

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة بلحاج بوشعيب عين تيموشنت  
Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Faculté des Science & Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de Fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : TECHNOLOGIE  
Filière : ELECTROMECHANIQUE  
Spécialité : ELECTROMECHANIQUE  
Thème :

**ETUDE ET MODELISATION D'UN TURBO ALTERNATEUR DE TYPE  
600 MVA**

- 1) DJEDID Fethi
- 2) ELMERERBI Mustapha Djawed

Devant les jurys composés de :

Dr. BENZAZZA Baghdadi	M C B	U.B.B (Ain Témouchent)	Président
Dr. AISSOU Massinisa	M C A	U.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
Dr. BENSAID Boubaker	M A A	U.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant

Année Universitaire : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciement :

Mes remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

On remercie Mr B.Bensaid pour nous avoir honorés de son encadrement et ses judicieux conseils qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous voulons aussi remercier les membres de jury qui nous rendent honneur de leurs présences ainsi que pour toutes les remarques et conseils qui nous auront apportés.

Nous remercions vont aussi à tous les enseignants du département de génie électrique qui a contribué à notre formation.

Nous remercions Mr. Bendellah Djelloul Ingénieur chef maintenance électrique au niveau de Société Production d'électricité SPE/PPO Boutlelis.

Nous remercions Mr. Bellouati Houari Ingénieur chef maintenance mécanique au niveau de Shariket Kahrabae el Djazair SKE Terga.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien tout moral.

# Dédicace :

Avant tous

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Je dédie ce travail :

A mes parents qui m'ont soutenu durant toute mon existence, que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mon binôme qui partager ce travail avec moi dans tous ses moments

Mes dédicaces vont également à mes amis particulièrement,

Boutra Mustapha, Bouzada Mustapha, Daho Mohamed

ELMERERBI Mustapha Djawed

# Dédicace :

Avant tous

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Je dédie ce travail :

A ma famille

A mes oncles

A tous mes amis (es) d'études :

benallal imad eddine, zireg yacine, bourahla abdelwahed.

DJEDID Fethi

## ملخص

لقد درسنا في عملنا نظامًا مهمًا جدًا في مجال توليد الطاقة الكهربائية يسمى المولد التوربيني. ينقسم المولد التوربيني إلى جزأين ، التوربين والمولد حيث يحول التوربين الطاقة الحركية إلى طاقة ميكانيكية ثم يقوم المولد بتحويل تلك الطاقة إلى طاقة كهربائية. قمنا بنمذجة هذا النظام من عملها وحصلنا على نظام المعادلات التفاضلية. يتم تحويل هذه المعادلات إلى نموذج محاكاة تم تطويره في إطار Matlab Simulink. لقد تحققنا من صحة هذا النموذج من خلال اختبارات المحاكاة في الحالة التي يكون فيها المولد التوربيني تحت الحمل. تمت مناقشة النتائج التي تم الحصول عليها.

**الكلمات الرئيسية:** المولد التوربيني ، النمذجة ، المحاكاة

## Résumé

Nous avons étudié un système très important dans le domaine de production d'énergie électrique qui s'appelle turboalternateur. Le turboalternateur est divisé en deux parties, la turbine et l'alternateur où la turbine transforme l'énergie cinétique vers une énergie mécanique ensuite l'alternateur converti cette énergie en énergie électrique. On a modélisé ce système à partir de leur fonctionnement et on a obtenu un système d'équations différentielles. Ces équations sont transformées vers un modèle de simulation développé sous Matlab Simulink. Nous avons validé ce modèle par des essais de simulation dans le cas où le turboalternateur en charge. Les résultats obtenus sont discutés.

**Mots clés :** turboalternateur, modélisation, simulation.

## Abstract

We have studied a very important system in the field of electric power generation called turbo alternator. The turbo alternator is divided into two parts, the turbine and the alternator where the turbine converts kinetic energy into mechanical energy then the alternator converts that energy into electrical energy. We modeled this system from their operation and we obtained a system of differential equations. These equations are transformed into a simulation model developed under Matlab Simulink. We have validated this model by simulation tests in the case where the turbo-generator is under load. The results obtained are discussed.

**Keywords:** turbo alternator, modeling, simulation.

# Sommaire

---

REMERCIEMENT .....	I
DEDICACE .....	II
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES TABLEAUX .....	IV
Introduction générale .....	1

## **Chapitre I. Etude et Technologie d'un TurboMachine.**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Type de turbine a gaz .....	3
I.2.1. Turbine mono-arbre .....	3
I.2.2. Turbine bi-arbre .....	3
I.3. Fonctionnement de la turbine a gaz type GT26 .....	4
I.3.1. Système d'admission d'air .....	5
I.3.2. Le Compresseur .....	6
I.3.3. Le Système de Combustion .....	8
I.3.4. La Turbine.....	11
I.3.5. Système D'échappement .....	13
I.4. Système auxiliaires de Turboalternateur .....	15
I.4.1. Système de refroidissement et d'étanchéité.....	15
I.4.2. Système d'huile de graissage .....	15
I.4.3. Système d'huile de soulèvement.....	16
I.5. Technologie de la turbine a gaz.....	17
I.5.1. Ailettes Compresseur.....	17
I.5.2. Ailettes Turbine .....	17
I.6. Conclusion .....	18

## **Chapitre II. Etude Théorique d'un alternateur.**

II.1 Introduction .....	19
II.2. Caractéristique Technique d'alternateur .....	19
II.3. Généralité sur les alternateurs.....	20
II.4. Constitution de l'alternateur .....	21
II.4.1 Le Stator .....	22
II.4.2 Les Enroulements du stator .....	23
II.4.3. Le Rotor.....	23
II.4.2.1. Rotor à pôles lisses .....	24
II.4.2.2. Rotor à pôles saillants .....	24
II.4.4. Les enroulements du rotor.....	25

# Sommaire

---

II.4.5. Le Système d'excitation .....	25
II.4.5.1. Système statique de démarrage SSD .....	26
II.4.5.2. Système d'excitation statique SES .....	26
II.4.5.3. Les Tâches du système d'excitation .....	27
II.4.5.4. Les Types d'excitation.....	28
II.4.6. Les systèmes auxiliaires .....	28
II.5. Principe de fonctionnement .....	28
II.6. Système de refroidissement de l'alternateur.....	29
II.7. Analyse de fonctionnement d'un alternateur .....	30
II.7.1. Caractéristique à vide.....	30
II.7.2. Caractéristique en charge .....	31
II.7.2.1. Charge purement résistive.....	33
II.7.2.2. Charge purement inductive .....	34
II.7.2.3. Charge purement capacitive .....	34
II.8. Diagramme de Behn-Eshenbourg .....	35
II.9. Les forces électromotrices .....	36
II.9.1. Forces électromotrices théoriques .....	36
II.9.2. Forces électromotrices réelles.....	37
II.10. Bilan des puissances d'un alternateur.....	38
II.10.1. Puissance absorbée.....	38
II.10.2. Puissance utile .....	39
II.10.3. Bilan des pertes.....	39
II.10.3.1. Pertes de puissance mesurable .....	39
II.10.3.2. Pertes supplémentaires.....	40
II.11. Rendement d'un alternateur.....	40
II.11.1. Rendement vrais.....	40
II.11.2. Rendement approché.....	40
II.12. Couplage des alternateurs .....	41
II.13. Propriétés du moteur synchrone.....	42
II.13.1. Les avantages .....	42
II.13.2. Les inconvénients .....	42
II.14. Technologie des alternateurs .....	42
II.15. Conclusion .....	43

## **Chapitre III. Modélisation et simulation d'un Turboalternateur de 600 MVA.**

III.1. Introduction.....	44
III.2. Hypothèses simplificatrices .....	44
III.3. Modèle de la génératrice synchrone à pôles lisses dans le repère triphasé abc .....	44
III.3.1. Equations des tensions et des flux magnétiques .....	45
III.3.1.1. Equations de tension.....	45
III.3.1.2. Equations de flux magnétiques .....	46
III.3.2. Modèle de la génératrice synchrone à pôles lisses dans le repère diphasé dq .....	47
III.3.2.1. Equations des tensions .....	49
III.3.2.2. Equations électromagnétiques.....	49
III.3.2.3. Equations du couple électromagnétique .....	50
III.3.3. Représentation d'état de la génératrice synchrone à pôles lisses .....	50
III.4. Simulation d'un turbo-alternateur.....	51
III.5. Résultats de simulation d'un turbo-alternateur.....	52
III.6. Conclusion.....	54
Conclusion Générale.....	55

# Listes des figures

---

## Chapitre I

<b>Figure (I. 1)</b> Turbine a un seul arbre.....	3
<b>Figure (I. 2)</b> Turbine a deux arbres.....	4
<b>Figure (I. 3)</b> Bloc thermique turbine à gaz GT-26.....	4
<b>Figure (I. 4)</b> Système d'admission d'air.....	6
<b>Figure (I. 5)</b> Détails du compresseur.....	7
<b>Figure (I. 6)</b> Détails de la chambre de combustion.....	10
<b>Figure (I. 7)</b> Bloc Turbine à Gaz.....	11
<b>Figure (I. 8)</b> Rotor de turbine.....	12
<b>Figure (I. 9)</b> Détails d'un palier.....	13
<b>Figure (I. 10)</b> Emplacement des composants principaux d'un groupe turbo-alternateur.....	14
<b>Figure (I. 11)</b> Système d'huile de graissage.....	15
<b>Figure (I. 12)</b> Partie inférieure du palier avec poche d'huile de soulèvement.....	16

## Chapitre II

<b>Figure (II. 1)</b> Vue d'ensemble de l'alternateur.....	22
<b>Figure (II. 2)</b> Stator d'alternateur.....	23
<b>Figure (II. 3)</b> Rotor d'alternateur.....	24
<b>Figure (II. 4)</b> Machine synchrone à rotor à pôles lisses.....	24
<b>Figure (II. 5)</b> Machine à pôles saillants et enroulements amortisseurs.....	25
<b>Figure (II. 6)</b> Système D'excitation Statique.....	27
<b>Figure (II. 7)</b> Alternateur refroidi par hydrogène, type WT20H.....	30
<b>Figure (II. 8)</b> Caractéristiques d'un alternateur à vide .....	31
<b>Figure (II. 9)</b> Branchement d'un alternateur à vide.....	31
<b>Figure (II. 10)</b> Branchement d'un alternateur en charge.....	32
<b>Figure (II. 11)</b> Caractéristiques d'un alternateur en charge .....	33
<b>Figure (II. 12)</b> Cas d'une Charge purement résistive.....	33
<b>Figure (II. 13)</b> Cas d'une charge purement inductive.....	34
<b>Figure (II. 14)</b> Cas d'une charge purement capacitive.....	35
<b>Figure (II. 15)</b> Courbes de variation $V(I)$ à vitesse et excitation constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance.....	35
<b>Figure (II. 16)</b> Diagramme de Fresnel. ....	36
<b>Figure (II. 17)</b> Bilan des puissances d'un alternateur .....	38

## Listes des figures

---

**Figure (II. 18)** Couplage des alternateurs sur le réseau.....41

### Chapitre III

**Figure (III. 1)** Schéma équivalent de la Machine Synchrones Rotor Bobiné à pôles lisses.....45

**Figure (III. 2)** Montre le schéma simplifié de l'alternateur dans le repère de Park. ....48

**Figure (III. 3)** Schéma Bloc Générale de simulation turbo alternateur .....51

**Figure (III. 4)** Les trois tensions triphasées équilibré délivrée par alternateur.....52

**Figure (III. 5)** Les trois courants statoriques .....52

**Figure (III. 6)** La déviation de vitesse de rotor.....53

**Figure (III. 7)** Le couple de générateur et turbine.....54

# Listes des Tableaux

---

## Chapitre I

<b>Tableau (I. 1)</b> Spécification de la turbine à gaz GT-26.....	5
<b>Tableau (I. 2)</b> Spécifications du compresseur.....	8
<b>Tableau (I. 3)</b> Spécifications de la chambre de combustion .....	10
<b>Tableau (I. 4)</b> Spécifications de paliers.....	13

## Chapitre II

<b>Tableau (II. 1)</b> Données générales de l'alternateur .....	19
<b>Tableau (II. 2)</b> Les différentes vitesses pour chaque paire de pôles.....	21

# Nomenclature

---

## Nomenclature

Symbole	Signification
T	Turbine
TG	Turbine a gaz
HP	Haute pression
BP	Basse pression
EV	Environnementale vapeur
SEV	Séquentielle environnementale vapeur
GT26	Gaz Turbine Alstom GT26
KA26	Cycle Combiné KA26
VG	variable guide vanes
SSD	Système statique de démarrage
SES	Système d'excitation statique
HT	Réseau haute tension
IGBT	Transistors bipolaires à grille intégrée

### Introduction générale

Ces dernières années, la demande en électricité a connu une évolution importante et particulièrement en périodes estivale, atteignant des pics de consommation importants. Cette forte augmentation de la demande est une conséquence directe du changement des habitudes du consommateur et l'amélioration de sa qualité de vie, ainsi que la pulsion donnée au secteur économique et industriel.

Conscient de cet enjeu et de l'importance de l'accès à l'électricité pour les citoyens, le secteur s'est fixé comme priorité de développer tous les axes permettant de garantir la couverture à long terme, des besoins en électricité du pays, notamment par la diversification des sources d'énergie, le développement du parc de production électrique et des infrastructures de transport et de distribution de l'électricité. [1]

Les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydrauliques sont les trois importants modes de production dans le monde.

L'obtention de l'énergie électrique est par la transformation d'énergie mécanique engendrée par une turbine à gaz dans les centrales électrique, cette énergie mécanique présente la grandeur de sortie de la turbine et la grandeur d'entrée de l'alternateur et le couplage entre turbine et alternateur s'appelle turbo-alternateur.

Actuellement, la plus grande partie de l'énergie électrique dans le monde est générée par les turbo-alternateurs, ces derniers sont constitués par une turbine et un alternateur qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique. [2]

Nous nous sommes intéressés à étudier et à modéliser le turbo-alternateur à cause de son importance dans la génération d'énergie électrique consommée dans la vie quotidienne. Pour atteindre cet objectif notre mémoire est structurée en quatre chapitres sont donnés ci-après:

Le premier chapitre va décrire Généralité et technologie d'une turbomachine, sa constitution, son fonctionnement et caractéristiques pour donner une idée claire sur cette dernière.

Le deuxième chapitre illustrera une étude théorique de l'alternateur pour connaître leur constitution et de montrer son principe de fonctionnement, et l'objectif de l'utilisation.

Le dernier chapitre est la partie essentielle de notre travail est consacré à la modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné, où on a introduit les différentes équations associés à notre

## Introduction générale

---

système étudié, et aussi il consiste à élaborer une simulation d'un turbo-alternateur sous « Matlab/Simulink » où on a fait l'interprétation des résultats et les courbes obtenues.

Enfin, une conclusion générale qui résumera les résultats obtenus et leur importance ainsi que les perspectives vont être donnés à la fin de ce travail.

## Chapitre I :

# Etude et Technologie d'un TurboMachine

## I.1. Introduction

La turbine à gaz est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne. Le rôle de la turbine est de produire l'énergie mécanique sous forme de rotation de l'arbre, à partir de l'énergie cinétique des gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure (fioul, gaz combustible...) qui subissent une détente dans la turbine. L'air ambiant filtré est comprimé avant d'entrer dans la chambre de combustion, en utilisant un compresseur rotatif entraîné par le même arbre de la turbine. [3]

## I.2. Type de turbine à gaz

On distingue deux types de turbine à gaz :

### I.2.1. Turbine mono-arbre

Le compresseur et les sections de la turbine sont montées sur un même arbre en tournent à la même vitesse, Ce type est utilisé pour les utilisations qui n'ont pas besoin des variations de vitesse telle que l'entraînement des génératrices pour la production de l'électricité.

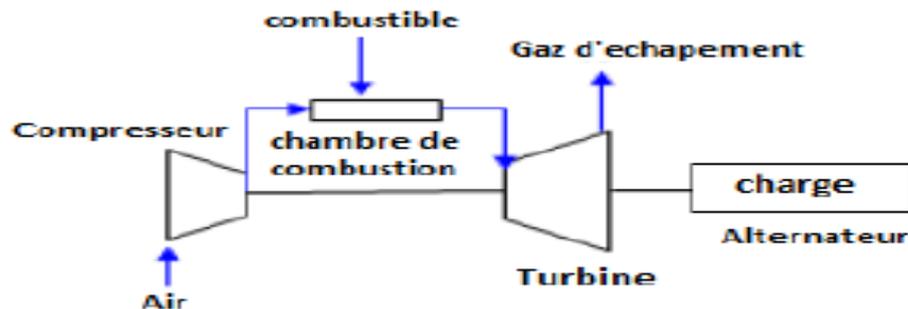


Figure (I. 1) Turbine a un seul arbre. [4]

### I.2.2. Turbine bi-arbre

Contrairement à la turbine à gaz a un seul arbre. Les deux sections de turbine ne sont pas reliées mécaniquement ce qui leur permet de tourner à des vitesses différentes.

Ce type est utilisé dans les utilisations qui demandent une large variation de vitesse telle que l'entraînement des compresseurs.

