



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Filière : Electromécanique  
Electromécanique

Réf. : /

---

Présenté et soutenu par :  
**Zaouch Lazhar & Zanouda Achraf Abd ELKarim**

Le : mercredi 29 juin 2022

## Etude et Modélisation d'un turbo- alternateur

---

### Jury :

Pr.	Hadri Amel	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	khelili Fatiha	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Becha Habiba	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021-2022



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Filière : Electromécanique  
Electromécanique

Réf. : /

---

## Etude et Modélisation d'un turbo-alternateur

Le : .....

**Présenté par :**

**Zaouch Lazhar**

**Zanouda Achraf Abd ELKarim**

**Avis favorable de l'encadreur :**

**khelili Fatiha**

*signature*

**Signature Avis favorable du Président du Jury**

**Hadri Amel**

*Signature*

**Cachet et signature**

# **DEDICACE**

*Nous dédions ce projet à toutes les personnes qui nous ont accompagnés, Par une parole, un geste ou même une pensée,*

*A toute celles qui ont contribué de près ou de loin à cette*

*Finalité :*

*A nos très chers parents qui n'ont cessé de nous aider et de nous encourager durant tout notre parcours et qui nous ont permis d'être aujourd'hui ce qu'on est,*

*A nos frères qui nous ont soutenus et encouragés tous au long dénoter projet*

*A nos sœurs, qui nous ont toujours soutenus et poussés à donner le meilleur de nous-mêmes,*

*A nos chères amies*

# *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné*

*Le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent  
mémoire.*

*A travers ce modeste travail,*

*Nous exprimons nos sincères remerciements :*

*à nos parents pour leur contribution à*

*Chaque travail qu'ils ont fait.*

*Pour notre mon encadreur, le Dr **Khalili Fatiha***

*Pour l'aide que vous nous avez apportée.*

*Nos sincères remerciements aux membres du jury*

*A tous les professeurs du département*

*Ingénierie électrique.*

*A la fin nous tenons à remercier tous nos collègues d'études*

*Sans oublier ceux qui ont étroitement participé*

<i>DEDICACE</i> .....	<i>A</i>
<i>REMERCIEMENT</i> .....	<i>B</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i> .....	<i>H</i>
<i>Liste de symbole</i> .....	<i>K</i>
<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i> .....	<i>L</i>
<i>Résumé</i> .....	<i>M</i>
<i>Introduction Générale</i> .....	<i>2</i>

## Sommaire

### **Chapitre I. Généralité sur la turbine à gaz**

I .1.Introduction : .....	4
I .2. Le turbo alternateur : .....	4
I .3.Généralités sur la turbine a gaz : .....	5
I .4.Types de turbine à gaz :.....	5
I .5.Eléments principaux de la turbine à gaz : .....	5
I .5.1.Section du compresseur.....	6
I .5.2. Section de combustion: .....	7
I .5.3. Section de la turbine:.....	8
I .6.Principe de fonctionnement de la turbine à gaz : .....	9
I.7. Classification des turbines à gaz .....	9
I.7.1. Par mode de construction .....	9
I.7.1.1.Selon la disposition de l’arbre :.....	10
I.7.2. Par mode de travail :.....	11
I.7.2.1. Turbine à action.....	11
I.7.2.2. Turbine à réaction .....	11
I.7.3. Par mode de fonctionnement thermodynamique : .....	12
I.7.3.1. Turbine à gaz à cycle ouvert : .....	12
I.7.3.2. Turbine à cycle simple : .....	12
I.7.3.3. Turbine à cycle régénéré : .....	12

I .8. Technologie des turbines à gaz .....	12
I .9. Turbine à gaz à circuit ouvert.....	12
I .10. Turbine à gaz à circuit fermé.....	14
I .11. Cycle combine.....	15
I .12. Turbomoteur : définition et principe de fonctionnement.....	16
Conclusion .....	17

## **Chapitre II Etude théorique d’alternateur**

II.1 Introduction .....	19
II.2. Construction de l’alternateur.....	19
II.2.1 Stator .....	20
II.2.1.1 La carcasse .....	20
II.2.1.2 Le caisson des bornes .....	21
II.2.1.3 Le circuit magnétique .....	21
II.2.1.4 Le Bobinage .....	21
II.2.1.5 L’enroulement stator.....	21
II.2.2 Rotor.....	22
II.2.2.1 L’arbre.....	23
II.2.2.2 L’enroulement du rotor.....	23
II.2.2.3 Les frettes et les plateaux porte-frettes .....	24
II.2.2.4 Les connexions d’excitation .....	24
II.2.2.5 Les ventilateurs axiaux .....	24
II.2.3 Système de refroidissement de l’alternateur .....	24
II.3 Principe de fonctionnement des alternateurs .....	26
II.3.1 Fonctionnement d’un alternateur monophasé.....	26
II.3.2 Fonctionnement d’un alternateur triphasé .....	28
II.4 Champs alternatifs et champs tournants.....	30
II.4.1 Champ alternatif d’une bobine parcourue par un courant Alternatif.....	31
II.4.2 Champ des courants triphasés circulant dans un enroulement triphasé.....	33

II.5	Système d'excitation de l'alternateur.....	35
II.5.1	Le rôle du système d'excitation .....	35
II.5.2	Classification des systèmes d'excitation.....	36
a)	Système d'excitation à courant continu .....	36
b)	Système d'excitation à courant alternatif .....	36
c)	System deexcitation statique .....	37
II.6	Les forces electrometries.....	37
II.6.1	Forces électromotrices théoriques .....	37
II.6.2	Forces électromotrices réelles .....	38
II.6.3	Réaction magnétique d'induit .....	38
II.7	Modèle de Behn-Eschenburg d'un alternateur .....	38
II.8.	Diagramme de Fresnel .....	41
II.9	Couplage des alternateurs .....	41
II.9.1	Couplage d'un alternateur à un réseau.....	41
II.9.2	Fonctionnement en parallèle des alternateurs.....	42
II.10.	Analyse de fonctionnement d'un alternateur .....	43
II.10.1.	Caractéristique à vide.....	43
II.10.2	Caractéristique en charge.....	44
II.11-	Bilan des puissances d'un alternateur.....	45
II.11.1.	Puissance absorbée.....	46
II.11.2.	Puissance utile.....	46
II.11.3.	Bilan des pertes .....	46
II.11.3.1.	Pertes de puissance mesurable.....	46
II.11.3.2.	Pertes supplémentaires.....	47
II.11.4	Rendement d'un alternateur.....	47
II.11.4.1	Rendement vrais .....	47
II.11.4.2.	Rendement approché.....	47
	Conclusion .....	48

## **Chapitre III. Modélisation d'un turboalternateur**

III.1. Introduction.....	50
III.2. Micro turbine à gaz .....	50
III.3. Éléments constitutifs.....	51
-L'entrée.....	51
-Le compresseur.....	51
-La chambre de combustion .....	51
-La turbine .....	51
-La tuyère.....	52
III.4. Description de principe.....	52
III.5. Etude des différents modèles .....	52
III.5.1. Modèle du type Rowe.....	53
III.5.2. Modèle du type Caporale.....	54
III.5.3. Modèle du type Schobert.....	54
III.6. Modélisation d'un micro turbine à gaz.....	54
III.7. Machine synchrone à aimants permanents .....	56
III.7.1. Le stator .....	57
III.7.2. Le rotor .....	58
III.7.2.1. Les rotors à pôles lisses .....	58
III.7.2.2. Rotor à pôles saillants.....	59
III.8. Caractéristiques d'une machine synchrone .....	59
III.9. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	59
III.9.1 Hypothèses simplificatrices.....	60
III.9.2. Structure générale d'une MSAP .....	60
III.9.3. Mise en équations de la machine.....	61
III.9.4. Equations électriques.....	62
III.9.5. L'équation magnétique.....	62
III.9.6. Passage au repère de Park.....	63
III.9.7. Choix du référentiel .....	65
III.9.7.1. Référentiel lié au stator.....	65

III.9.7.2. Référentiel lié au rotor.....	66
III.9.7.3. Référentiel lié au champ tournant .....	66
III.10. Modèle de la machine synchrone à aimant permanent dans le repère de Park .....	67
III.10.1. Equations électriques .....	67
III.10.2. Equations magnétiques .....	68
III.10.3. Expression du couple électromagnétique .....	68
III.10.4. Equations mécaniques .....	70
III.11. Simulation de l’alternateur à aimant permanent.....	70
III.11.1. Simulation de l’alternateur à vide.....	70
III.11.2. Schéma Bloc de simulation .....	71
III.11.2.1. Résultats de simulation de l’alternateur à vide .....	71
III.11.1.2. Interprétation des résultats.....	72
III.11.2. L’alternateur alimente une charge .....	73
III.11.2.1. Equations d'état.....	74
III.11.2.2 Schéma Bloc de simulation de l’alternateur en charge .....	75
III.11.2.3. Résultats de simulation.....	75
III.11.2.4. Interprétation des résultats.....	77
Conclusion .....	78
<i>Conclusion générale</i> .....	80
Annexe .....	81
Les références .....	82

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

<b>Fig. I.1</b> Le système turbo-alternateur.....	4
<b>Fig. I.2.</b> Schéma représente les éléments principaux d'une turbine à gaz.....	6
<b>Fig. I.3.</b> Schéma représente la position de compresseur axial dans une turbine à gaz..	6
<b>Fig. I.4.</b> Schéma représente le Rotor et le Stator d'un compresseur axial.....	7
<b>Fig. I.5.</b> Schéma représente la position chambre de combustion dans un turbine à gaz8	
<b>Fig. I.6.</b> Schéma représente la directrice et la roue de turbine.....	8
<b>Fig. I.7.</b> La variation de la pression et de température dans les différentes sections de la TAG aux phases de fonctionnement.....	9
<b>Fig. I.8.</b> Turbine à gaz à un seul arbre.....	10
<b>Fig. I.9.</b> Turbine à gaz bi-arbre.....	11
<b>Fig. I.10</b> Turbine à gaz à cycle simple et à un seul arbre.....	13
<b>Fig. I.11</b> Cycle théorique.....	13
<b>Fig. I.12 :</b> Temps nécessaire pour que le groupe prenne sa charge.....	14
<b>Fig. I.13</b> Turbine à gaz à un seul arbre à circuit fermé.....	15
<b>Fig. I.14:</b> Schéma d'un cycle combiné.....	16

## Chapitre II

<b>Fig. II.1</b> Coupe d'un stator.....	20
<b>Fig. II.2</b> Enroulement du TIB-200-MT3 (alternateur de la centrale thermique de Jijel).....	22
<b>Fig. II.3</b> type des rotor (pole lisse (A), pole saillant (B)).....	23
<b>Fig. II.4</b> Circuit de refroidissement de l'alternateur.....	25
<b>Fig. II.5</b> Spire stator MN.....	26
<b>Fig. II.6</b> Sens du courant dans MN.....	27
<b>Fig. II.7 :</b> Champ H d'un rotor.....	27
<b>Fig. II.8</b> Positions du rotor .....	28
<b>Fig. II.9</b> Stator triphasé.....	29
<b>Fig. II.10</b> Force électromotrice d'un alternateur triphasé .....	30
<b>Fig II.11</b> Bobine à deux spires .....	31

<b>Fig. II.12</b> la valeur du courant $i$ pendant une période.....	31
<b>Fig. II.13</b> Variation du champ magnétique pendant une période .....	32
<b>Fig. II.14</b> Enroulement triphasé.....	33
<b>Fig. II.15</b> Position des champs tournants H2 et H'2 .....	33
<b>Fig II.16</b> Position des champs tournants H3 et H3' .....	34
<b>Fig. II.17</b> Champs tournants .....	34
<b>Fig. II.18</b> le schéma du Système d'excitation d'une machine synchrone .....	36
<b>Fig. II.19</b> Modèle équivalent de BehnEshembourg.....	38
<b>Fig. II.20</b> mesures de la résistance d'induit .....	39
<b>Fig. II.21</b> diagrammes de Behn-Eschenburg.....	40
<b>Fig.II.22</b> détermination des paramètres de Behn-Eshembourg .....	40
<b>Fig. II.23</b> Diagramme de Fresnel.....	41
<b>Fig.II.24</b> Schéma de couplage d'un alternateur à un réseau.....	42
<b>Fig. II.25</b> caractéristiques à vide.....	43
<b>Fig. II.26</b> Caractéristiques d'un alternateur en charge .....	44
<b>Fig. II.27</b> Caractéristique de réglage .....	45
<b>Fig. II.28</b> Bilan des puissances d'un alternateur .....	45

### Chapitre III

<b>Fig. III.1</b> Micro turbine à gaz.....	50
<b>Fig. III.2:</b> modèle amélioré d'une turbine à gaz.....	53
<b>Fig. III.3</b> Modèle de la micro turbine .....	55
<b>Fig. III.4 :</b> stator et rotor de la machine synchrone à aimants permanents.....	57
<b>Fig.III.5</b> rotors à pôles lisses.....	58
<b>Fig. III.6</b> Rotor à pôles saillants.....	59
<b>Fig. III.7</b> schéma d'une machine synchrone à aimant permanent à étudier.....	60
<b>Fig.III.8</b> Schéma général de la machine synchrone.....	61
<b>Fig. III.9</b> Naissance du repère de Park.....	64
<b>Fig. III.10</b> Représentation des tensions triphasées et leurs équivalences de systèmes de tensions diphasées tournant (dq0).....	64
<b>Fig. III.11</b> Schéma bloc de simulation de l'alternateur à vide.....	71

<b>Fig.III.12</b> : Résultats de simulation de l’alternateur à vide.....	72
<b>Fig. III.13</b> Bloc de simulation de l’alternateur en charge.....	75
<b>Fig. III.14</b> Résultats de simulation de l’alternateur en charge.....	77

## *Liste de symbole*

$e, e1, e2$	La force électromotrice engendrée dans le conducteur
$H$	Le champ magnétique produit par le rotor
$\omega$	Vitesse du rotor
$i$	Le courant d'excitation de l'alternateur monophasé
$E$	La force electrometric
$f$	Fréquence
$N$	Nombre total de conducteurs
$\Phi$	Flux total sous un pole
$p$	Nombre pair de pole
$Kd$	Facteur de distribution
$Kf$	Facteur de forme
$K$	Coefficient de Kapp $2,22KdKf$
$[X]$	Soit $E_{1,2,3}$ $V_{1,2,3}$ $I_{1,2,3}$ sent des grandeurs complexe pour représentation vectoriel
$Ls$	Inductance synchrone
$Xs$	Réactance synchrone
$\Omega$	Vitesse de rotation des champs tournant en rad/s
$n$	Vitesse de rotation des champs tournant en tr/s
$U$	Tension composée
$V$	Tension simple
$I$	Courant de charge
$I_{ex}$	Courant d'excitation
$Rr$	La résistance du circuit d'excitation
$P$	La puissance active
$Q$	La puissance réactive
$Pa$	Puissance absorbée par l'alternateur
$P_{js}$	Les pertes-joule dans l'enroulement induit
$P_{jr}$	Les pertes-joule dans l'enroulement inducteur
$P_f$	Les pertes-fer
$P_m$	Les pertes mécaniques
$\eta_{vrai}$	Rendement vrai
$\eta_{approché}$	Le rendement approche
$\dot{m}_f$	Le débit de masse de gaz
$\dot{m}_0$	Le débit de masse d'air
$\dot{m}_c$	Le débit de masse d'air à la sortie du compresseur
$\dot{m}_{cc}$	Le débit de masse d'air du compresseur est à l'entrée de la chambre de combustion
$\dot{m}_f$	Le débit de masse de fuel est à l'entrée de la chambre de combustion

$\dot{m}_T$	Le débit de masse d'air de la turbine
$C_p$	Le coefficient de puissance thermique.
$T_a$	La température ambiante du compresseur
$T_c$	La température à la sortie du compresseur
$T_{cc}$	La température en sortie de la chambre de combustion.
$T_T$	La température en sortie de la turbine
$P_{th,c}$	La puissance thermique engendrée dans le compresseur
$P_{m,c}$	La puissance mécanique du compresseur
$P_{th,cc}$	La puissance thermique générée dans la chambre de combustion
$P_{th,T}$	La puissance thermique engendrée dans la turbine
$P_{m,T}$	La puissance mécanique de la turbine
$P_{sma}$	La puissance mécanique en sortie de la micro turbine à gaz
$C_m$	Le couple de turbine ou moteur
$p$	Le nombre de paire de pôles de la machine.
$V_{abcs}$	Tension de phases satiriques
$v_{ds}, v_{qs}$	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
$i_{abcs}$	Courant de phases satiriques
$i_{ds}, i_{qs}$	Composantes du courant satirique dans le repère de Park
$\varphi_{abcs}$	Flux traversant les bobines satiriques
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Composantes du flux satirique dans le repère de Park
$R_s$	Résistance satirique
$L_d$	Inductance satirique directe
$L_q$	Inductance satirique quadratique
$\omega_r$	Pulsation électrique rétorque
$\varphi_f$	Flux d'excitation des aimants permanents
$C_{em}$	Le couple électromagnétique
$C_m$	Couple moteur
$C_f$	Couple de frottements visqueux
$F$	Coefficient des frottements visqueux
$J$	Moment d'inertie de la machine

## LISTE DES ABREVIATIONS

f.é.m: Force Electromotrice.

