_d).
- un courant de pulsation ω_r s'amortissant rapidement car (T_a) est faible.

II.5 Détermination du courant de phase durant un court-circuit triphasé brusque

Ce courant est obtenu par application d'un court-circuit aux bornes des phases statoriques quand la machine fonctionne à vide, puis on relève l'évolution des courants de la machine en fonction du temps. Cet essai est utilisé pour déterminer les paramètres dynamiques de la machine que sont les constantes de temps et les réactances transitoires et sub-transitoires.

Le courant de court-circuit dans la phase A de la machine synchrone munie d'amortisseurs est donné par l'expression suivante :

$$I_a = V\sqrt{2} * \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \cos(\omega t) + V * e^{-\frac{t}{T_a}} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) \cos(2\omega t) \right) \quad (2.12)$$

Avec :

La Figure II.6 donne l'allure du courant de court-circuit dans une phase. L'expression du courant de court-circuit (Eq.2.12) est la somme de cinq termes qu'on peut regrouper en trois composantes :

- composante alternative fondamentale de pulsation ω_r .
- composante asymétrique de terme apériodique.
- composante du second harmonique de pulsation $2\omega_r$.

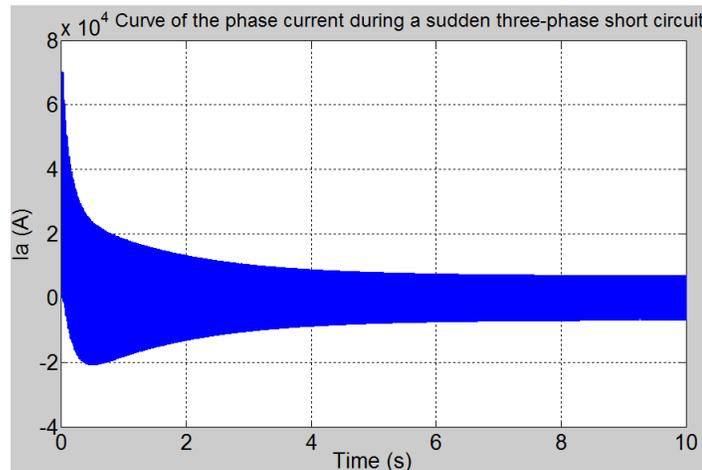


Fig. II. 6. Courant de phase de court-circuit

Interprétation des résultats

On remarque que l'amplitude des ondes successives décroît très rapidement pendant les premières périodes (cela est dû à la constante de temps sub-transitoire) puis elle décroît plus lentement (effet de la constante de temps transitoire) pour enfin tendre vers une valeur constante (composante alternative).

II.6 Conclusion

La détermination précise et fiable des paramètres de la machine est très importante car elle permet de réaliser un contrôle robuste de la machine et surtout de garantir sa stabilisation en cas de grande perturbation. La procédure de vérification des paramètres nous a permis de corriger ceux fournis par la centrale de Hadjret Ennous.

L'intensité du courant de phase durant un court-circuit triphasé brusque diminue progressivement. Cette diminution est due à l'intervention successive des trois réactances.

II.7 Références

- [1] H. Guesbaoui, 'Grandeurs caractéristiques de la machine synchrone obtenues analytiquement à partir d'une réduction de modèle par une technique des multi échelles de temps', Journal de Physique III, EDP Sciences, 1995, 5 (1), pp.103-126.
- [2] B. Adkins and R.G. Harley, 'The General Theory of Alternating Current Machines. John Wiley & Sons', Incorporated, 1978, (279 pages).
- [3] W. Bahloul, M. Ouali, M. Chaabene and M.B.A Kamoun, 'Identification des paramètres dynamiques de la machine synchrone par algorithme génétique', International Renewable Energy Congress, November 5-7, 2009.
- [4] Fernando L. Alvarado, Senior Member, Claudio Caiizares, 'synchronous machine parameters from sudden-short tests by back-solving', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, No. 2, June 1989.
- [5] I.M. Canay, 'Determination of model Parameters of Synchronous Machines', Proceedings IEE, Vol.130, part B, pp.89-94, March 1983.
- [6] H.W.Dommel, S.Battacharya, I.I.Dommel, V.Brandwajn and YeZhong.Liang, 'Canay's Data Conversion of Synchronous Machine Parameters', 'EMTP Newsletter, Vol.5,4. pp.8-25, October 1985.
- [7] K.R.Paddiyar, 'Stability and Control' ,second Edition, Indian Institute of Science, Bangalore 2008, pp 85-89.

Chapitre III

Modélisation des sous-ensembles du groupe Turbine-
alternateur

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on développe des modèles numériques de chaque élément du groupe turbine-alternateur. Un rappel sur les différentes équations mécaniques et électriques de l'ensemble (turbo-alternateur) est donné dans ce chapitre. Un choix adéquat du modèle permet de connaître le comportement dynamique et de vérifier la stabilité du système. De plus, il est possible de faire varier les paramètres de la génératrice dans le but d'obtenir les performances souhaitées.

On présente le modèle mathématique de la génératrice synchrone et son système d'excitation dans le repère triphasé (abc) puis dans le référentiel de (Park). On donnera, par la suite, le modèle mathématique de la génératrice synchrone couplée à un réseau de puissance infinie. Un modèle simplifié de la turbine à gaz est donné à la fin de ce chapitre.

III.2 Modèle de l'alternateur

- Description

La machine synchrone à pôles lisses est composée d'un induit triphasé généralement fixe et d'un inducteur tournant alimenté en courant continu. Le bobinage de l'inducteur est réparti dans des encoches fraisées dans la masse du rotor cylindrique. Dans le cas d'une machine à pôles lisses la partie massive du fer rotorique joue le rôle d'amortisseur.

- Modèle Mathématique

La machine étudiée, possède trois enroulements statoriques a, b et c décalés de 120 degrés. Le rotor comporte un nombre d'enroulements équivalents répartis selon deux axes : l'axe direct qui coïncide avec celui de l'enroulement d'excitation et qui possède un deuxième enroulement fictif qui représente l'effet des amortisseurs et l'axe en quadrature ayant un enroulement fictif représentant l'effet des amortisseurs.

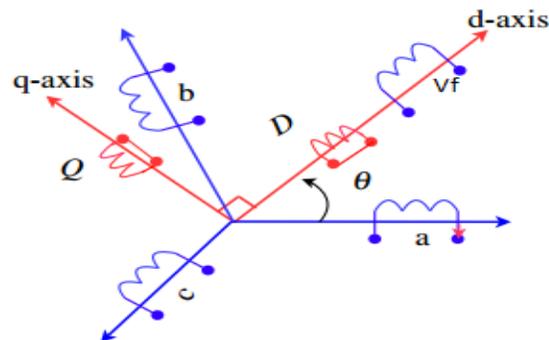


Fig. III.1. Schéma équivalent de la machine synchrone munie d'amortisseurs [3], [6].

Le schéma simplifié de la machine est donné par la Fig. III.1 dans lequel les bobinages D et Q représentent, respectivement, les amortisseurs au niveau du rotor d'axe direct et d'axe quadrature. Les bobinages a, b et c sont les trois phases du générateur synchrone et θ représentent l'angle électrique en fonction du nombre de pôles.

- Hypothèses

Afin de simplifier la mise en équations du système, il est nécessaire d'introduire quelques hypothèses simplificatrices, à savoir :

- Les courants de Foucault sont supposés négligeables. Cette hypothèse permet d'exprimer tous les flux de la machine en fonction des courants, des inductances propres et mutuelles,
- Les résistances (d'induit et d'inducteur) de la machine sont invariantes par rapport aux variations de la température,
- Le circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté de sorte que seuls les circuits inducteurs, induits et amortisseurs sont parcourus par des courants,
- On admet que les forces magnétomotrices des enroulements du stator sont à répartition sinusoïdale ce qui conduit à des expressions des inductances relativement simples,
- La saturation du circuit magnétique ne sera pas prise en compte [9].

- Equations des tensions au stator

Les équations des tensions sont données comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

- Equations des tensions au rotor

La fonction de base du système d'excitation est de fournir un courant continu aux bobines créant ainsi un champ au rotor de la machine synchrone. De plus, l'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive. D'un point de vue de l'installation électrique, le système d'excitation contribue au contrôle efficace de la tension et à l'amélioration de la stabilité du

système. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations intempestives.

Le circuit d'excitation est alimenté tandis que les amortisseurs sont court-circuités. Les équations électriques produites au niveau du rotor sont les suivantes [6] [7] :

$$\begin{bmatrix} V_f \\ V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Comme les enroulements amortisseurs des deux axes sont court-circuités, les deux valeurs des tensions sont nulles, on obtient alors le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Les équations mécaniques qui correspondent au fonctionnement mécanique de l'alternateur synchrone sont [10] :

$$\begin{cases} \frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - Dw_r) \\ \frac{d\delta}{dt} = w_s(w_r - 1) \\ T_e = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q \end{cases} \quad (3.4)$$

III.3 Passage du référentiel d'axes (abc) au référentiel de Park

L'ensemble des équations électriques statoriques et rotoriques ainsi que l'équation mécanique définissent le modèle de la machine en fonctionnement dynamique. Ce modèle fait apparaître des difficultés pour sa résolution numérique.

- D'une part, l'ordre du système est élevé,
- et d'autre part, les matrices des paramètres sont fonctions de l'angle (θ) de rotation donc du temps.

Afin d'obtenir des équations plus simples, nous avons recherché des transformations permettant d'abaisser l'ordre du système et d'éliminer cette dépendance vis-à-vis de (θ). La transformation la plus utilisée et celle de Park. Elle consiste à faire une projection des variables

reliées au stator dans un référentiel qui tourne avec le rotor afin de rendre les inductances mutuelles du modèle de la machine indépendantes de la rotation.

La matrice de transformation de Park $[P(\theta)]$ permet le passage des grandeurs statoriques V_a, V_b, V_c et i_a, i_b, i_c à leurs composantes relatives V_o, V_d, V_q et i_o, i_d, i_q . Elle est donnée par l'expression suivante, [1]:

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta + 2\pi/3) & \cos(\Theta + 4\pi/3) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\sin(\Theta + 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

La matrice de passage de Park n'est pas orthogonale. En divisant chaque vecteur colonne par sa norme, on obtient une matrice orthogonale dite transformation de Park modifiée $[P_M(\Theta)]$. Cette transformation permet de garder l'invariance des puissances instantanées dans les deux systèmes d'axes (abc) et (dqo) afin d'avoir l'équivalence physique, [1] tel que:

$$[P_M] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta + 2\pi/3) & \cos(\Theta + 4\pi/3) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\sin(\Theta + 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Les enroulements rotoriques ne subissent aucune transformation puisqu'ils sont par construction ordonnés suivant deux axes perpendiculaires. La transformée de Park est applicable pour les tensions, courants et flux ; on obtient alors :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.7) \quad ; \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.8) \quad ; \quad \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

On pose :

$$[R] = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} ; V_{dqo} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} ; \Psi_{dqo} = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} ; i_{dqo} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix}$$

Le système d'équations devient :

$$V_{dqo} = [R] * i_{dqo} + \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} \quad (3.10)$$

En remplaçant les équations (3.7), (3.8) et (3.9) dans la relation (3.10) on obtient :

$$V_{dqo} = [P_M] * [R] * [P_M]^{-1} * i_{dqo} + [P_M] * \frac{d}{dt} [[P_M]^{-1} * \Psi_{dqo}] \quad (3.11)$$

$$V_{dqo} = [R] * [P_M] * [P_M]^{-1} * i_{dqo} + [P_M] * [P_M]^{-1} * \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} + [P_M] * \Psi_{dqo} * \frac{d}{dt} [[P_M]^{-1}] \quad (3.12)$$

$$V_{dqo} = [R] * i_{dqo} + \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} + w_s * \Psi_{dqo} * [P_M] * \frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] \quad (3.13)$$

Avec

$$\frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\sin(\Theta) & -\cos(\Theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\cos(\Theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\Theta + 4\pi/3) & -\cos(\Theta + 4\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Et

$$[P_M] * \frac{d}{d\Theta} [[P_M]^{-1}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Après avoir remplacé l'équation (3.15) dans (3.13) on obtient l'équation de la loi d'Ohm généralisée au niveau du stator :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} + w_r \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Soit

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - w_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + w_r \Psi_d \\ V_o = -r_a i_o + \frac{d}{dt} \Psi_o + 0 \Psi_o \end{cases} \quad (3.17)$$

Etant donné que l'axe homopolaire nul, on ne prend que les deux premières équations du système (3.18), on obtient le nouveau modèle dans le repère de Park :

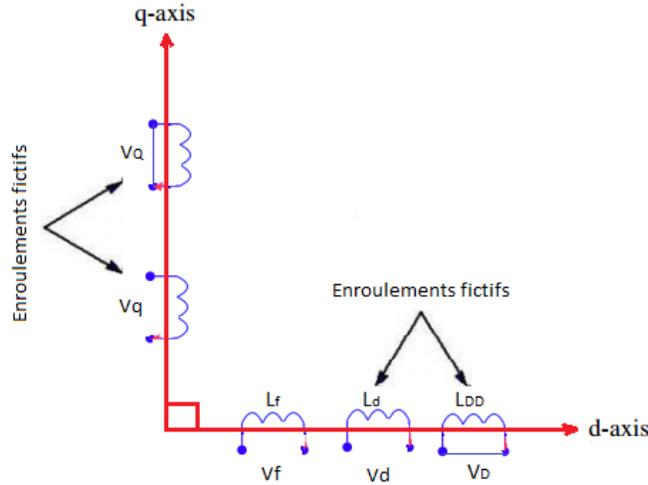


Fig. III.2. Modèle de la machine synchrone dans le repère (dq0)