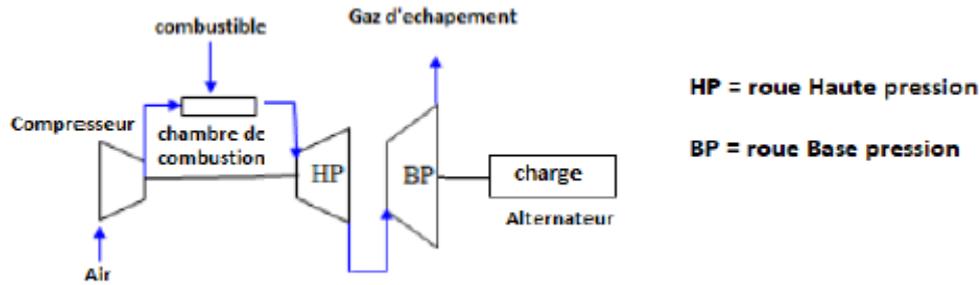


Figure (I. 2) Turbine a deux arbres. [4]

### I.3. Fonctionnement de la turbine à gaz type GT26

L'air ambiant filtré est comprimé dans le compresseur de la turbine à gaz. En suite l'air comprimé s'écoule autour de la chambre de combustion EV annulaire, le refroidissant, avant d'entrer dans les brûleurs EV au niveau desquels il est mélangé avec le combustible, puis brûlé. Le gaz de combustion chaud se répartit ensuite dans la turbine HP à un étage et entre dans la chambre de combustion SEV annulaire où est ajouté du combustible, mélangé et brûlé pour réchauffer les gaz d'échappement de la turbine HP. Ce gaz réchauffé se dilate alors dans les quatre étages restants de la turbine BP. [5]

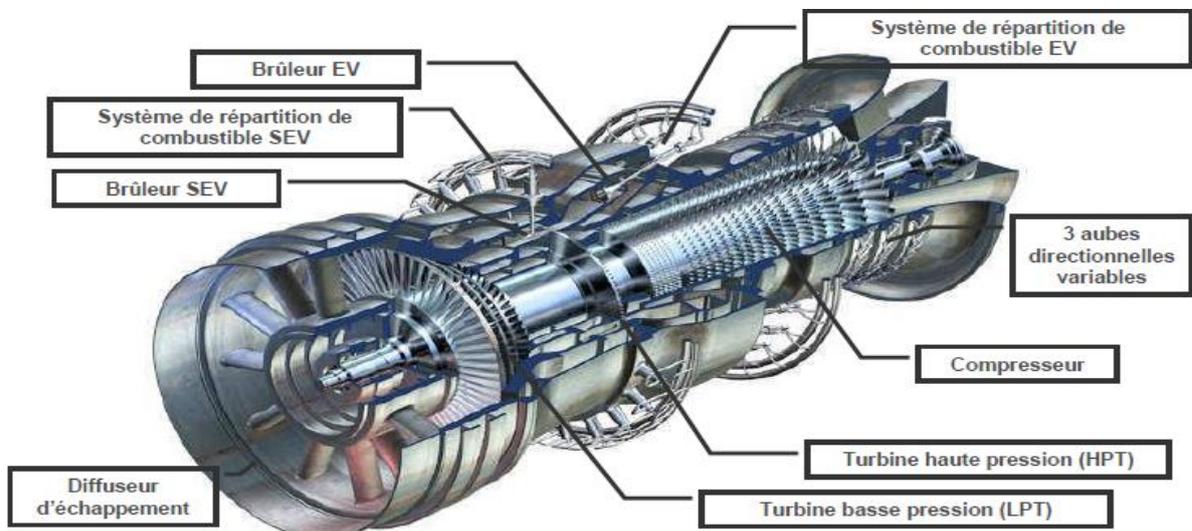


Figure (I. 3) Bloc thermique turbine à gaz GT-26. [6]

Tableau (I. 1) Spécification de la turbine à gaz GT-26. [7]

Spécification de la TG :	
-Modèle à cycle combiné	KA26-1CCPP
-Série	GT26
-Cycle TG	Brayton (TG en configuration a cycle combiné)
-Vitesse de rotation	3 000 tr/min
-Sens de rotation	Dans le sens des aiguilles d'une montre (en regardant depuis l'aval)
-Poids de la TG	370 tonnes
-Dimensions de la TG (longueur/hâteur/largeur)	~ 12.6/5.4/4.7 m
-Poids du rotor	120 tonnes ( à ailettes )
-Longueur du rotor (sans arbre intermédiaire)	11 650mm
-Moment d'inertie du rotor	45 313 kgm <sup>2</sup>
-Etages de la turbine haute pression (THP)	1
-Etages de la turbine basse pression (TBP)	4
-Nombre de réducteurs	2 (THP & TBP)
-Etages refroidis : ailettes	4 (THP B, TBP B1, TBP B2, TBP B3 )
-Etages refroidis : aubes	4 (THP V, TBP V1, TBP V2, TBP V3)
-Techniques de refroidissement pour les ailettes et aubes de turbine	Convection, film et refroidissement de contact
-Diamètre extérieur du dernier étage d'ailettes de la turbine	3 300 mm (turbine BP B4)

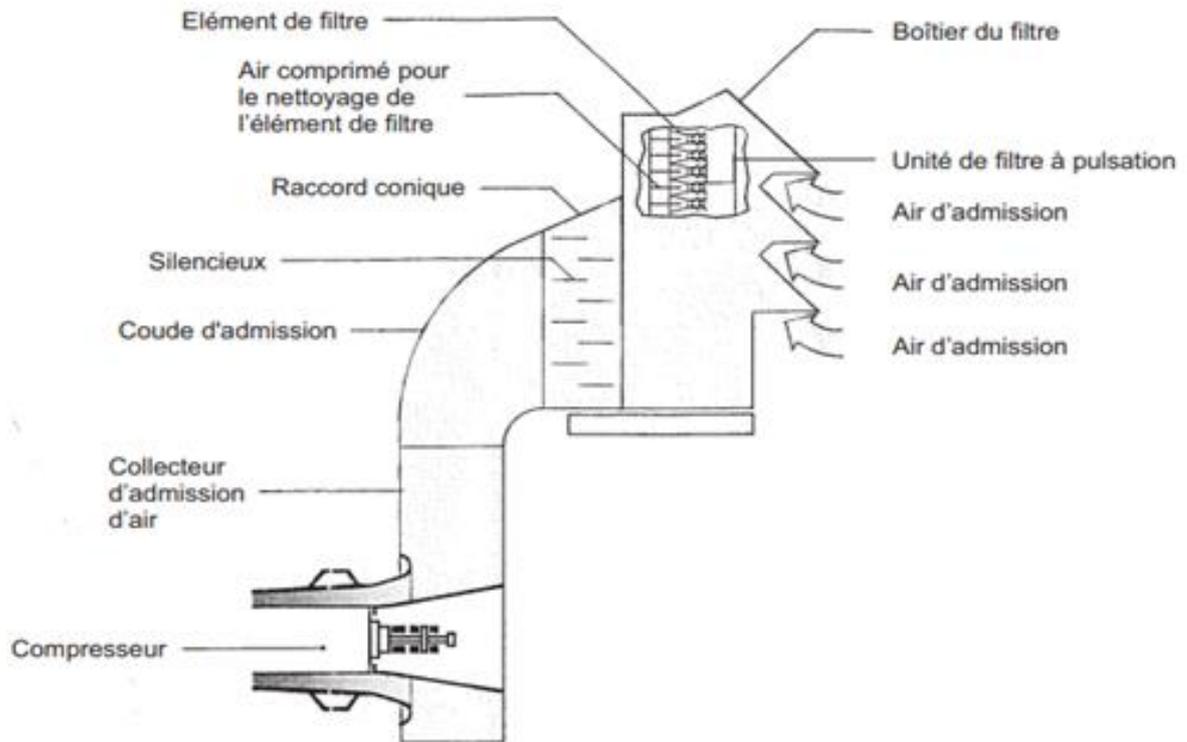
### I.3.1. Système d'admission d'air

L'admission d'air fournit suffisamment d'air pur au compresseur axial. Il doit être pur pour éviter tout encrassement du compresseur, ce qui entraînerait une diminution de la sortie de puissance du turbo-groupe à gaz, des dysfonctionnements et l'endommagement de l'unité.

Un système antigivrage est installé pour les situations dans lesquelles les températures sont basses et l'humidité relative élevée. Il prévient la formation de glace dans le compresseur. Pour le système antigivrage, l'air de décharge du compresseur est ajouté à l'air entrant.

L'air ambiant est aspiré à travers des protections empêchant la pluie, la neige et les corps étrangers importants (oiseaux, etc.) de pénétrer dans la bache d'admission d'air. Une fois l'air nettoyé par le filtre à 2 étages, il traverse un silencieux et passe par le coude d'admission et le collecteur de l'entrée du compresseur. Des unités de filtre à 3 étages et à

pulsation sont également disponibles. La **Figure I.4** montre l'exécution et la disposition d'une unité de filtre à pulsation. [8]



**Figure (I. 4)** Système d admission d'air. [8]

### I.3.2. Le Compresseur

Le compresseur à air fait partie du bloc thermique. L'objectif du compresseur d'air axial est d'augmenter la pression et par conséquent la température de l'air provenant du système d'admission d'air. L'air d'admission propre est dirigé vers le compresseur, où il est ensuite compressé par des ailettes rotatives et des aubes fixes. La combinaison d'une rangée rotative et d'une rangée fixe s'appelle un étage de compresseur. Le compresseur axial utilisé dans la turbine à gaz GT26 est un appareil à flux d'air axial et à 22 étages.

Les caractéristiques de la conception à 22 étages sont une charge faible des ailettes, une marge au pompage élevée, une fiabilité élevée du compresseur et une grande efficacité. Les aubes directrices variables à l'entrée garantissent un contrôle efficace du flux d'air et agrandissent la plage de fonctionnement utile.

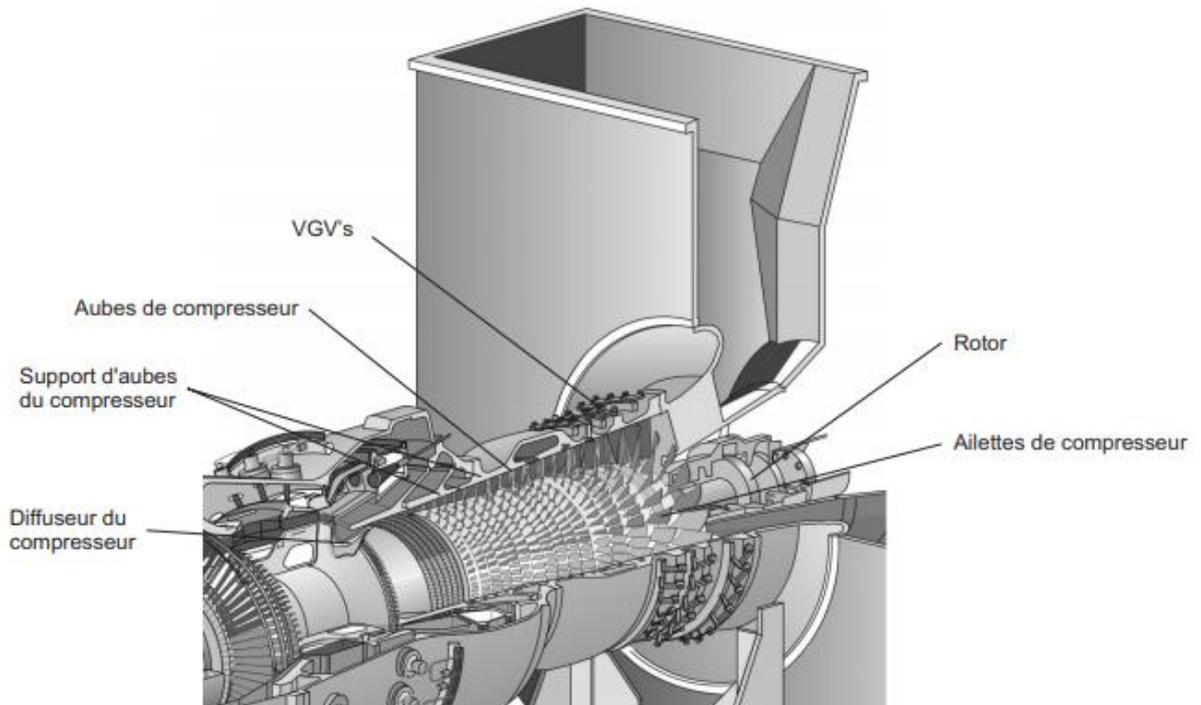
Les ailettes rotatives du compresseur sont fixées dans des rainures usinées dans le périmètre du rotor. 21 rangées d'ailettes de compresseur sont fixées dans les rainures périphériques et maintenues radialement par des entretoises. La première rangée est bloquée par un assemblage à queue d'aronde.

Les aubes du compresseur (ou ailettes fixes) sont fixées dans des gorges périphériques en T usinées dans la périphérie du corps du compresseur ou de deux supports d'aubes. Y font exception la rangée d'aubes directrices variables d'entrée et les deux premières rangées d'aubes du compresseur, dont la fixation est différente en raison de leur variabilité. Les 11 premières rangées d'aubes sont fixées directement sur le corps du compresseur, ainsi que la première rangée d'aubes directrices variables d'entrée. Les rangées d'aubes 12 à 16 sont fixées sur le premier support d'aubes de compresseur. Les rangées d'aubes 17 à 22 sont fixées sur le deuxième support d'aubes de compresseur.

Toutes les ailettes sont faites d'un alliage chrome-acier résistant à la corrosion. Elles ne nécessitent donc aucun revêtement. [8]

#### **Aubes directrices variables (variable guide vanes ou VGV) :**

Les aubes directrices variables ajustent le débit volumique d'air traversant le compresseur. Les aubes directrices variables sont montées sur 3 rangées à l'entrée du corps et pivotent entre les positions ouverte et fermée sur commande du régulateur de la turbine EGATROL. Elles sont utilisées pendant le fonctionnement à puissance partielle pour réduire le débit volumique d'air, afin de réduire les émissions de gaz d'échappement. [8]



**Figure (I. 5)** Détails du compresseur. [8]

Tableau (I. 2) Spécifications du compresseur. [7]

Spécification des composants : le compresseur	
-Etages d'ailettes du rotor	22
-Etages d'aubes du stator	24 (22+ADEV+OV)
-Aubes directrices variables à l'entrée du compresseur	3 (ADEV+ADV1+ADV2)
-Etages d'ailettes enduites (nombre & position)	NA
-Etages d'aubes enduites (nombre & position)	NA
-Vannes de décharge « pour le démarrage » (nombre & position)	2 sur le 5 <sup>e</sup> étage 1 sur le 11 <sup>e</sup> étage 1 sur le 16 <sup>e</sup> étage
-Branchements extérieurs du compresseur (nombre et position)	1 sur le 5 <sup>e</sup> étage 1 sur le 11 <sup>e</sup> étage 1 sur le 16 <sup>e</sup> étage
-Branchements intérieurs du compresseur (nombre & position)	NA
-Description du dispositif hydraulique	Vannes de décharge
-Diamètre extérieur du premier étage d'ailettes du compresseur	2 370 mm (compresseur BP B1)

### I.3.3. Le Système de Combustion

Le système de combustion GT26 se compose d'une chambre de combustion d'environnement (chambre de combustion EV) et d'une chambre de combustion séquentielle d'environnement (chambre de combustion SEV). La chambre de combustion EV se compose d'une zone primaire dans laquelle la combustion a lieu et d'une zone secondaire qui envoie les gaz chauds vers le premier étage de la turbine avec des pertes très faibles. La chambre de combustion SEV est montée après le premier étage turbine et le diffuseur turbine.

La conception de la combustion séquentielle de la GT26 est unique : elle fonctionne selon le principe de réchauffage thermodynamique. A la place de l'approche conventionnelle d'amélioration des performances par une augmentation de la température de combustion de la turbine. [5]

\* **Chambre de combustion EV** : Située entre le compresseur et la turbine HP, la chambre de combustion EV brûle le combustible mélangé à l'air provenant du compresseur. L'énergie thermique est dissipée de manière à ce que le gaz de combustion chaud s'écoule vers la turbine HP, où il est accéléré et dilaté. [8]

Le corps de la turbine entoure la chambre de combustion EV et dirige l'air du compresseur au travers de l'espace circulaire creux des chemises à paroi double pour le refroidissement à contre-courant.

\* **Brûleurs EV** : La GT 26 comprend 24 brûleurs EV. Les brûleurs EV sont conçus sous la forme de cônes divisés axialement, et sont montés selon une disposition circulaire dans les segments avant. Les moitiés sont décalées afin de former deux fentes d'entrée d'air de largeur constante.

- L'air de combustion pénètre dans la zone de combustion par ces fentes et se mélange avec le combustible dans les brûleurs.

- Le gaz combustible est injecté dans les brûleurs par des rangées de petits trous situées sur l'arête des fentes d'entrée.

- Le combustible liquide passe par un injecteur et entre dans les brûleurs par une buse située au sommet du cône.

\* **Torches d'allumage** : Deux torches d'allumage à activation électrique allument le combustible (propane ou fuel) fourni par le système de gaz d'allumage. Quand les torches d'allumage sont allumées et les flammes vérifiées, le combustible est injecté via les brûleurs EV dans la chambre à combustion EV. La flamme s'étend d'un brûleur à l'autre sous le contrôle du programme de démarrage. Une fois la combustion établie, les torches sont mises hors-service automatiquement.

\* **Détecteurs de flamme** : Le processus d'allumage et de combustion est surveillé par 3 contrôleurs de flamme infrarouges dont les signaux sont évalués dans un circuit 2 sur 3. Si deux capteurs détectent la présence de flammes dans un laps de temps fixé, le démarrage continue. Sinon, la turbine à gaz est déclenchée.

\* **Chambre de combustion SEV** : Les gaz d'échappement chauds après l'unique étage de la turbine HP s'écoulent à travers le conduit d'échappement de la turbine pour atteindre la chambre de combustion SEV. Pour réchauffer à nouveau ces gaz d'échappement, du combustible supplémentaire est injecté dans la chambre de combustion par les injecteurs SEV. Ceux-ci sont alimentés en combustible par des tubes collecteurs situés à l'extérieur du corps de la turbine. L'énergie thermique de cette deuxième combustion est dissipée de manière à ce que le gaz chaud s'écoule dans un courant régulier vers la turbine BP, où il est accéléré et dilaté. La chambre de combustion SEV est montée en aval de l'étage de la turbine HP et du diffuseur de turbine. La chambre de combustion est formée par l'espace circulaire creux après le conduit d'échappement, par les brûleurs SEV et les chemises. Le corps de la turbine entoure la chambre de combustion SEV et dirige l'air de refroidissement provenant du

compresseur au travers de l'espace circulaire creux des chemises à paroi double pour le refroidissement à contre-courant. La zone dans laquelle se trouvent les brûleurs SEV, l'arbre et la partie intérieure de la chambre de combustion SEV est également refroidie par l'air provenant du compresseur.