F.M.M : Force Magnétomotrice.

MTG : Micro Turbine A Gaz

MSAP : Machine Synchrone A Aimants Permanents

## Résumé

Dans nos recherches, nous nous sommes penchés sur le générateur à turbine, qui est un système très basique dans le domaine de la production d'énergie électrique. Le turbogénérateur se compose de deux parties : la turbine et l'alternateur. La turbine convertit l'énergie thermique en énergie mécanique, que le générateur convertit ensuite en énergie électrique. Nous avons créé un système d'équations différentielles en modélisant ce système selon son fonctionnement. Ces équations sont ensuite converties en un modèle de simulation à l'aide de Matlab Simulink. Nous avons validé ce modèle en exécutant des simulations à vide et en charge avec un générateur à turbine. Les résultats de l'étude ont été discutés.

### Mots clés :

Alternateur, turbine, modélisation, simulation.

## Summary

In our research, we looked at the turbine generator, which is a very basic system in the field of electric power production. The turbine generator consists of two parts: the turbine and the alternator. The turbine converts thermal energy into mechanical energy, which the generator then converts into electrical energy. We have created a system of differential equations by modeling this system according to how it works. These equations are then converted into a simulation model using Matlab Simulink. We validated this model by running simulations at no-load and load conditions with a turbine generator. The results of the study were discussed.

## ملخص

في بحثنا ، نظرنا في المولد التوربيني ، وهو نظام أساسي للغاية في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية. يتكون المولد التوربيني من جزأين: التوربين والمولد. يحول التوربين الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية ، والتي يحولها المولد بعد ذلك إلى طاقة كهربائية. لقد أنشأنا نظامًا من المعادلات التفاضلية من خلال نمذجة هذا النظام وفقًا لكيفية عمله. ثم يتم تحويل هذه المعادلات إلى نموذج محاكاة باستخدام Matlab Simulink. لقد تحققنا من صحة هذا النموذج من خلال تشغيل عمليات المحاكاة في حالات عدم التحميل والحمل باستخدام مولد التوربينات. تمت مناقشة نتائج الدراسة.

### الكلمات الدالة:

مولد، توربين، نمذجة، محاكاة

***Introduction***  
***générale***

# **Introduction générale**

---

## **Introduction générale**

Le turbo-alternateur est le cœur de la production de l'énergie électrique ce qui donne une importance à sa sûreté de fonctionnement et la mis hors danger de ces différents éléments. La protection contre les différentes anomalies qui peuvent avoir lieu est indispensable pour empêcher la rupture de fonctionnement. Cette rupture provoque des conséquences couteuses pour le secteur industriel.

En raison de son importance dans la génération de l'énergie électrique utilisée dans la vie quotidienne, nous étions intéressés à étudier et à Modélisation d'un turbo-alternateur. Notre mémoire est divisé en trois parties pour atteindre cet objectif :

Pour offrir un concept clair de cette dernière, le premier chapitre traitera d'une généralisation sur la turbine à gaz, sa composition, son fonctionnement et ses classifications.

Le deuxième chapitre présentera un examen théorique de l'alternateur afin de comprendre sa construction et de démontrer son principe de fonctionnement, ainsi que ses applications et objectifs industriels.

Le troisième chapitre est une section particulière de notre mémoire dans laquelle nous exposerons le modèle et discuterons de notre rôle dans ce domaine. Enfin, une conclusion générale sera présentée à la fin de l'étude, résumant les résultats et leur importance.

# *Chapitre I*

*Généralité sur la  
turbine à gaz*

### I.1.Introduction

-La turbine à gaz c'est un moteur thermique qui appartient à la famille des turbomachines, elle convertit de l'énergie mécanique au moyen de mécanismes à rotor à partir de l'énergie chimique contenue dans un combustible, cette énergie est convertie en énergie électrique à l'aide d'un générateur, ou convertie en énergie de pression par le compresseur ou la pompe .

Ses principaux avantages sont [1]:

- Puissance spécifique élevée (kW/kg).
- Installation simple (la principale servitude est la qualité et le volume de l'air aspiré).
- disponibilité élevée (> 95 %).
- Poly-combustible (gaz, fioul, ...).
- Exige peu de fluide de refroidissement (eau ou air).
- Accepte les conditions climatiques extrêmes (moyennant des adaptations sur l'aspiration d'air et les auxiliaires combustible et lubrification).
- Fonctionnement sous conduite et surveillance automatisée.
- Possibilité de mise en régime rapide (quelques dizaines de minutes).

### I.2. Le turbo alternateur

Les alternateurs de grande puissance ou Turbo alternateur (Appellation donnés généralement aux alternateurs entraînés par des turbines à vapeur ou à gaz) se distingue des autres plus petits par leurs puissances en premier lieu, et après par la technologie utilisée soit pour la construction des pièces maitresses ou pour le refroidissement des différents éléments de la machine. [2]

La figure suivante présente le système turbo-alternateur:

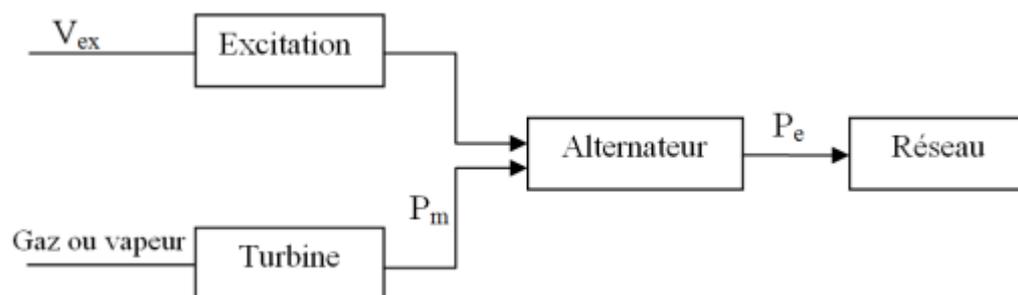


figure. I.1 Le système turbo-alternateur [3].

### I .3. Généralités sur la turbine a gaz

Une turbine à gaz, appelée aussi 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 (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure. Les progrès obtenus dans le domaine de la technologie des matériaux et dans la recherche approfondie sur la combustion ont donné comme résultats des améliorations rapides des performances en termes de puissance spécifique et rendement en augmentant la température maximale dans le cycle thermodynamique.[4].

### I .4. Types de turbine à gaz

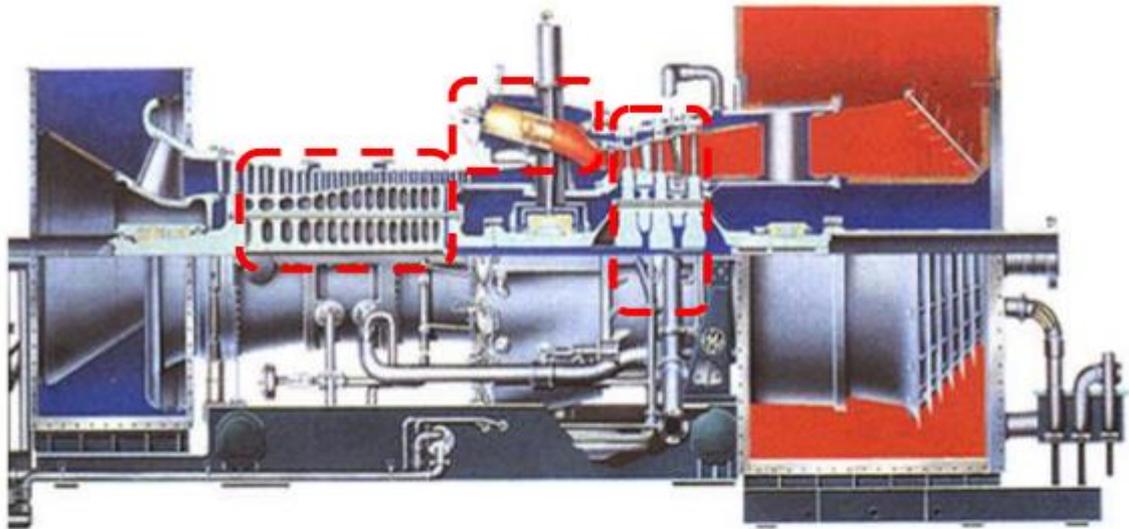
En général, les moteurs thermiques ainsi que les turbines à gaz sont classés selon un emplacement de combustion comme :

- Turbines à combustion interne** : La plupart des turbines à gaz sont des moteurs à combustion interne. Dans ces turbines, la température élevée est atteinte en brûlant le mélange carburant-air dans la chambre de combustion.

- Turbines à combustion externe** : dans ces turbines, un échangeur de chaleur est généralement utilisé et seul un milieu propre sans produits de combustion traverse la turbine de puissance. Comme les aubes de turbine ne sont pas soumises à des produits de combustion, des carburants de bien moindre qualité (et donc moins chers) peuvent être utilisés. Ces turbines ont généralement un rendement thermique inférieur à celui des turbines à combustion interne [5].

### I .5.Eléments principaux de la turbine à gaz

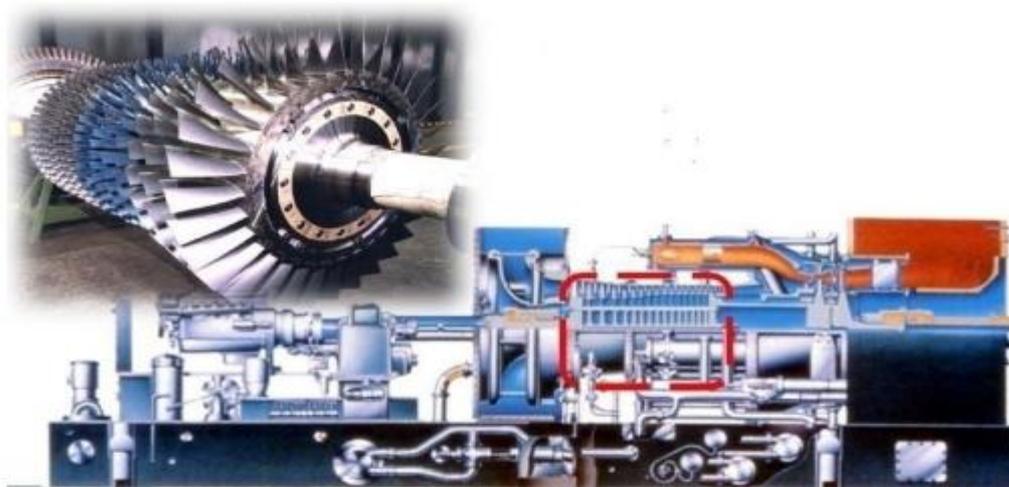
Une turbine à gaz généralement se compose de trois éléments principaux sont : un compresseur, une section de combustion, et une turbine de détente comme montré dans la **Fig (I.2)**.



**Fig. I.2.** Schéma représente les éléments principaux d'une turbine à gaz [6].

### I .5.1.Section du compresseur

Dans les turbines à gaz qui produisent de l'électricité, des compresseurs à flux axial qui aspirent un débit d'air élevé sont utilisés. Chaque étage d'un compresseur se compose d'une roue fixe (stator) et d'une roue mobile (rotor). Le compresseur contient plusieurs étages, c'est-à-dire de plusieurs successions d'ensemble roue fixe et roue mobile, comme l'indique la figure I.4. L'écoulement traversant le premier étage va être dévié avant d'entrer dans le deuxième étage [7].



**Fig. I.3.** Schéma représente la position de compresseur axial dans une turbine à gaz [6].

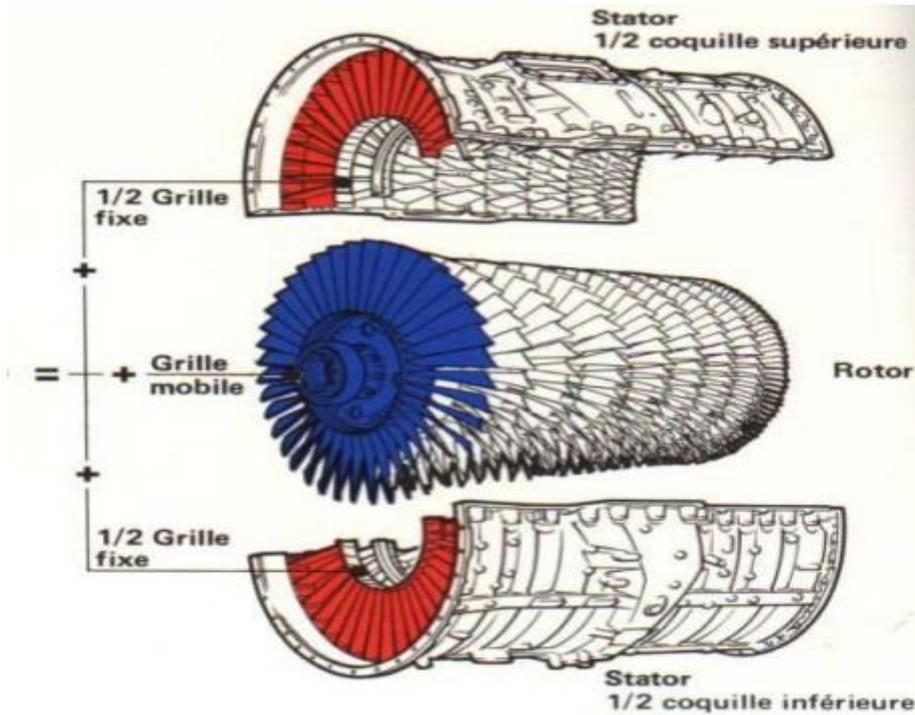
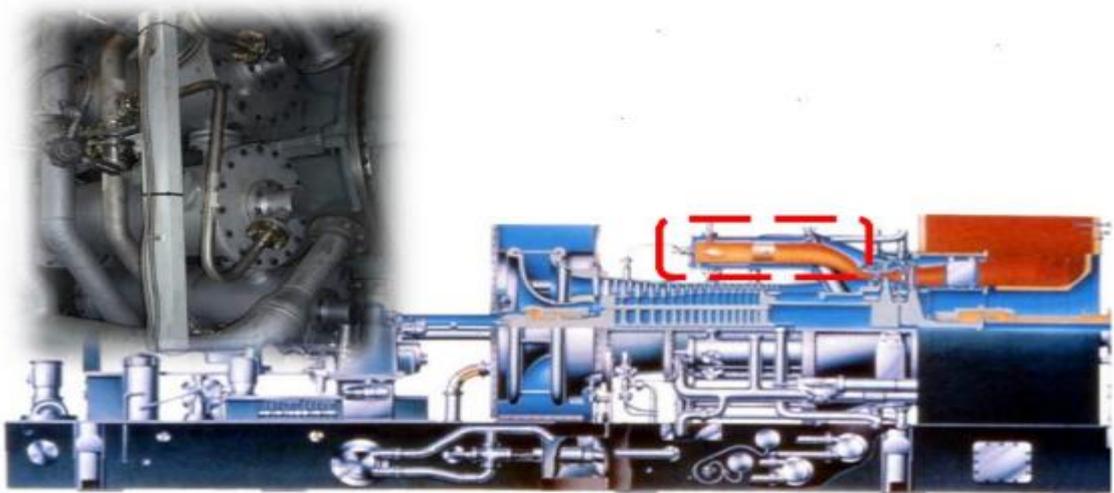


Fig. I.4. Schéma représente le Rotor et le Stator d'un compresseur axial [8].

### I .5.2. Section de combustion:

La section de combustion se compose d'un système comprenant une ou plusieurs chambres de combustion annulaires disposées symétriquement le long d'une circonférence ; ces chambres de combustion reçoivent et brûlent du combustible au moyen d'un nombre égal des brûleurs (un pour chaque chambre de combustion). L'air entre dans chaque chambre dans une direction opposée à la veine intérieure des gaz chauds (pour cette raison, cette méthode de distribution de l'air s'appelle à "débit inverse"). Ce courant extérieur d'air, qui s'écoule le long des chemises, sert à les refroidir. En outre, l'air qui n'est pas employé dans le processus de combustion est employé pour refroidir les gaz chauds après la combustion ; en effet, il est introduit dans les chambres par les trous de mélange et refroidit le gaz à la température optimale d'admission de la turbine [9].