Le système suivant représente les équations au rotor et au stator [4] :

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d \\ V_f = r_f i_f + \frac{d}{dt} \Psi_f \\ 0 = r_D i_D + \frac{d}{dt} \Psi_D \\ 0 = r_Q i_Q + \frac{d}{dt} \Psi_Q \end{cases} \quad (3.18)$$

Dans les expressions de tension V_d et V_q on voit l'apparition des f.e.m statiques $(\frac{d}{dt} \Psi_d, \frac{d}{dt} \Psi_q)$ dues aux variations des flux et des f.e.m dynamiques $(\omega_r \Psi_q, \omega_r \Psi_d)$ dues à la rotation, [1]. La nouvelle forme obtenue du modèle de l'alternateur est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

- Détermination des expressions des flux en fonction des courants

Le flux total à travers la bobine équivalente au stator sur l'axe direct et l'axe quadrature (Ψ_d et Ψ_q) ainsi que les flux à travers l'enroulement d'excitation et l'enroulement amortisseur sur l'axe d et l'axe q (Ψ_f, Ψ_D et Ψ_Q) peuvent être exprimés en fonction des courants et des inductances propres et mutuelles, [1] [2] :

$$\begin{cases} \Psi_d = -L_d i_d + M_{df} i_f + M_{dD} i_D \\ \Psi_q = -L_q i_q + M_{qQ} i_Q \\ \Psi_f = -M_{df} i_d + L_f i_f + M_{fD} i_D \\ \Psi_D = -M_{dD} i_d + M_{Df} i_f + L_D i_D \\ \Psi_Q = -M_{qQ} i_q + L_Q i_Q \end{cases} \quad (3.20)$$

Les expressions des flux en fonction des courants sous forme matricielle sont:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

On remplace les flux de la relation (3.21) dans le système d'équations (3.19), et on obtient le modèle régissant le fonctionnement de l'alternateur en fonction des courants, [2] [4] :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ v_q \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \\ + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Le système (3.22) peut être écrit sous la forme simplifiée suivante :

$$V = [R_a] * I + [A] * \frac{dI}{dt} + [G] * I \quad (3.23)$$

Avec :

$$[R_a] = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \text{ et}$$

$$[G] = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La tension aux bornes du générateur V_t est donnée par l'équation suivante [2] :

$$V_t = (V_d^2 + V_q^2)^{1/2} \quad (3.24)$$

Le courant statorique est obtenu de la même manière telle que [2]:

$$i_m = (i_d^2 + i_q^2)^{1/2} \quad (3.25)$$

La puissance P_e à la sortie du générateur est donnée par [2] :

$$P_e = V_d i_d + V_q i_q \quad (3.26)$$

III.4 Modèle de l'alternateur relié à un réseau de puissance infinie

Généralement les alternateurs sont connectés aux réseaux de puissance infinie par l'intermédiaire d'un transformateur et de lignes de transmission. Un réseau de puissance infinie est défini par une tension, une fréquence et un déphasage constant.

Les hypothèses adoptées lors de la modélisation sont les suivantes :

- Les aspects capacitifs des lignes sont négligés.
- le modèle de l'alternateur est pris avec amortisseurs et sa fréquence est supposée constante.
- La ligne est modélisée par une résistance et une inductance en série " R_t et L_t ", Fig. III.3 :

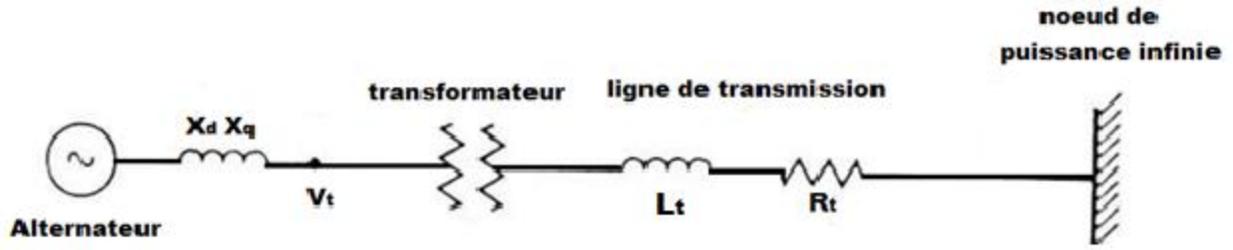


Fig.III.3. Alternateur relié à un nœud de puissance infinie

Dans ce cas, la chute de tension au niveau de la ligne de transmission pour les trois différentes phases est donnée par les équations suivantes:

$$\begin{cases} dV_a = L_t \frac{di_a}{dt} - R_t i_a \\ dV_b = L_t \frac{di_b}{dt} - R_t i_b \\ dV_c = L_t \frac{di_c}{dt} - R_t i_c \end{cases} \quad (3.27)$$

Afin de pouvoir intégrer ces équations avec le modèle (3.22) de l’alternateur, il faut procéder à un changement de repère en utilisant la transformé de Park donnée par l’équation (3.6) c’est-à-dire, passer du repère (abc) vers le repère (d-q). L’utilisation de cette transformation permet d’obtenir les équations suivantes [2]:

$$dV_d = V_d - V_s \sin(\delta) = L_t \frac{di_d}{dt} - L_t \omega_r i_q + R_t i_d \quad (3.28)$$

$$dV_q = V_q - V_s \cos(\delta) = L_t \frac{di_q}{dt} + L_t \omega_r i_d + R_t i_q \quad (3.29)$$

Les équations de l’alternateur avec les lignes de transmissions deviennent, [2], [8] :

$$\begin{bmatrix} V_s \sin(\delta) \\ V_s \cos(\delta) \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_a + R_t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(r_a + R_t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} +$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} -(L_d + L_t) & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -(L_q + L_t) & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -x_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -x_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \\
& \omega_r \begin{bmatrix} 0 & (L_q + L_t) & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -(L_d + L_t) & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.30)
\end{aligned}$$

Dans cette partie, nous avons présenté la machine synchrone en décrivant ses différentes parties et son principe de fonctionnement en mode alternateur. Nous avons développé des modèles permettant d'étudier le fonctionnement de la machine en régime transitoire ainsi que les contraintes s'exerçant sur la machine de façon relativement précise.

III.5 Modèle de la machine en grandeur relative et en valeur réduite

Le système <<per unit>> permet d'avoir des ordres de grandeur relatifs à un certain nombre de paramètres indépendamment des niveaux de tensions et de puissance. De plus, l'utilisation de ce système simplifie certaines relations et schémas équivalents.

Ce système associe, à une variable quelconque << \mathbf{x} >>, une valeur de base << \mathbf{x}_{base} >> et la compare à sa valeur réelle << $\mathbf{r}_{éelle}$ >> dans le but de l'exprimer dans un système sans dimensions <<pu>> [11].

La notion de valeur réduite est associée à la notion de grandeurs nominales. Dans le cas d'un alternateur, elle est caractérisée par :

- La puissance apparente nominale S_n
- La tension nominale entre phase et neutre V_n , ou la tension nominale composée entre deux phases U_n , avec :

$$V_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (3.31)$$

- Le courant nominal I_n , qui représente le courant de ligne, avec :

$$S_n = 3V_n I_n = \sqrt{3} U_n I_n \quad (3.32)$$

On introduit également l'impédance nominale Z_n , tel que :

$$Z_n = V_n / I_n \quad (3.32)$$

La notion de valeurs réduites peut être utilisée aux régimes quelconques, c'est à dire aux valeurs instantanées des courants, tensions ainsi qu'aux différentes équations mathématiques (nombres complexes, transformées de Laplace ...). Mais, dans ce cas on est amené à diviser chaque grandeur physique, pour la ramener en valeur réduite, non pas forcément par sa valeur nominale, mais par valeur dite «de base». Certaines valeurs de base peuvent être choisies arbitrairement avec la considération de leur commodité en respectant certaines règles de cohérence notamment sur le plan de la conservation de l'énergie.

Les avantages de l'utilisation des valeurs réduites sont les suivantes:

- les ordres de grandeurs des impédances en valeur réduite d'une famille de machines sont peu variables d'une machine à l'autre si bien que l'utilisation des valeurs réduites permet de mieux apprécier et interpréter les similitudes comme les différences du comportement de ces machines.
- les courants et les tensions en valeur réduite fournissent rapidement une estimation de la gravité des contraintes résultant du régime étudié [11].

Valeurs réduites relatives d'axe (d-q)

On choisira $\sqrt{2} * I_n$ (I_n courant nominal de l'alternateur) comme valeur de base pour les courants statoriques et on posera [11] :

$$i_d(p.u) = \frac{i_d}{\sqrt{2} * i_n} \quad i_q(p.u) = \frac{i_q}{\sqrt{2} * i_n} \quad (3.34)$$

De même on choisira $\sqrt{2} * V_n$ (V_n tension nominale à la sortie de l'alternateur) comme valeur de base :

$$V_d(p.u) = \frac{V_d}{\sqrt{2} * V_n} \quad V_q(p.u) = \frac{V_q}{\sqrt{2} * V_n} \quad (3.35)$$

Les différentes puissances électriques (active, réactive, apparente) auront comme valeur de base : ($3 * V_n * I_n$), on prend un exemple de la puissance active :

$$P_e(p.u) = \frac{P_e(W)}{3 \cdot V_n \cdot I_n} \quad (3.36)$$

Pour la dimension du temps, on lui a conservé son unité habituelle (seconde). Pour les flux on a choisi une valeur de référence égale à $(\Psi_{ref} \cdot \omega)$ soit :

$$\Psi_d(p.u) = \frac{\Psi_d(Wb)}{\Psi_{ref} \cdot \omega_s} \quad \Psi_q(p.u) = \frac{\Psi_q(Wb)}{\Psi_{ref} \cdot \omega_s} \quad (3.37)$$

Ce qui permet d'avoir les quantités $(\omega_s \cdot \Psi_d)$ et $(\omega_s \cdot \Psi_q)$ en régime permanent, qui seront en grandeur de l'unité. Pour avoir le couple en valeur réduite, il est commode de définir un couple nominal par référence à la puissance nominale apparente :

$$C_n = \frac{3 \cdot V_n \cdot I_n}{w_s} \quad (3.38)$$

D'où le couple, en valeur réduite, exprimé par :

$$C_e(p.u) = \frac{C_e(N.m)}{C_n} \quad (3.39)$$

III.6 Modèle de la Turbine

Généralement la forme la plus simple et la plus répandue de la turbine à gaz est composée :

- d'un compresseur d'air qui permet de comprimer l'air ambiant à une pression comprise entre 10 et 30 bars environ,
- d'une chambre de combustion dans laquelle le combustible est brûlé avec de l'air comprimé,
- et d'une turbine dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion.

- Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la turbine à gaz (9FB) est identique à toutes les turbines à gaz. En premier lieu, l'air est comprimé au niveau du compresseur, réchauffé dans une chambre de combustion puis il se dilate dans une turbine ce qui permet de produire une puissance mécanique.

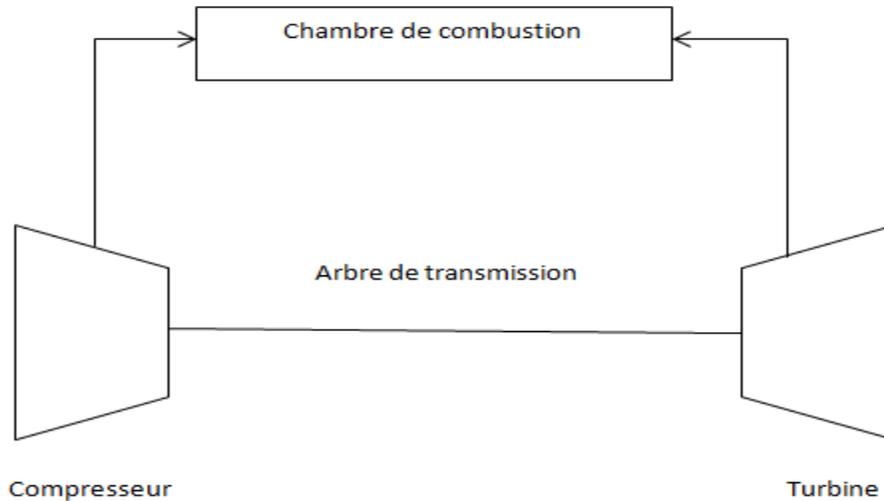


Fig.III.4. Turbine à gaz

Une partie de cette puissance est utilisée pour entraîner le compresseur, la partie restante est utilisée pour entraîner l'alternateur. Le cycle idéalisé de la turbine à gaz est présenté dans le diagramme (P.V). Les courbes du diagramme sont déduites par la loi de Poisson qui donne pour le cas d'un changement adiabatique (pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur) la relation suivante :

$$P.V^K = cste \quad (3.40)$$

Le cycle est présenté dans le diagramme suivant :

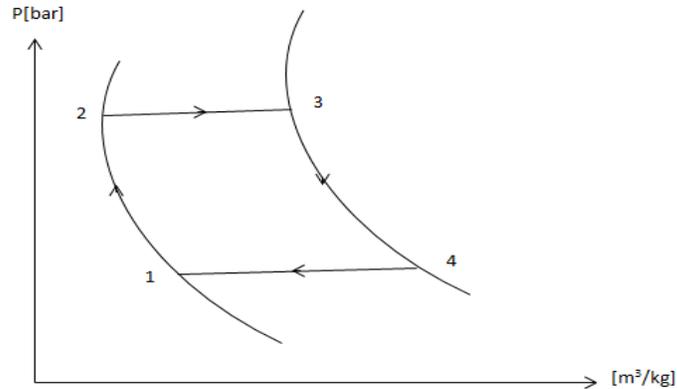


Fig. III.5. Cycle idéalisé de la turbine à gaz

- 1 → 2 Compressions
- 2 → 3 Chambre de combustion
- 3 → 4 Dilatation de l'air dans la turbine
- 4 → 1 Refroidissement naturel

Le cycle décrit est dit ouvert car l'étape de refroidissement se fait dans l'air. Durant notre travail, il ne sera pas tenu compte de la variation de la puissance mécanique lors d'une perturbation. Le modèle de la turbine qui entraîne la machine est négligé car la turbine possède une constante de temps plus importante en comparaison avec les constantes de temps électriques de l'alternateur et de son système d'excitation. Par conséquent la variation du couple mécanique est plus lente devant celle du couple électrique. Et de ce fait le modèle de la turbine n'est pas inclus dans le modèle de l'alternateur.