\* **Brûleurs SEV** : 24 brûleurs SEV sont montés sur la circonférence du corps de turbine et sont alimentés en combustible par des injecteurs depuis l'extérieur du corps de turbine. Les injecteurs sont refroidis par l'air extrait du compresseur. Cet air est injecté dans la veine de gaz chaud avec le combustible. Aucun allumage n'est nécessaire en raison de la température élevée du gaz arrivant dans les brûleurs SEV depuis la turbine HP. [8]

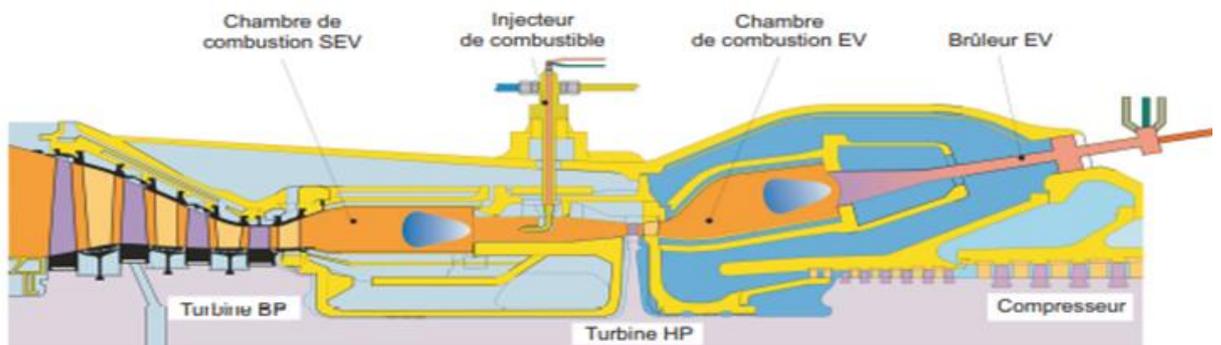


Figure (I. 6) Détails de la chambre de combustion. [6]

Tableau (I. 3) Spécifications de la chambre de combustion. [7]

Spécification des composants : la chambre de combustion	
- Etages de combustion	2
- Chambres de combustion	2 ( 1 <sup>er</sup> : EV, 2 <sup>nd</sup> : SEV )
- Type de chambres de combustion	Annulaire
- Nombre de brûleurs	48 ( 24 EV & 24 SEV )
- Technologie des brûleurs	Mixte, avec faibles émissions de NOx
- Nombre d'injecteurs par brûleur	2
- Type d'injecteurs	EV & SEV
- Torches d'allumage (nombre et position)	2 sur EV en position 2 & 10 h (dans sens du flux)
- Contrôleurs de flamme (nombre & position)	3 sur EV en position 1, 4 & 8 h (dans sens du flux)

### I.3.4. La Turbine

La turbine convertit l'énergie thermique du gaz de combustion en énergie mécanique transmise au rotor de l'alternateur. La turbine GT26 est composée d'une turbine HP à 1 étage et d'une turbine BP à 4 étages. La turbine HP est positionnée après la chambre de combustion EV. La turbine BP est positionnée après la chambre de combustion SEV. Tous les étages de turbine sont refroidis par air à l'exception du dernier.

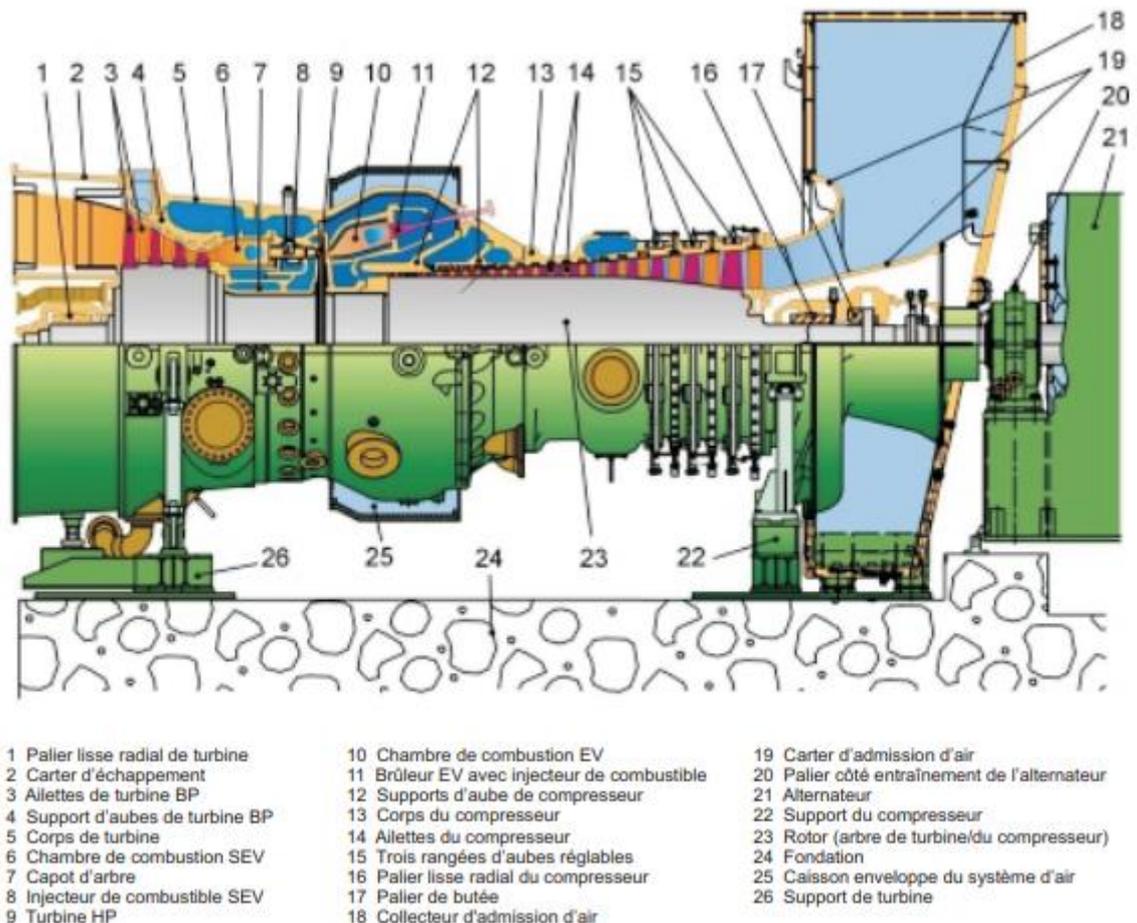
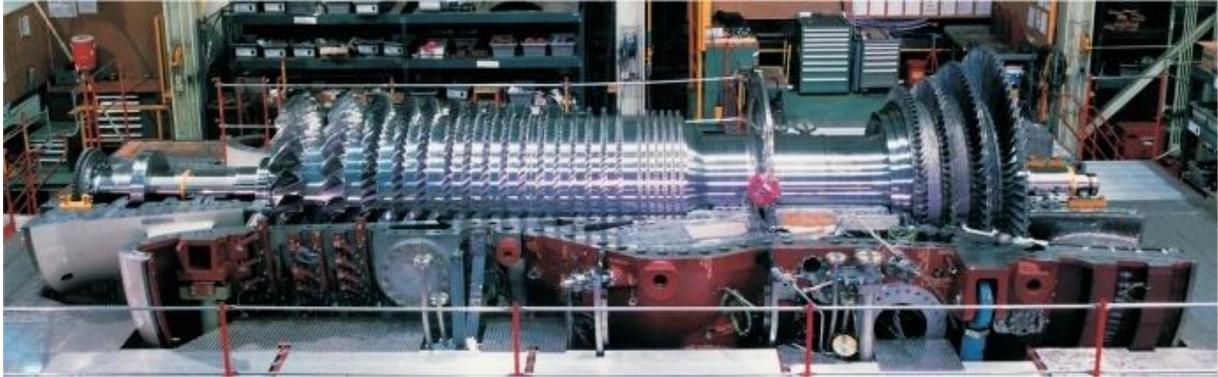


Figure (I.7) Bloc Turbine à Gaz. [8]

**Corps :** Le corps en fonte soutient et entoure la turbine et son support d'aubes. Il est divisé le long de l'axe central horizontal. Les moitiés sont vissées ensemble pour former une unité rigide. Le corps repose sur une plaque de base en travers des supports, dont chacun possède deux points d'appui. Le corps est équipé d'une isolation thermique et acoustique avec des coussinets numérotés faciles à monter qui empêchent les radiations thermiques et acoustiques dans l'environnement, tout en assurant une distribution régulière de la température dans le corps.

**Rotor** : Le rotor de turbine est manufacturé à base de disques soudés ensemble pour former un arbre unique avec le rotor du compresseur. Les ailettes HP et BP sont attachées au rotor et ancrées dans des encoches de type "sapin". Le rotor comporte des rainures maintenant des languettes d'étanchéité.



**Figure (I. 8)** Rotor de turbine. [8]

**Ailettes** : Le bloc turbine à gaz convertit l'énergie thermique présente dans le gaz de combustion en énergie mécanique. Le gaz de combustion pressurisé et chaud qui traverse les aubes fixes et les ailettes rotatives de la turbine entraîne la rotation du rotor. Cette énergie mécanique est transmise à l'alternateur, qui la convertit en énergie principalement transmise au réseau électrique haute tension. Une faible partie d'énergie est utilisée pour alimenter les consommateurs de la centrale. Les ailettes rotatives sont fixées au rotor, tandis que les aubes fixes sont montées sur un support d'aubes fixé au corps. Les ailettes sont disposées en rangées, numérotées de l'entrée à la sortie de la turbine. La combinaison d'une rangée fixe et d'une rangée rotative s'appelle un étage de compresseur. C'est à l'étage de la turbine que la chaleur du gaz de combustion est convertie en énergie mécanique. La GT26 comporte un seul étage HP et 4 étages BP.

**Palier** : Le palier lisse radial de turbine, monté dans le carter d'échappement, maintient et guide le rotor de la turbine dans la direction radiale. Comme les paliers du compresseur, il est surveillé pour détecter l'apparition de vibrations et de hautes températures du métal antifriction, et est graissé et refroidi par le système d'huile de graissage. En raison de son emplacement, le palier lisse radial de turbine est également refroidi par air. [8]

Tableau (I. 4) Spécifications de paliers. [7]

Spécifications des composants : les paliers	
- Paliers de charge radiale (palier lisse radial)	2 (1 sur le côté compresseur + 1 sur le côté turbine)
- Paliers de charge axiale (palier de butée)	1 bidirectionnel (côté compresseur)
- Ecart entre les paliers	9 620 mm

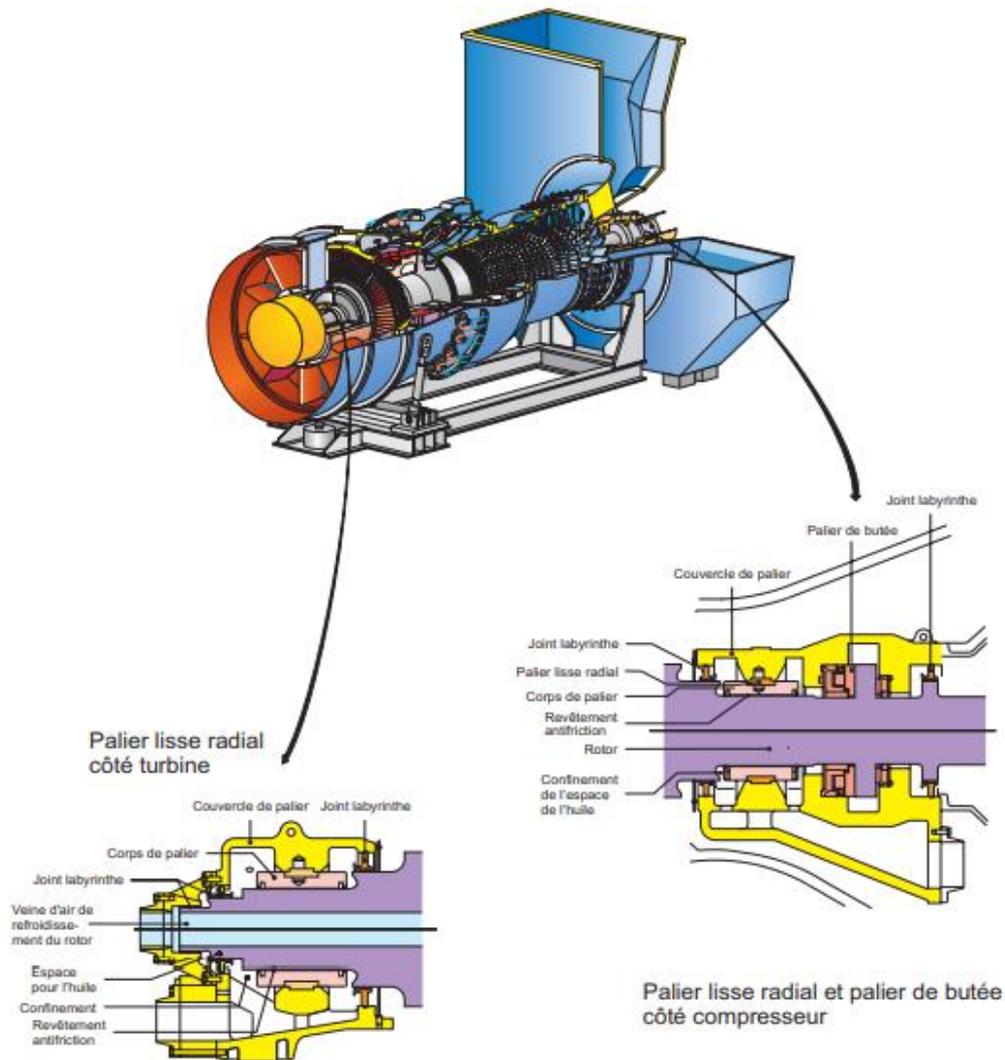


Figure (I. 9) Détails d'un palier. [8]

### I.3.5. Système d'échappement

Le système de gaz d'échappement dirige le flux de gaz d'échappement dans l'atmosphère par la cheminée s'applique à des centrales à cycle simple.

**Le diffuseur d'échappement :** Le diffuseur guide les gaz d'échappement du carter d'échappement de la turbine vers la cheminée. Pour compenser les différences de dilatation

thermique, le diffuseur est raccordé à la base de la cheminée par un joint de dilatation. Il est isolé contre les radiations thermiques et acoustiques par une isolation de laine minérale. [8]

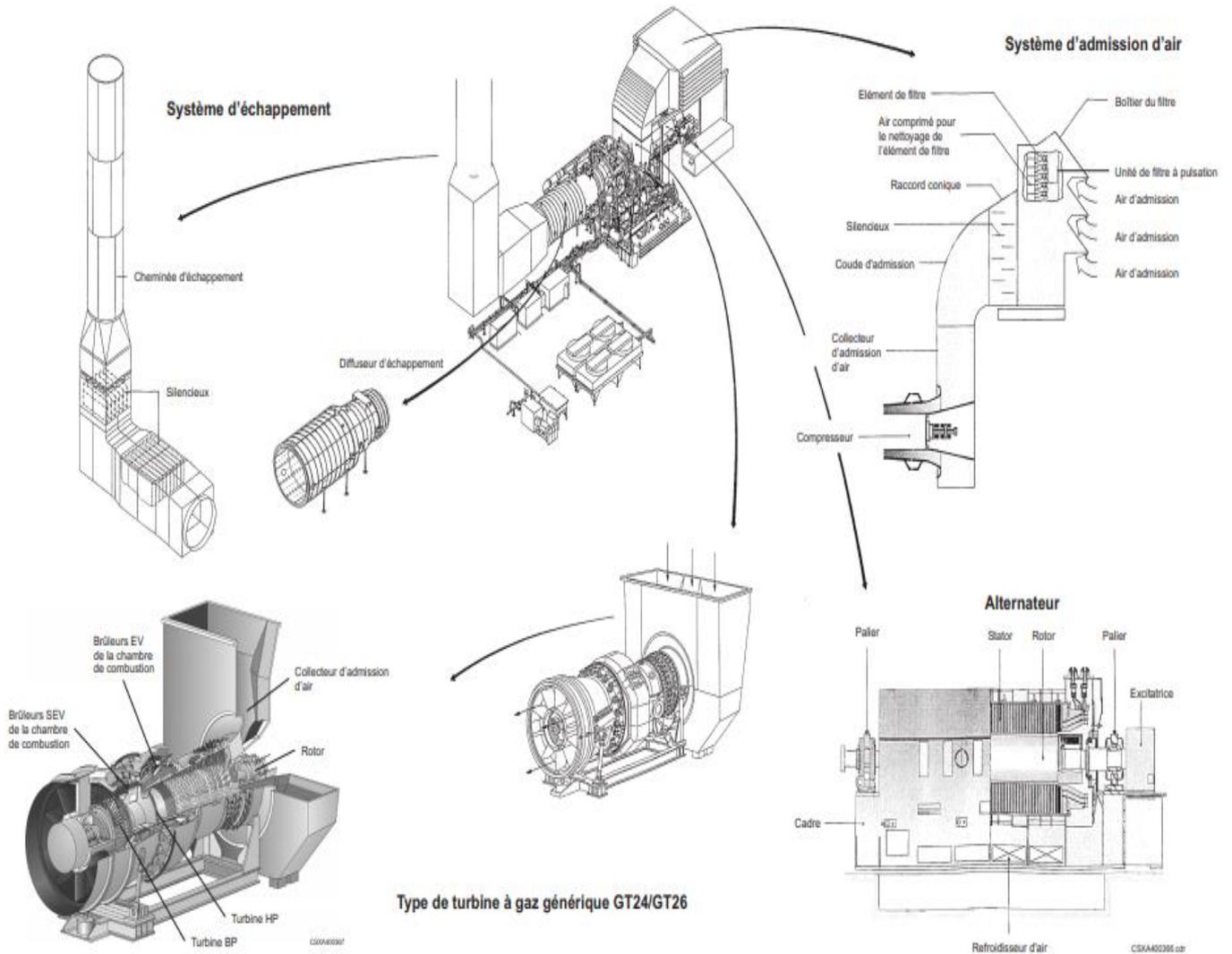


Figure (I. 10) Emplacement des composants principaux d'un groupe turbo-alternateur. [8]

## I.4. Systèmes auxiliaires de Turboalternateur

Il contient un système de refroidissement et d'étanchéité, un système d'huile de graissage, un système d'huile de soulèvement. [9]

### I.4.1. Système de refroidissement et d'étanchéité

Le système effectue les fonctions suivantes :

Il protège les pièces de la turbine à gaz se trouvant dans la veine de gaz chaud et le rotor contre une surchauffe.

- ✓ Il assure l'étanchéité de la section d'extrémité de la turbine basse pression afin d'empêcher l'entrée de gaz d'échappement.
- ✓ Il assure l'étanchéité de la partie palier/compresseur afin d'empêcher l'entrée d'air non filtré dans le compresseur axial. [9]

### I.4.2. Système d'huile de graissage

L'objectif du système d'huile de graissage est de lubrifier et de refroidir les paliers de la turbine à gaz, du générateur.