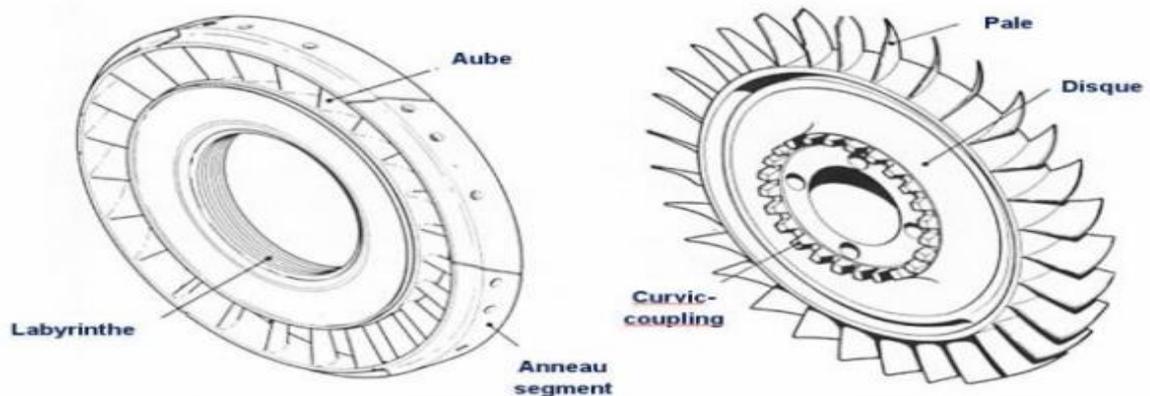
La veine des gaz chauds du système de combustion à l'admission de la turbine traverse les pièces de transition qui transforment les écoulements du gaz de chacune des chambres de combustion en un courant annulaire continu adapté à l'admission de l'anneau de la directrice du premier étage de la turbine de détente [9].



**Fig. I.5.** Schéma représente la position chambre de combustion dans un turbine à gaz [6].

**I .5.3. Section de la turbine:**

La section de la turbine généralement comprend un certain nombre d'étages ; chacun d'entre eux se compose d'un étage stator et d'un étage rotor (aubes), dans l'étage stator (directrice), les gaz à des températures et des pressions élevées fournies par la pièce de transition, sont accélérés et acheminés vers un étage d'aubes du rotor montées sur un disque connecté à l'arbre de puissance [9].

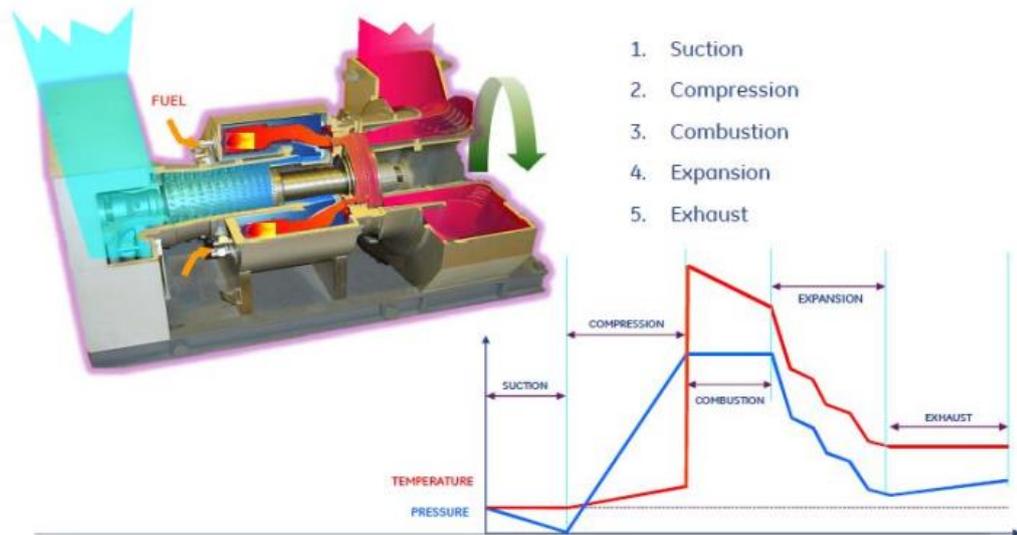


**Fig. I.6.** Schéma représente la directrice et la roue de turbine [10].

**I.6.Principe de fonctionnement de la turbine à gaz**

Une turbine à gaz fonctionne en suivant ces étapes [9] :

- ✓ Admission : elle extrait de l'air du milieu environnant.
- ✓ Compression : elle le comprime à une pression plus élevée.
- ✓ Combustion : elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion.
- ✓ Détente : elle achemine l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine.
- ✓ Échappement : elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température.



**Fig. I.7.** La variation de la pression et de température dans les différentes sections de la TAG aux phases de fonctionnement [11].

**I.7. Classification des turbines à gaz**

Les turbines à gaz peuvent être classées [12] :

**I.7.1. Par mode de construction :** Le domaine d'utilisation d'une turbine à gaz est un moyen de choisir le type de machines adéquates. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono-arbre ; elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité). Un deuxième type, englobe les turbines à deux arbres (bi-arbres), elles ont l'avantage d'entraîner des appareils à charges variables (pompes, compresseur.). Elles se composent, principalement, de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine (GG), la deuxième est liée à la charge. Un troisième type peut être aussi cité, ce sont les turbines dites dérivées de l'aéronautique, elles ont une conception spéciale suivant le domaine dans lequel elles sont utilisées. Dans ce troisième type, la partie qui assure l'autonomie de la turbine existe toujours, et l'énergie encore

emmagasinée dans les gaz d'échappement est utilisée pour générer de la poussée, en transformant cette énergie (thermique et de pression) en une énergie cinétique de jet dans une tuyère.

### I.7.1.1. Selon la disposition de l'arbre :

Un autre moyen de classification des turbines à gaz est selon la disposition et le nombre d'arbres qu'elles peuvent contenir, on trouve à cet effet :

- **Arbre unique** : Dites aussi mono-arbre, c'est une turbine à gaz dans laquelle les composants rotatifs sont couplés mécaniquement sur un arbre commun. Elle est généralement utilisée dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité) comme le montre le schéma de la figure I.9.
- **Deux arbres** : Elle a l'avantage d'entraîner des appareils à charges variables (pompes, compresseurs, ...), elle se compose de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine génératrice de gaz (GG), la deuxième est liée à la charge (figure I.9).

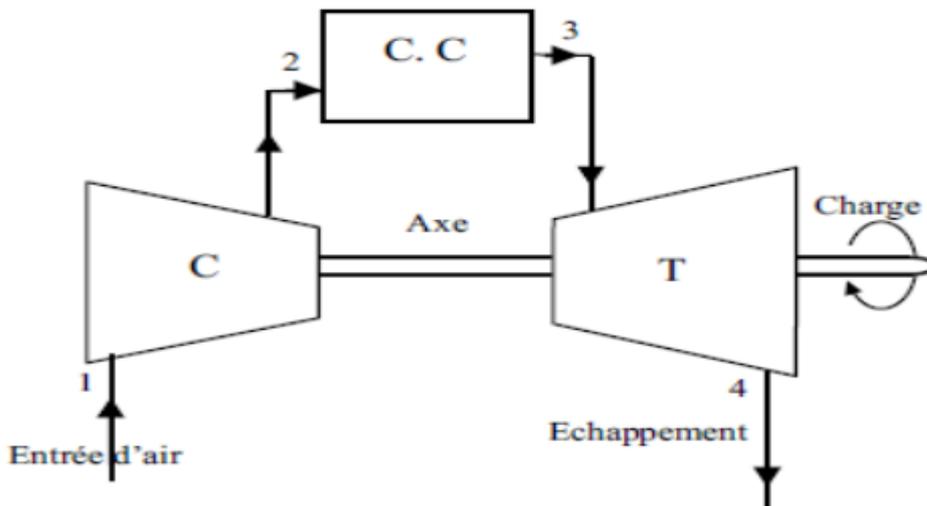


Fig. I.8. Turbine à gaz à un seul arbre

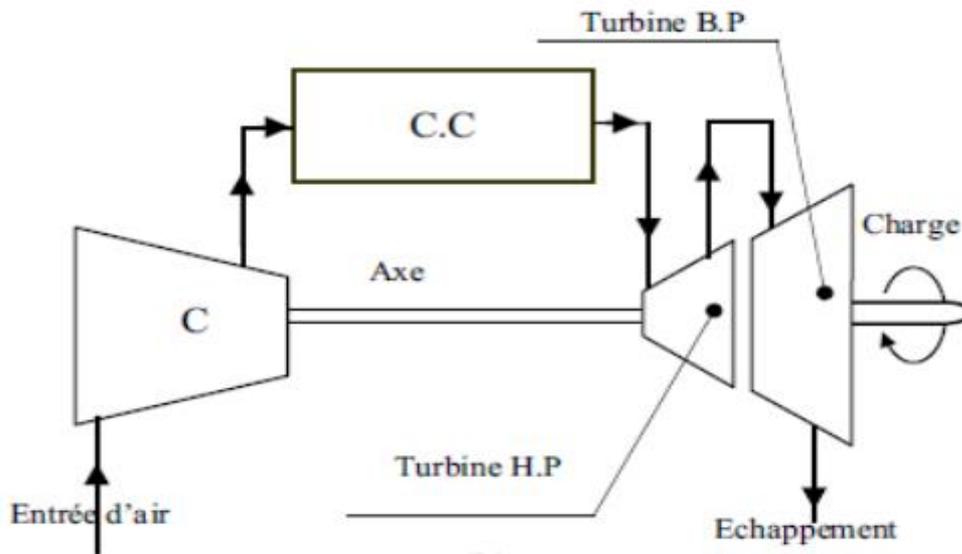


Fig. I.9. Turbine à gaz bi-arbre

- **Arbres multiples** : C'est une turbine dont laquelle les rotors des éléments mécaniques sont montés sur plus d'un arbre rotatif. Ces arbres peuvent tourner ou non entre eux avec un rapport de vitesse déterminé. Ils sont appelés arbres flottants, à l'exception de l'arbre d'accouplement

### I.7.2. Par mode de travail

On distingue deux types de turbines :

**I.7.2.1. Turbine à action** : Où l'énergie thermique est transformée complètement en énergie cinétique dans la directrice. L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique  $P_1 > P_2 = P_3$ .

**I.7.2.2. Turbine à réaction** : Une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec une variation de la pression statique  $P_1 > P_2 > P_3$ . Le taux de réaction  $\epsilon$  caractérisera le pourcentage d'énergie thermique totale.

Avec :

$P_1$  : Pression des gaz à l'entrée de la directrice

$P_2$  : Pression des gaz à la sortie de la directrice

$P_3$  : Pression des gaz à la sortie de la roue de la turbine

**I.7.3. Par mode de fonctionnement thermodynamique****I.7.3.1. Turbine à gaz à cycle ouvert**

C'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère, ce type de turbine qui est le plus répandu se divise en deux classes :

**I.7.3.2. Turbine à cycle simple**

C'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique, après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers l'échappement.

**I.7.3.3. Turbine à cycle régénéré**

C'est une turbine dont le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'augmenter le rendement de l'installation.

**I.8. Technologie des turbines à 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 comme contrainte supplémentaire. Les turbines à gaz sont caractérisées par la haute qualité des matériaux utilisés, ils présentent l'avantage d'être des matériaux réfractaires à base de nickel ou cobalt additionné de chrome. Les ailettes obtenues par coulage à solidification orientée ou à coulage monocristal. Cela constitue une partie des solutions apportées pour y remédier aux éventuelles anomalies qui peuvent être générées par la contrainte thermique due à la température élevée des gaz à l'entrée turbine. Une autre solution consiste à faire dévier une partie du débit d'air (10 à 15%) sortant du compresseur (qui est à température largement inférieure à celle entrée turbine) pour refroidir les ailettes par l'intérieur et pour obtenir un mince film d'air « frais » entre l'ailettes et les gaz chauds de façon à limiter autour de 800°C la température des gaz atteignant la turbine haute pression[12]

**I.9. Turbine à gaz à circuit ouvert****I.9.1. Principes**

générale, Il existe deux types de turbine à circuit ouvert. Le premier type est les turbines « Heavy-Duty » et le deuxième est les turbines aérodérivatives qui sont en fait dérivées des turboréacteurs, elles sont utilisées pour la génération d'énergie.

Totalement, la turbine est composée de trois éléments (figure I.10):

- ✓ le compresseur;
- ✓ la chambre de combustion;
- ✓ la turbine.

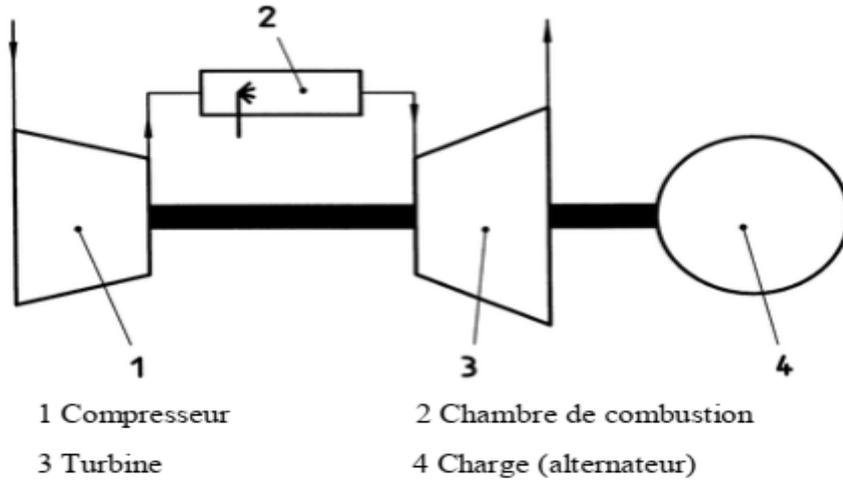


Fig. I.10 Turbine à gaz à cycle simple et à un seul arbre [13].

Ramène la température de fonctionnement à une valeur admissible pour la turbine à gaz. La constitution de troisième phase est par la détente dans la turbine du gaz brûlé. La présentation du principe de fonctionnement de cette turbine est donnée par le cycle théorique de Joule ou de Baryton et la figure I.11 illustre le cycle théorique. Les hypothèses, pour obtenir ce cycle, sont que les chaleurs spécifiques du fluide sont indépendantes à la température et qu'il n'y a pas de pertes. La compression et la détente sont supposées adiabatiques et réversibles. On les qualifie d'isentropique (la variation entropies null)

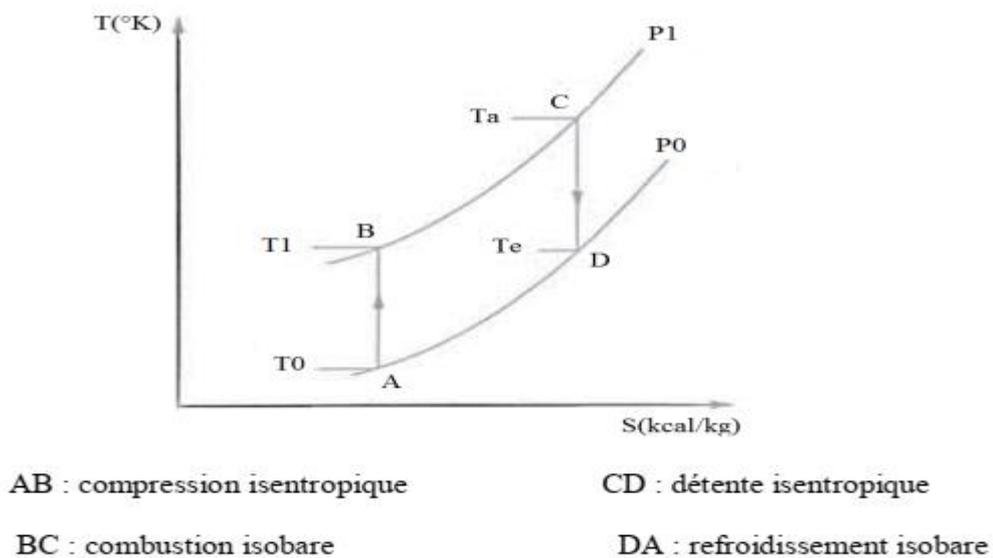
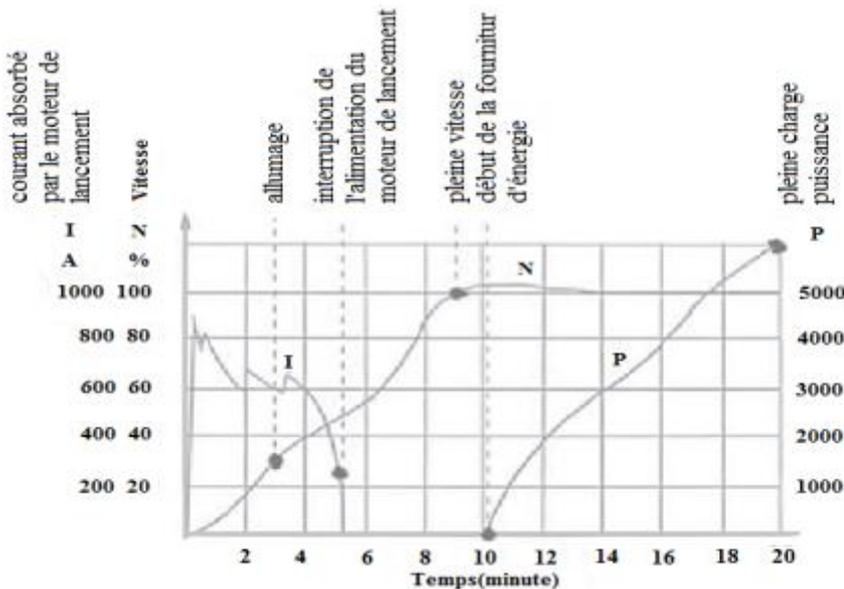


Fig. I.11 Cycle théorique [14].