III.7 Blocs Simulink

Les équations précédentes ont permis de déterminer les modèles Simulink des différents sous-ensembles (turbo-alternateur).

- Bloc de l'alternateur à vide

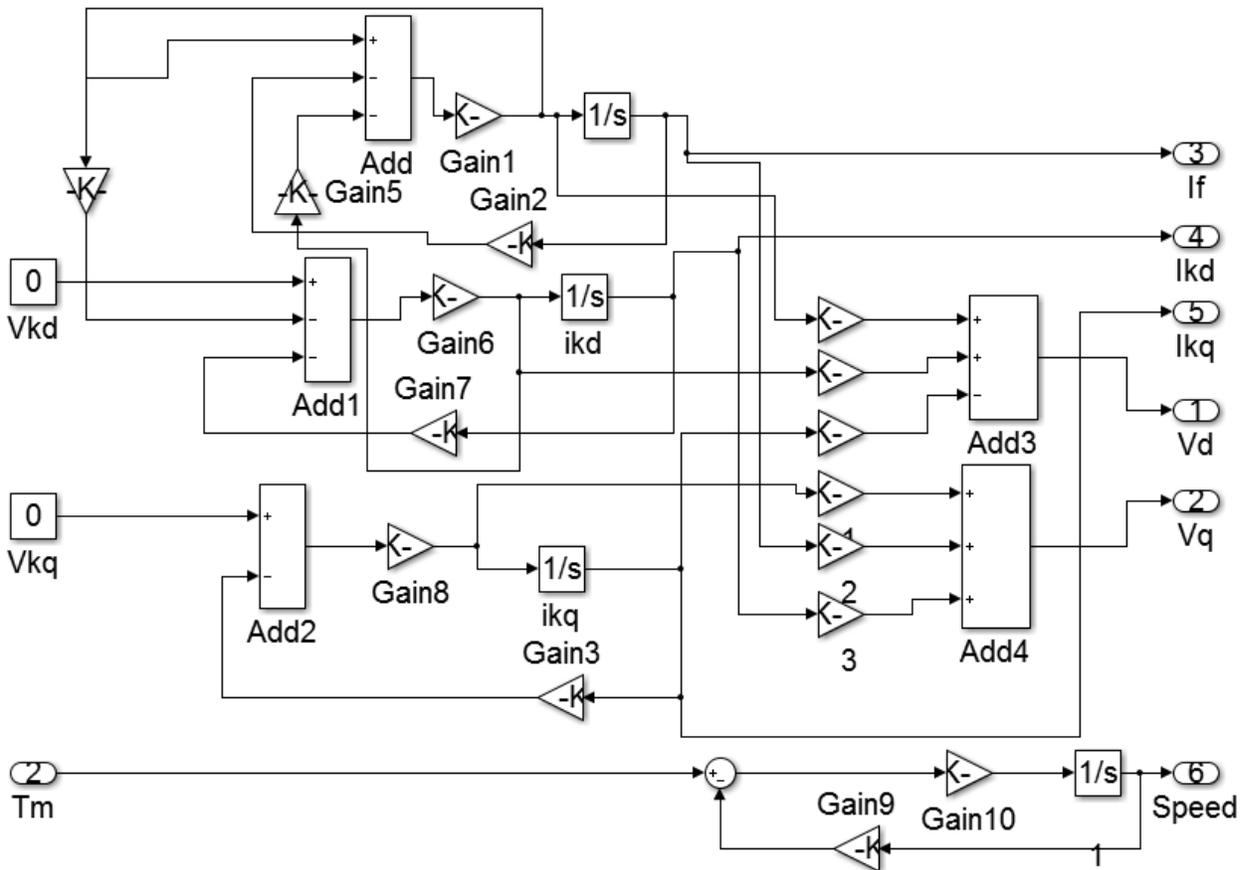


Fig. III.6. Réalisation du modèle de l'alternateur à vide sous environnement Simulink

Le modèle de l'alternateur peut être représenté par un bloc possédant deux entrées et six sorties tel que représenté par la Fig. III. 7.

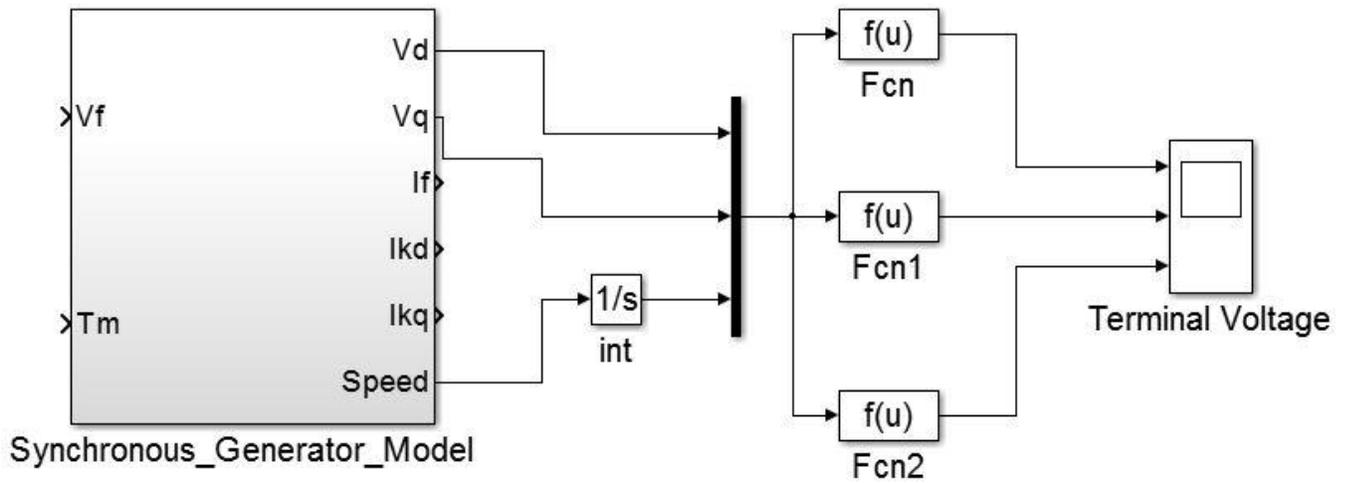


Fig. III. 7. Modèle simplifié de l’alternateur

- **Résultats de simulation de l’alternateur à vide**

La tension de sortie à vide des trois phases au niveau du stator est donnée par la Fig.III.8.

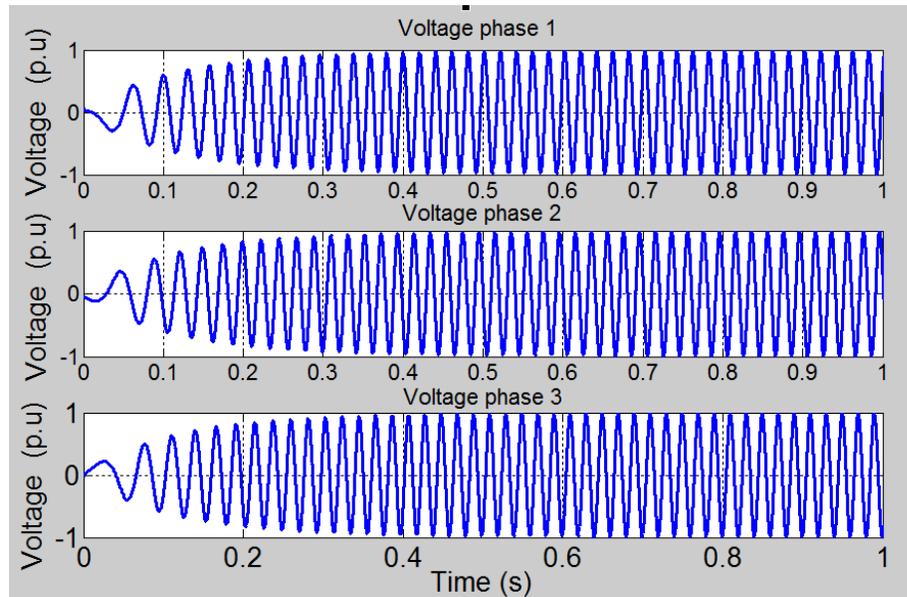


Fig. III.8. Tension de sortie de l’alternateur à vide

La vitesse de rotation est donnée par la Fig. III. 9.

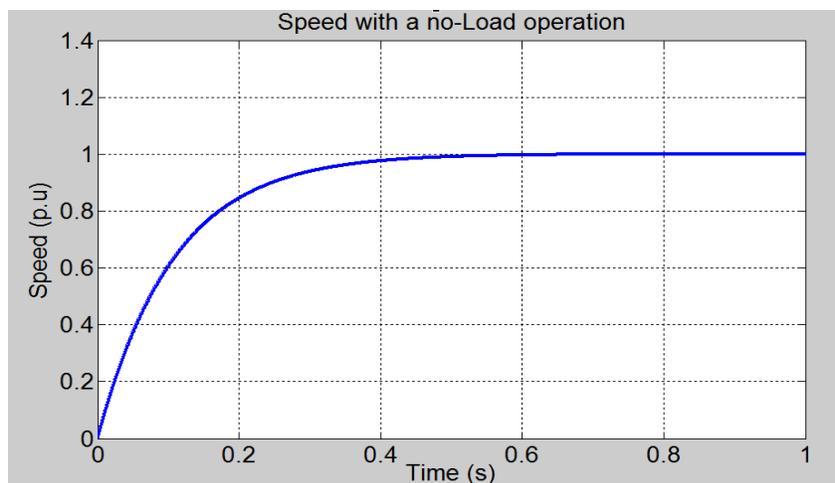
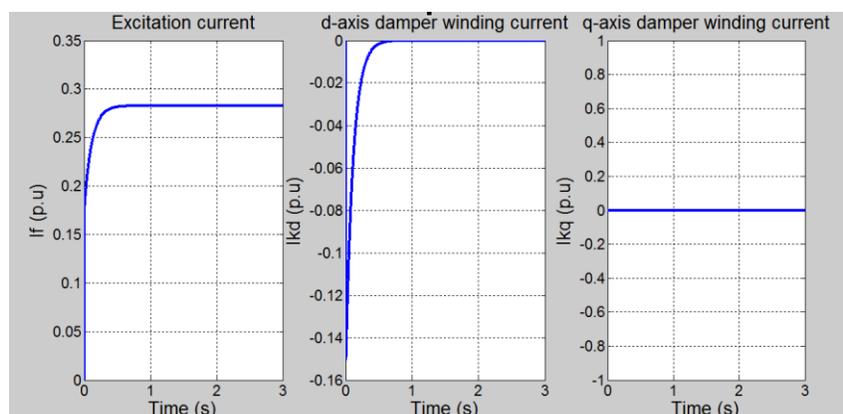


Fig. III.9. Vitesse de rotation à vide

Le courant d'excitation, le courant d'enroulement amortisseur sur les axes d et q sont représentés par la Fig. III. 10.