Le système d'huile de graissage fournit également de l'huile pré-pressurisée au système d'huile de commande et aux systèmes d'huile de soulèvement de la turbine à gaz l'huile de graissage est également utilisée pour la lubrification de l'embrayage auto commutable synchrone et de la pompe du dispositif d'entraînement en rotation de la turbine à vapeur. [10]



Figure (I. 11) Système d'huile de graissage. [10]

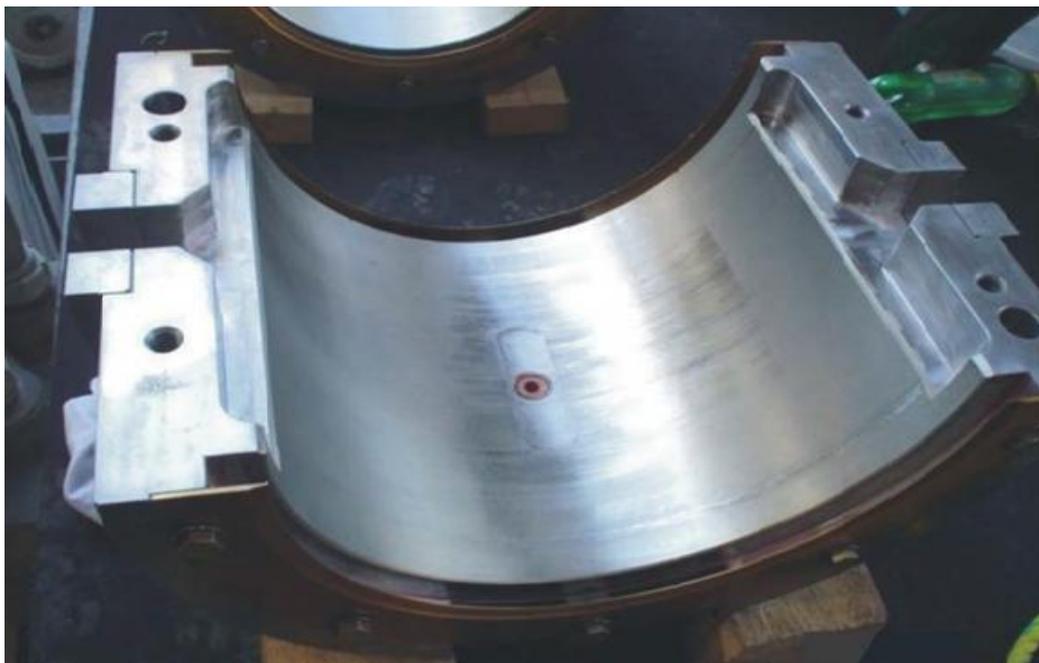
### I.4.3. Système d'huile de soulèvement

Le système d'huile de soulèvement :

- Alimente les paliers lisses radiaux de la turbine à gaz en huile haute pression et forme un film d'huile de graissage hydrostatique entre le tourillon et la coquille de palier inférieur lors de l'arrêt ou de la rotation à vitesse réduite du rotor. Ainsi, l'arbre est soulevé, assurant une séparation complète des deux surfaces, permettant au rotor de "flotter". Dès que le rotor tourne à une vitesse plus élevée, le film d'huile se forme de manière hydrodynamique grâce à la forme du palier, au jeu du palier et à la quantité et la viscosité de l'huile de graissage fournie. Le système d'huile de soulèvement est alors éteint. [10]
- Réduit le couple de démarrage pendant le démarrage de la turbine à gaz.

Le système d'huile de soulèvement doit toujours fonctionner lorsque le rotor tourne à vitesse réduite, c'est-à-dire pendant :

- Le démarrage de la turbine à gaz pour réduire le couple de démarrage.
- La mise à l'arrêt de la turbine à gaz.
- Le fonctionnement sous vireur.
- Le lavage offline du compresseur de la turbine à gaz.
- Le refroidissement rapide (forcé) de la turbine.
- La rotation du rotor avec système statique de démarrage (SSD), p. ex. rotation du moteur pendant la mise en service de la centrale. [10]



**Figure (I. 12)** Partie inférieure du palier avec poche d'huile de soulèvement. [10]

## I.5. Technologie de la turbine a gaz

Les particularités technologiques de la turbine à gaz sont essentiellement liées aux très hautes températures atteintes au niveau des turbines de détente (de 800 à plus de 1300°C selon les types).

Cela pose des problèmes de tenue au fluage, à la fatigue, à la corrosion des aubages en particulier. Un éventuel filtrage insuffisant de l'air aspiré par le compresseur ajouterait de l'érosion à ce qui précède.

Aussi, les matériaux utilisés sont de haute qualité : matériaux réfractaires à base de nickel ou cobalt additionné de chrome, ailettes obtenues par coulage à solidification orientée ou à coulage monocristal.

De plus, une partie du débit d'air (10 à 15 %) sortant du compresseur est dévié pour refroidir les ailettes par l'intérieur et pour obtenir un mince film d'air "frais" entre l'ailette et les gaz chauds de façon à limiter autour de 800°C la température de peau du métal.

Au niveau de la chambre de combustion, le débit d'air est divisé en plusieurs flux : environ 20 % du débit sert de comburant, 70 % sert d'air de dilution et le reste sert à refroidir les parois de la chambre et réduire la température des gaz atteignant la turbine haute pression. [11]

### I.5.1. Ailettes Compresseur

Des ailettes type « à réaction subsonique » sont utilisées, fournissant une distribution minimisée des pertes.

L'aubage d'entrée et les deux premières rangées d'aubages du compresseur sont réglables. Trois étages de soutirage (rangées 5, 11 et 16) sont installés. Les aubages réglables sont également utilisés pour réguler les gaz d'échappement et améliorer le fonctionnement à charge partielle. [5]

### I.5.2. Ailettes Turbine

La turbine axiale à cinq étages est équipée d'ailettes type « à réaction ». La première rangée d'ailettes est refroidie par l'intérieur au moyen d'un refroidissement à film et d'air provenant de l'aval du compresseur. Les rangées d'ailettes deux, trois et quatre sont principalement refroidies par l'intérieur au moyen d'un refroidissement en « serpentín » et de l'air provenant du compresseur. [5]

**I.6. Conclusion**

La génération d'électricité, la plupart du temps, est assurée par un alternateur entraîné en rotation par une turbine.

Une turbine est un dispositif rotatif (turbomachine) destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion).

Dans ce premier chapitre, nous avons fait une description générale sur la turbine à gaz type GT26. Et les systèmes auxiliaires utilisés tout en détaillant leur technologie et les mécanismes de fonctionnement et les améliorations apportées.

Dans le chapitre suivant, on va étudier l'alternateur (définition, la construction, les caractéristiques, le principe de fonctionnement d'alternateur ....)

## Chapitre II :

# Etude Théorique d'un Alternateur

## II.1. Introduction

L'alternateur est une machine synchrone à courant alternatif qui est utilisé dans l'industrie tel que dans la production d'énergie électrique dans les centrales (hydraulique, thermique, nucléaire ...), il est la source primaire de toute l'énergie électrique de consommation. Cette machine constitue les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Plus de 95 % de l'énergie électrique est produite par des alternateurs. L'alternateur converti l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif, Le rotor de l'alternateur est entraîné en rotation par la turbine qui assure l'énergie mécanique, ce dernier fournit des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation. [2]

## II.2. Caractéristique Technique d'alternateur

**Tableau (II. 1)** Données générales de l'alternateur. [12]

Données générales de l'alternateur (valeurs nom.)	Syms	CL. B	Dim.
-Normes		CEI 60034	
-Echauffement selon		CEI 60034 Cl. B	
-Puissance apparente nominale	$S_n$	480.0	MVA
-Puissance active nominale	$P_n$	432.0	MW
-Tension assignée aux bornes (+ 7,5 % / - 7,5 %)	$U_n$	20000	V
-Courant de phase nominal	$I_n$	13856	A
-Facteur de puissance nominale	$\cos\varphi_n$	0.90	p. u.
-Fréquence assignée (+ 3,0 % / - 3,0 %)	$F_n$	50	Hz
-Vitesse nominale	$N\eta$	3000	Rpm
-Température d'entrée H2	$T_{cg}$	40	°C
-Pression H2 (manomètre)	$\Delta P_{H2}$	5.5	Bar
-Pureté de l'hydrogène		98.0	%
-Courant d'excitation à vide, tension nominale aux bornes	$I_{f0}$	1533	A
-Tension d'excitation à vide, tension nominale aux bornes	$U_{f0}$	122	V
-Courant d'excitation en charge nominale	$I_{fn}$	4104	A
-Tension d'excitation en charge nominale	$U_{fn}$	354	V
-Facteur de plafond		2.0	p. u.
-Rapport court-circuit	SCR	0.5	p. u.
-Puissance de l'alternateur avec un refroidisseur hors service		80.0	%

### II.3. Généralité sur les alternateurs

Les alternateurs de centrales hydrauliques entraînés par des turbines hydrauliques, se caractérisent par l'appellation « **d'alternateurs à pôles saillants** »

Les alternateurs des centrales thermiques entraînés par des turbines à vapeur ou à gaz, se caractérisent par l'appellation : « **d'alternateurs à pôles lisses** ». (Turboalternateurs). [13]

On peut aussi distinguer :

- Des alternateurs à axe horizontal
- Des alternateurs à axe vertical

Des alternateurs couplés à des turbines à vapeur, à gaz, diesel sont toujours à axe horizontal.

La vitesse de rotation de ces alternateurs n'est pas choisie arbitrairement, elle est imposée par la turbine qui entraîne l'alternateur. Pour les turbines à vapeur et à gaz il faut les faire tourner le plus possible. [13]

La vitesse de rotation est également fonction de la fréquence :

$$N \text{ (tr/mn)} = \frac{60 \times F(\text{Hz})}{P(\text{paires de pôles})} \quad (\text{II.1})$$

**Tableau (II. 2)** Les différentes vitesses pour chaque paire de pôles. [13]

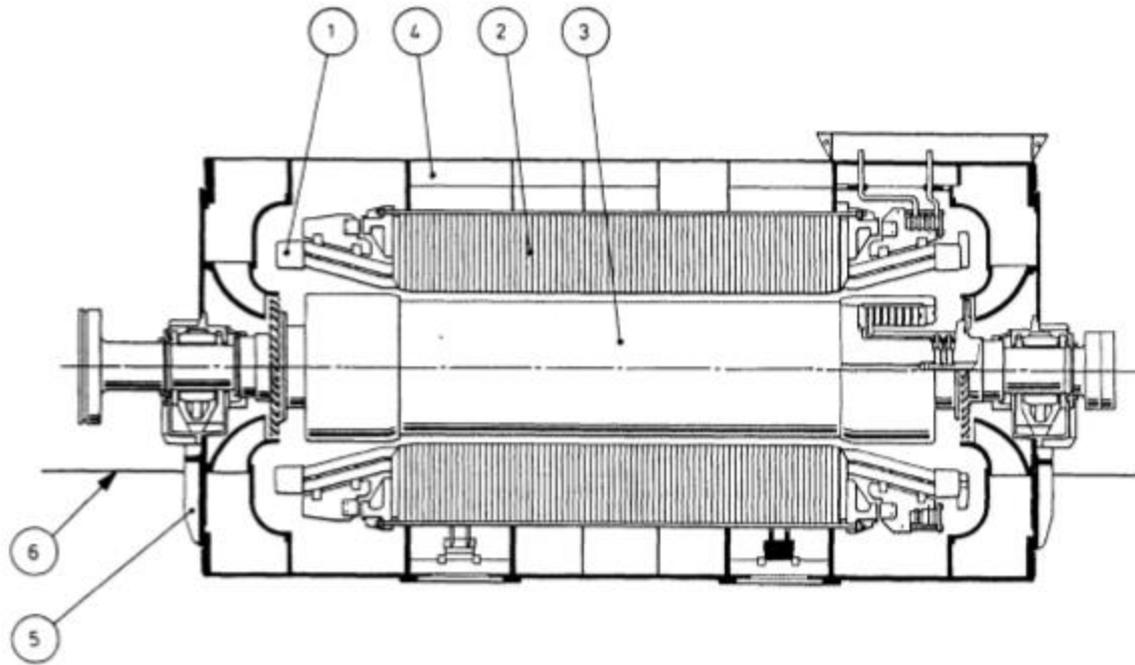
<b>Fréquence</b>	<b>50 Hz</b>	<b>60 Hz</b>	
	3000 tr/mn	3600 tr/mn	Avec 1 paire de pôles
	1500 tr/mn	1800 tr/mn	Avec 2 paire de pôles
	1000 tr/mn	1200 tr/mn	Avec 3 paire de pôles
	750 tr/mn	900 tr/mn	Avec 4 paire de pôles
	75 tr/mn	90 tr/mn	Avec 40 paire de pôles

Les alternateurs de la production thermique ont une vitesse de rotation de 3000 tr/mn. [13]

#### **II.4. Constitution de l'alternateur**

L'alternateur se compose des éléments suivants :

- Le stator
- Le rotor
- Les enroulements du stator
- La carcasse
- Le système d'excitation
- Les systèmes auxiliaires



1 - Enroulement stator.

4 - Carcasse alternateur.

2 - Circuit magnétique.

5 - Paliers.

3 - Rotor.

6 - Fondation.

**Figure (II. 1)** Vue d'ensemble de l'alternateur. [2]

### II.4.1. Le Stator

Le stator est la partie fixe du circuit magnétique soumis à un champ magnétique tournant. Il est constitué de tôles d'acier au silicium ayant la forme de couronnes et perpendiculaires à l'axe de la machine.

Les alternateurs sont munis d'amortisseurs qui sont destinés à amortir les oscillations du rotor lors des phénomènes transitoires et faciliter les régimes de fonctionnement asymétrique.

Les conducteurs de l'induit sont placés dans des encoches autour de la carcasse de la machine et sont groupés en bobine. [14]

Les enroulements du stator sont le siège de courant alternatif monophasé ou triphasé, ils possèdent donc le même nombre de paire de pôles «  $P$  ». Dans une machine synchrone bipolaire, le stator comporte 3 bobines identiques décalées de  $120^\circ$ . [14]

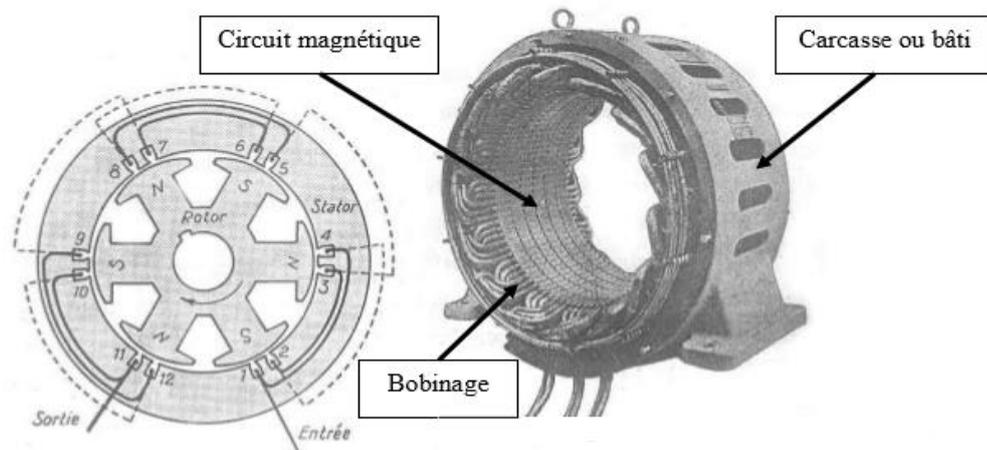


Figure (II. 2) Stator d'alternateur. [15]

### II.4.2. Les Enroulements du stator

L'enroulement stator est la partie principale de l'alternateur. Sa construction est par un ensemble de conducteurs immobilisés dans le circuit magnétique. Il est le siège de la puissance électrique générée par l'alternateur et il doit évacuer cette énergie vers l'extérieur. L'enroulement stator est refroidi par un système de refroidissement indirect. Dans les barres stator, le passage du courant entraîne des pertes thermiques qui sont évacuées par le circuit magnétique lui-même refroidi par circulation d'air et par circulation d'air frais dans les développantes. [2]

### II.4.3. Le Rotor

Le rotor est constitué d'un arbre en acier massif de haute caractéristique mécanique (limite élastique élevée) et éventuellement d'empilage de tôles, dans lequel sont logés les enroulements toriques alimentés en courant continu.