La différence entre la puissance engendrée par la détente dans la turbine et celle destinée à l'entraînement du compresseur est la puissance d'entraînement de l'alternateur. Le rendement d'une telle installation est faible de l'ordre de 20 %.

Cette installation présente les avantages suivants :

- ✓ la construction est simple en raison des faibles pressions utilisées (5 à 15 bars);
- ✓ la consommation en eau est nulle. L'installation d'un tel site de production ne nécessite pas la présence d'une source d'eau ;
- ✓ la mise en marche pour passer d'un état froid à la pleine charge est très rapide. En effet, pour démarrer un tel groupe, il faut amener la vitesse de rotation à 30% de sa vitesse nominale afin que la pression de l'air soit suffisante pour éviter les chocs thermiques dans la chambre de combustion lors de l'allumage. C'est le moteur de lancement qui réalise cette fonction. Cette phase prend environ trois minutes et le temps nécessaire pour la prise de charge est de 10 à 20 minutes suivant la puissance du groupe. La phase de démarrage d'un tel groupe est montrée sur la figure I.12



**Fig. I.12 :** Temps nécessaire pour que le groupe prenne sa charge [14].

**I .10. Turbine à gaz à circuit fermé**

**I.10.1. Principes**

La fig I.13 présente une installation sous une forme simple. Le principe de la turbine à cycle fermées le suivant :

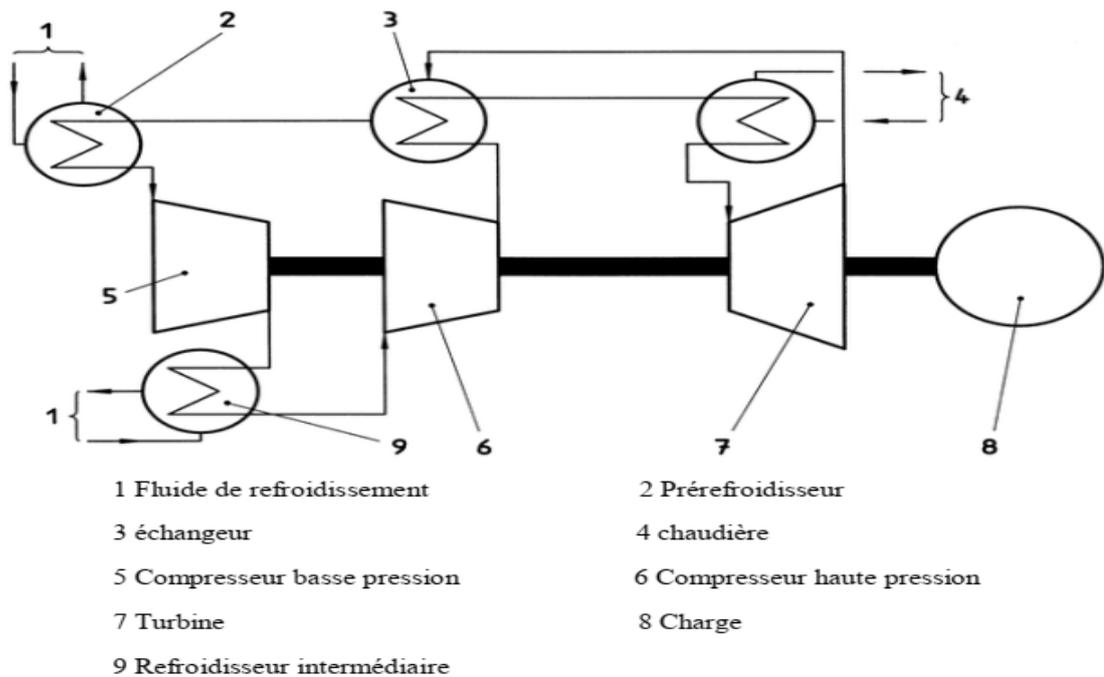
- ✓ le gaz est chauffé par l'intermédiaire d'une chaudière au lieu d'une chambre de combustion ;
- ✓ il est ensuite détendu dans la turbine, passe dans un échangeur et dans un pré-réfrigérateur, organe qui n'existait pas dans la turbine à circuit ouvert car l'atmosphère remplissait cette fonction de la turbine à gaz à circuit fermé sont :
- ✓ après son passage dans le pré-réfrigérateur, le gaz est envoyé dans le compresseur.

Les avantages

- ✓ la facilité de variation de la puissance délivrée à rendement et à vitesse constante par l'intermédiaire du compresseur de charge dont le rôle est de faire varier le débit massique soit en augmentant soit en diminuant la pression. Une limitation de puissance haute est imposée par la résistance des matériaux;
- ✓ le gaz utilisé dans le circuit fermé n'est pas pollué par les déchets de combustion, et peut être utilisé infiniment longtemps en l'absence de pertes;
- ✓ n'importe quel combustible peut être utilisé pour le foyer de la chaudière.

Les inconvénients de la turbine à gaz à circuit fermé sont:

- ✓ la chaudière: en effet la constitution d'une chaudière est nettement plus compliquée que celle d'une simple chambre de combustion;
- ✓ la consommation en eau du pré-réfrigérateur qui impose l'installation d'un tel site près d'une source d'eau.



**Fig. I.13** Turbine à gaz à un seul arbre à circuit fermé [13].

La valve charge et décharge sont utilisées pour que le système reste dans des plages de fonctionnement nominale

**I .11. Cycle combine**

Un cycle combiné de puissance est la juxtaposition de deux ou plusieurs cycles thermodynamiques destinés à convertir plus efficacement l'énergie fournie en travail en adaptant deux ou plusieurs fluides de cycle. Avec le développement de la turbine à gaz, le terme « cycle combiné » se réfère plus spécialement à un système composé d'une turbine à gaz, d'un récupérateur de chaleur générateur de vapeur, et d'une turbine à vapeur.

Le concept de cycle combiné a pour objectif d'augmenter le rendement global et la puissance utile d'une centrale thermique en investissant des équipements additionnels nécessités par le cycle à vapeur. Il est d'autant plus rentable que le coût de l'énergie est élevé. [15]

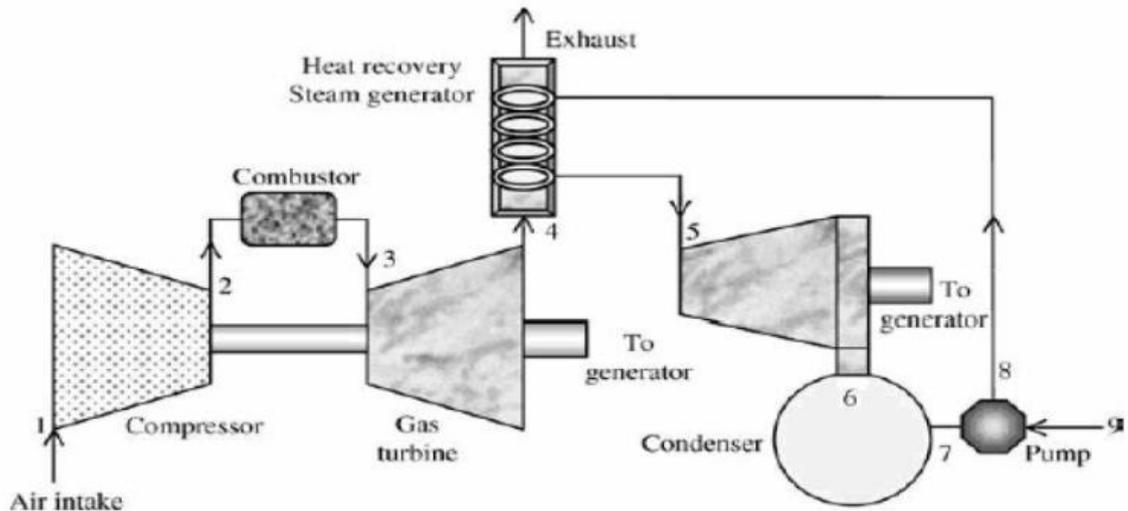


Fig. I.14: Schéma d'un cycle combiné.

### I .12. Turbomoteur : définition et principe de fonctionnement

D'entrée, il est important de mentionner que le turbo est une pièce vitale du moteur, surtout pour les voitures qui l'utilisent. De nos jours, la demande est de plus en plus grande en ce qui concerne la qualité et la performance des moteurs. Pour répondre aux besoins des consommateurs, les fabricants utilisent des turbomoteurs qui sont des composants permettant d'optimiser le fonctionnement des moteurs.

Le turbomoteur peut être décrit comme une composante constituée de deux hélices ou roues, dont la turbine et le compresseur. Pour que les moteurs des véhicules fonctionnent de manière optimale, il faut la combustion du carburant avec l'air. Ainsi, le turbomoteur permet de récolter l'énergie des gaz d'échappement et l'utilise pour faire tourner la turbine. Cette dernière est reliée par un mécanisme à la roue du compresseur. Lorsque les deux tournent, il y a une grande quantité d'air comprimée qui est envoyée vers l'admission et ensuite dans le moteur. Tout de même, cet air passe par un circuit de refroidissement d'air avant de rentrer dans le moteur. Un grand pourcentage d'oxygène est ensuite envoyé dans la chambre de combustion, favorisant une meilleure combustion du carburant. Ainsi, le moteur devient plus performant et le véhicule jouit d'une meilleure puissance pour son fonctionnement optimal.[16]

**Conclusion**

Les connaissances générales sur les turbines à gaz ont été abordées dans ce chapitre. Les turbines à gaz ont fait l'objet d'une description fonctionnelle, d'une classification basée sur les nombreux critères employés et d'un calendrier de développement. Enfin, une comparaison des avantages et des inconvénients des différentes installations a été créée.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons l'alternateur (définition, structure, propriétés, Le principe de fonctionnement de l'alternateur, etc.)

# Chapitre II

*Etude théorique  
d'alternateur*

## II.1 Introduction

L'alternateur est un dispositif mécanique qui convertit l'énergie cinétique en énergie électrique en présence d'un champ magnétique. Le générateur électrique fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique, qui est à la base de la génération de courant inductif. L'industrie du générateur électrique s'est beaucoup développée en termes de production du courant inductif du redresseur à un degré très élevé, et le générateur électrique dirige le courant électrique pour qu'il circule à travers un circuit électrique externe, et les sources du générateur électrique sont nombreuses, y compris ce est un moteur alternatif, y compris les turbines qui utilisent des moteurs à vapeur dans leur travail, ou par des chutes d'eau dans des turbines dites hydroélectriques, des moteurs à combustion interne, des éoliennes, des manivelles, de l'air comprimé ou toute autre source d'énergie mécanique. Cette machine constitue les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Plus de 95 %

L'alternateur a 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 a assuré l'énergie mécanique, ce dernier fourni des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation, il est donc constitué de deux parties principales. Une partie fixe est appelée stator et une partie mobile est appelé rotor.

## II.2. Construction de l'alternateur

L'alternateur est composé à une deux parties une partie fixe qui s'appelle stator et une partie tournante s'appelle rotor.

- Le stator dans le cas d'un alternateur est l'induit. Il est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courants électriques alternatifs

Induits par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit.

- **Rôle mécanique du stator** : stabiliser la structure
- **Rôle électromagnétique** : - le stator est l'induit  
-Siège des forces électromotrices induites  
-Délivre la puissance électrique : circuit de sortie [17].

-Le rotor est nommé l'inducteur. L'inducteur c'est la partie tournante de L'alternateur il est alimenté par un courant continue (DC), c'est lui qui crée un champ magnétique tournant dans l'entrefer, la construction d'un turbo-alternateur est très spécialisée [18].

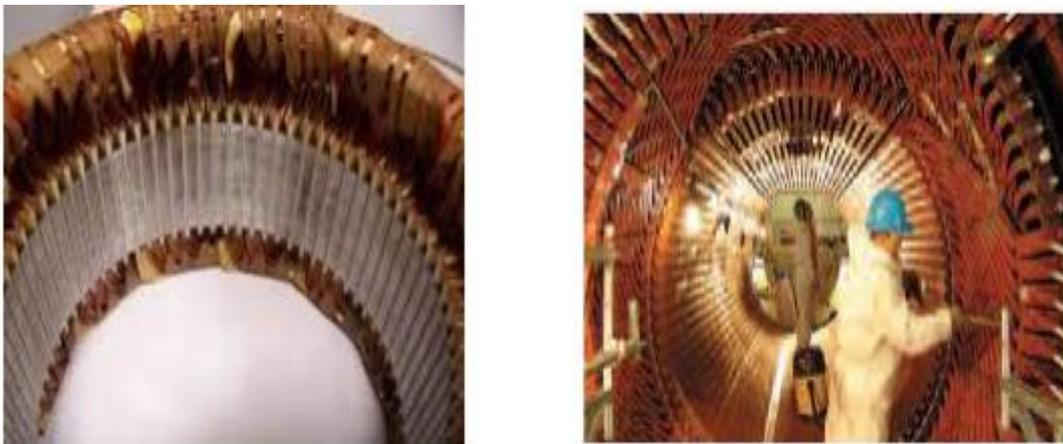
- **Rôle mécanique du rotor** : - absorber la puissance mécanique.
- **Rôle électromagnétique du rotor** : - l'inducteur.  
-Crée un champ magnétique continu.  
-Constitue la commande (circuit de réglage de la tension produite) [17].

**II.2.1 Stator**

Le stator est composé d'un empilage de plusieurs milliers de tôles magnétiques spéciales, isolées entre elles et ayant une forme d'une couronne.

Le champ magnétique tournant des alternateurs de grande puissance est établi par la circulation d'un courant dans les enroulements des pièces polaires. La densité du champ magnétique étant un des facteurs déterminants de la valeur de la tension induite et sur lequel on peut agir, on s'en servira pour faire varier la tension aux bornes de l'alternateur. L'enroulement statique est généralement logé dans des encoches pratiquées dans le stator. Ces encoches contiennent des barres composées d'un ensemble de brins en cuivre transposés suivant le procédé Reubel. Le niveau des puissances élevées de certaines

Machines entraîne des contraintes liées aux efforts électrodynamiques [18].



**Fig. II.1 Coupe d'un stator.**

Les éléments constitutifs du stator sont :

**II.2.1.1 La carcasse**

Cet élément a pour fonction de recevoir le circuit magnétique et le bobinage. Il sert également à recevoir, suivant la conception, les flasques et paliers assurant le guidage en rotation du rotor.

Elle est, pour les nouvelles générations, réalisée en mécano-soudé et doit être de conception suffisamment robuste pour résister aux efforts électromagnétiques subits par l'alternateur dans ses différentes phases de fonctionnement.

Généralement, la carcasse du stator est conçue pour :

- Supporter le circuit magnétique, réagir aux efforts de court

Circuit et les différentes vibrations qui se trouvent engendrées.

- Supporter les flasques et les paliers de l'alternateur.
- Assurer une circulation efficace du fluide de refroidissement.
- Permettre le raccordement des enroulements du stator aux conduites d'amenée d'eau
- Résister à la pression engendrée par l'exploitation d'un mélange fortuit d'air et d'hydrogène.

La carcasse assure ainsi deux rôles :

- Rôle mécanique : Elle supporte les pôles et transmet les forces de réaction au bâti par l'intermédiaire des pattes de fixation ou des brides d'accouplement.
- Rôle magnétique : Elle véhicule les lignes d'induction correspondantes au flux principal et au flux auxiliaire d'aide à la commutation. [18]

### **II.2.1.2 Le caisson des bornes**

La fixation du caisson des bornes est faite sur la partie supérieure de la carcasse et la réalisation de son cadre est par des tôles soudées. La fermeture du caisson est effectuée par une plaque isolante [19].

### **II.2.1.3 Le circuit magnétique**

Il est constitué d'un ensemble de tôles magnétiques feuilletées. Ce feuilletage de tôles est fait de l'empilement de tôles d'acier, de même dimension, les unes sur les autres. Le vernis isolant électrique déposé sur chaque tôle permet de limiter la circulation du courant d'une tôle à sa voisine afin de réduire les courants de Foucault (courants vagabonds induits), donc l'échauffement du circuit magnétique par rapport à un même circuit dit massif. Ceci améliore le rendement par diminution des pertes fer et donc le dimensionnement des machines qui les utilisent.

Pour chacune des tôles magnétiques, en un seul morceau ou en secteurs pour les circuits magnétiques de grande dimension, des encoches y sont découpées en partie alésage, afin de constituer une encoche axialement orientée lorsque toutes les tôles magnétiques sont empilées. Ces encoches permettent de recevoir les enroulements en cuivre (le bobinage).