Fig. III.10. Les courants I_f , I_D et I_Q

- Schéma Bloc de l'alternateur en charge

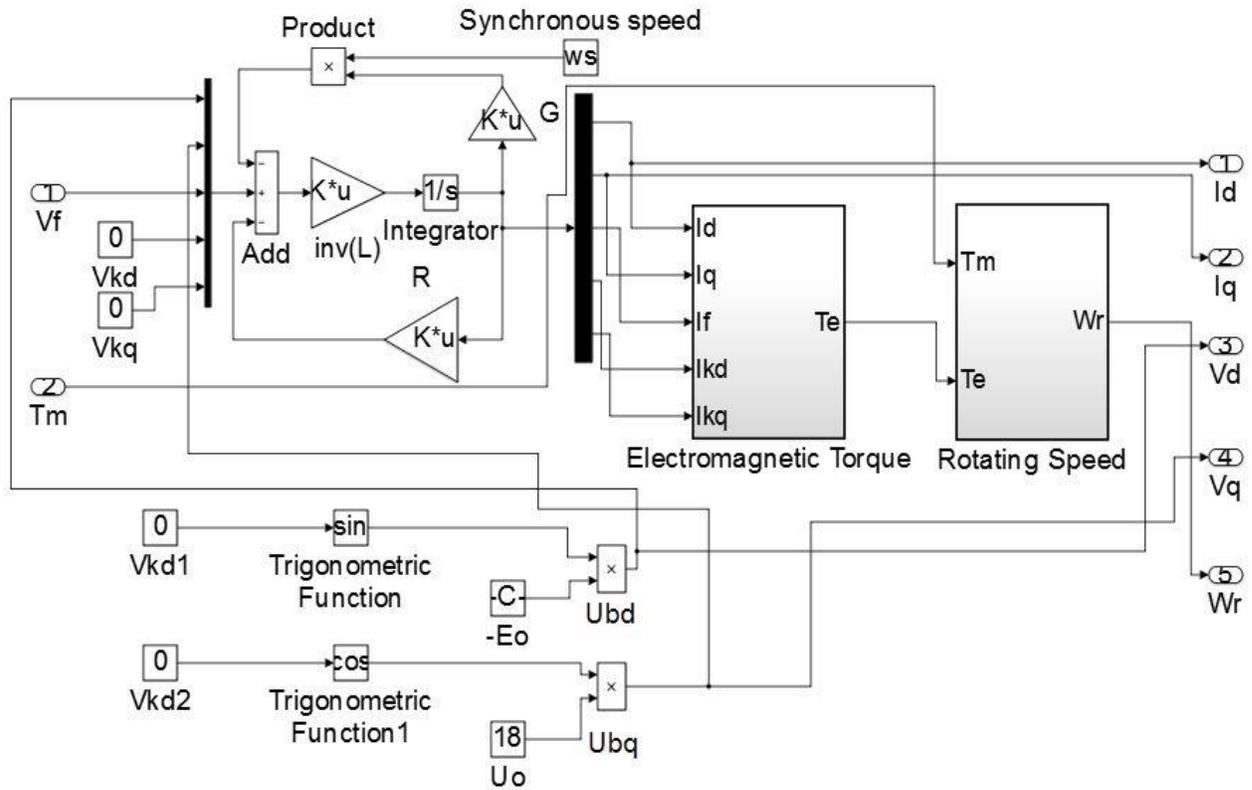


Fig. III.11. Modèle de l'alternateur en charge sous Simulink

Le bloc de simulation du couple électromagnétique est :

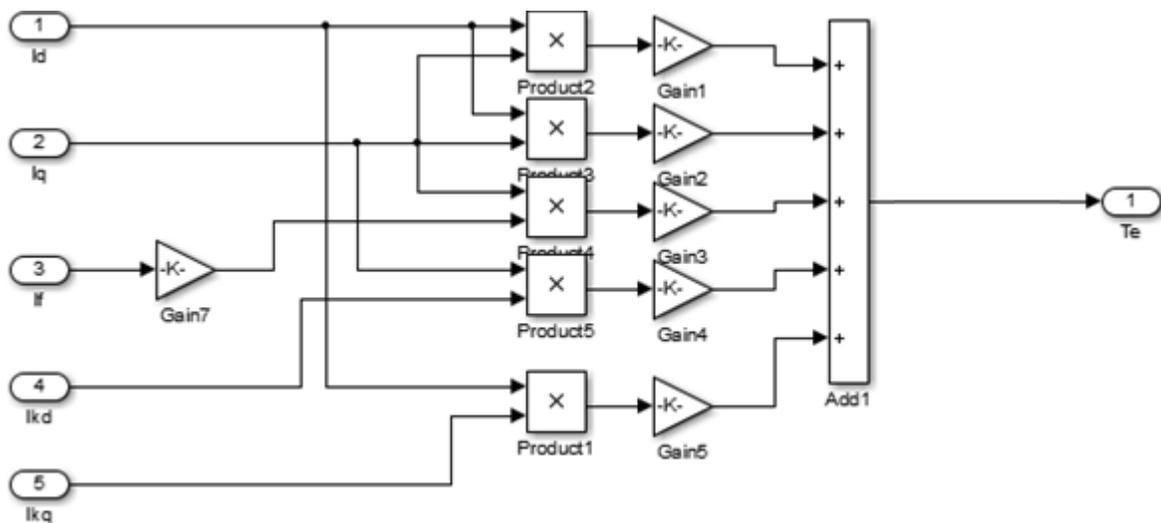


Fig. III.12. Bloc-Simulink du couple électromagnétique.

- Résultats de simulation de l'alternateur en charge

Nous présentons sur la Fig.III.13 les courants statoriques et la vitesse de rotation de la génératrice en charge sur la Fig.III.14.

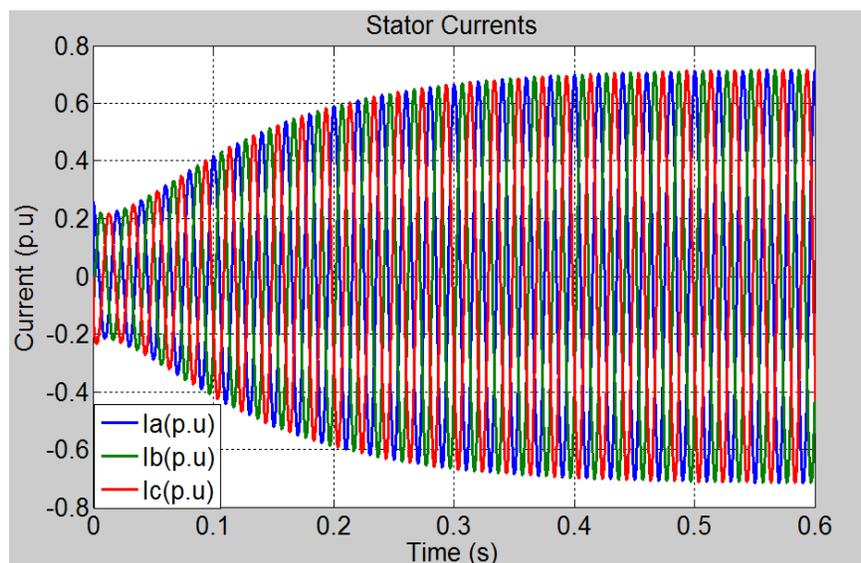


Fig. III.13. Courants des trois phases statoriques

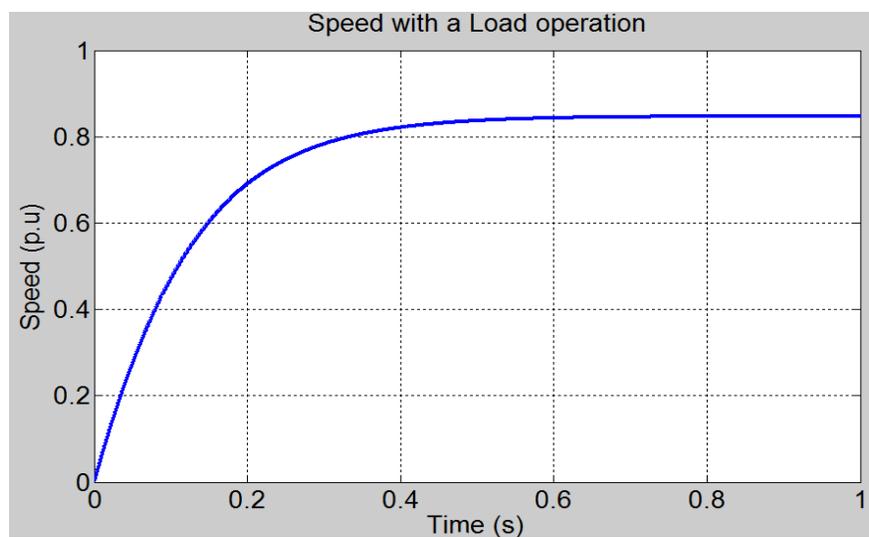


Fig. III.14. Vitesse de rotation en charge

- **Interpretation des resultats**

Les résultats de simulations obtenus à vide et en charge montrent que lorsque la charge augmente, la tension de sortie et la vitesse de rotation diminuent. On a remarqué que chaque perturbation au niveau de la charge influe directement sur la tension de sortie et sur la vitesse de rotation du générateur.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une modélisation du groupe turbine-alternateur, c'est-à-dire, machine synchrone, turbine et charge, afin de pouvoir étudier son comportement dynamique. Nous avons réalisé dans un premier temps un test de fonctionnement à vide puis en charge. Ces essais ont permis de confirmer les paramètres de simulation de la génératrice synchrone que l'on a obtenus par calcul au niveau du Chapitre II de notre étude dans le cas de la centrale de « Hadjert Ennous ».

Les résultats obtenus par simulation ont montré que lorsque la génératrice subit une variation de charge (perturbation). Cette variation introduit une perturbation au niveau de la tension de sortie et une autre au niveau de la vitesse de rotation de la génératrice. Afin de fixer la tension et la fréquence du réseau pour obtenir une meilleure qualité d'écoulement d'énergie électrique, il nécessaire d'introduire la notion de commande et de régulation afin maintenir le niveau d'équilibre. Le Chapitre suivant sera consacré à la stabilité.

III. 9 Références

- [1] J.Lesenne, F.Notelet, G.Séguier, 'Introduction à l'électrotechnique approfondie' Technique and documentation, Paris, 1981.
- [2] John R.Smith, 'Response Analysis of A.C.Electrical Mahines', Computer Models and Simulation', Research Studies Press ltd, 1990
- [3] Emile Mouni *,Slim Tnani , Gérard Champenois,' Synchronous generator modelling and parameters estimation using least squares method', Simulation Modelling Practice and Theory 16 (2008), pp 678 –689.
- [4] Rachid ABDESSEMED, 'Modélisation et simulation des machines électriques', Ellipses Technosup, Mai 2011, pp. 115-121
- [5] F. Bruck, F. Himmelstoss,'Modelling and simulation of synchronous machine, in: IEEE Computers in Power Electronics, 6th Workshop on 19–22 July, 1998, pp. 81–86.
- [6] E. Mouni, S. Tnani, G. Champenois,'Comparative study of three models methods of synchronous generator'. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Paris, France, 2006.
- [7] P. Subramaniam, O.P. Malik, 'Digital simulation of a synchronous generator in direct phase quantities', Proc. IEE 118, January 1971 ,pp153–160.
- [8] Lamy Abdeljalil,' Modélisation dynamique et commande des alternateurs couplés dans un réseau ´ électrique embarqué' Electric power. Université de Nantes, 2006.
- [9] Hemmami Mohammed Ilyes,' Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) par l'utilisation de la commande directe du couple et d'un observateur de vitesse à mode glissant', Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra 2011.
- [10] Juste Tsotie Wamba, 'Modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale hydro-québec', PHd thesis, Université du Québec en abitibi-témiscamingue, décembre, 2013, pp 26-27.
- [11] Paul C.Krause,Oleg.Wasynczuk,Scott,Scott D.Sushaff, 'Electric Machinery And Drive Systems', Second edition IEEE press series on power engineering 2002,pp 155-157.

Chapitre IV

Régulation de la tension de sortie et de la vitesse de
rotation
de l'ensemble turbine-alternateur

IV.1 Introduction

Dans les grands réseaux électriques, il est important de conserver et de maintenir la fréquence et la tension à leurs valeurs nominales afin d'avoir un fonctionnement adéquat et un équilibre entre la puissance produite et celle consommée.

En effet, le plus grand problème de l'énergie électrique est son stockage par conséquent les quantités nécessaires pour faire face aux variations de la demande et aux incidents doivent être produites instantanément au moment où elles sont demandées [1].

Une augmentation de la demande d'énergie provoque des creux de tension et une diminution de la vitesse de rotation et donc de la fréquence du réseau. A l'aide de capteurs, la valeur de la vitesse sera mesurée et corrigée automatiquement par des régulateurs de vitesses par action sur l'admission de la quantité du combustible (gaz) au niveau de la turbine. Il en est de même pour la tension de sortie qui doit être régulée grâce à l'excitatrice.

IV.2 Systèmes de contrôle

Les systèmes de contrôle sont composés de deux dispositifs essentiels, tels que, représentés dans la **Fig. IV.1**.

- Le premier, dispositif servant à réguler la tension de sortie de l'alternateur à travers son excitatrice, la tension de sortie doit être maintenue autour de 18,5 kV quelque soit la perturbation de charge.
- Le second, dispositif servant à réguler la vitesse de rotation et à la maintenir à une valeur constante par adaptation de la puissance mécanique. La vitesse de fonctionnement de la génératrice dépend de la fréquence du réseau, $f = 50 \text{ Hz}$, $p = 1$).