Des amortisseurs LEBLANC (barres de cuivre en court-circuit) sont logés dans des encoches, tout autour du rotor. Le refroidissement est assuré par une circulation d'un fluide (air, H<sub>2</sub>, eau). [13]

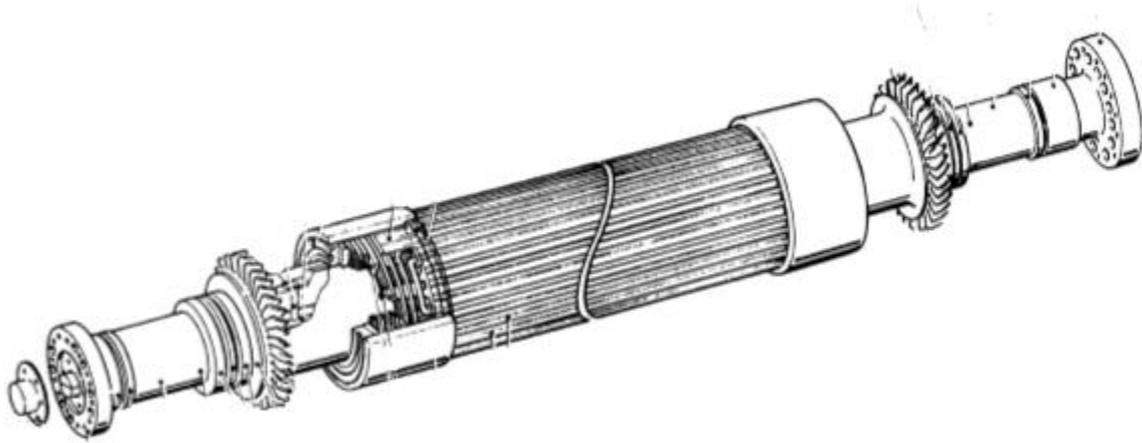


Figure (II. 3) Rotor d'alternateur. [2]

#### II.4.3.1. Rotor à pôles lisses

La vitesse des turbines à gaz est généralement grande 3000 tours par minute, le nombre de pôles est généralement 2. La grande vitesse exige une économie d'espace, mais la force centrifuge intense exige que les pièces polaires fassent partie intégrante du rotor. En effet, les conducteurs des enroulements polaires sont solidement fixés dans des encoches taillées dans la masse même du rotor, d'où le nom de rotor à pôles lisses. [13]

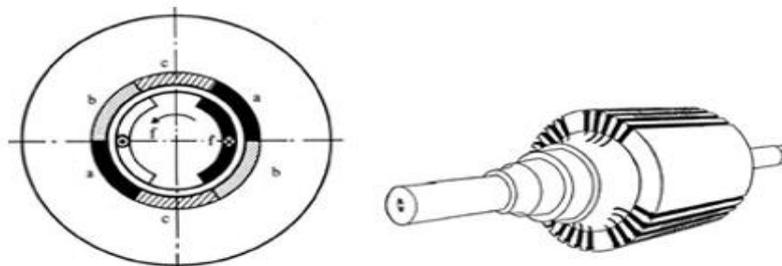


Figure (II. 4) Machine synchrone à rotor à pôles lisses. [15]

#### II.4.3.2. Rotor à pôles saillants

La vitesse des turbines hydrauliques étant faible, le nombre de pôles doit être grand. Ce nombre de pôles exige beaucoup d'espace, mais par contre, les problèmes de force centrifuge, en ce qui concerne la fixation des pièces polaires, sont éliminés. Les pièces polaires individuelles que l'on fixe autour d'un noyau constituent ce que l'on appelle le rotor à pôles saillants. Ces pièces polaires sont constituées d'un noyau et d'un enroulement dans lequel circule le courant d'excitation. [13]

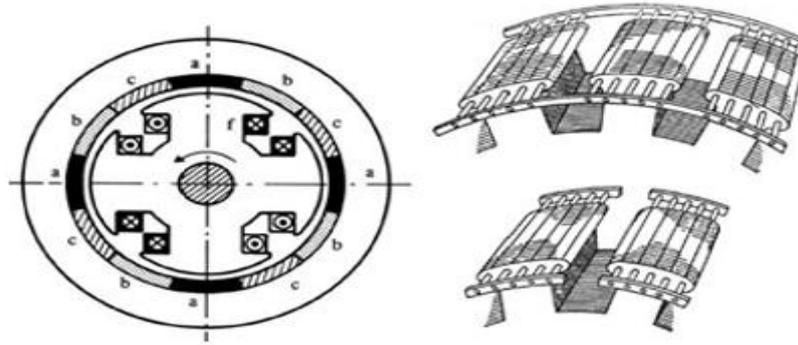


Figure (II. 5) Machine à pôles saillants et enroulements amortisseurs. [15]

#### II.4.4. Les enroulements rotor

L'enroulement inducteur se compose de plusieurs bobines logées dans les encoches longitudinales dans la partie active du rotor. Les bobines sont montées en série, et enroulées de façon à constituer deux pôles. Chaque conducteur est centré pour former une demi-spire dans lesquelles sont logées dans les encoches du rotor, puis assemblées pour former les spires inductrices. Les têtes de bobines sont calées entre elles au moyen des pièces isolantes de façon à éviter tout déplacement inadmissible des bobines. [16]

Tous les alternateurs comportent deux enroulements principaux :

- Enroulement producteur du champ électromagnétique, c'est l'enroulement «INDUCTEUR » sont placés sur les encoche du stator pour créer un champ tournant.
- Enroulement subissant l'effet du champ électromagnétique, c'est l'enroulement «INDUIT» qui est le siège des f.e.m induites. ils sont logés dans les encoches du rotor.

#### II.4.5. Le système d'excitation

Le courant continu exigé pour les électro-aimants ou pôles, provient ordinairement de générateurs à courant continu, en passant par deux bagues collectrices montées sur l'arbre de l'alternateur. Le circuit destiné à fournir ce courant continu se nomme circuit d'excitation, et la tension employée est habituellement de l'ordre de 200 à 500 volts cc.

Le système d'excitation permet d'alimenter le rotor en courant continu d'excitation. Le contrôle de ce courant permet de réguler la tension de sortie de la machine. [13]

**II.4.5.1. Système statique de démarrage SSD**

Le Système statique de démarrage (SSD) est utilisé uniquement pour démarrer et lancer la turbine gaz qui sera allumée après avoir atteint environ sa vitesse nominale.

Lors du démarrage de la TG, le disjoncteur de l'alternateur est ouvert.

Pour lancer la TG, l'alternateur est utilisé en moteur synchrone et alimenté via le SSD par le transformateur lui-même alimenté par le réseau HT à travers le transformateur principal.

En cas de démarrage par les groupes électrogènes, le SSD sera alimenté par le transformateur lui-même alimenté par le tableau de distribution 6,6 kV des groupes électrogènes.

Pendant la phase de démarrage en moteur synchrone, la tension fournie au stator de l'alternateur est d'abord redressée et ensuite transformée en tension triphasée à fréquence variable par le démarreur statique.

Le système de démarrage de l'excitation fournit le courant continu aux enroulements d'excitation du rotor, produisant ainsi le champ magnétique, qui permet au rotor de l'alternateur de tourner. [17]

**II.4.5.2. Système d'excitation statique SES**

Ce type de système d'excitation est souvent utilisé pour les alternateurs hydrauliques et les grands turboalternateurs avec une puissance supérieure à 50 MVA. Les exceptions dépendent des exigences des clients. [18]

La puissance pour le système d'excitation est prise des bornes de l'alternateur. Le régulateur de tension automatique travaille à travers un organe de puissance à semi-conducteurs qui est très souvent un convertisseur à thyristors ou à transistors bipolaires à grille intégrée (IGBT).

Le régulateur de tension avec le convertisseur de puissance et le transformateur d'excitation ainsi que le disjoncteur du champ forment les composants principaux d'un système d'excitation statique. [17]

Il est constituée d'un redresseur qui convertit le courant alternatif en courant continu et un système de balais et collecteurs tournants qui transmettent le courant de la source à la bobine du rotor. Le contrôle de la tension s'effectue dans le pont de diodes qui peut régler l'amplitude de la tension de sortie. [19]

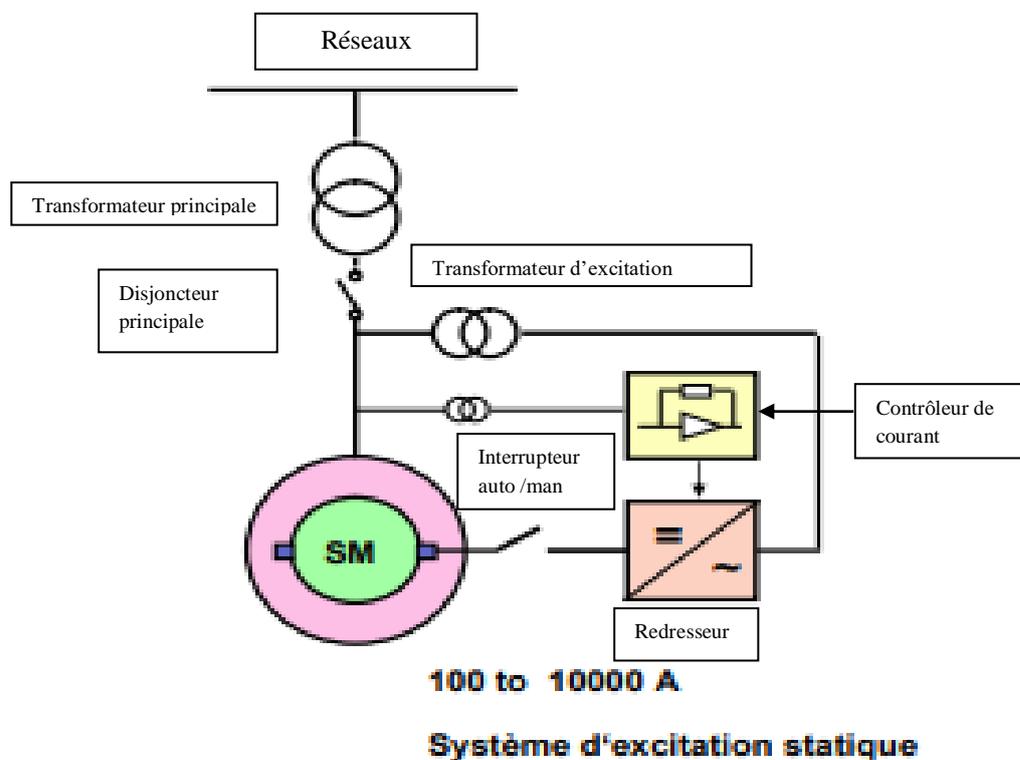


Figure (II. 6) Système D'excitation Statique. [18]

### II.4.5.3. Les Tâches du Système D'excitation

- Maintenir la tension de bornes du générateur
- Opérer la machine synchrone dans les limites d'opération
- Prévenir la machine synchrone de passer en mode asynchrone
- Réponse rapide en cas de perturbations du réseau
- Partage de la puissance réactive avec d'autres machines synchrones connectées en parallèle
- Stabiliser les oscillations de puissance
- Haute fiabilité. [18]

**II.4.5.4. Les type d'excitation**

Il existé différents modes d'excitation.

- Système directe d'excitation: l'induit de l'excitatrice a courant continue appelé à l'arbre de la machine synchrone.
- Système indirecte d'excitation : l'induit de l'excitatrice à courant continue est accouplé à l'arbre de la machine synchrone.
- Système statique d'excitation: équipé de diode et thyristor.
- Système d'auto excitation.
- Système d'excitation sans balais.

**II.4.6. Les systèmes auxiliaires**

Ils assurent le bon fonctionnement de l'alternateur.

Sur les très grosses machines on trouve :

- Un système de réfrigération hydrogène: il assure le refroidissement de l'hydrogène sous pression, indispensable à la réfrigération du rotor et du stator.
- Un système d'huile d'étanchéité: il a comme fonction d'assurer l'étanchéité indispensable de la carcasse alternateur au niveau des liaisons entre les parties fixes (carcasse) et la partie tournante (rotor). Cette étanchéité est indispensable du fait de l'hydrogène sous pression.
- Un système de refroidissement eau stator : il permet l'évacuation des pertes des barres stator par circulation d'eau directement dans le conducteur. [13]

**II.5. Principe de fonctionnement**

Lorsque le rotor est excité par un courant continu, il produit un champ tournant, qu'il entraîne avec lui. Ce champ tournant engendre une force électromotrice dans chacune des phases de l'enroulement stator (phénomène d'induction). Si les phases sont connectées sur une charge (réseau), il apparaît des courants triphasés dans les conducteurs des barres du stator. L'ensemble de ces courants du stator produit un champ tournant dans le même sens et

à la même vitesse que le rotor (machine synchrone). Le champ tournant induit (stator) se compose avec le champ de l'inducteur (rotor) et donne naissance à une force électromotrice en charge. Cette force électromotrice est décalée d'un angle (dit angle interne) par rapport à la force électromotrice qui serait engendrée à vide par le courant inducteur seul.

L'alternateur des centrales nucléaire ou thermique classique est une machine électrique tournant à une vitesse de synchronisme élevée : 3000 tr/min pour  $p = 2$  ou 1500 tr/min pour  $p = 4$  pour une fréquence réseau de 50 Hz. [13]

### II.6. Système de refroidissement de l'alternateur

Les alternateurs refroidis à l'hydrogène nécessitent deux systèmes auxiliaires spéciaux pour fonctionner correctement.

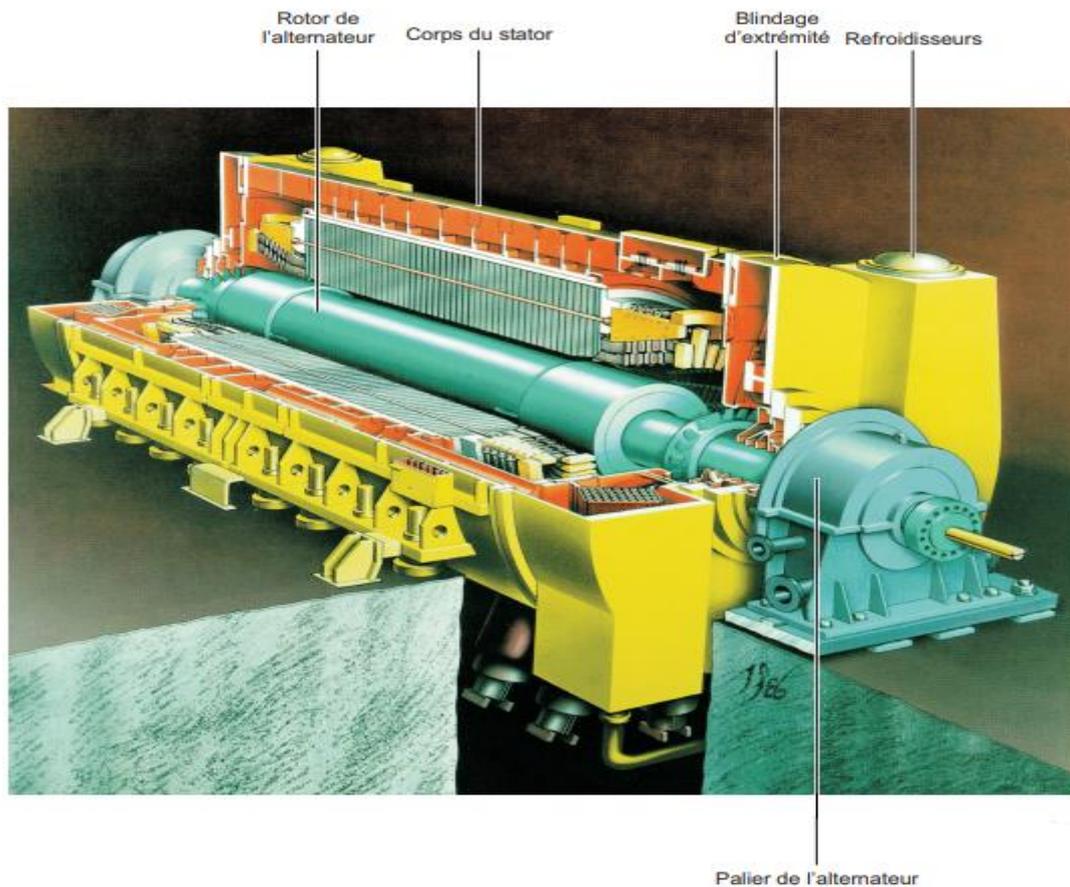
- Le système d'huile d'étanchéité qui maintient le gaz H<sub>2</sub> piégé dans le corps de l'alternateur.
- Le système de gaz qui maintient la pression et la pureté de gaz nécessaire dans le corps de l'alternateur. [20]

L'hydrogène est préféré à l'air comme média de refroidissement pour les raisons suivantes:

- La densité de H<sub>2</sub> gaz étant égale à 1/14 de celle de l'air, les pertes par ventilation rotationnelle sont considérablement réduites.
- Le transfert de la chaleur du gaz H<sub>2</sub> (évacuation de la chaleur générée par le flux de courant dans le champ et les enroulements du stator) est pratiquement supérieur à celui de l'air.
- Absence de dégradation de l'isolation par oxydation dans un environnement hydrogène.

Mais cette technique ne présente pas que des avantages:

- La pureté du gaz H<sub>2</sub> doit être maintenue à un niveau élevé.
- Une concentration de 4-76 % de l'hydrogène dans l'air constitue un mélange explosif.
- Deux systèmes auxiliaires supplémentaires sont nécessaires. [20]



**Figure (II.7)** Alternateur refroidi par hydrogène, type WT20H. [8]

## II.7. Analyse de fonctionnement d'un alternateur

### II.7.1. Caractéristique à vide

Lorsque le courant statorique est nul, la tension (V) mesurée aux bornes du stator est égale à la force électromotrice (E) de l'alternateur. La force magnétomotrice provient uniquement de l'inducteur (rotor). L'amplitude dépend du courant d'excitation  $I_f$  traversant le circuit inducteur (rotor). [21]

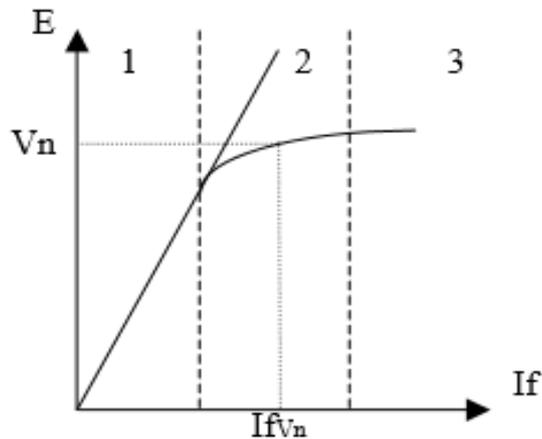


Figure (II.8) Caractéristiques d'un alternateur à vide. [19]

Dans la partie 1 non utilisée: une faible variation de  $I_f$  entraîne une variation importante de  $V$ .