### **II.2.1.4 Le Bobinage**

Le bobinage, qu'il soit en bobines ou en barres (barres Rebel) est constitué de fil méplat en cuivre isolé (émail + guipage) mis en œuvre suivant les caractéristiques électriques à obtenir. Le nombre de spires, la section du cuivre, l'émail et le guipage à utiliser sont parmi d'autres éléments des critères importants dans la fabrication de bobines. L'isolant appliqué sur les bobines, qui a pour fonction d'isoler par rapport à la masse requiert des connaissances particulières quant au choix des matériaux et à leur application. Cela étant d'autant plus vrai et important que le niveau de tension est élevé.

### **II.2.1.5 L'enroulement stator**

Le stator se compose alors d'un noyau en tôle d'acier muni d'encoches destinées à recevoir les conducteurs formant les enroulements de l'induit.

Les enroulements du stator sont la partie principale de l'alternateur. Sont fabriqués en fils de cuivre. Chaque spire de fil est isolée des autres spires. Dans le cas des alternateurs monophasés, les enroulements sont reliés en série. Dans le cas des alternateurs triphasés, les enroulements du stator sont divisés en trois enroulements distincts, disposés à  $120^\circ$  les uns des autres [20].

Deux parties de l'enroulement stator sont :

- Dans le circuit magnétique, on trouve la partie droite.
- Les développantes, extérieures au circuit magnétique et permettant une liaison entre les barres des différentes encoches pour la réalisation de cet enroulement.



**Fig. II.2** Enroulement du TIB-200-MT3 (alternateur de la centrale thermique de Jijel).

### **II.2.2 Rotor**

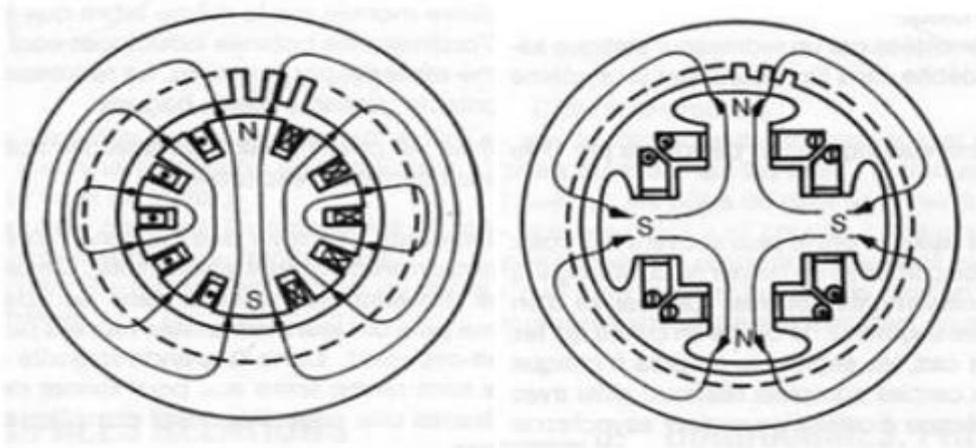
Le rotor constitue l'élément mobile de l'alternateur. Il renferme les pièces polaires qui constituent l'inducteur de la machine, c'est pourquoi on l'appelle aussi "roue polaire".

Le Rotor c'est la partie tournante de l'alternateur il est alimenté par un courant continue.

On distingue deux types de rotors : les rotors à pôles saillants et les rotors à pôles lisses.

\* les rotors à pôles saillants : On utilise le rotor à pôles saillants lorsque l'alternateur tourne à basse vitesse.

\* Les rotors à pôles lisses : sont conçus pour les petits alternateurs tournant à haute vitesse.



(A)

(B)

**Fig. II.3 type des rotor (pole lisse (A), pole saillant (B)).**

### II.2.2.1 L'arbre

L'arbre du rotor se compose d'une partie active appelé (table) et deux fusées. Les extrémités libres des deux fusées sont usinées en forme des brides et constituent les plateaux d'accouplement qui servent à relier le rotor de l'alternateur à la turbine et l'excitatrice. La table est pourvue sur environ 2/3 de sa circonférence d'encoches longitudinales qui reçoivent l'enroulement inducteur.

Deux fonctions principales de l'arbre sont montrées ci-après :

- \* La production d'un champ tournant est une fonction électrique.
- \* La transmission du couple est une fonction mécanique.

Il compose par deux éléments principaux :

- \* Le fût : Une pièce forgée monobloc qui formant le fût.
- \* Les accouplements : Il existe deux façons d'accouplements, qui sont l'accouplement coté turbine qui garantit le centrage des rotors présents et l'accouplement coté excitation qui permet le centrage et la fixation de la partie mobile de l'excitateur à diodes tournantes par des boulons d'accouplements.

### II.2.2.2 L'enroulement du rotor

Les enroulements rotor transportent les courants nécessaires à la magnétisation de la machine. Ils sont utilisés dans les machines à courant continu, les machines synchrones et dans les moteurs à courant alternatif à collecteur. Ils peuvent être constitués de conducteurs enroulés sur des pôles saillants situés au stator (machines à courant continu) ou au rotor (machines synchrones), mais ils peuvent être, également, constitués de conducteurs formant un bobinage concentrique situé dans des rainures à la périphérie du rotor (machines synchrones à rotor lisse) [21].

**II.2.2.3 Les frettes et les plateaux porte-frettes**

Les frettes sont des cylindres en acier maintenant les têtes de bobines contre les effets de la force centrifuge et les plateaux porte frettes sont des anneaux montés avec serrage à l'extrémité de la frette.

**II.2.2.4 Les connexions d'excitation**

Le système d'excitation fournit un courant qui alimente l'enroulement rotor à l'aide des connexions reliées directement aux bobines rotor.

**II.2.2.5 Les ventilateurs axiaux**

Sur chaque côté du rotor monte des ventilateurs axiaux, pour créer la surpression nécessaire pour obtenir une circulation d'air à travers le circuit rotor et stator.

Directement le rotor est refroidi. Les pertes thermiques principales d'un rotor sont engendrées par l'enroulement inducteur. Elles sont évacuées par circulation d'air dans les bobines. Les pertes résiduelles de surface du rotor sont évacuées par convection, avec l'air circulant dans l'entrefer.

**II.2.3 Système de refroidissement de l'alternateur**

Les pertes joule du rotor et du stator, ainsi que les pertes fer sont quittées par la circulation d'air à l'intérieur de l'alternateur. Pour simplifier la maintenance de l'alternateur et de ses auxiliaires, il faut utiliser l'air.

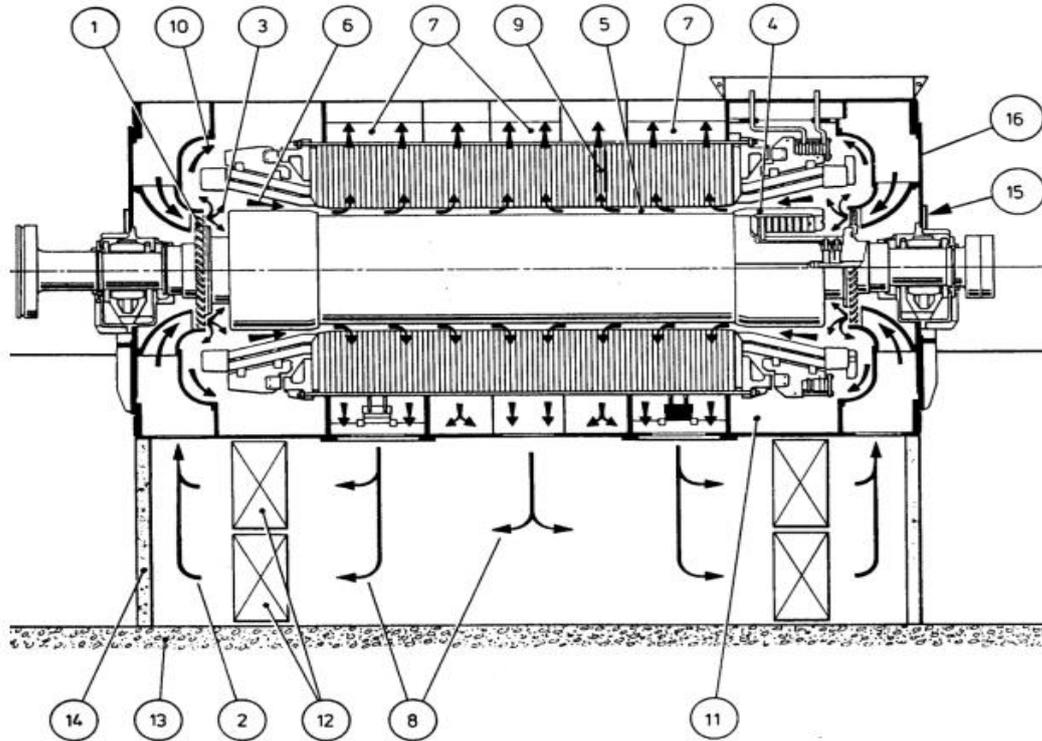
La mise en circulation de l'air est faite par les ventilateurs axiaux. Trois circuits principaux en parallèle sont alimentés par le débit de chaque ventilateur :

- \* Le circuit rotor, entrant sous la frette et sortant dans l'entrefer.
- \* Le circuit noyau magnétique, composé par l'entrefer, les canaux radiaux du noyau magnétique et les compartiments retour de la carcasse.
- \* Le circuit tête de bobines, formé par les têtes de bobines, les compartiments intermédiaires de la carcasse et les compartiments retour.

Les compartiments retour de la carcasse établissent un collecteur qui canalise l'air chaud vers les sorties de la carcasse, puis de là vers les réfrigérants. L'air est guidé par le massif et les cloisons. En traversant les réfrigérants, l'air chaud perd ses calories puis par les entrées des carcasses, il est conduit vers les ventilateurs principaux [22].

Le circuit de refroidissement est un circuit fermé. Aussi les légères fuites éventuelles sont équilibrées par une entrée d'air possible au niveau des filtres sur le flasque palier supérieur [23].

En présente les différents élément qui formé le circuit de refroidissement d'un alternateur dans la figure suivant.



- |   |  |
|---|--|
| 1- Ventilateurs axiaux.                       | 9- Canaux radiaux                            |
| 2- Entrées d'air dans la carcasse.            | 10-Circuit de ventilation "têtes de bobines" |
| 3- Circuit de ventilation "rotor".            | 11-Compartiments intermédiaires.             |
| 4- Frette.                                    | 12- Réfrigérants.                            |
| 5- Entrefer.                                  | 13-Massif.                                   |
| 6- Circuit de ventilation "noyau magnétique". | 14-Cloisons de fermeture.                    |
| 7- Compartiments retour.                      | 15 Filtres.                                  |
| 8- Sortie de la carcasse.                     | 16-Demi-flasque palier supérieur.            |

**Fig. II.4** Circuit de refroidissement de l'alternateur.

### II.3 Principe de fonctionnement des alternateurs

La présentation de fonctionnement d'alternateur est nécessaire. Pour comprendre le fonctionnement d'un alternateur triphasé, on présente le fonctionnement d'un alternateur monophasé qu'on généralisera ensuite.

#### II.3.1 Fonctionnement d'un alternateur monophasé

L'alternateur monophasé comprend un inducteur tournant muni d'au moins un bobinage, des moyens pour alimenter le bobinage de l'inducteur en courant d'excitation, un stator comportant au moins un enroulement principal. Il comporte un circuit magnétique pour l'inducteur qui est feuilleté et forme une paire de pôles initialement magnétisés, une diode qui referme le circuit du bobinage de l'inducteur dans un sens correspondant à la magnétisation initiale des pôles et au stator un enroulement auxiliaire dont l'axe magnétique fait un angle avec celui de l'enroulement principal et qui est fermé sur une charge partiellement capacitive.

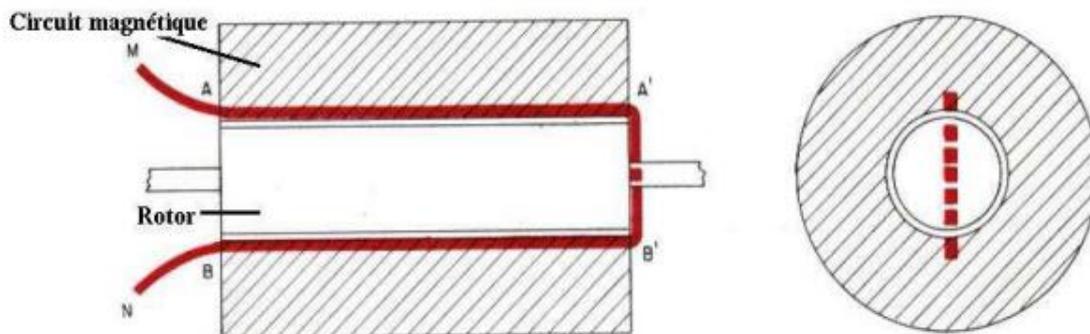


Fig. II.5 Spire stator MN[8]

La spire pénètre dans l'encoche du stator en A pour en sortir en A'. Elle entre ensuite dans l'encoche diamétralement opposée en B' pour en sortir en B.

On passe un courant continu dans le rotor et on tourne ce rotor à une vitesse  $\omega$ . Le champ produit par un aimant qui se déplace devant un fil conducteur engendre dans ce fil une force électromotrice :

\* dont la valeur est proportionnelle au champ et à la vitesse de rotation de l'aimant.

\* dont le sens est donné par la règle du tire-bouchon.

Par conséquent la force électromotrice  $e_1$ , engendrée dans le conducteur AA' sera proportionnelle à H et à la vitesse  $\omega$  du rotor :

$$e_1 = K_1 H \omega \quad (\text{II-1})$$

Où H est le champ magnétique produit par le rotor. Ceci provoquant le passage d'un courant dont le sens est donné sur la figure II-6

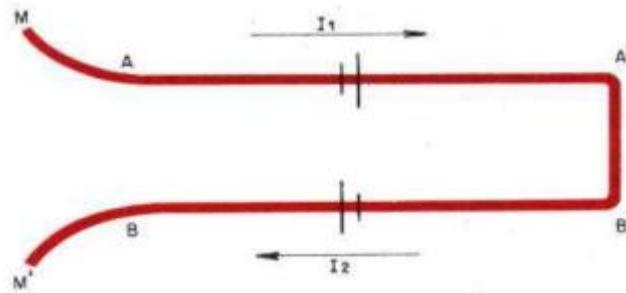


Fig. II.6 Sens du courant dans MN.[24]

-La force électromotrice  $e_2$  dans BB' :

$$e_2 = K_2 H v \tag{II-2}$$

-La force résultante dans le spire MM' étant la somme de  $e_1$  et  $e_2$  :

$$E = K H v \tag{II-3}$$

Sur le pourtour du rotor sont creusées des encoches qui reçoivent le bobinage. Les extrémités du bobinage sont reliées a des bagues A et B. Le bobinage du rotor est ensuite alimenté créant ainsi un ou plusieurs aimant. Du fait de la répartition du bobinage sur la périphérie du rotor, le champ magnétique crée ne sera pas le même en chaque point pour un alternateur possédant deux pôles (Nord et Sud).

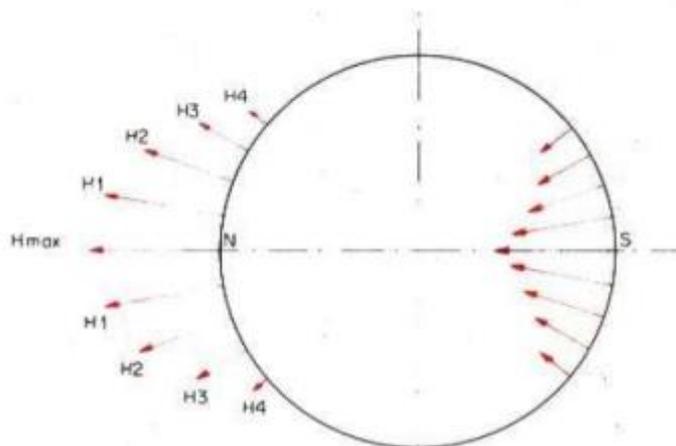


Fig. II.7 : Champ H d'un rotor.[24]

La circonférence du rotor est divisée en 36 parties égales.

En supposant que le rotor fasse un tour en une seconde et qu'au temps zéro le pôle nord du rotor se trouve devant le conducteur AA' du stator ; la force électromotrice sera égale à  $K H_{max} V$ .

- $\frac{1}{36}$ ème de seconde après elle sera à : KH1V.
- $\frac{2}{36}$ ème de seconde après elle sera à : KH2V.
- $\frac{3}{36}$ ème de seconde après elle sera à : KH3V.