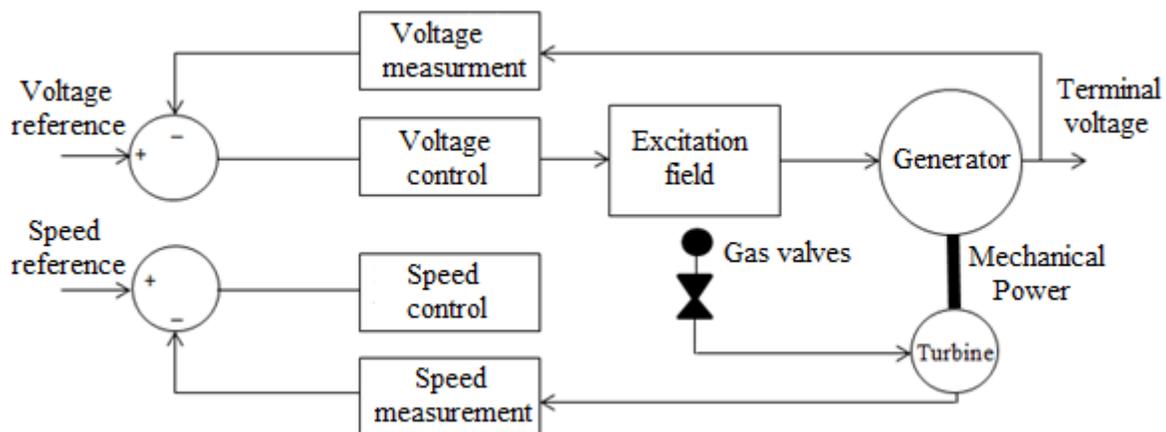


Fig.IV.1. Circuit de contrôle [2]

IV.3 Régulation de la tension de sortie de l'alternateur

Le contrôle de la tension est un concept fondamental qui permet d'assurer la continuité du service, de fournir une bonne qualité d'énergie aux consommateurs et surtout de créer l'équilibre entre la puissance produite et celle consommée. Pour assurer cette régulation, il est nécessaire d'introduire un contrôleur appelé "**régulateur automatique de tension AVR**", qui a pour tâche principale de maintenir l'amplitude de la tension aux bornes du générateur synchrone à un niveau spécifié. Ce dernier permet d'assurer l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie ou absorbée selon le besoin de la charge. Ce contrôleur représente un moyen très important pour assurer la stabilité transitoire du système de puissance. Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur et permet de régler le flux magnétique dans la machine donc régler la tension de sortie à une valeur spécifiée [2], [11]. La Figure .IV. 2 montre un modèle simplifié du régulateur AVR utilisé :

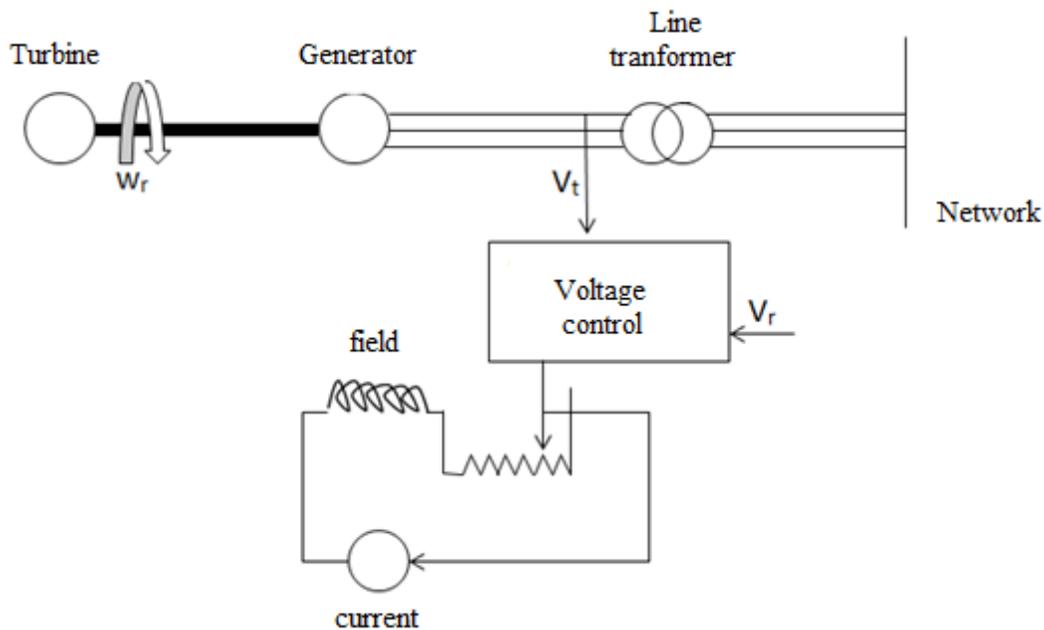


Fig. IV.2. Représentation du groupe de régulation

Le modèle schématique utilisé dans notre étude est représenté dans la Fig. IV. 3, il est composé essentiellement d'un capteur de tension, d'un comparateur (Sommeur), d'un amplificateur, d'un régulateur PID et d'un système de limitation de tension.

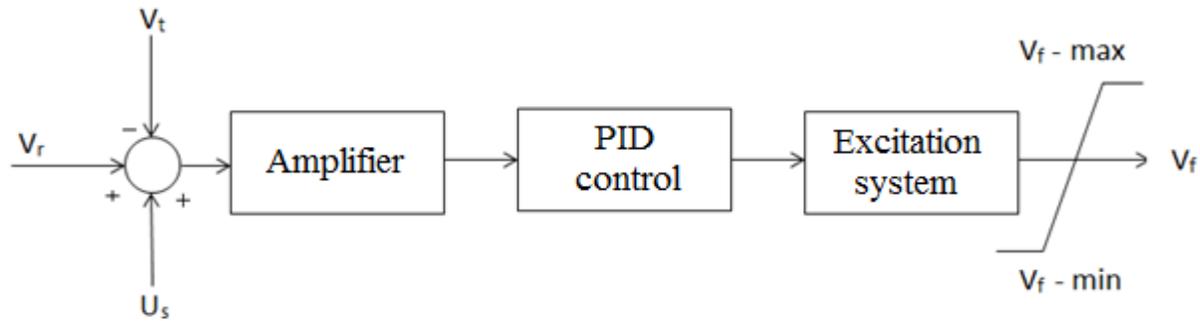


Fig. IV.3. Modèle schématique d'un régulateur AVR

où :

La grandeur V_r représente la consigne de tension utilisée comme référence qui satisfait les conditions d'état d'équilibre. Le régulateur de tension compare, au départ, la valeur de la tension de sortie de l'alternateur V_t avec celle de consigne V_r . La différence (erreur) est amplifiée pour donner la tension d'excitation V_f nécessaire pour maintenir l'équilibre souhaité qui sera limité entre deux valeurs grâce à un système de limitation ($V_{f-\min}$, $V_{f-\max}$).

L'addition d'un signal complémentaire U_s au nœud de sommation peut avoir lieu. Ce dernier est un signal de commande appelé stabilisateur de puissance (**PSS**). Il permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la vitesse de rotation à l'entrée du régulateur de tension (**AVR**) du générateur afin de produire un couple qui est en phase avec la variation de la vitesse rotorique. Le stabilisateur de puissance (**PSS**) corrige la décroissance du couple d'amortissement et s'oppose à toutes les faibles oscillations en forçant le système d'excitation à varier rapidement et au bon moment [7] [12].

Différentes études ont été menées par un groupe IEEE dans le domaine de la modélisation des éléments d'un système de puissance concernant les systèmes d'excitation. Il existe trois types de systèmes d'excitation qui sont fréquemment utilisés [3] :

- **"The Potential-Source Static Excitation System"**, dans lequel le temps de réponse de la tension d'excitation est très court,
- **"The Separately Excited Static Diode-Rectifier Excitation System"**, qui existe sous deux formes, la première appelée **Nominal Response Excitation System (NRES)** et la seconde appelée **High Initial Response (HIR)**. Le temps de réponse de la tension d'excitation pour la première est compris entre 0,2 et 0,5s ce qui est beaucoup plus lent que celui du HIR.

- "The Brushless Excitation System" qui a une réponse semblable au deuxième modèle. Cependant, les modèles mathématiques de ces trois types de systèmes d'excitation sont disponibles à savoir : Type IEEE ST1 pour le premier modèle, type IEEE AC1 est choisi pour le modèle **Brushless Excitation System** et le type IEEE AC2 pour le modèle **HIR**.

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le modèle du système IEEE ST1 car il est le plus utilisé. Ce système se caractérise principalement par sa rapidité dans la réponse et sa sensibilité.

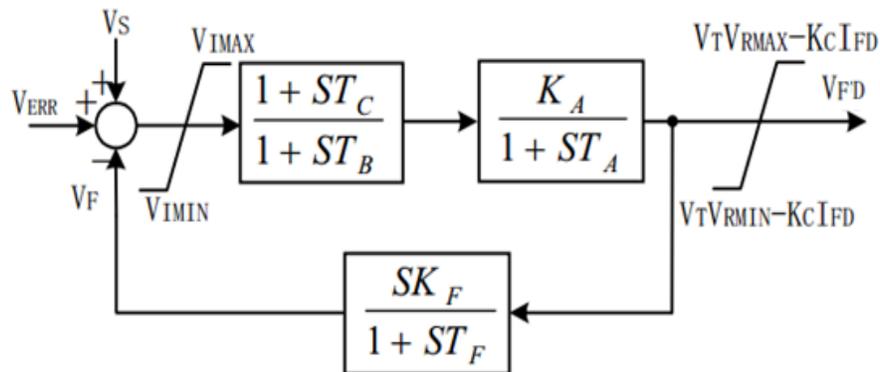


Fig.IV.4. Modèle du système d'excitation IEEE-type ST1 [3]

Afin de contrôler la tension d'excitation V_{FD} , un modèle simplifié, dans lequel nous avons négligé les constantes de temps (T_c , T_B , T_F), est représenté comme suit :

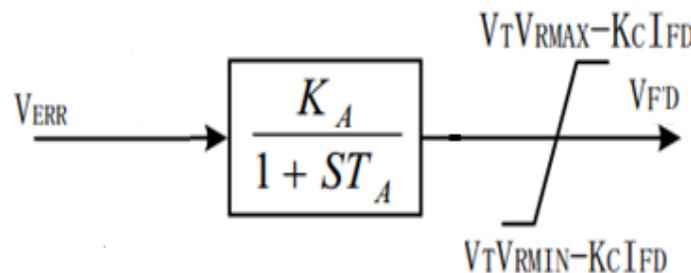


Fig.IV.5. Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1 [4]

Par substitution du modèle simplifié du système d'excitation dans le modèle d'un régulateur automatique de tension, on aboutit au modèle suivant :

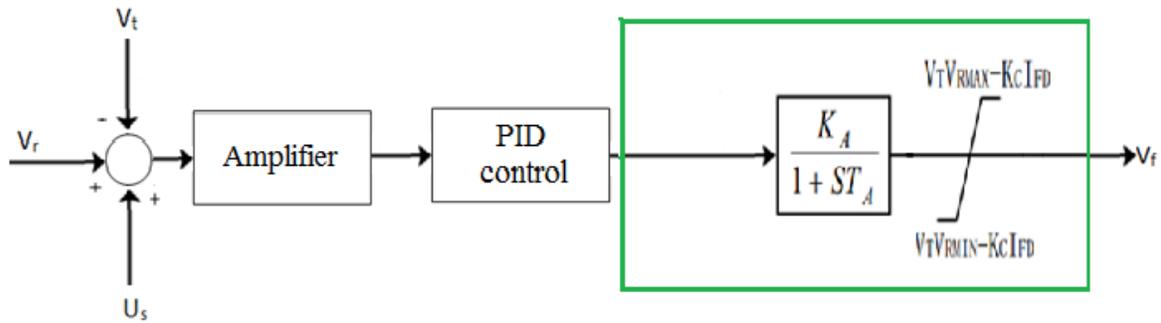


Fig. IV.6. Modèle schématique d'un régulateur AVR

IV.4 Régulation de la vitesse de rotation de l'ensemble turbine-alternateur

Le contrôle de la vitesse de rotation de l'ensemble turbo-alternateur est nécessaire pour assurer la stabilité de la fréquence du réseau à 50 Hz et de protéger l'alternateur contre le décrochage. Pour assurer cette régulation, il est nécessaire d'introduire un contrôleur PID qui a pour tâche principale de maintenir la vitesse de rotation autour de 3000 tr/min. La boucle de régulation est composée principalement d'un régulateur PID, d'un servomoteur et d'une turbine. La Figure IV. 7 montre le principe de régulation de la vitesse.

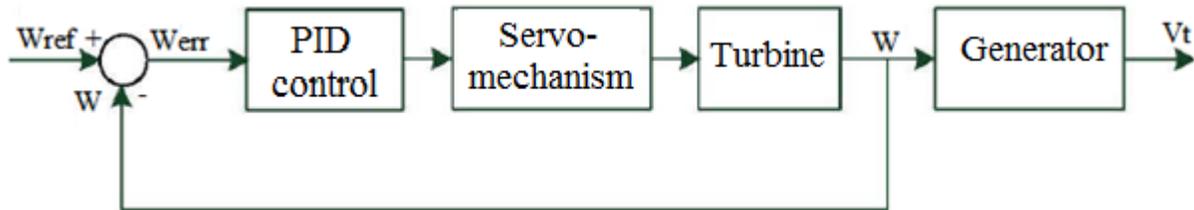


Fig. IV.7. Principe de régulation de la vitesse,

Le régulateur PID agit sur la position du vannage de la turbine en fonction de la variation de la vitesse par rapport à sa valeur nominale. Il permet aussi d'assurer le bon fonctionnement de la turbine [9].