Dans la partie 2 utilisée : une faible variation de  $I_f$  entraîne une faible variation de  $V$

Dans la partie 3 non utilisée : une faible variation de  $I_f$  entraîne une faible variation de  $V$  mais, courant important  $I_f$  donc sur dimensionnement du rotor. [19]

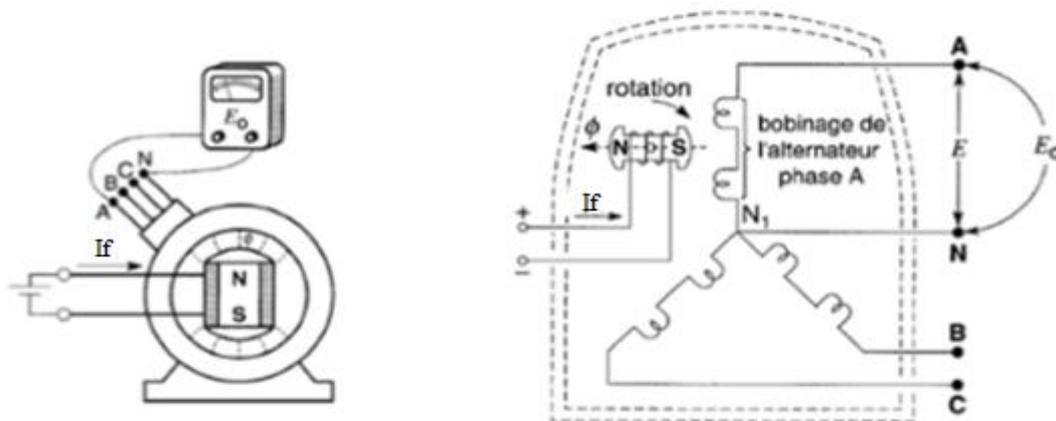


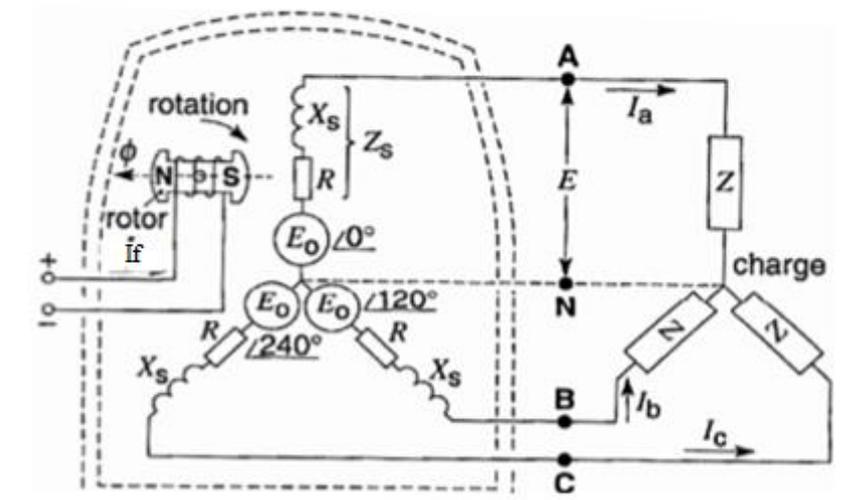
Figure (II. 9) Branchement d'un alternateur à vide. [14]

### II.7.2. Caractéristique en charge

Lorsque la machine est en charge, la force magnétomotrice totale est la somme vectorielle de la force magnétomotrice produite par l'inducteur et celle produite par l'induit lui-même du fait du passage du courant de charge  $I$  ("hypothèses de Blondel"). [19]

L'alternateur est entraîné à sa vitesse de synchronisme  $n_s$  excitée par le courant d'excitation  $I_f$ , il fournit alors une f.é.m.  $E$  aux bornes du stator. Si ce dernier est branché sur une charge triphasée équilibrée, il délivre des courants induits tels que. [19]

$$I = I_a = I_b = I_c. \quad (\text{II.2})$$



**Figure (II. 10)** Branchement d'un alternateur en charge. [14]

Le déphasage entre ces 2 forces magnétomotrices dépend de la phase du courant statorique  $I$  par rapport à la force électromotrice induite à vide.

**Si le déphasage est nul**, la force magnétomotrice de réaction d'induit est décalée de  $90^\circ$  en arrière par rapport à la force magnétomotrice de l'inducteur. La réaction d'induit est dite transversale.

**Si le déphasage est de  $90^\circ$  en avant**, les lignes de champ de l'induit empruntent le même chemin que les lignes de champ de l'inducteur et la force magnétomotrice de l'induit renforce la force magnétomotrice de l'inducteur. La réaction d'induit est dite longitudinale et magnétisante.

**Si le déphasage est de  $90^\circ$  en arrière** (cas du court-circuit ou des charges inductives), la force magnétomotrice de l'induit s'oppose à la force magnétomotrice de l'inducteur. La réaction d'induit est dite longitudinale et démagnétisante.

Dans ce cas, si le courant d'excitation n'est pas augmenté, pour compenser la diminution du flux tournant, le courant de court-circuit pourra prendre une valeur nettement inférieure au courant de service de l'alternateur. [19]

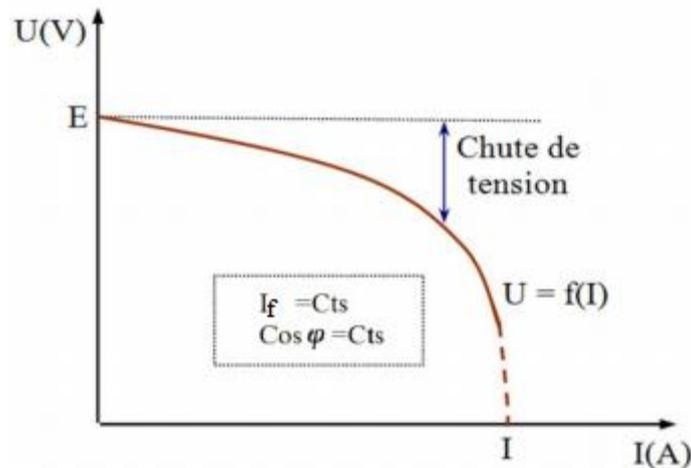


Figure (II. 11) Caractéristiques d'un alternateur en charge. [2]

### II.7.2.1. Charge purement résistive

Dans ce cas, le champ induit maximal, donc la f.e.m induite, sont maximal, ce qui entraîne un courant induit maximal. On voit sur la Figure (II. 11) que le champ produit par le rotor est perpendiculaire au champ produit par le stator, pour cette raison la réaction d'induit est dite transversale.

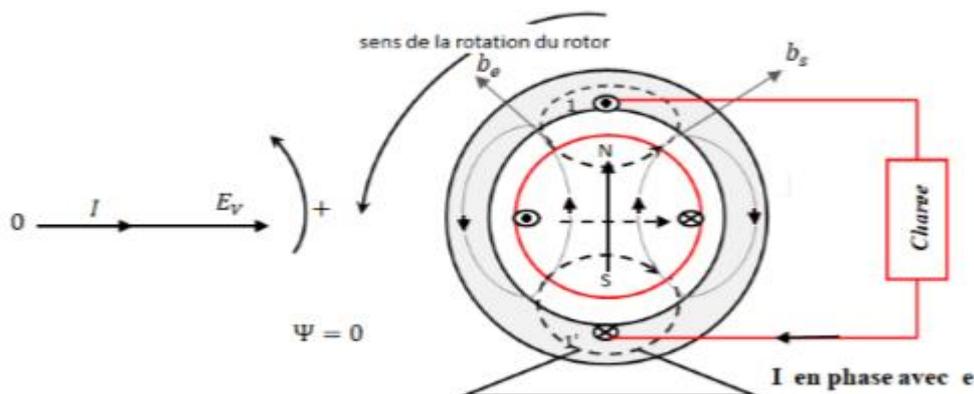
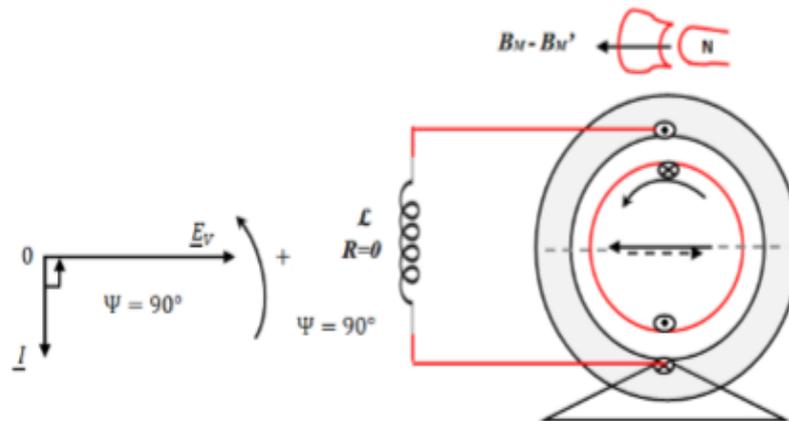


Figure (II. 12) Cas d'une Charge purement résistive. [14]

D'après les lignes de champ de la Figure (II. 11), on remarque qu'il y a une dissymétrie du champ résultant dans l'entrefer; on dit qu'il y a distorsion du champ par conséquent : la réaction transversale provoque une distorsion du champ dans l'entrefer. [14]

### II.7.2.2. Charge purement inductive

Si le rotor occupe la position de la **Figure (II. 12)**, la f.e.m est maximale mais le courant est en retard de  $90^\circ$ , donc il faut que le rotor tourne de  $90^\circ$  pour que ce courant atteigne sa valeur maximale. Dans cette position, le champ tournant statorique et le champ tournant rotorique sont opposés. Pour cette raison, la réaction d'induit est dite longitudinale ou directe. Pour un courant d'excitation  $J$  donné, le flux a diminué. [14]



**Figure (II. 13)** Cas d'une charge purement inductive. [14]

À cause du flux causé par l'induit, pour l'augmenter à sa valeur initiale il faut augmenter le courant d'excitation  $J$ . On dit alors que cette réaction d'induit est démagnétisant.

### II.7.2.3. Charge purement capacitive

Si le rotor occupe la position de la **Figure (II. 13)**, la f.e.m est maximale mais le courant est en avance de  $90^\circ$ . Donc, il faut que le rotor tourne  $270^\circ$  pour que ce courant atteigne sa valeur maximale. Dans cette position **Figure (II. 13)**, le champ tournant statorique et le champ tournant rotorique sont en phase. Pour cette raison la réaction d'induit est dite aussi longitudinale ou directe.

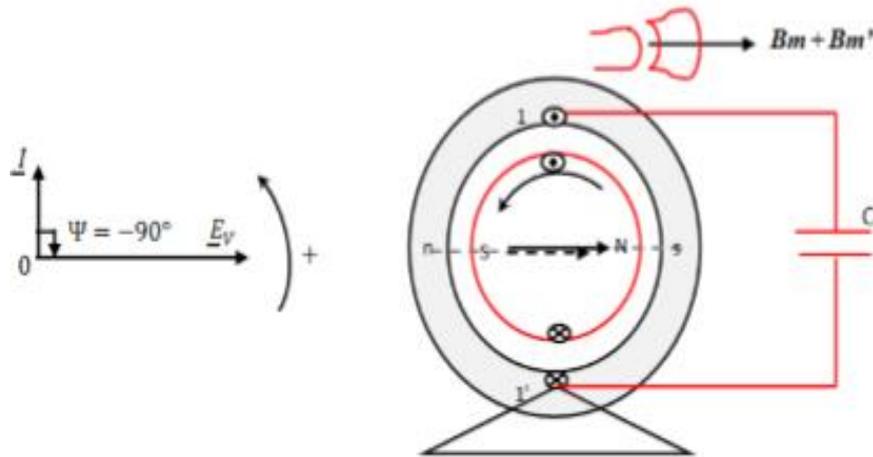


Figure (II. 14) Cas d'une charge purement capacitive. [14]

Pour un courant d'excitation  $I_f$  donné, le flux a augmenté à cause du flux dû à l'induit ; pour le diminuer à sa valeur initiale, il faut diminuer le courant  $I_f$ . On dit alors que cette réaction d'induit est magnétisante. [14]

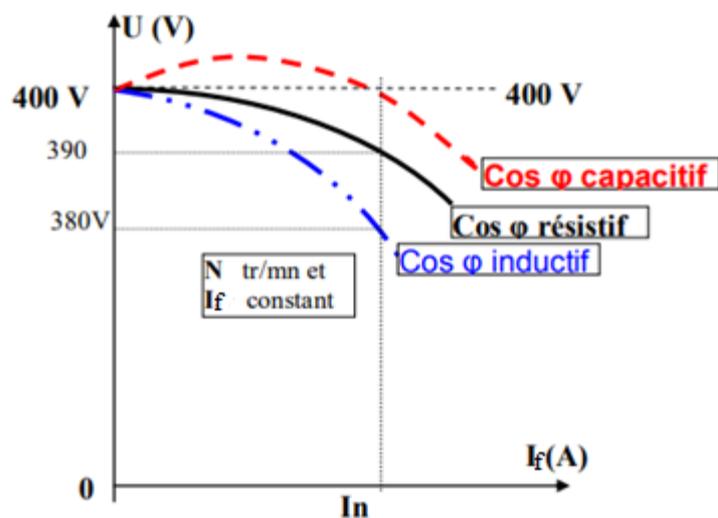


Figure (II. 15) Courbes de variation  $V(I)$  à vitesse et excitation constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance. [22]

### II.8. Diagramme de Behn-Eschenburg

La force électromotrice  $E$  délivrée par la machine est égale à la somme de la tension  $V$  aux bornes du stator majorée de la chute de tension  $R I_c$  (résistance du stator de la machine parcourue par le courant de charge  $I_c$ ) et majorée de la chute de tension  $X_d I_c$  (réactance synchrone longitudinale de la machine parcourue par le courant de charge  $I_c$ ).

$$E = V + R I_c + j X_d I_c \tag{II.3}$$

La tension  $V$  , aux bornes du stator, est imposée par le réseau.

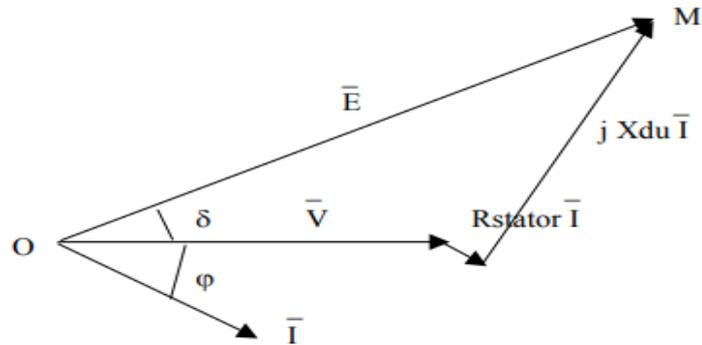


Figure (II. 16) Diagramme de Fresnel. [21]

$\varphi$  = déphasage entre  $V$  et  $I_c$

$\delta$  = déphasage entre  $V$  et  $E$  = angle interne de la machine.

## II.9. Les forces électromotrices

### II.9.1. Forces électromotrices théoriques

Son expression suppose que d'une part les f.e.m induites dans tous les brins actifs sont en phases (soit une seule encoche par pôle et par phase) et que ces f.e.m sont rigoureusement sinusoïdales (soit un champ radial rigoureusement sinusoïdal) [23].

Pour mieux expliquer le phénomène, nous avons deux conducteurs d'une même spire occupent au même instant la même position par rapport à deux pôles consécutifs, compte tenu du couplage, les deux f.e.m s'ajoutent arithmétiquement. Si nous admettons que les différentes spires sont superposées, donc que tous les conducteurs d'un même pôle sont dans la même encoche, la valeur efficace de la f.e.m totale est la somme arithmétique des valeurs efficace. Soit  $N$  le nombre total de conducteur, il y a  $N/2$  spires [24] :

$$E = 4.44 f \cdot \varphi \cdot \frac{N}{2} \tag{II.4}$$

Alors :

$$E = 2.22 f . N . \varphi \quad (\text{II.5})$$

Où :

$N$  : Nombre de conducteurs.

$\varphi$  : Flux sous un pôle.

Il est possible de remplacer  $f$  par  $P . n$  pour trouver :

$$E = 2.22 P . n . N . \varphi \quad (\text{II.6})$$

### II.9.2. Forces électromotrices réelles

La force électromotrice réelle est donnée par l'expression :

$$E = 2.22 K_d . K_f . N . f . \varphi \quad (\text{II.7})$$

Où :

$K_d$  : Facteur de distribution.

$K_f$  : Facteur de forme.

Le produit  $K = 2.22 K_d . K_f$  est appelé coefficient de Kapp, il doit être calculé pour chaque alternateur. Notons cependant que pour un alternateur triphasé,  $K_d < 1$  et  $K_f > 1$  ont un produit voisin de l'unité et la f.é.m réelle ne diffère de la théorique que de quelques pour cent.

[23]

Finalement la f.é.m réelle devient :

$$E = K . f . N . \varphi \quad (\text{II.8})$$

II.10. Bilan des puissances d'un alternateur

Les différentes puissances sont représentées sur la figure :

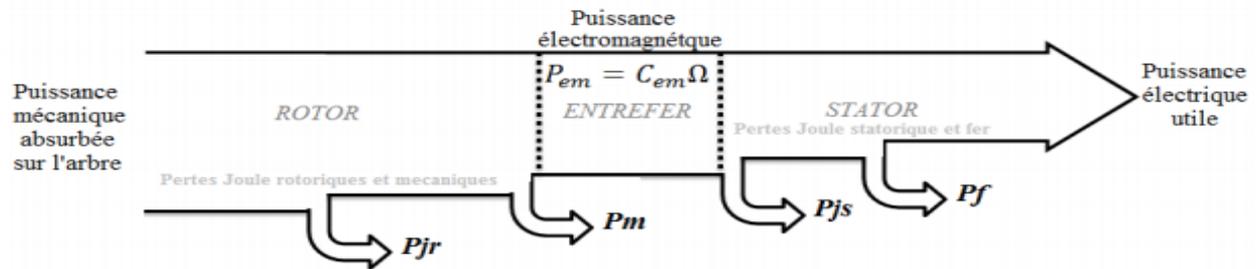


Figure (II. 17) Bilan des puissances d'un alternateur. [25]

II.10.1. Puissance absorbée

Dans notre étude, la turbine à gaz entraîne l'arbre de l'alternateur, c'est à dire que cette turbine fournit une puissance mécanique à l'entrée de l'alternateur (puissance absorbée par l'alternateur) et on montre sa par la formule suivante [2] :

$$Pa = Cm\Omega = Cm \frac{2\pi N}{60} \tag{II.9}$$

Où :

$\Omega$  : Vitesse de rotation du champ tournant en rad/s

$N$  : Vitesse de rotation du champ tournant en tr/s

$Cm$  : Couple utile sur l'arbre en N.m

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

$$Pa = Cm\Omega + Uf.If = Cm \frac{2\pi N}{60} + Uf.If \tag{II.10}$$

Avec :

$Uf$  = Tension d'excitation en volte.

$If$  = Courant d'excitation en ampère

### II.10.2. Puissance utile

L'alternateur lors fonctionnement est produit une puissance utile électrique  $P_u$  qui dépend de la charge qui est connectée (influence du  $\cos \varphi$ ). Si l'alternateur est triphasé, on a [2] :

$$P_u = \sqrt{3}UI \cos\varphi \quad (\text{II.11})$$

$$P_u = 3VI \cos\varphi \quad (\text{II.12})$$

### II.10.3. Bilan des pertes

Les pertes de puissance de l'alternateur sont classées en deux groupes :

#### II.10.3.1. Pertes de puissance mesurable

On générale, les pertes de puissance mesurable sont composées par deux types:

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

- Les pertes-joule dans l'enroulement induit (stator) :

$$P_{js} = \frac{3}{2}RI^2 \quad (\text{II.13})$$

$R$  : La résistance vue entre deux bornes de l'alternateur.