Ainsi quand le pôle sud sera devant le conducteur AA', c'est-à-dire

$\frac{18}{36}$ ème de seconde après, elle reprendra la valeur de KHmaxV mais aura un sens inverse à celui qu'elle avait au temps 0, qu'elle retrouvera au bout d'une seconde. Les valeurs prises par le champ et la force électromotrice sont données par les courbes suivantes. [24]

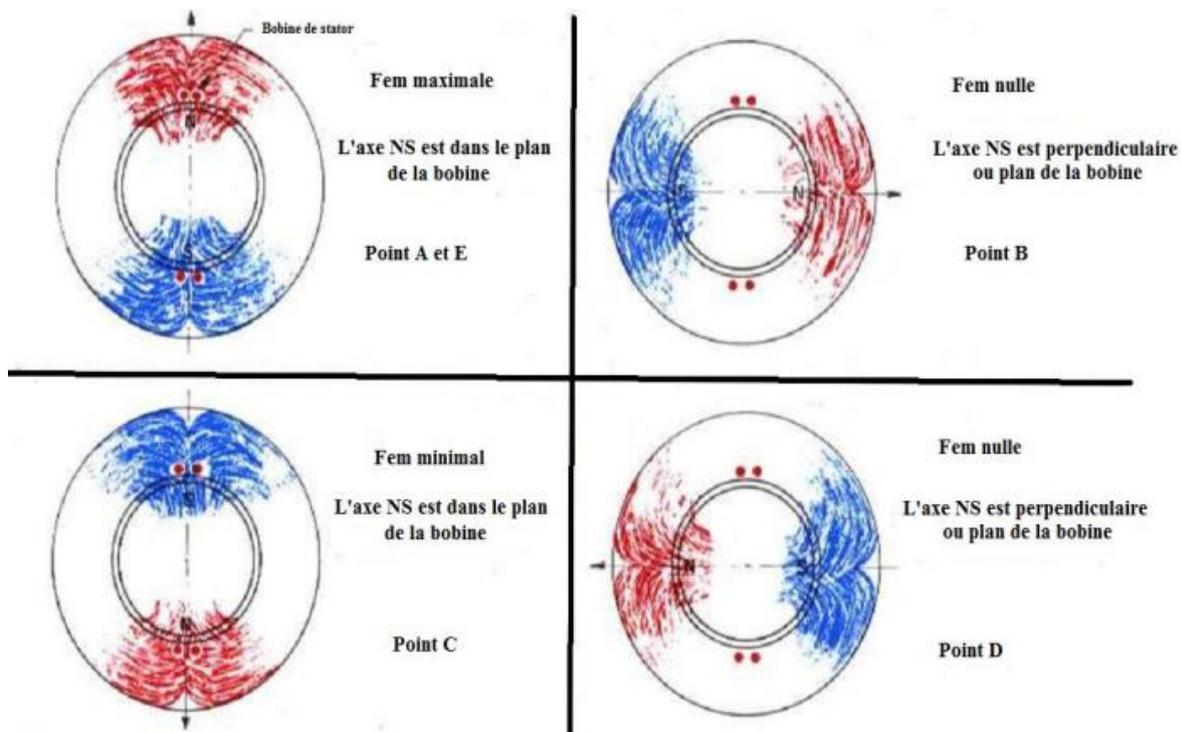


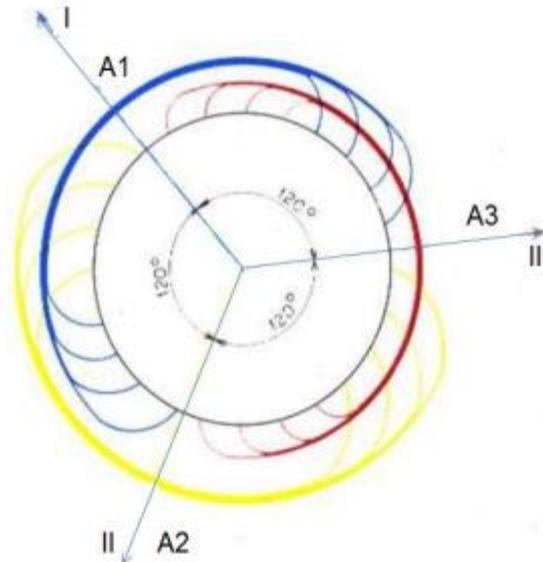
Fig. II.8 Positions du rotor [24].

La figure donne les positions du rotor dans le stator aux différents points de fonctionnement A, B, C, D et E

### II.3.2 Fonctionnement d'un alternateur triphasé

L'alternateur triphasé comporte un bobinage inducteur, trois bobinages de l'induit et deux bagues collectrices. Il est utilisé pour la distribution de l'énergie électrique. Dans ce cas, l'induit comporte trois enroulements indépendants ayant le même nombre de brins actifs ; chacun d'eux utilisant le tiers des encoches de l'armature d'induit. Ces enroulements sont

décalés entre eux d'un angle électrique de  $120^\circ$ . Les forces électromotrices engendrées par les trois enroulements indépendants seront donc régulièrement déphasées de  $120^\circ$ . Les tensions induites sont également décalées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres [25].



**Fig. II.9 Stator triphasé[24].**

La figure illustre un enroulement sinusoïdal triphasé (A1, A2, A3) dont les axes sont décalés de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre.

Pour chaque bobine, nous aurons une force de même valeur maximale, égale à  $K_{in}$  et de même période. Cependant les courbes représentatives des 3 forces seront décalées d'un tiers de période l'une par rapport à l'autre. Si l'on reprend l'exemple d'un tour de rotor par seconde on obtient les courbes représentatives suivantes :

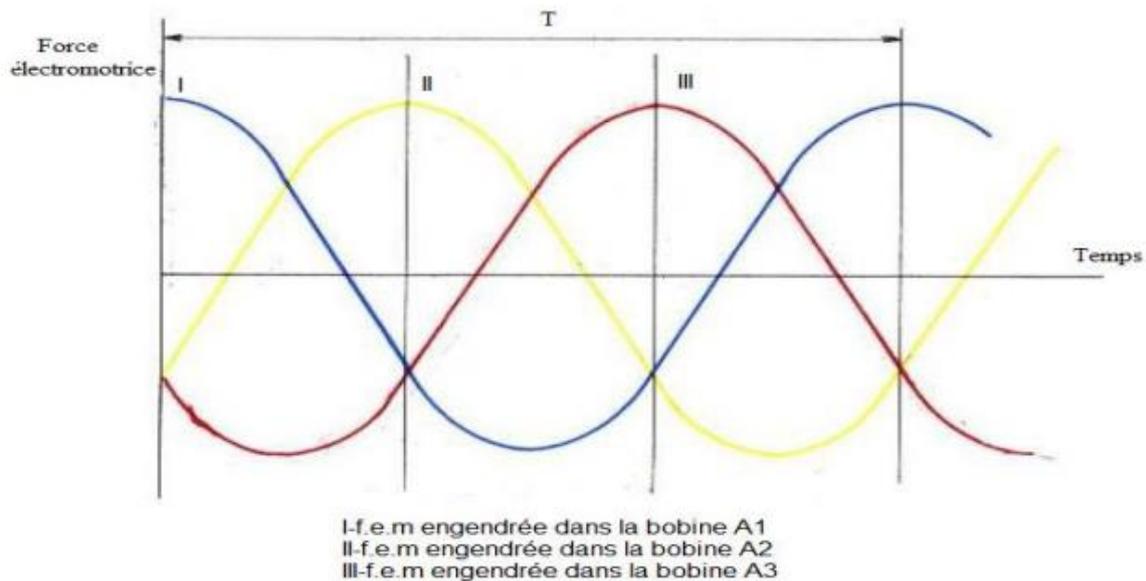


Fig. II.10 Force électromotrice d'un alternateur triphasé [25].

Dans les phases A1, A2, A3, nous remarquons des forces électromotrices maximales dans les bobines.

#### II.4 Champs alternatifs et champs tournants

\*Le champ alternatif est un courant électrique. Il ne peut être généré selon la loi de Faraday que par un alternateur électrique alternatif.

\*Un champ tournant est un champ magnétique dont l'orientation pivote au cours du temps.

Les champs tournants sont créés afin qu'ils entraînent des pièces présentant une certaine polarité créant ainsi des moteurs.

Si le champ tournant est créé par des pièces fixes (stator) alimentées en alternatif, il entraîne (c'est donc un moteur) un rotor (si c'est à la même vitesse que le champ tournant c'est alors un moteur synchrone sinon c'est un moteur asynchrone) qui aura tendance à aligner son champ magnétique (champ magnétique créé par un aimant permanent ou un bobinage alimenté en continu pour le moteur synchrone ou champ magnétique induit par le fait que le rotor voit le champ tournant varier autour de lui, c'est donc un moteur asynchrone) sur celui du champ tournant créé par le stator.

Pour créer un champ tournant deux possibilités :

- Rotation d'un aimant ou d'un électroaimant (alimenté en continu): c'est en général le cas de l'alternateur
- Bobinages fixes espacés de  $120^\circ$  et parcourus par des courants triphasés : c'est le cas d'alternateur.

- Lors un courant alternatif est parcouru dans une bobine, un champ alternatif et un champ tournant sont engendrés.

II.4.1 Champ alternatif d'une bobine parcourue par un courant Alternatif

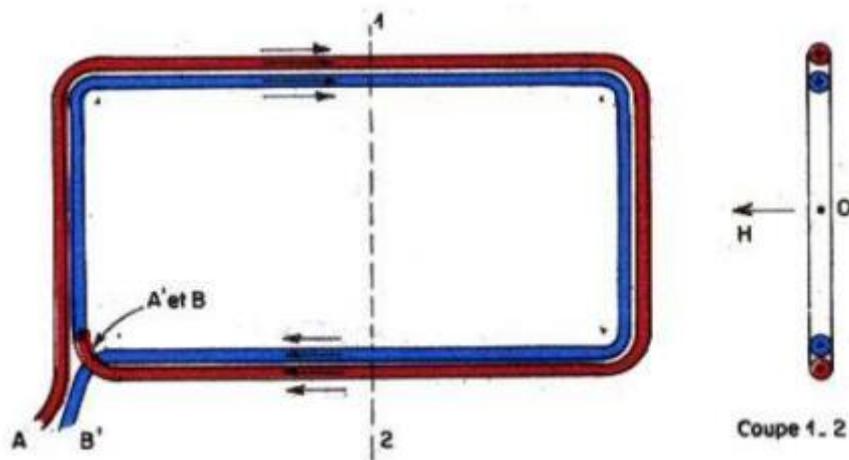


Figure II.11 Bobine à deux spires [24].

Une bobine à 2 spires AA' et BB' dans laquelle circule un courant alternatif  $i$ .

- Le champ H créé par la bobine est :

$$H = Ki \tag{II-4}$$

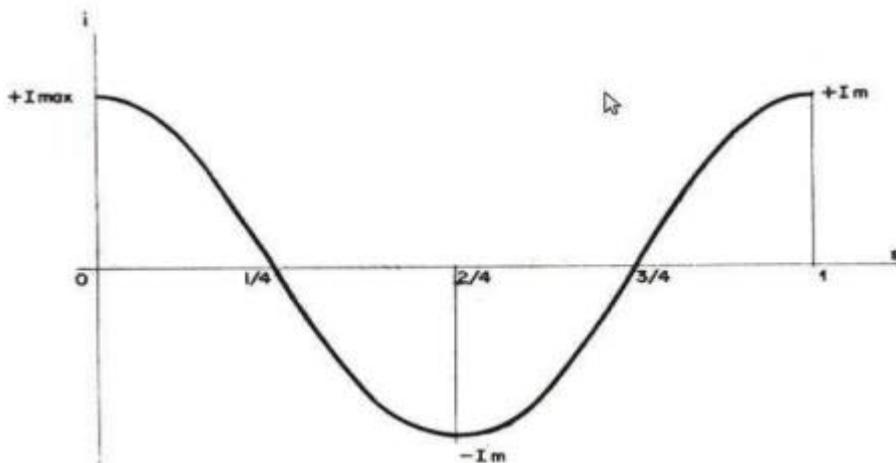
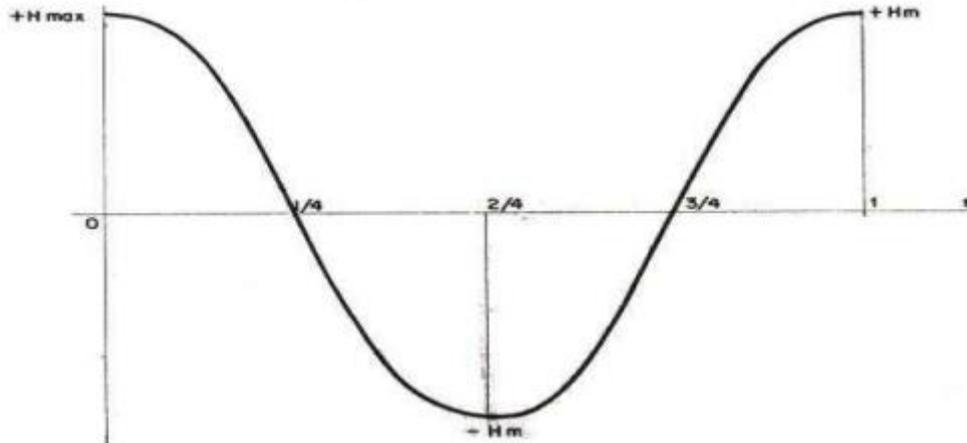


Fig. II.12 la valeur du courant  $i$  pendant une période.

La valeur du champ H variant de la même manière :



**Fig. II.13 Variation du champ magnétique pendant une période [24].**

Il est à présent intéressant d'associer un courant continu égal à  $I_m$ . Par chaque bobine,  $\frac{Hm}{2}$  est la valeur du champ engendré. Lorsque l'on effectue des rotations successives des bobines dans des sens opposés autour de l'axe O comme suit, on retrouve le même comportement pour le champ H que précédemment (figure II.13).

Remarque. Le champ produit par une bobine parcourue par un courant alternatif est équivalent au champ résultant produit par deux champs tournants égaux à la moitié du champ maximal ( $Hm$ ) produit par le courant alternatif. Ces deux champs tournants en sens contraire à un nombre de tours par seconde égal à la fréquence du courant alternatif envisagé.

II.4.2 Champ des courants triphasés circulant dans un enroulement triphasé

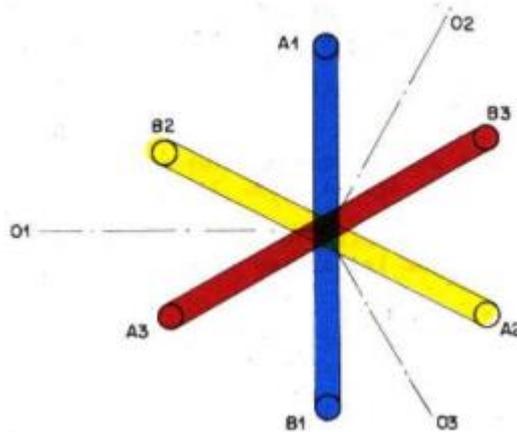


Fig. II.14 Enroulement triphasé.

En supposant qu'au temps zéro le champ est maximal dans la bobine A1B1, à cet instant les deux champs tournants H1 et H'1 sont dans le même sens. Le champ produit par la bobine A2B2 ne sera maximal que lorsque les deux champs tournants H2 et H'2 auront eu le temps de parcourir 1/3 de tour.

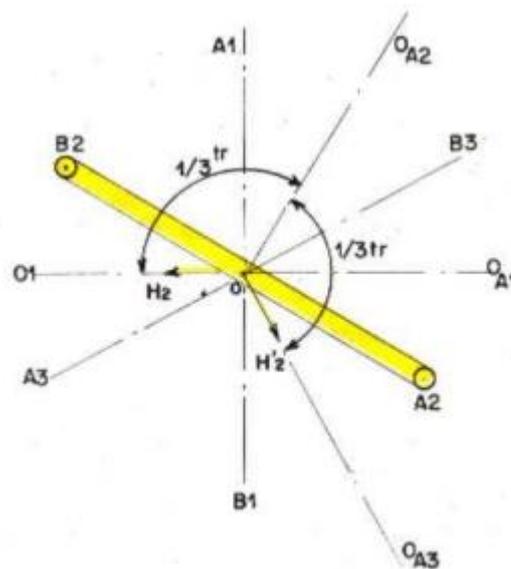


Fig. II.15 Position des champs tournants H2 et H'2 [24].

A l'instant zéro ils auront donc la position. Le champ produit par la bobine A3B3 ne sera maximal que lorsque les deux champs tournants H3 et H'3 auront tourné de 2/3 de tour, au temps zéro leur position est donnée par la figure suivante :

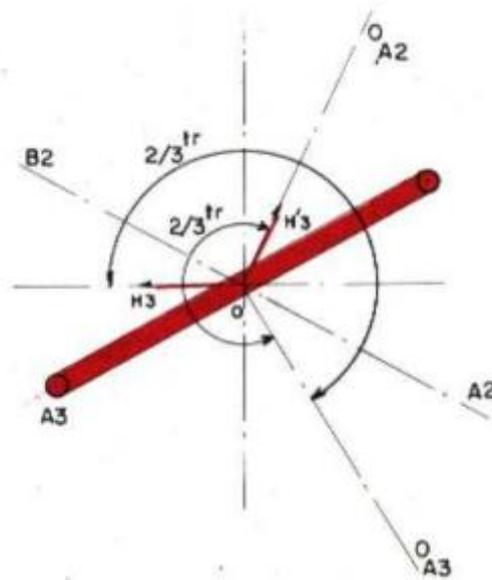


Fig II.16 Position des champs tournants H3 et H3' .