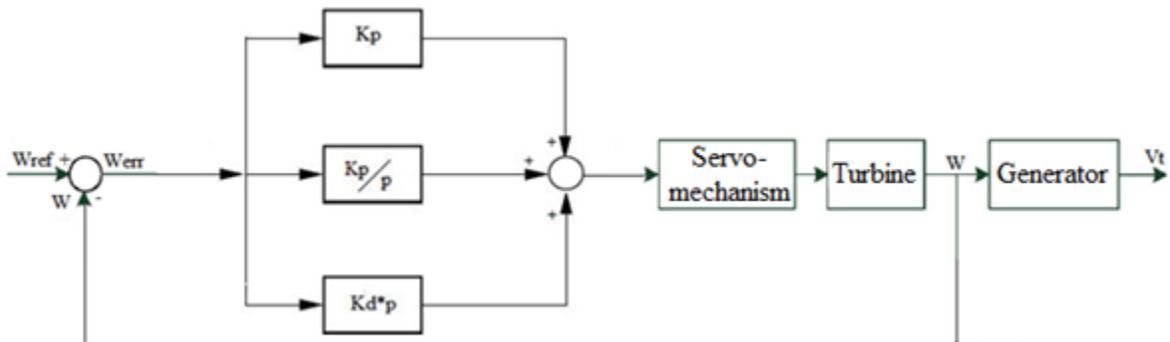


Fig.IV.8. Régulateur PID et servomoteur [8]

IV.5 Synthèse des régulateurs

Les régulateurs servent à améliorer les performances intrinsèques d'un système donné à savoir sa précision et sa rapidité tout en garantissant sa stabilité pour avoir un bon fonctionnement qui satisfait le cahier des charges.

Dans cette partie on s'intéresse à synthétiser quelques correcteurs permettant d'obtenir un certain nombre de performances et d'avoir un système bien réglé.

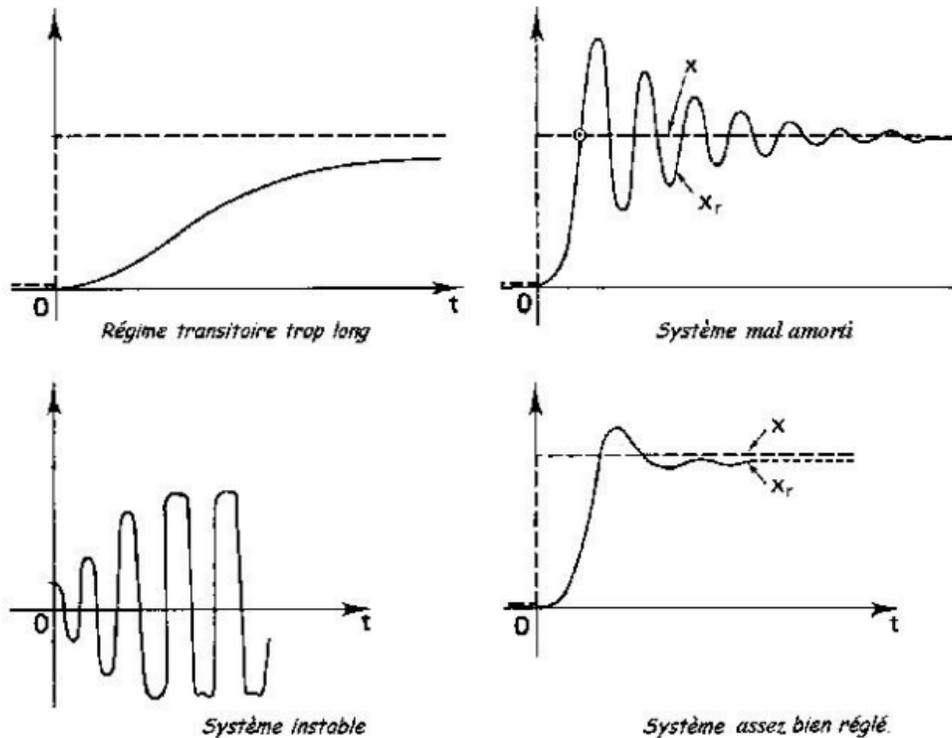


Fig. IV .9. Quelques systèmes à réguler [6]

Correcteur proportionnel (P)

Ce régulateur est le plus classique. Il consiste à appliquer une correction en rapport avec la différence instantanée entre la valeur mesurée et celle de référence. Il est défini par un gain K , la sortie du correcteur est donnée par :

$$y(t) = K \cdot \varepsilon(t) \quad (4.1)$$

où $\varepsilon(t)$ est le signal d'entrée du correcteur et $y(t)$ représente le signal de sortie du correcteur. Sa fonction de transfert est donné par :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K \quad (4.2)$$

Cette commande ne permet pas de réaliser de bonnes performances en termes de précision. Un faible gain K donne généralement un système stable mais avec une erreur importante. Par contre une valeur importante de K donne de mauvaises performances en régime transitoire [6].

Correcteur à action proportionnelle et intégrale (PI)

Ce régulateur est défini par l'équation différentielle suivante :

$$K_p \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + K_i \varepsilon(t) = \frac{dy(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Sa fonction de transfert est donné par :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \quad (4.4)$$

Avec $T_i = \frac{K_p}{K_i}$

Ce correcteur représente l'association de deux actions (P et I) qui est représenté par le schéma fonctionnel suivant :

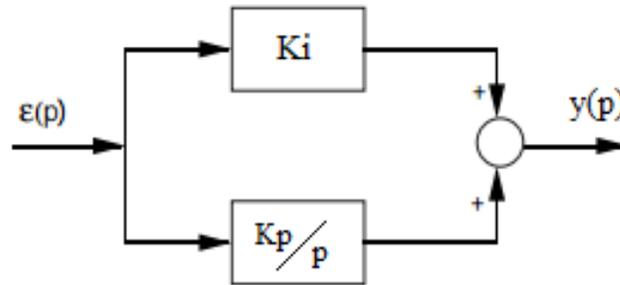


Fig. IV.10. Schéma fonctionnel d'un correcteur PI

La régulation par introduction d'un correcteur PI permet d'améliorer la précision du système de contrôle et d'éliminer les perturbations dues à l'application d'un signal de type échelon. Par contre ce type de régulateur possède certaines limitations sur l'amélioration de la rapidité du système.

Correcteur à action proportionnelle et Dérivé (PD)

Ce régulateur est défini par l'équation différentielle suivante :

$$y(t) = K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (4.5)$$

La fonction de transfert de ce correcteur est donnée par :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + K_d p = K_p(1 + T_d) \quad (4.6)$$

Avec $T_d = \frac{K_d}{K_p}$

Ce correcteur représente l'association de deux actions (P et D) qui sont représentés par le schéma fonctionnel suivant :

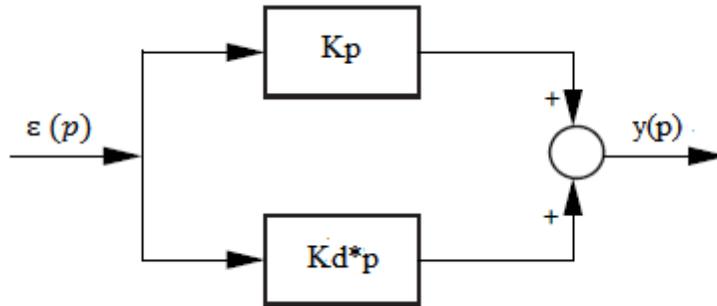


Fig. IV.11. Schéma fonctionnel d'un correcteur PD

Ce correcteur introduit un déphasage positif et de ce fait on l'appelle correcteur à avance de phase qui permet d'améliorer la stabilité et la rapidité du système. Par contre, il présente un certain inconvénient concernant sa sensibilité aux bruits.

Correcteur à action proportionnelle intégrale et Dérivé (PID)

Ce type de correcteur est défini par l'équation différentielle suivante :

$$y(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (4.7)$$

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) \quad (4.8)$$

Ce correcteur représente l'association de trois actions (P, I, D) qui sont représentées par le schéma fonctionnel suivant :

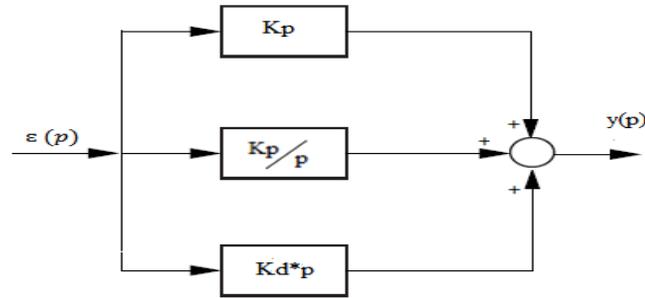


Fig. IV.12. Schéma fonctionnel d'un correcteur PID

Chaque partie du régulateur PID a sa fonction sur le contrôle du système. L'action proportionnelle permet d'augmenter le facteur d'échelle et d'accélérer ainsi la vitesse de réponse. Le rôle de l'action intégrale est d'éliminer l'erreur statique. L'action dérivée permet de réduire le temps de dépassement et assurer la stabilité du système, mais il est très sensible à l'interférence à haute fréquence [5].

Lors de notre étude on a choisi le régulateur de type **PID** car il présente une bonne régulation de la tension due aux avantages qu'ils représentent.

Détermination des paramètres de régulateur

Le réglage d'un PID revient à déterminer les valeurs des coefficients K_p , T_i et T_d , qui permettent d'obtenir la réponse souhaitée du procédé avec les caractéristiques suivantes : robustesse, rapidité et précision.

$$F(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right) \quad (4.9)$$

Chaque coefficient influe sur la réponse du système de la manière suivante :

K_p : Il influe sur le temps de montée. Quand on diminue le temps de montée on obtient un dépassement plus important avec une erreur statique améliorée.

T_i : Il règle la vitesse à laquelle est intégrée l'erreur. Plus T_i est petit, plus on fait croître rapidement le signal de correction.

T_d : Il règle le temps d'application à chaque « saut » du signal d'erreur [6].

Détermination des paramètres par la méthode d'approches successives

Elle consiste à modifier les actions du régulateur et à observer les effets sur la mesure enregistrée jusqu'à obtenir la réponse optimale. On commence par régler l'action proportionnelle puis l'action dérivée et ensuite l'intégrale.

Cette technique présente l'intérêt d'être simple et utilisable sur n'importe quel type de système sauf que son caractère itératif cause sa difficulté d'utilisation sur des procédés à grande inertie.

La procédure

On commence avec un K_p très petit et on annule les actions D et I. On applique un échelon de consigne. Si le gain est suffisamment faible la réponse doit être bien amortie, on augmente le gain K_p et on applique à nouveau un échelon de consigne et on recommence jusqu'à ce que des dépassements apparaissent sur la sortie. Régler alors K_p à la moitié de la valeur obtenue à l'apparition des dépassements.

On applique la même procédure pour T_i et on revient à 2 fois la valeur provoquant les dépassements. Même chose avec T_d et on revient au tiers de la valeur provoquant les dépassements [6].

Après l'application de la méthode par approches successives, les paramètres optimaux qui remplissent les critères de stabilité et rapidité sont les suivants :

Les paramètres du régulateur PID pour la régulation de la tension de sortie obtenue sont :

$$K_p = 200 ; T_i = 0.014 \text{ s} \text{ et } T_d = 0.025 \text{ s}$$

Les paramètres du régulateur PID pour la régulation de la vitesse de l'ensemble Turbine-alternateur sont :

$$K_p = 20 ; T_i = 0.01 \text{ s} \text{ et } T_d = 0.013 \text{ s}$$

Ces résultats sont satisfaisants, car le dépassement au niveau des résultats obtenus est largement amélioré (30 %).

IV.6 Schémas blocs

La procédure de simulation consiste à associer l'alternateur présenté dans le chapitre III au schéma bloc de régulation de la tension (**AVR**), Fig.IV.3, au schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation, Fig. IV.7 ainsi qu'à leur mise en commun telle que mentionnée dans la Fig. IV.13.

Ce système permet d'avoir une idée sur le comportement des grandeurs de la machine telles que les tensions de sortie (**Va, Vb, Vc**), les courants (**Ia, Ib, Ic**), la vitesse de rotation (ω_r) et l'angle interne (δ).