- Les pertes-joule dans l'enroulement inducteur (rotor) :

$$P_{jr} = R_r.I_f = U_f.I_f \quad (\text{II.14})$$

$R_r$  : La résistance du circuit d'excitation.

2- Pertes constantes indépendantes de la charge. Dans l'essai à vide, on a déterminé les pertes suivantes:

- Les pertes-fer  $P_f$  dans les tôles de l'armature d'induit.
- Les pertes mécaniques  $P_m$  dans les paliers, bagues et ventilation. [2]

### **II.10.3.2. Pertes supplémentaires**

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

- Concentration du courant vers l'extérieur du conducteur dans une encoche.
- Courant de Foucault induits dans un conducteur par le courant même qui le traverse.
- Supplément de pertes dans le fer du fait de la distorsion du flux en charge.
- Pertes par courants de Foucault dans les inducteurs des alternateurs monophasés. [2]

## **II.11. Rendement d'un alternateur**

### **II.11.1. Rendement vrais**

La formule du rendement vrai est montée ci-après :

$$\eta_{Vrai} = \frac{\text{Puissance électrique active fournie}}{\text{puissance mécanique absorbée} + \text{puissance nécessaire à l'excitation}} \quad (\text{II.15})$$

### **II.11.2. Rendement approché**

Le rendement approché est donné par la relation suivante:

$$\eta_{\text{approché}} = \frac{\text{puissance électrique active fournie}}{\text{puissance électrique active} + \text{pertes mesurable}} \quad (\text{II.16})$$

### II.12. Couplage des alternateurs

Les alternateurs utilisés pour la production de l'énergie électrique, débitent dans un réseau commun (interconnexion).

La mise en fonctionnement d'un tel alternateur implique donc son couplage en parallèle sur le réseau.

Pour coupler un alternateur sur le réseau, il faut que la courbe de la f.e.m qu'il produit soit superposée à la courbe de la tension correspondante au réseau.

Or, pour que les deux sinusoïdes se superposent il faut :

- L'égalité de leurs valeurs maximales.
- L'égalité de leurs fréquences
- L'identité de leurs phases.

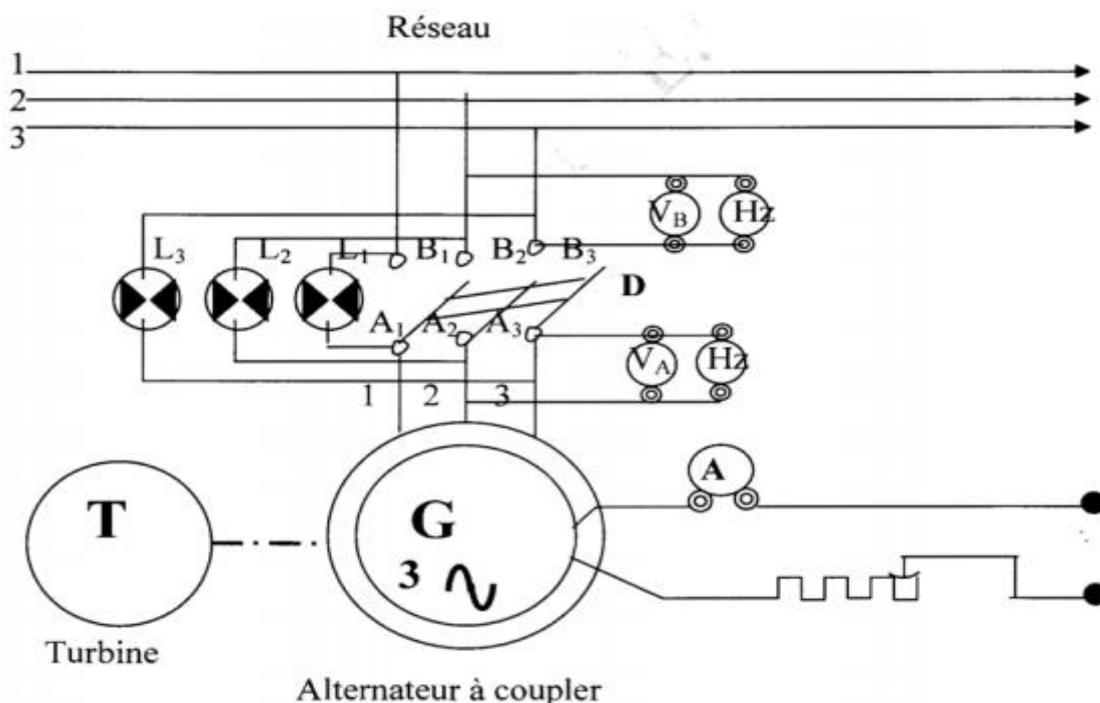


Figure (II. 18) Couplage des alternateurs sur le réseau. [13]

**II.13. Propriétés du moteur synchrone****II.13.1. Les avantages**

- \* Tourne au synchronisme.
- \* Bon rendement à  $\cos\varphi$ .
- \* Pas de limitation de puissance.
- \* Peut servir en compensateur d'énergie réactive pour le réseau.

**II.13.2. Les inconvénients**

- \* Plus coûteuse à l'achat (nécessité d'excitation – synchro-coupleur).
- \* Plus vulnérable (du à l'excitation et au réglage de la tension).
- \* Automatisation plus complexe (désexcitation de la machine par exemple).
- \* Nécessité de contrôler l'isolement de l'excitation et toute grandeur électrique. [21]

**II.14. Technologie des alternateurs**

Les alternateurs comprennent 2 parties :

- \* le stator qui comprend :
  - le circuit magnétique qui canalise le champ magnétique, il est réalisé en tôles feuilletées isolées entre elles,
  - la carcasse dont le rôle est purement mécanique,
  - le bobinage triphasé.
- \* le rotor qui tourne à la même vitesse que le champ statorique (cas de l'alternateur synchrone) ou moins vite (cas de l'alternateur asynchrone) comprend :
  - le circuit magnétique qui doit être en tôles feuilletées, isolées entre elles, dans le cas de l'alternateur asynchrone (à cause des courants de Foucault induits par la différence de vitesse rotor/stator), et massif dans le cas de l'alternateur synchrone),

- l'enroulement rotorique qui est relié au courant d'excitation (cas de l'alternateur synchrone), il peut n'être relié à aucune source extérieure et fermé sur lui-même (cas de l'alternateur asynchrone). [21]

### II.15. Conclusion

Actuellement, la production de l'électricité est basée sur l'utilisation d'un système électromécanique qui s'appelle alternateur, ce qui montre son importance dans le domaine industriel.

Dans ce chapitre, nous avons vu une étude théorique complète concernant l'alternateur, Ce dernier est entraîné par une turbine qui fournit l'énergie mécanique à l'entrée de l'alternateur, celui-ci transforme cette énergie en énergie électrique.

La suite de notre travail qui va présenter dans le chapitre III sera consacrée à modéliser le système turboalternateur et la validation du modèle développé par des tests de simulation.

**Chapitre III :**  
**Modélisation et simulation**  
**d'un TurboAlternateur de 600 MVA**

### III.1. Introduction

La modélisation est une étape importante dans l'analyse et la conception des systèmes. Elle aboutit souvent à un modèle mathématique qui contient plusieurs paramètres inconnus. Des essais expérimentaux sont nécessaires pour identifier ces paramètres.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un modèle mathématique couplé de type circuit électrique. Ce modèle permet l'étude et la simulation du comportement électromécanique de la machine synchrone à rotor bobiné. [15]

### III.2. Hypothèses simplificatrices

Pour la mise en équation du modèle de la machine synchrone permettant l'étude de son comportement en régime dynamique, nous avons retenu les hypothèses simplificatrices suivantes :

On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé est parfaitement feuilleté ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteur, induit, amortisseurs) sont parcourus par des courants.

On admettra que l'ensemble des amortisseurs peut être représenté par deux enroulements amortisseurs d'axe direct dirigé selon l'axe ( $Od$ ), l'autre en quadrature dirigé suivant l'axe ( $Oq$ ).

Tous les harmoniques d'espaces dans les expressions des forces magnétomotrices sont négligés. Cela revient à considérer les inductances et les mutuelles comme la somme d'une valeur constante et d'un terme sinusoïdal éventuel dépendant de la position du rotor par rapport au stator. [26]

### III.3. Modèle de la génératrice synchrone à pôles lisses dans le repère triphasé abc

La Figure (III.1) représente la position spatiale des enroulements de la génératrice synchrone à pôle lisse pour les axes triphasés abc et diphasés  $dq$ . Le stator (induit) se compose de trois phases (a, b, c) identiques déphasées entre elles de  $120^\circ$ , alors que le rotor (inducteur) est constitué d'un enroulement, d'indice  $f_e$  réparti selon l'axe polaire  $d$ .

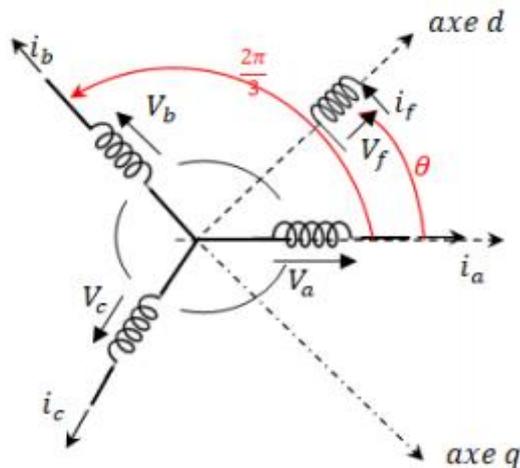


Figure (III.1) Schéma équivalent de la Machine Synchrone Rotor Bobiné à pôles lisses. [15]

### III.3.1. Equations des tensions et des flux magnétiques

On rappelle que dans cette étude, la machine synchrone à pôles lisses est en fonctionnement générateur, avec la convention « récepteur » au rotor et la convention « générateur » au stator. Selon les différentes hypothèses mentionnées au début de cette section, l'alternateur peut être décrit par les équations suivantes :

#### III.3.1.1. Equations de tension

- Au stator

Les équations électriques concernant les variables statorique sont :

$$V_s = - [R_s]. [i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \tag{III.1}$$

Où  $R_s$  est la résistance d'un enroulement statorique.

$$\begin{cases} V_{as} = -R_a \cdot i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = -R_b \cdot i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = -R_c \cdot i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \tag{III.2}$$

- Au rotor

$$[Vr] = [Rr][ir] \frac{d}{dt} [\varphi r]$$

$$Vf = Rf \cdot if + \frac{d}{dt} \varphi f \quad (\text{III.3})$$

### III.3.1.2. Equations de flux magnétiques

Soit  $\theta$  l'angle électrique entre l'axe de l'enroulement rotorique et l'axe de la phase a du rotor, correspondant à un angle mécanique  $\theta'$  tel que  $\theta = P \cdot \theta'$ . Quel que soit le type d'enroulement P désignant le nombre de paires de pôles de la machine.

La relation matricielle entre les flux et les courants est :

$$[\varphi] = L \cdot [i] \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi a \\ \varphi b \\ \varphi c \\ \varphi r \end{bmatrix} \quad [\varphi r] = [\varphi f] \quad \text{et} \quad [is] = \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \\ ir \end{bmatrix}; \quad [ir] = [if] \quad (\text{III.5})$$

En tenant compte des inductances mutuelles et propres établies précédemment, les flux totalisés s'expriment sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [\varphi s] = -[Ls] \cdot [is] + [Lsr] \cdot [ir] \\ [\varphi r] = -[Lrs] \cdot [is] + [Lr] \cdot [ir] \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

De manière plus explicite :

$$\begin{cases} \varphi a = -L.ia + M.\cos\theta.ir \\ \varphi b = -L.ib + M.\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right).ir \\ \varphi c = -L.ic + M.\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right).ir \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

De plus :

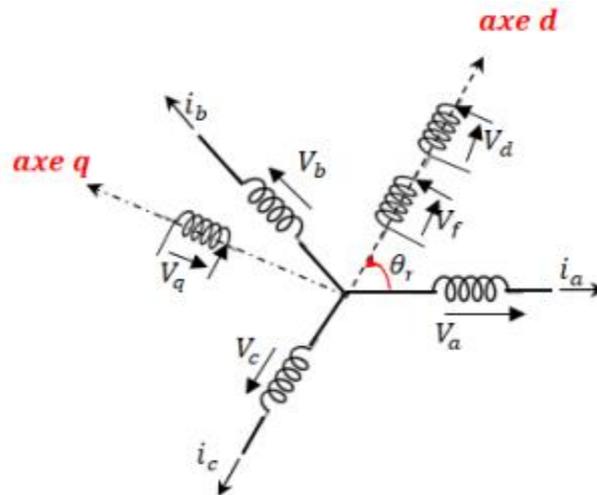
$$\varphi r = Lr.ir + M^t.P.[is] \quad (\text{III.8})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi a \\ \varphi b \\ \varphi c \\ \varphi f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_s & -M_s & -M_s & M.\cos(p\theta) \\ -M_s & -L_s & -M_s & M.\cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -M_s & -M_s & -L_s & M.\cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -M.\cos(p\theta) & -M.\cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -M.\cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \\ if \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

### III.3.2. Modèle de la génératrice synchrone à pôles lisses dans le repère diphasé dq

La simplification du modèle dynamique de la machine est par l'application d'un changement du repère. Grâce à une transformation mathématique, on peut effectuer ce changement, alors elle transforme les trois bobines statoriques déphasées de  $(2\pi/3)$  en deux bobines fictives équivalentes diphasées  $(\pi/2)$  de et situées sur le rotor. Les deux bobines sur les axes  $d$  et  $q$  tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes.

Les variations exprimées dans ce nouveau repère  $dq$ , nous permettent de passer du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine. [15]



**Figure (III.2)** Montre le schéma simplifié de l'alternateur dans le repère de Park. [15]

Le passage du système triphasé au système diphasé est défini par le système d'équations suivantes :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

Avec :

$X$  : Grandeur statorique ou rotorique (représente le vecteur de tension, courant ou flux).

$X_0$  = Composante homopolaire choisie nulle pour un système équilibré.

### III.3.2.1. Equations des tensions

A partir du modèle de la machine électrique généralisée dans le référentiel rotorique, et après simplification des calculs, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_r \cdot \varphi_q \\ V_q = -R_s \cdot i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega_r \cdot \varphi_d \\ V_f = R_f \cdot i_f + \frac{d}{dt} \varphi_f \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$V_d, V_q$  : Composantes de la tension au stator dans le repère de Park ;

$V_f$  : Composantes de la tension rotorique dans le repère de Park ;

$i_d, i_q$  : Composantes du courant statorique dans le repère de Park ;

$i_f$  : Composantes du courant rotorique dans le repère de Park ;

$\varphi_d, \varphi_q$  : Composantes du flux statorique dans le repère de Park ;

$\varphi_f$  : Flux d'excitation ;

$\omega_r$  : Pulsation électrique rotorique.

### III.3.2.2. Equations électromagnétiques

Afin de trouver la représentation d'état nous adoptons les écritures suivantes :

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}; [\varphi_r] = [\varphi_f]; [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; [i_r] = [i_f] \quad (\text{III.14})$$

$$\begin{cases} \varphi d = -Ld.id + Msf.if \\ \varphi q = -Lq.iq \\ \varphi f = Lf.if - Msf.id \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

$M_{sf} = L_{sr}$  : Inductance mutuelle entre l'enroulement de champ (enroulement d'excitation) et l'enroulement statorique d'axe  $d$  ;

Pour générateur synchrone à pôles lisses  $L_s = L_d = L_q$  : inductance statorique,

$L_f$  : Inductance rotorique.

### III.3.2.3. Equations du couple électromagnétique

Pour l'obtention d'une modélisation complète de l'alternateur, nous ajoutons aux équations électriques, l'équation mécanique de la machine définie par la relation suivante :

$$J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = -T_e - f_v \cdot \Omega_m + T_{mec} \quad (\text{III.16})$$

$T_e$  est le couple électromagnétique de l'alternateur à pôles lisses, son expression dans le repère de Park est donnée par :

$$T_e = p \cdot (\varphi d \cdot iq - \varphi q \cdot id) \quad (\text{III.17})$$

### III.3.3. Représentation d'état de la génératrice synchrone à pôles lisses

Le modèle de la génératrice synchrone à pôles lisses, sous forme d'équation d'états dans le repère  $dq$ , est non linéaire, multi variable et fortement couplé, il s'écrit sous la forme : [14]

$$\begin{cases} [\dot{X}] = f(t, X, U) \\ [y] = [C] \cdot [X] \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Avec :

$[U] = [V_d \ V_q \ V_f]^t$  : Vecteur de commande,

$[y]$  : Vecteur de sortie ;

$[X] = [\varphi_d \ \varphi_q \ \varphi_f \ \omega]^t$  : Vecteur d'état.

Sous la forme développée :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \varphi_d = R_s \cdot i_d + \omega_r \cdot \varphi_q + V_d \\ \frac{d}{dt} \varphi_q = R_s \cdot i_q - \omega_r \cdot \varphi_d + V_q \\ \frac{d}{dt} \varphi_f = -R_f \cdot i_f + V_f \\ \frac{d}{dt} \Omega_m = (-T_e - f_v \cdot \Omega_m + T_{mec}) / J_t \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \varphi_d = R_s \frac{\varphi_d}{L_s} + \omega_r \cdot \varphi_q + V_d \\ \frac{d}{dt} \varphi_q = R_s \frac{\varphi_q}{L_s \sigma} + \frac{R_s M_{sf}}{L_f L_s \sigma} \varphi_f + V_q - \omega_r \cdot \varphi_d \\ \frac{d}{dt} \varphi_f = \frac{-R_f M_{sf}}{L_f L_s \sigma} \varphi_q - \frac{R_f}{L_f \sigma} \varphi_f + V_f \\ \frac{d}{dt} \Omega_m = \frac{(-T_e - f_v \cdot \Omega_m + T_{mec})}{J_t} \end{array} \right. \quad (III.19)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M_{sf}^2}{L_s L_f} \quad (III.20)$$

### III.4. Simulation d'un TurboAlternateur

A titre d'exemple on prendra comme modèle pour la simulation une turbine à gaz couplé à la machine synchrone (Alternateur) 600MVA 20kv 3000tr/mn connecté sur un réseaux électrique via un transformateur.