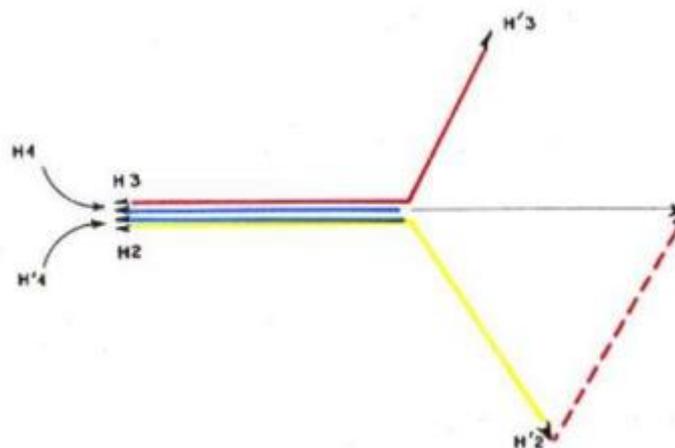


Fig. II.17 Champs tournants .

Il en résulte que les trois champs : H1, H2 et H3 s'ajoute pour donner un champ tournant, amenant aux conclusions suivante :

1. Un ensemble de bobines fixes A1 B1, A2 B2, A3 B3 calées à 120° l'une de l'autre et parcourues par des courants triphasés produit un champ tournant
2. Ce champ tournant vient se placer perpendiculairement au plan de chaque bobine quand le courant alternatif qui la traverse atteint sa valeur maximale.[24].

**II.5 Système d'excitation de l'alternateur**

On a vu que l'on doit faire appel à une source d'énergie externe pour faire fonctionner les alternateurs. L'excitatrice remplit cette fonction. Il s'agit en fait d'une petite génératrice de courant continu, qui alimente les enroulements inducteurs de l'alternateur.

La tension produite grâce à l'excitatrice est acheminée aux enroulements inducteurs par l'entremise des balais et des bagues collectrices.

On regroupe les excitatrices en deux catégories :

**- les excitatrices mobiles**

L'excitatrice mobile est montée directement sur l'arbre de l'alternateur. En réglant le courant d'excitation de la génératrice, on règle le courant dans le rotor de l'alternateur.

**- les excitatrices statiques**

L'excitatrice statique est une machine plus récente que la précédente. Elle se compose d'une source d'alimentation électrique munie de redresseurs à semi-conducteurs. L'avantage de ce type d'excitatrice réside dans l'absence de pièces mobiles et de balais, ce qui diminue les coûts d'entretien de la machine.

L'excitation d'un alternateur constitue un de ses éléments les plus importants. En générale l'excitation des alternateurs est effectué par une génératrice à courant continu entraîné par l'arbre ou par le réducteur de vitesse pour les puissances élevé (jusqu'à 250 MW).

**II.5.1 Le rôle du système d'excitation**

Le rôle du système d'excitation compound autonome consiste à fournir un courant d'excitation variant avec le courant débité et le  $\cos\phi$  de la charge, de façon à maintenir la tension de l'alternateur sensiblement constante sans adjonction d'un autre moyen.

Le réglage d'un tel système nécessite deux moyens de réglage permettant de régler séparément :

- L'excitation à vide, donc la tension à vide
- L'excitation en charge, donc la tension en charge

L'excitatrice joue le rôle d'un amplificateur et permet de réduire la puissance au compound, donc son encombrement. Cette excitatrice est munie d'un deuxième inducteur utilisé pour la régulation auxiliaire.

En régime normal, l'excitation est commandée automatiquement suivant les fluctuations de la charge pour garder la tension constante ou, encore, pour changer la puissance réactive débitée par l'alternateur.

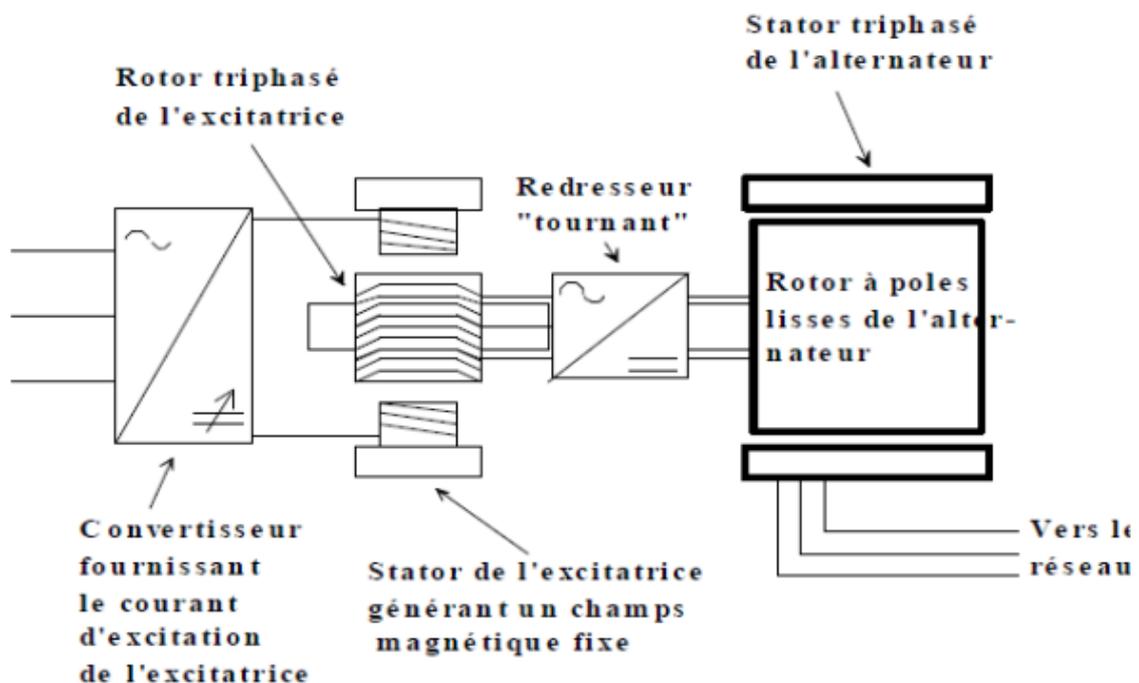


Fig. II.18 le schéma du Système d'excitation d'une machine synchrone [26].

## II.5.2 Classification des systèmes d'excitation

### a) Système d'excitation à courant continu

Le système à courant continu contient deux excitateurs, l'excitateur principal et l'excitateur pilote. La sortie du catalyseur est ajustée par un régulateur de tension automatique (AVR) pour contrôler la tension aux bornes de sortie du générateur. L'insertion du transformateur de courant (AVR) garantit que le courant de l'alternateur est limité lors d'un défaut. Lorsque le disjoncteur est ouvert, la résistance de décharge de champ est connectée aux bornes de l'enroulement de champ, de manière à dissiper l'énergie stockée dans la bobine de champ qui est fortement inductive.

### b) Système d'excitation à courant alternatif

Le système d'excitation à courant alternatif est constitué d'un alternateur et d'un pont redresseur à thyristor relié directement à l'arbre principal de l'alternateur. Le stimulus principal peut être soit auto-excité, soit excité séparément. Le système d'excitation AC peut être classé en deux catégories :

**b.1 Rotation Thyristor Système d'excitation**

Ce système comprend une excitatrice CA, un champ fixe et une armature tournante. La sortie de l'excitatrice est redressée par un circuit redresseur pont à thyristors à double alternance et alimentée par l'enroulement de champ de l'alternateur principal.

Le bobinage de l'alternateur est également fourni par un autre circuit redresseur.

**b.2 Système d'excitation sans brosse**

Le système d'excitation sans balais comprend un alternateur, un redresseur, une excitatrice principale et un alternateur à générateur d'aimants permanents. L'excitateur principal et le pilote sont entraînés par l'arbre principal. L'excitateur principal a un champ fixe et une armature tournante directement connectés, par l'intermédiaire des redresseurs en silicium, au champ des alternateurs principaux.

**c) System deexcitation statique**

Dans ce système, la fourniture provient de l'alternateur lui-même par l'intermédiaire d'un transformateur abaisseur triphasé connecté en étoile / triangle. Le primaire du transformateur est connecté au bus de l'alternateur ; son secondaire alimente le redresseur et alimente également le circuit de commande du réseau et d'autres équipements électriques.

**II.6 Les forces électrométries****II.6.1 Forces électromotrices théoriques**

Pour expliquer le phénomène on adieux conducteurs d'une même spire occupent à la mémé instant la même position par rapport à deux pôles consécutifs, compte tenu du couplage, les deux f.é.m. S'additionnent arithmétiquement. Si les différentes spires sont superposées, donc tous les conducteurs d'une mémé pole sont dans la même encoche, la valeur efficace de la f.é.m. totale est la somme arithmétique des valeurs efficace, soit N le nombre total de conducteur, il y a N/2 spires

Où :

$$E = 4,44 f \phi \frac{N}{2} \quad (\text{II.5})$$

Alors :

$$E = 2,22 f N \phi \quad (\text{II.6})$$

N : Nombre total de conducteur.

$\phi$  : Flux total sous un pôle.

**II.6.2 Forces électromotrices réelles**

$$E = 2,22 KdKffN\phi \tag{II.7}$$

$Kd$  : Facteur de distribution.

$Kf$  : Facteur de forme.

Le produit  $K = 2,22KdKf$  est nommé coefficient de Kapp.

Finalement ; on exprime la f.é.m. réelle par la relation suivante :

$$E = KfN\phi \tag{II.8}$$

**II.6.3 Réaction magnétique d'induit**

Quand un alternateur débite, les courants induits créent un champ magnétique qui s'oppose aux causes qui l'ont créé (loi de Lenz). Ils ne peuvent empêcher la rotation mais diminuent le flux utile.

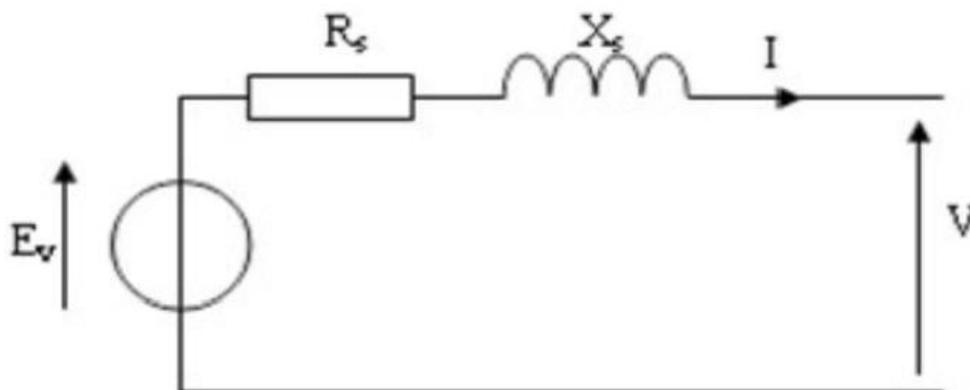
**II.7 Modèle de Behn-Eschenburg d'un alternateur**

Behn-Eschenburg a établi un modèle d'étude de la machine synchrone simplifiée.

Pour aboutir à ce diagramme, on doit supposer que le circuit magnétique de la machine est non saturé ce qui engendre que les f.é.m. soient proportionnels aux flux et aux F.M.M.

Le modèle de Ben Ehrenbourg ne s'applique que si la machine est non saturée et à pôles lisses. C'est le plus simple, il ne tient compte d'aucune saturation ni variation de l'entrefer. Il consiste à remplacer chaque phase de la machine par un ensemble de trois dipôles en série composé d'une résistance( $R_s$ ), réactance ( $X_s$ ) et source de tension ( $E_v$ ).

Ce modèle équivalent est représenté dans la figure ci-dessous :



**Fig. II.19 Modèle équivalent de Behn-Eshembourg[27].**

La tension aux bornes de la source est égale à :

$$\overline{E}_v = R_s \overline{I} + j x_s \overline{I} + \overline{v} \tag{II-9}$$

Où :

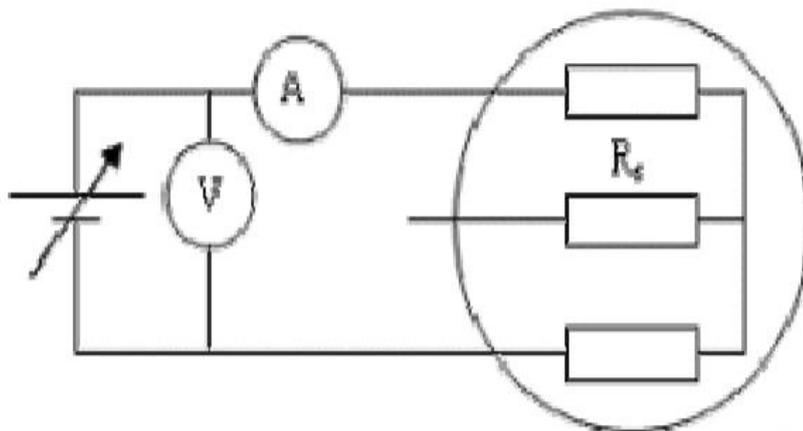
-  $X_s = L_s \cdot \omega$  correspond à la réactance synchrone ( $\omega$  est la pulsation électrique).

-  $L_s$  est appelée inductance synchrone et englobe l'inductance de fuite par phase et l'inductance équivalente qui traduit la chute de tension due à la réaction magnétique d'induit (machine à pôles lisses).

-  $E_v$  correspond à la force électromotrice à vide de la machine, et dépend, du courant d'excitation circulant dans la roue polaire.

La résistance  $R_s$ , correspond à la résistance de l'induit par phase. On la détermine par une mesure volt ampérométrique, à chaud, en continu, et on mesure tension et courant (sans dépasser  $I_n$ ).

On obtient la valeur de la résistance en appliquant la loi d'ohm. la figure suivant.



Stator de la machine synchrone.

Fig. II.20 mesures de la résistance d'induit [27].

On peut facilement déterminer les éléments de ce modèle, à l'aide des deux essais :

- Essai en court-circuit à vitesse constante.
- Essai à vide à vitesse constante et courant constant.

La relation(II-9) :

« $\overline{E}_v = R_s \overline{I} + j x_s \overline{I} + \overline{v}$ » peut être traduite géométriquement, et ça serra la représentation du diagramme de Behn-Eshenbourg. Elle est représentée dans la figure suivant.

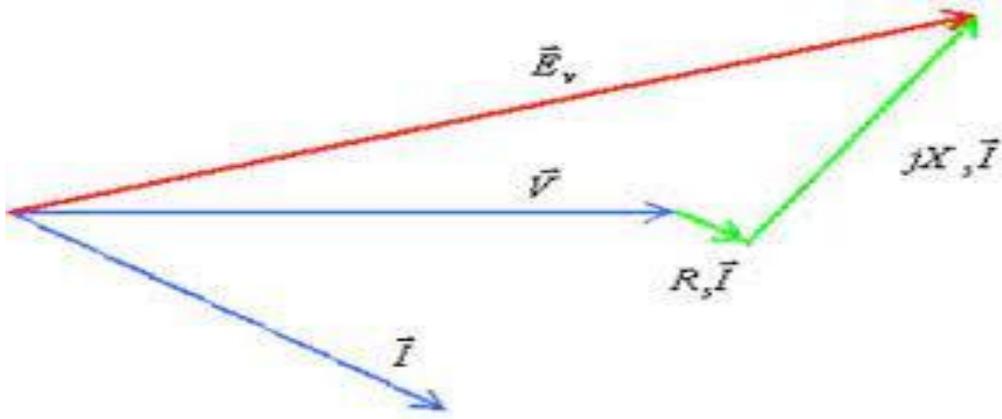


Fig. II.21 diagrammes de Behn-Eschenburg.