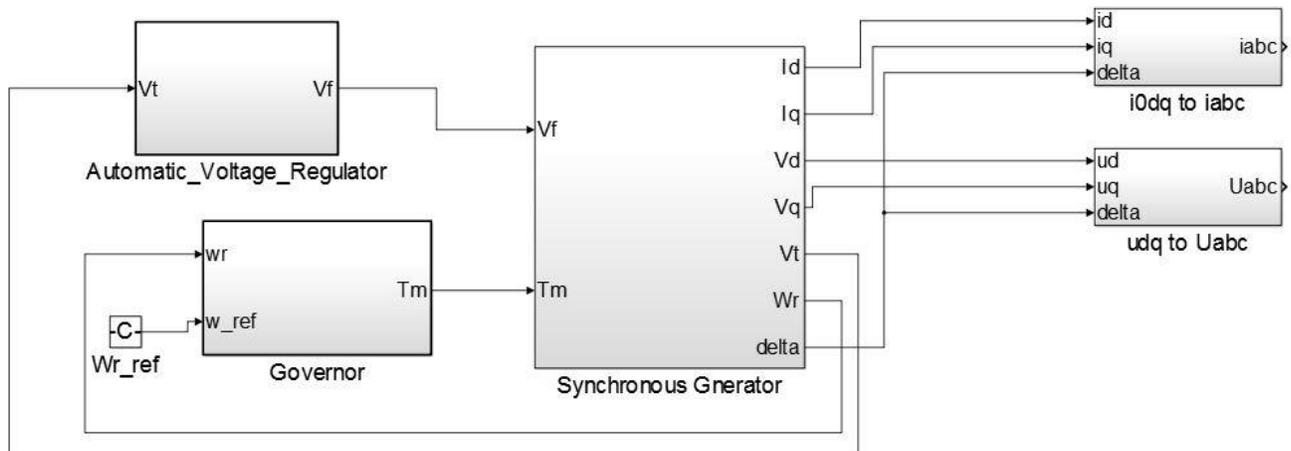


Fig. IV.13. Structure combinée de la génératrice et des blocs de régulation sous Simulink

Le schéma bloc de régulation de la tension de sortie sous Matlab/Simulink est :

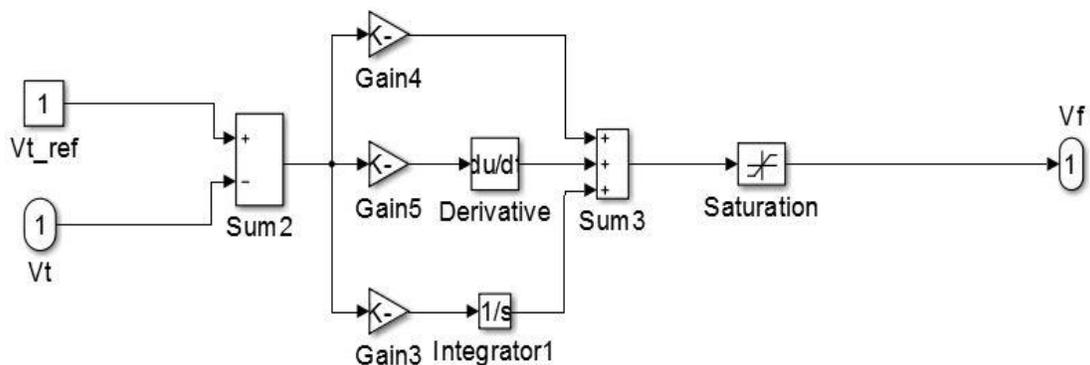
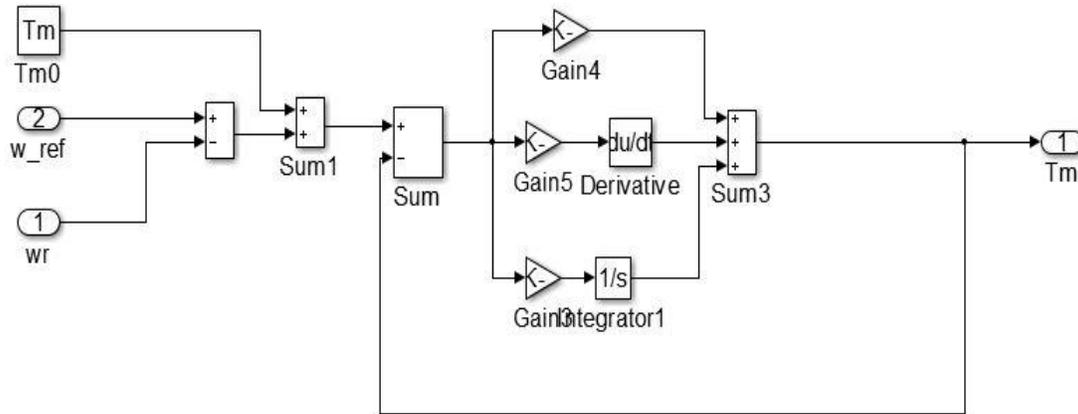


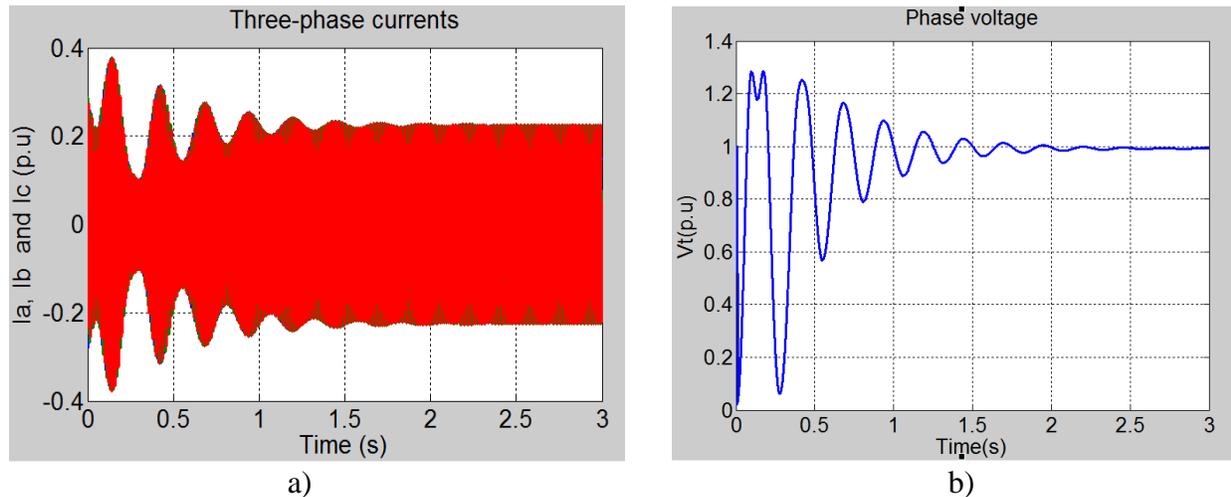
Fig. IV.14. Structure du régulateur de tension de sortie sous Simulink

Le schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation sous Matlab/Simulink est :

Fig.IV.15. Structure du régulateur de la vitesse (W_r) sous Simulink

IV.7 Résultats de simulation

- **Commutation sur une charge à l'instant $t = 0s$**
- **Courant triphasé et tension de sortie**

Fig. IV.16. Courants des trois phases à $t = 0s$ (a) et tension d'une phase (b)

Nous présentons les courants et tensions des trois phases obtenus sur les Figs. IV.16. Quand l'alternateur est à vide aucune puissance active n'est demandée par la charge de ce fait tous les courants sont nuls à son niveau. Lors de la commutation sur une charge à l'instant $t = 0s$ cette dernière provoque une augmentation des courants (I_a , I_b , I_c). La période transitoire dure environ 1.5s après, ces courants atteignent un nouveau régime permanent. La mise en charge provoque une perturbation de la tension de sortie qui varie rapidement et atteint un pic de 1.3

(p.u) (Fig. IV. 16 b). Le temps de rétablissement est d'environ 1.5s, ensuite la tension oscille faiblement autour de la valeur nominale avant de se stabiliser.

- *Vitesse de rotation (ω_r) et angle interne (δ)*

La mise d'une charge provoque une perturbation au niveau de la vitesse. La présence du régulateur PID intervient sur le couple d'entraînement afin de la ramener à sa valeur initiale après une période transitoire qui dure 1.5 s. De même pour l'angle interne qui prend une nouvelle valeur due à l'appel du courant. Cette valeur est atteinte après une perturbation provoquée par le système de régulation de vitesse qui dure 1.5 s

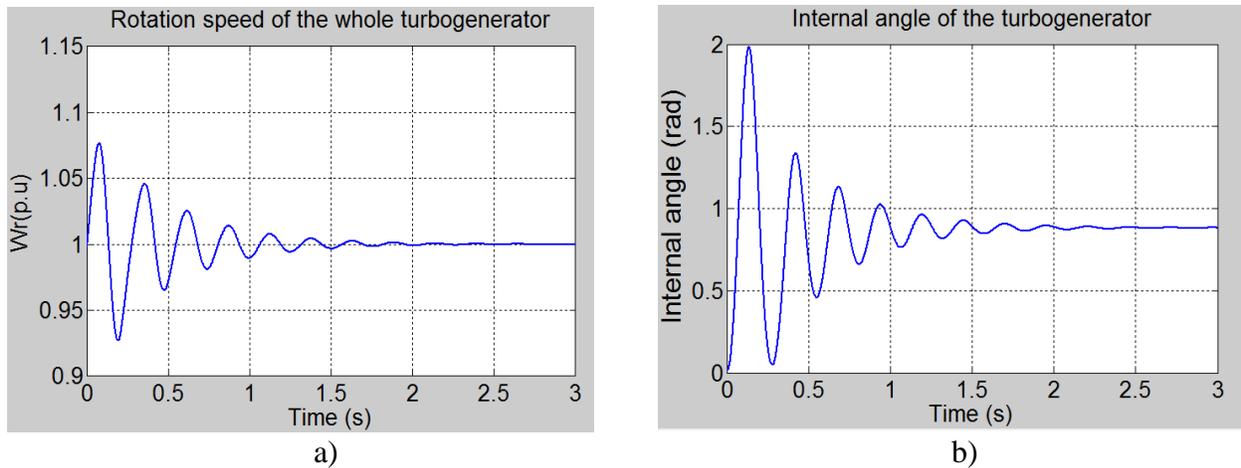
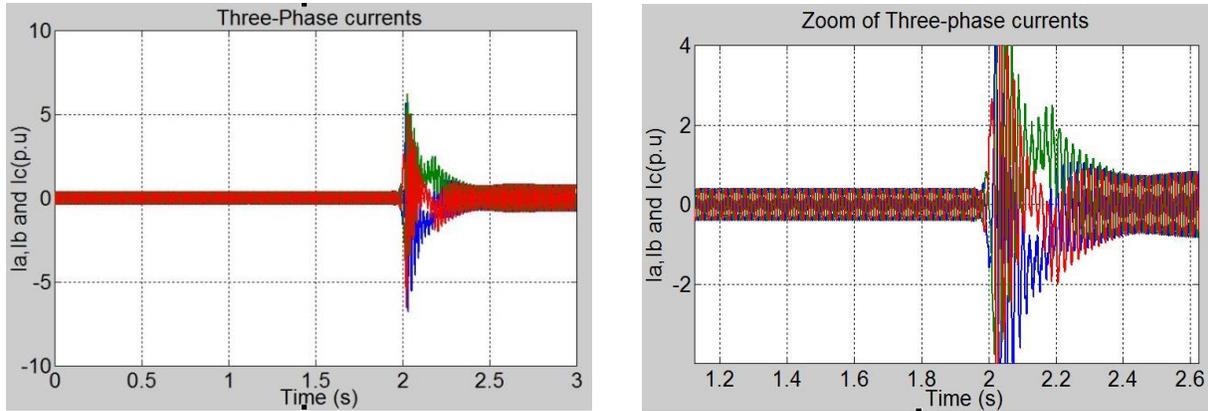
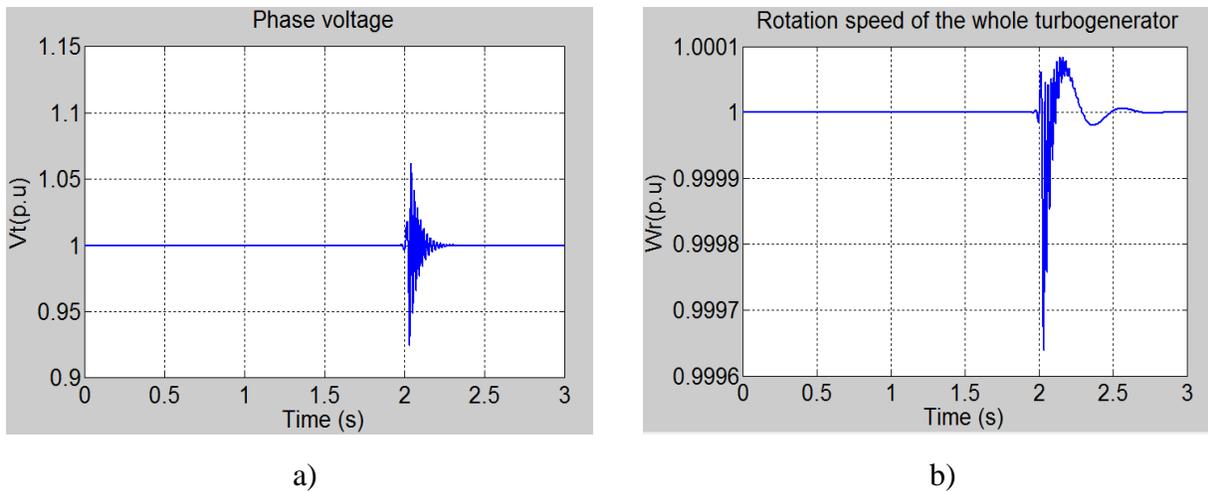


Fig. IV.17. Vitesse de rotation (a) et angle interne δ (b) de l'alternateur à $t = 0s$

- **Tests sur l'alternateur subissant une perturbation de charge à l'instant $t = 2s$**

Nous obtenons sur les Figs. IV.18 les courants des trois phases. Les Figures IV. 19 (a) et (b) représentent respectivement la tension de sortie de l'alternateur et la vitesse.