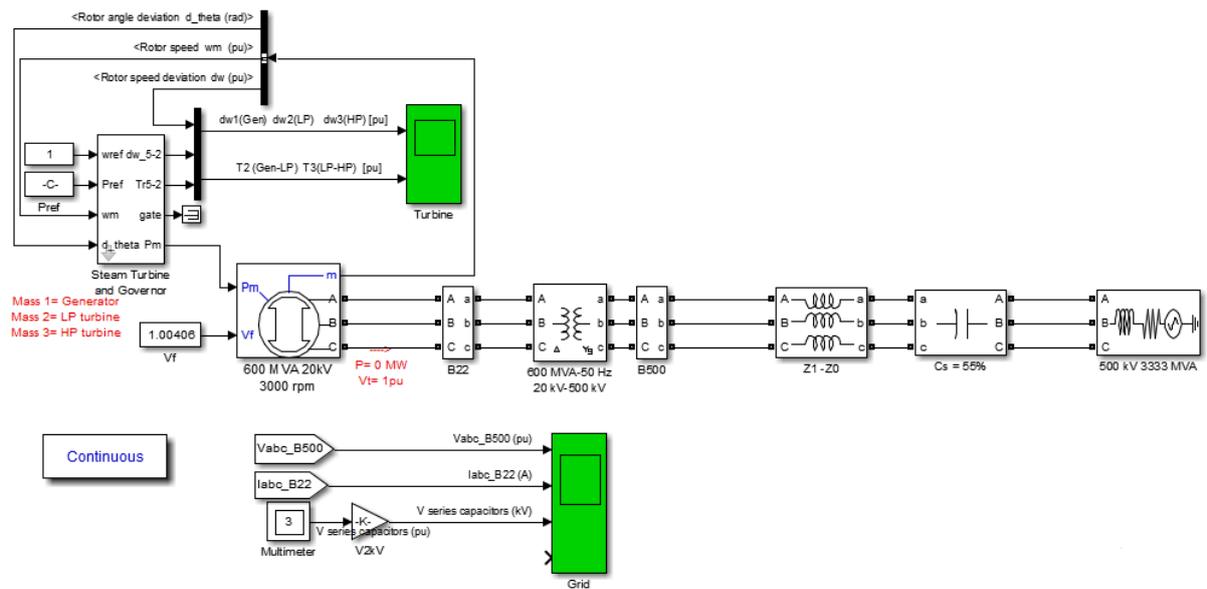


Figure (III. 3) Schéma Bloc Générale de simulation turbo alternateur.

### IV.5. Résultats de simulation d'un turbo-alternateur

Afin de faciliter la lecture des courbes le système par unité a été employée

1) Evolution de la tension abc :

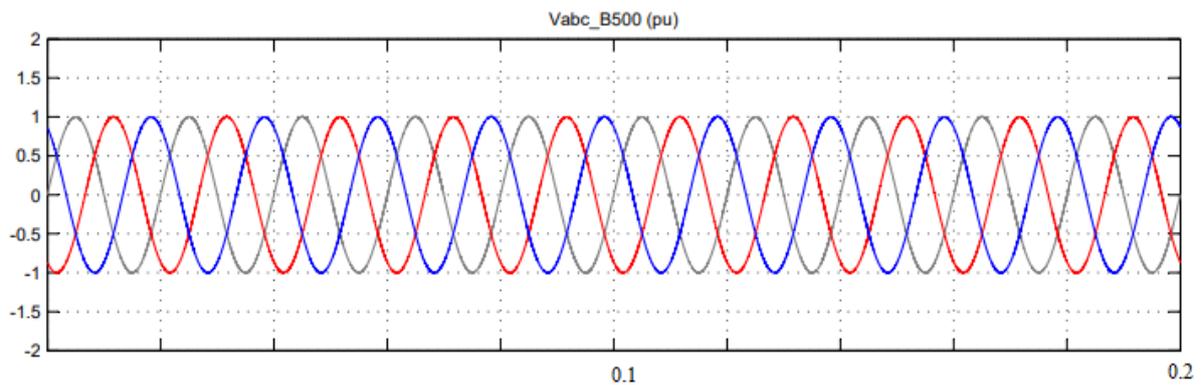
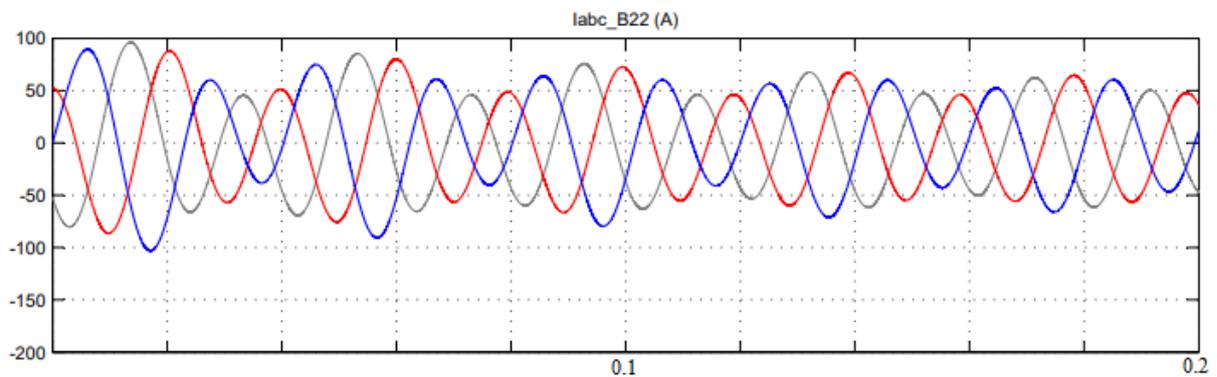


Figure (III. 4) Les trois tensions triphasées équilibre délivrée par alternateur.

2) Courants statoriques abc :

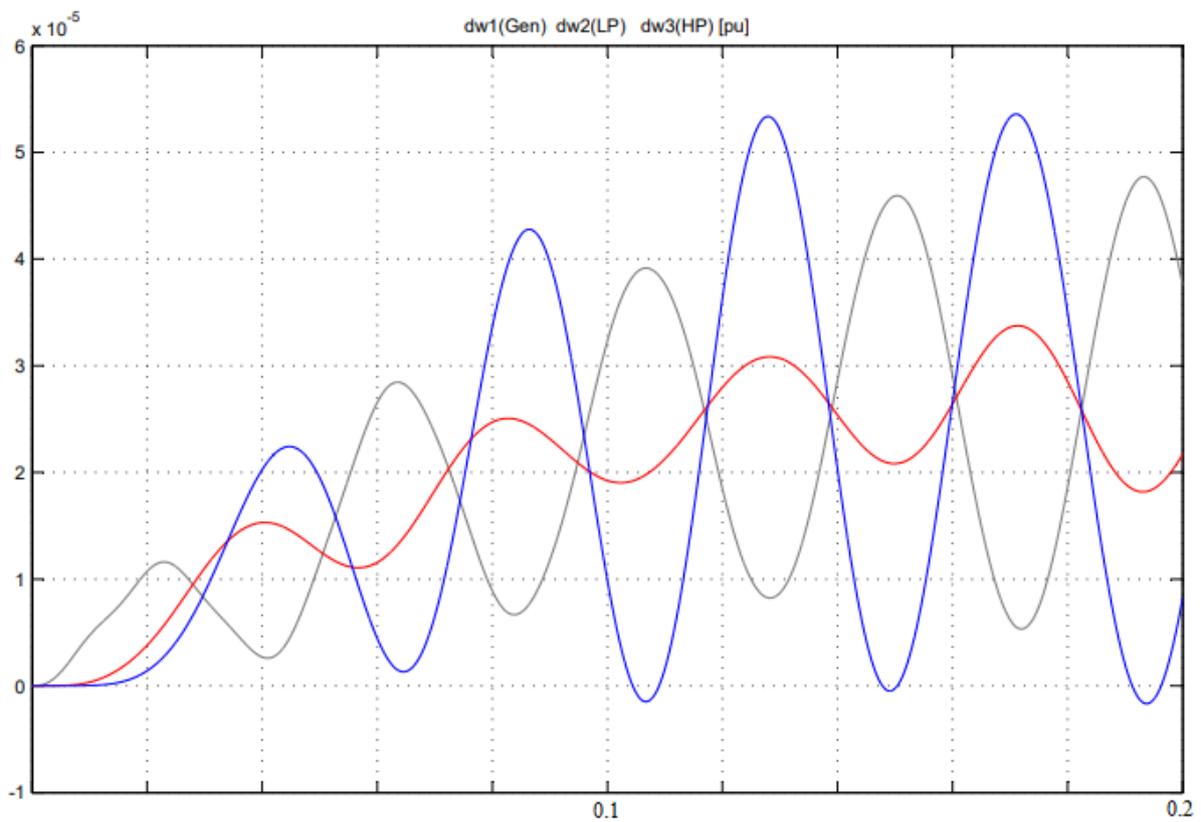


**Figure (III. 5)** Les trois courants statoriques.

Les tensions triphasées le temps pris varie entre 0 et 0.2s L'évolution des courants triphasés

La turbine à gaz et le gouverneur un moteur tandem-composé complet de gaz, y compris un système réglant la vitesse, une turbine à gaz à quatre étages, et un axe avec les jusqu'à quatre masses

Le système régulateur de vitesse se compose d'un régulateur proportionnel, d'un relais de vitesse, et d'un servomoteur commandant l'ouverture de porte. Il est semblable à un des modèles proposés dans Matlab.

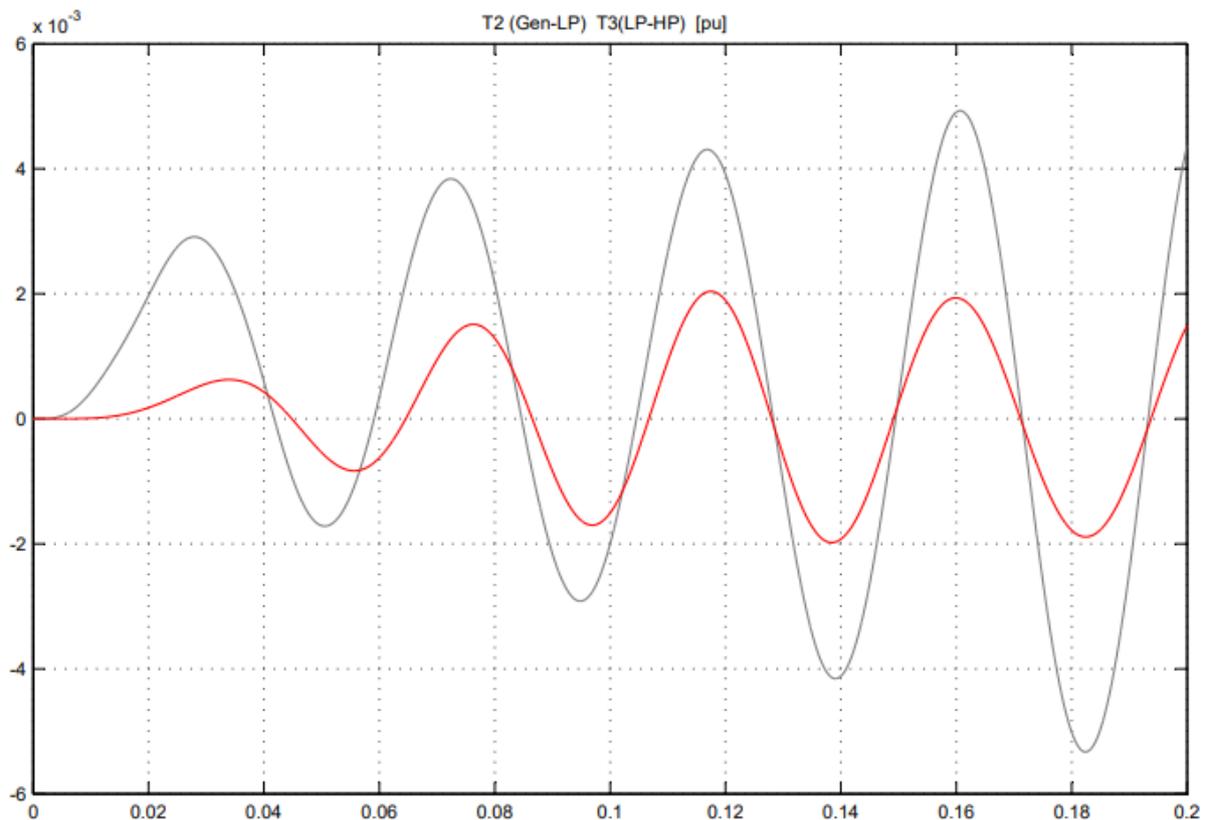


**Figure (III. 6)** La déviation de vitesse de rotor.

dw1 : La déviation de vitesse de rotor du générateur (Rouge) varie entre 0.02 et 0.03

dw2: La déviation de vitesse de rotor de la turbine basse pression (Bleu) 0.01 et 0.035

dw3: La déviation de vitesse de rotor de la turbine haute pression (Gris) 0.01 et 0.03



**Figure (III. 7)** Le couple de générateur et turbine.

T2 : couple générateur basse pression (Rouge)

T3 : couple turbine basse pression haute pression (Gris)

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation de machine synchrone dans le repère biphasé de Park. Le modèle de la machine synchrone à rotor bobiné à pôles lisse est détaillé.

Nous avons validé ce modèle par des essais de simulation dans le cas où le turboalternateur est en charge.

Les résultats de simulation de turboalternateur montrés les tensions sont parfaitement sinusoïdales dans le régime permanent

### Conclusion générale

Le turboalternateur est un système électromécanique qui est composé par deux sous-systèmes, le premier est la turbine et son principe de fonctionnement est de convertir l'énergie thermique fournie par la chambre de combustion en énergie mécanique et le deuxième est l'alternateur qui transforme cette énergie mécanique en énergie électrique.

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à la modélisation et la simulation d'un turbo alternateur

La modélisation du turboalternateur utilisé comme un outil de simulation ainsi le montré dans notre travail, le modèle extrait est un système triphasé et pour simplifier ce dernier, nous avons utilisé la transformation de Park pour le convertir vers un système biphasé. Ce modèle est validé par des tests de simulation par l'utilisation du logiciel Matlab Simulink.

Dans les travaux futurs, il est aussi important d'étudier et évaluer la sureté de fonctionnement du turboalternateur (fiabilité, maintenabilité, sécurité et disponibilité) qui peuvent aider à déterminer et améliorer le niveau de la maintenance.

## Références bibliographiques :

- [1] Dr. TEBANI HOCINE, « Production de l'Energie Electrique » Polycopié de Cours, Université Hassiba Benbouali Chlef 2019-2020.
- [2] ELKALI laid «Etude et modélisation d'un turbo-alternateur » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2014.
- [3] <https://www.techno-science.net/definition/262.html>
- [4] BENDALI Manel et CHAOUAT Mohamed « système de commande de démarrage d'une turbine à gaz à l'aide d'API et visualisation sur un HMI » mémoire d'ingénieur, université de blida, 2017
- [5] Alstom document turbine à Gaz centrale électrique (Sharikat Kahraba Terga).
- [6] Document Alstom (Switzerland) Ltd, '' Présentation KA26 ENDESA France 19 avril 2007 P26 ''.
- [7] Document Alstom (Switzerland) Ltd, '' Spécification Technique du Bloc Thermique de la TG – Terga 2009 ''.
- [8] Document Alstom (Switzerland) Ltd, ''cours de formation-220053fr composant principaux d'un groupe turbo-alternateur 2009''.
- [9] Document Alstom- ''220331frB système d'air de refroidissement et d'étanchéité 2009''.
- [10] Document Alstom operating maintenance Algérie ''220324frD système de graissage et huile de secours 2009''.
- [11] Document Turbine a gaz Technologie et fonctionnement MT TGA – 02472A\_F – Rév 0 ENSPM Formation Industrie – IFP Training 08/06/2005.
- [12] Document Alstom- '' HTGG 422 Caractéristiques techniques de l'alternateur 50WT21H-120''.
- [13] Document Technique Alternateur Fonctionnement &Exploitation Ecole Technique De Blida Service Technique et Pédagogique Institut de formation en électricité et gaz.
- [14] <https://www.coursehero.com/file/26135252/cours-alternateurpdf/>
- [15] Kheireddine MATI, Ahmed BOUDAHRI « Modélisation et identification hors ligne des paramètres d'une machine synchrone à rotor bobiné de faible puissance. » mémoire d'ingénieur, université de Tlemcen, 2020.
- [16] NAIMI OUARDA, BOUAM FATMA « Calcul et exploitation d'un Turboalternateur » mémoire de fin d'étude de MASTER, Université Tizi-Ouzou, 2008.
- [17] Alstom document (Fonctionnement de la turbine à gaz/ Dispositif de Maintenance électrique).

- [18] Thyristor Theory and Design Considerations – ON Semiconductor, SCILLC, hbd855/d. 2006.
- [19] ABB Switzerland Ltd document Maintenance préventive SES de centrale électrique Terga.
- [20] Document Alstom (Switzerland) Ltd, ‘‘Cours de formation Construction de l’alternateur refroidi à l’hydrogène et composants principaux’’.
- [21] Document Les Cahiers Techniques de Microener Protection des generateurs cahier N°10.
- [22] Bapio BAYALA, Cours La Machine Synchrone, - techniciens supérieurs – ingénieurs électrotechniciens
- [23] F.milsant, cours d’électrotechnique à l’usage de l’enseignement supérieur, 1993.
- [24] J . NIARD, Machines électriques, paris 1983, P.P.10-12.
- [25] Guy Chateigner et all « manuel de génie électrique» livre, édition Dunod, Paris, France, 2006.
- [26] Mustapha LABBACI, Samir MEZIANE « Modélisation et simulation d’un ensemble turbine-alternateur en mode isochrone. » mémoire de Fin d’Etudes de MASTER, Université Tizi Ouzou, 2015.
- [27] Document Alstom - Shariket Kahraba Terga S.p.a. ‘‘ Qu’est-ce qu’une centrale\_terga/ 06-06-2008’’.
- [28] Document Société de production de l’électricité Boutlelis SPE/PPO TV/TG.
- [29] ABB Switzerland Ltd document Maintenance préventive SES de centrale électrique Terga.
- [30] Société ABB (Système MEGATROL Manuel d’utilisation).