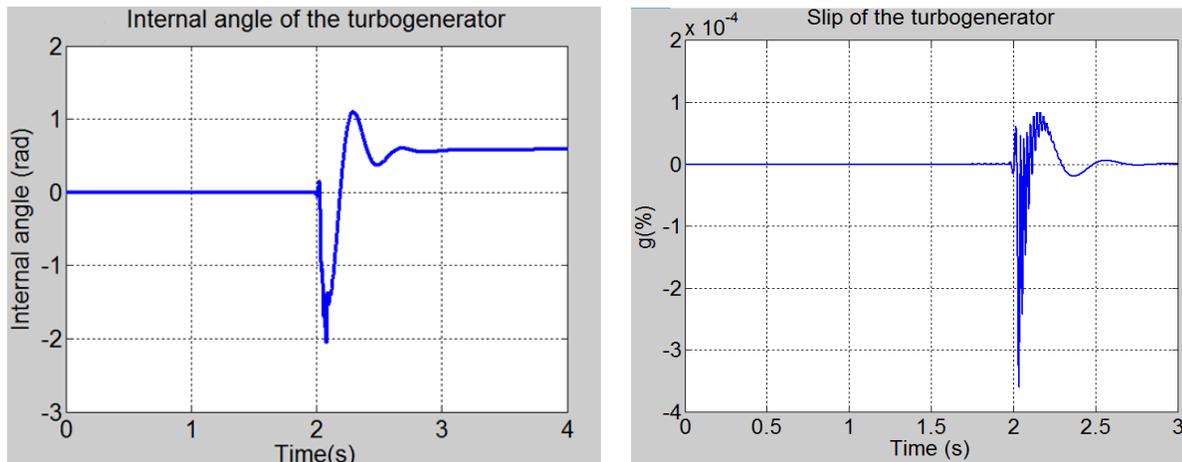
Fig.IV.18 : Courants des trois phases à $t=2s$ Figs. IV.19. Tension de sortie (V_t) et Vitesse (ω_r) de l'alternateur à $t = 2s$

Interprétation des résultats

La perturbation de charge provoque une variation de la tension. Cette variation est supprimée rapidement à l'aide du système de régulation (**AVR**). Il en est de même pour la vitesse. Le temps de rétablissement vers les valeurs nominales est de l'ordre de 0.2s pour la tension et de 0.5 s pour la vitesse.

- Angle interne(δ) et glissement de l'alternateur

Nous présentons sur les Figs. IV. 20 l'angle interne ainsi que le glissement de l'alternateur à une perturbation à l'instant $t = 2$ s. L'angle interne prend une nouvelle valeur, cette valeur est atteinte après une perturbation provoquée par le système de régulation de vitesse qui dure 0.8 s. Le glissement subit des perturbations pendant la période de régulation (transitoire) et revient à sa valeur nulle.



Figs. IV.20. Angle interne (δ) et glissement de l'alternateur à $t=2$ s

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons illustré les résultats essentiels obtenus à partir du fonctionnement attendu du modèle global dont lequel on s'est intéressé à l'étude des systèmes de régulation et de contrôle robustes des générateurs synchrones pour l'amélioration de la tension de sortie et de la vitesse de rotation.

Nous avons développé un modèle du système d'excitation de type IEEE ST1 avec tous ses éléments. Nous avons appliqué une régulation de la tension en utilisant un régulateur automatique appelé AVR au niveau du système d'excitation. Un système de régulation PID permettant de réguler la vitesse de rotation de l'alternateur a été également implémenté.

Enfin, nous avons mis au point un modèle global pour la simulation des performances dynamiques qui assemble les trois principaux schémas blocs essentiels du groupe turbine-alternateur sous forme de schémas blocs Matlab/Simulink.

IV. 9 Références

- [1] A. Kazemi, M.R. Jahed Motlagh, A.H. Naghshbandy *, 'Application of a new multi variable feedback linearization method for improvement of power systems transient stability', *Electrical Power and Energy Systems* 29 (2007) pp.322–328
- [2] Juste Tsotie Wamba, 'Modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale hydro-québec', PhD Thesis, Université du Québec en Abitibi-témiscamingue, déc.2013, pp 26-27.
- [3] Wei Shao, and Zheng Xu 'Excitation System Parameter Setting for Power System Planning', 2002 IEEE, DOI: [10.1109/PSS.2002.1043295](https://doi.org/10.1109/PSS.2002.1043295), pp 541-546
- [4] P. Kundur, 'Power System Stability and Control', New York: McGraw-Hill Inc, 1994, pp. 365-366.
- [5] Cao Yuan, MA Jin, 'Research on PID Parameters Optimization of Synchronous Generator Excitation Control System', DOI: [10.1109/CRIS.2010.5617581](https://doi.org/10.1109/CRIS.2010.5617581), pp.1-5, IEEE, 2010
- [6] Denis Curtil, 'Introduction à l'automatique', Cour Service EFPG, INP Grenoble, Avril 2007.
- [7] J.Machowski, J.W. Bialek, S.Robak, J.R.Bumby, 'Excitation control system for use with synchronous generators', *IEE Proc Gen. Trans. Dist.*, Vol 145, 5 September 1558.
- [8] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, 'Hydraulic Turbine and turbine control models for system dynamic studies', *Transactions on Power Systems*, Vol.7, no.1, Feb. 1992, pp 167 - 179.
- [9] IEEE committee report, 'Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies', [IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems](https://doi.org/10.1109/TPAS.1973.293570), DOI: [10.1109/TPAS.1973.293570](https://doi.org/10.1109/TPAS.1973.293570) 1973, Vol.PAS-92, N°6, Pages: 1904 - 1915,
- [10] Boonserm Changaroon, Suresh Chandra Srivastava, and Dhadbanjan Thukaram 'A Neural Network Based Power System Stabilizer Suitable for On-Line Training—A Practical Case Study for EGAT System', *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 15, N°. 1, March 2000.
- [11] A.L. Elshafei*, K.A. El-Metwally, A.A. Shaltout, 'A variable-structure adaptive fuzzy-logic stabilizer for single and multi-machine power systems', *Control Engineering Practice* 13 (2005), Elsevier Ltd, pp 413–423.
- [12] M. A. M. Hassan, O.P.Malik, G. S. Hope, 'A fuzzy logic based stabilizer for a synchronous machine', *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 6, No 3, September 1991.

Conclusion générale

Nous avons effectué des visites régulières au niveau de la centrale de Hadjret Ennous à Cherrhell ce qui nous a permis d'avoir une idée générale sur la production d'électricité ainsi que sur les principaux éléments d'une centrale électrique à cycle combiné.

Nous nous sommes donc particulièrement intéressés aux alternateurs de grande puissance. Nous avons eu également la chance d'assister aux opérations d'entretien directement sur site. Ces opérations consistaient, en grande partie, à l'inspection de l'état des différentes parties des turboalternateurs. Nous avons également eu accès aux données nécessaires à la conduite de notre PFE. Ces données portent sur les paramètres avec lesquels nous avons pu développer un modèle mathématique de l'alternateur.

Ce modèle est basé sur les équations électriques et mécaniques du turboalternateur. Ce qui nous a permis d'élaborer une synthèse pour les régulateurs afin de réguler la tension de sortie et la vitesse de rotation de l'ensemble turbine-alternateur. Finalement ce modèle a été implémenté sous Matlab/Simulink.

Notre étude a été effectuée en nous basant sur les valeurs nominales fournies par le constructeur. Les résultats obtenus à partir du modèle global que nous avons établi sont satisfaisants. Globalement, notre projet de fin d'études, nous a permis de :

- Développer un modèle du groupe turbine-alternateur pouvant être implémenté sous MATLAB/Simulink.
- Développer un modèle d'état de l'excitatrice en nous basant sur le modèle de référence établi sur IEEE-Std. 1A.
- Effectuer une régulation de la vitesse à partir d'un modèle idéal de la turbine.
- Effectuer une régulation de la tension par AVR au niveau du système d'excitation statique sur IEEE-Std.1A.

ANNEXE I

Centrale électrique Hadjret Ennous



La centrale à cycle combiné de Hadjret Ennous est située à l'ouest de Cherchell sur la Méditerranée dans la wilaya de Tipaza. Elle appartient à Shariket kaharabaa Hadjret Ennous (SKH). Elle est de type single shaft et a commencé à produire de l'électricité en décembre 2008.

La centrale à cycle combiné de Hadjret Ennous a une puissance de 1200 MW et comporte trois tranches (de 400 MW chacune) de production d'électricité en cycle combiné. Chaque tranche est constituée d'une turbine à gaz de type (9FB), d'un alternateur de type (450H), d'une turbine à vapeur de type (A15), d'une chaudière de récupération de chaleur et d'un condenseur de vapeur.

La centrale possède un système de refroidissement muni d'une prise d'eau de mer, d'une station de pompage et d'une unité de dessalement permettant de produire une eau déminéralisée nécessaire à la centrale (cycle de vapeur).

ANNEXE II

Toutes les informations concernant les paramètres du générateur de la centrale électrique de Hadjret Ennous sont données ci-dessous :

SIZE	DWG NO	SH	REV
A	212A8300	2	A
ESTIMATED GENERATOR DATA			
Customer:	SNC Lavalin INT. INC		
Station/Project:	HADJRET EN NOUSS		
Generator Number:	290T725, 726, 718		
Generator Type:	450H		
<u>GENERATOR RATING</u>			
Data for Proposal No/Electrical Design: F378T04A		Aug 11 2006	
ATB 2 546350 kVA 3000 RPM 18500 Volts 0.8 PF 75 psig 40 °C Gas 437080 kW 17050 Amps 650 Field Volts 0 Ft Alt 0.45 SCR 50 Hz 3 Phase WYE Connection			
<u>Exciter Rating</u>			
Type	Static		
1245 kW	650 Volts	3300 D.C.Amps	Field Amps @ Generator rated Load 3077
<u>Total temperatures are guaranteed not to exceed:</u>		<u>Insulation Class</u>	<u>Temperature Rise</u>
Stator coils: 103 °C by embedded detector		Armature F	B
Field coils 120 °C by Resistance		Field class F	B
Collector Gas Rise 20 °C by RTD			
<u>Cooling water Requirements @ Generator Rating (C901 - Data)</u>			
(Data not applicable for Open Ventilated Units. Air cooled OV units, values will be shown as -99999)			
Generator Output:	546350	Kva	
Loss to Coolers:	4236	Kw	
Inlet Water Temperature:	25.2	°C	
Outlet Cold Gas Temperature	40	°C	
Coolant	100%WATER		
Maximum Fouling Factor:	0.001 1/(btu / (hours*footsquared*F))		
Total Water Flow Required:	2500	GPM	(total for all coolers)
Coolant temperature Max	35	°C	
Head Loss Per Cooler:	18.5	Feet of Water	
Maximum Operating Pressure:	125	psig	
	8.6184	bar	
<u>Dielectric tests</u> (Between coils and ground, 50/60 hertz AC for 1 min)			
Stator	38000V		
Rotor	5232V		

SIZE	DWG NO	SH	REV
A	212A8300	3	A
REACTANCES (Per Unit):			
		Direct Axis	Quadrature Axis
Saturated Synchronous	X_{dV}	2.28	X_{qV} 2.19
Unsaturated Synchronous	X_{dI}	2.28	X_{qI} 2.19
Saturated Transient	X'_{dV}	0.29	
Unsaturated Transient	X'_{dI}	0.33	X'_{qI} 0.52
Saturated Sub transient	X''_{dV}	0.21	X''_{qV} 0.21
Unsaturated Sub transient	X''_{dI}	0.265	X''_{qI} 0.265
Saturated Negative Sequence	X_{2V}	0.21	
Unsaturated Negative Sequence	X_{2I}	0.265	
Saturated Zero Sequence	X_{0V}	0.145	
Unsaturated Zero Sequence	X_{0I}	0.145	
Saturated Leakage Reactance	X_{lv}	0.18	
Unsaturated Leakage Reactance	X_{li}	0.205	
FIELD TIME CONSTANTS (Seconds @ 125 °C)			
Open Circuit	T'_{d0}	6.9	T'_{d0} 0.64
Three Phase Short Circuit Transient	T'_{d3}	0.79	T'_{q} 0.15
Line To Line Short Circuit Transient	T'_{d2}	1.39	
Line To Neutral Short Circuit Transient	T'_{d1}	1.69	
Short Circuit Sub transient	T''_{dI}	0.031	T''_{qI} 0.031
Open Circuit Sub transient	T''_{d0}	0.042	T''_{q0} 0.076
ARMATURE DC COMPONENT TIME CONSTANTS (Seconds@ 100 °C)			
Three Phase Short Circuit	T_{a3}	0.55	
Line To Line Short Circuit	T_{a2}	0.55	
Line To Neutral Short Circuit	T_{a1}	0.42	
ARMATURE WINDING SEQUENCE RESISTANCES (Per Unit)			
Positive	R_1	0.0031	
Negative	R_2	0.0109	
Zero	R_0	0.005	
Reactance, Resistance and Time Constant data may be interpreted per IEEE 115, section VII.			
The base reactance ("UNIT") is calculated by the armature kV squared / MVA.			
Base reactance = 0.6264		Ohms	
Rotor Short-Time Thermal Capacity, $(I_2)^2 t$		6.929 s	
Turbine-Generator Combined Inertia Constant, H		5.52 kW-s/kVA	
Three Phase Armature Winding Capacitance		1.5134 μ F	
Armature Winding DC Resistance (Per Phase)		0.0009 Ω (100 °C)	
Field Winding DC Resistance		0.2003 Ω (125 °C)	
Field Current At Rated Kva, Armature Voltage, & PF		3077 A	
Field Current At Rated Kva, Armature Voltage, 0 PF Lagging		3618 A	
(For Systems Study Only - Not Allowable Operating Point)			