Détermination des paramètres de Behn-Eschenburg :

En utilisant les deux caractéristiques : à vide et en court-circuit, on peut déterminer les paramètres du modèle de Behn-Eschenburg :

En utilisant les deux caractéristiques  $I_{cc}(I_e)$  et  $E_v(I_e)$  pour un courant d'excitation donné (zone linéaire), on connaît  $I_{cc}$  et  $E_v$

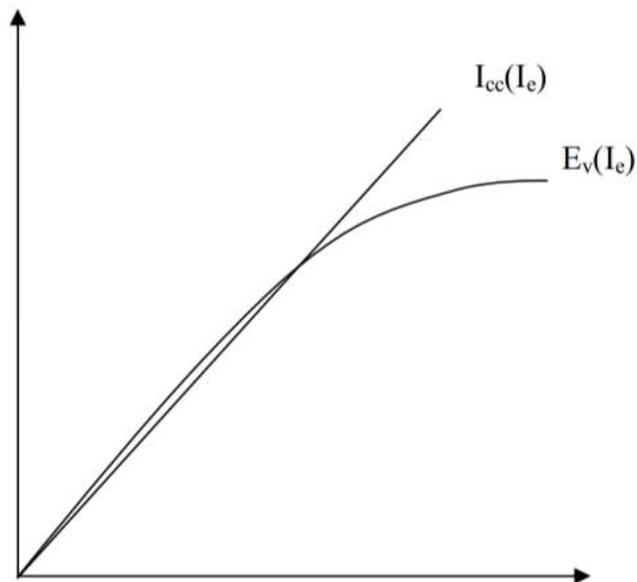


Fig.II.22 détermination des paramètres de Behn-Eshembourg [27].

## II.8. Diagramme de Fresnel

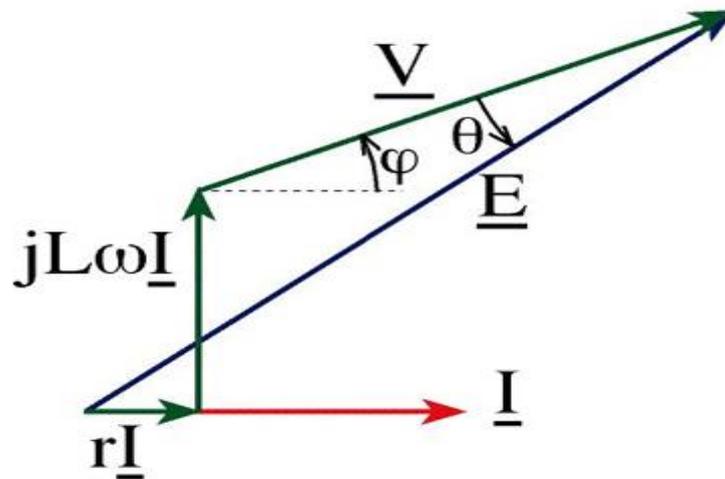


Fig. II.23 Diagramme de Fresnel.

A partir des modèles équivalents, on peut construire les diagrammes de Fresnel pour les différents fonctionnements de la machine synchrone. Il est à noter que :

- très souvent  $r.I$  est négligé.
- en traçant le diagramme à l'échelle, il est possible d'en déduire certaines grandeurs.
- si la charge est résistive  $\varphi = 0$  [3].

## II.9 Couplage des alternateurs

## II.9.1 Couplage d'un alternateur à un réseau

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.é.m. qu'il produit soit superposée à la courbe de la tension correspondante au réseau.

Le couplage est l'opération qui consiste à connecter les bornes de l'alternateur à celles du réseau triphasé pour débiter de la puissance électrique.

On n'effectue le couplage que lorsque les bornes homologues de l'alternateur et du réseau sont au même potentiel ; sinon la connexion s'accompagne de courants importants susceptibles de provoquer des chutes de tension, la disjonction des appareils de protection et

un couple important qui pourront causer la rupture de l'accouplement rotor turbine. Pour éviter cela, il faut réaliser les conditions :

- Même ordre de succession des phases.
- Mêmes valeurs efficaces de tensions.
- Mêmes fréquences.
- Tensions homologues en phases.

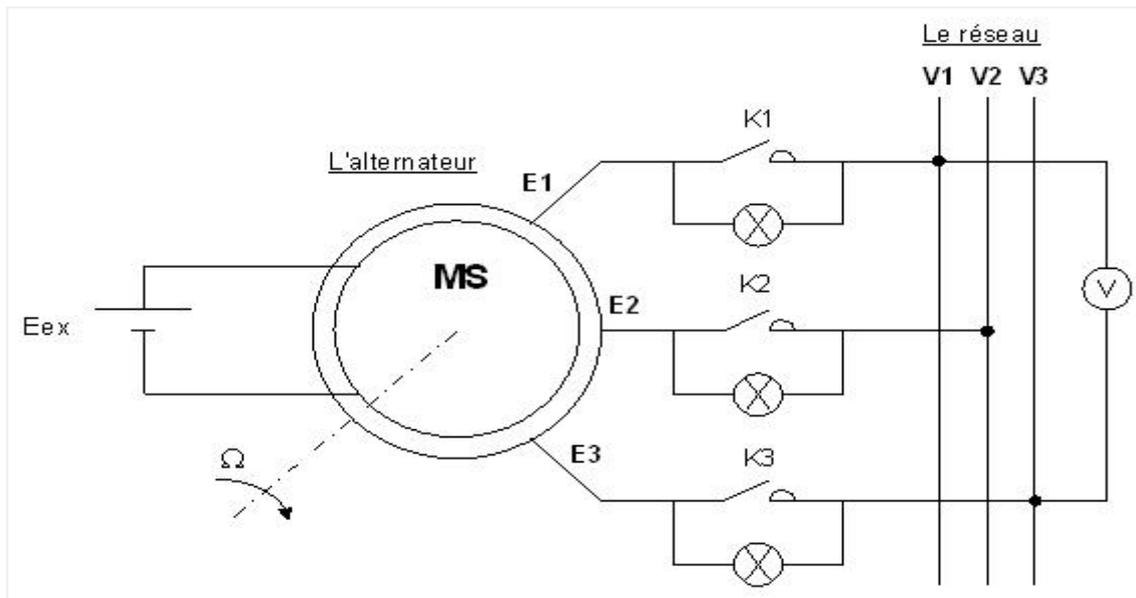


Fig.II.24 Schéma de couplage d'un alternateur à un réseau.

### II.9.2 Fonctionnement en parallèle des alternateurs

En alternateur, une force électromotrice est induite dans le stator (fil stationnaire) sous l'influence du champ magnétique tournant (rotor) en raison de la loi de Faraday. En raison de la vitesse de rotation synchrone des pôles de champ, il est également appelé générateur synchrone.

Ici, nous pouvons discuter de fonctionnement en parallèle de l'alternateur. Lorsque les systèmes d'alimentation en courant alternatif sont interconnectés pour plus d'efficacité, les alternateurs doivent également être connectés en parallèle. Il y aura plus de deux alternateurs connectés en parallèle dans les centrales.

Certaines conditions doivent être remplies pour fonctionnement en parallèle de l'alternateur. Avant d'entrer dans cela, nous devons comprendre certains termes qui sont les suivants :

\*Le processus de connexion de deux alternateurs ou d'un alternateur et d'un système de barres omnibus infini en parallèle est appelé synchronisation.

\*La machine en marche est la machine qui porte la charge.

\*La machine entrante est l'alternateur ou la machine qui doit être connectée en parallèle avec le système.

Les conditions à remplir sont :

- La séquence de phase de la tension entrante de la machine et de la tension du jeu de barres doit être identique.
- La tension de ligne efficace (tension terminale) du jeu de barres ou de la machine en cours d'exécution et de la machine entrante doit être identique.
- L'angle de phase des deux systèmes devrait être égal.
- La fréquence des tensions aux deux bornes (machine entrante et le jeu de barres) devrait être presque la même. Des transitoires de puissance importants se produisent lorsque les fréquences ne sont pas presque égales.

### II.10. Analyse de fonctionnement d'un alternateur

On va étudier les caractéristiques de l'alternateur à vide et en charge pour analyser leur fonctionnement.

#### II.10.1. Caractéristique à vide

A vide  $I = 0$ , le rotor est entraîné à la fréquence de rotation  $n$  constante. On relève, en fonction du courant d'excitation  $i$ , les variations de la tension aux bornes d'un enroulement ; à vide  $V_0 = E$ .

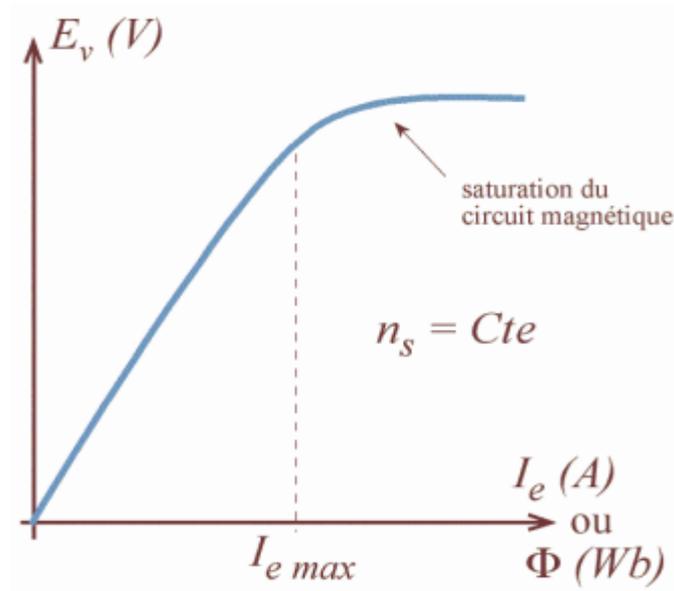


Fig. II.25 caractéristiques à vide.

Tant que le courant d'excitation dans l'inducteur  $I_e$  ne dépasse pas une certaine limite ( $I_e \text{ max}$ ), la valeur efficace  $E$  de la f.é.m. est proportionnelle à ce courant. C'est le courant  $I_e$  qui détermine le flux magnétique  $\Phi$  dans l'entrefer de la machine.

### II.10.2 Caractéristique en charge

Il y a deux types de caractéristiques en charge :

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

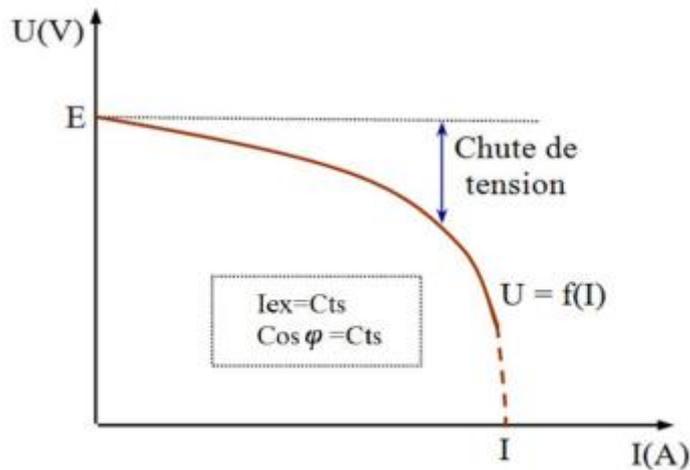


Fig. II.26 Caractéristiques d'un alternateur en charge [28].

La chute de tension interne est très importante, ce qui suppose la nécessité d'une régulation de tension très efficace pour maintenir une tension constante aux bornes de l'alternateur du régime à vide jusqu'au régime nominal [3].

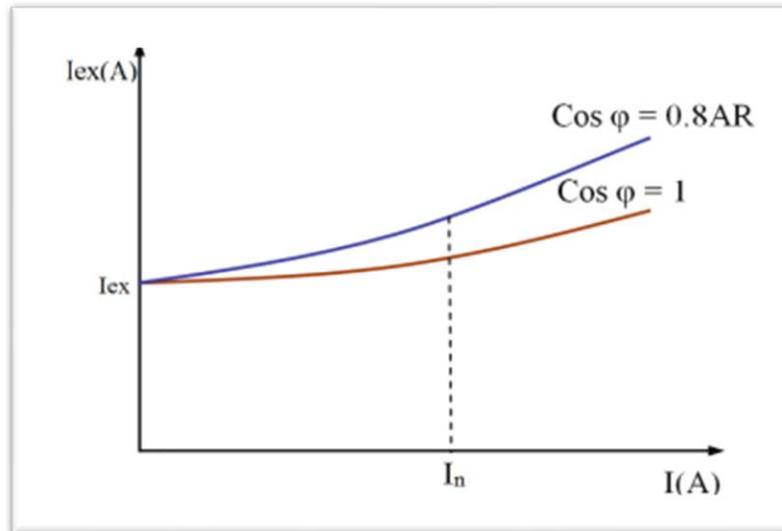


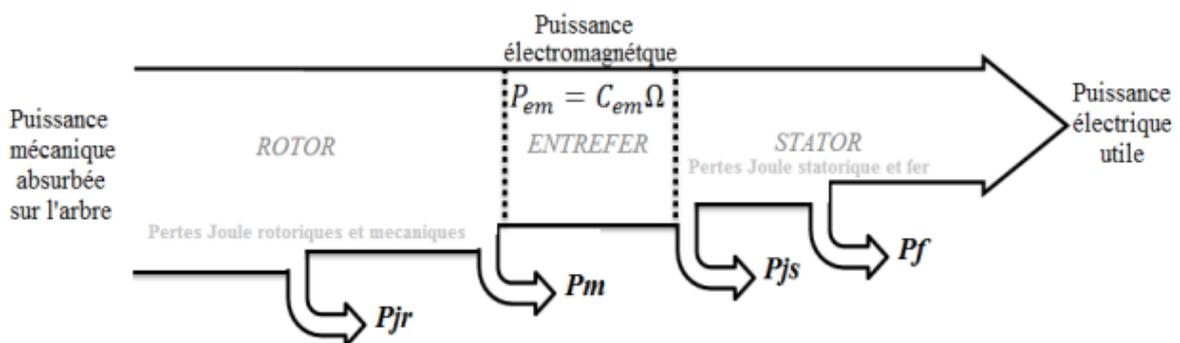
Fig. II.27 Caractéristique de réglage [28].

Pour l'étude du dispositif régulateur de tension automatique, il est utile de tracer la caractéristique de réglage  $I_{ex} = f(I)$ , la tension  $U$  avec le facteur de puissance  $\cos\phi$  constant

On remarque que à l'aide des courbes de réglage, il est possible de déterminer en fonction du courant débité et du déphasage, le réglage de la valeur de  $I_{ex}$  avec le maintien de la tension  $U$ . Ce dispositif est un régulateur de tension.

**II.11- Bilan des puissances d'un alternateur**

Les puissances aux différents niveaux de l'alternateur sont représentées sous forme de



bilan de puissance.

Fig. II.28 Bilan des puissances d'un alternateur [29].

**II.11.1. Puissance absorbée**

Dans un alternateur, la puissance absorbée  $P_a$  est une puissance mécanique. Elle correspond au couple de la turbine ou du moteur entraînant l'arbre de l'alternateur appliqué par l'arbre de transmission sur le rotor  $T_a$  multiplié par la vitesse angulaire de rotation. Elle s'écrit :

$$P_a = T_a \Omega_s = 2\pi n_s T_a \quad (\text{II-10})$$

Avec :

- $\Omega_s$  : Pulsation de rotation en rad/s
- $n_s$  : Vitesse en tr/s
- $T_a$  : Couple utile sur l'arbre.

Si l'alternateur est à excitation indépendante, il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor). Cette puissance électrique doit être fournie au rotor de la machine synchrone de façon à fournir l'excitation et à créer le champ d'induction.

**II.11.2. Puissance utile**

La puissance utile d'un alternateur est la puissance électrique fournie par son induit. Puisque l'induit fournit une puissance triphasée, alors nécessairement :

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

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

D'où

U : Tension composée.

V : Tension simple.

**II.11.3. Bilan des pertes**

On va voir deux pertes de puissance de l'alternateur.

**II.11.3.1. Pertes de puissance mesurable**

Les pertes de puissance mesurable sont composées à deux types

- Pertes par effet joules :

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

$$P_{js} = \frac{3}{2} R I^2 \quad (\text{II-13})$$

Où :

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

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

$$P_{j_r} = R_r I_{ex} = U_{ex} I_{ex} \quad (\text{II-14})$$

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

- les pertes de l'excitation :  $P_e = R_e I_e^2 \quad (\text{II-15})$

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

– Les pertes mécaniques rotationnelles  $P_{rot}$ , qui sont dues aux frottements et à la résistance de l'air.

– Les pertes fer par hystérésis et par courant de Foucault  $P_f$ , qui sont des défauts d'aimantation de la machine.

### **II.11.3.2. Pertes supplémentaires**

Ces pertes correspondent aux courants produits par les forces électromotrices qui résultent d'une répartition inégale du champ magnétique particulièrement dans la profondeur des encoches du stator. Ces courants produisent un échauffement par effet Joule. Elles ne sont pas mesurables.

## **II.11.4 Rendement d'un alternateur**

### **II.11.4.1 Rendement vrais**

$$\eta_{Vrai} = \frac{\text{puissance électrique active fournie}}{\text{puissance mécanique absorbée} + \text{puissance nécessaire à l'excitation}} \quad (\text{II.16})$$

### **II.11.4.2. Rendement approché**

$$\eta_{\text{approché}} = \frac{\text{puissance électrique active fournie}}{\text{puissance électrique active} + \text{pertes mesurables}} \quad (\text{II.17})$$

## **Conclusion**

Notre quotidien est marqué par l'utilisation indispensable de l'énergie électrique. Dans ce chapitre, nous présentons l'Alternateur dans ses différents fonctionnements et les différents modèles d'étude. L'Alternateur est une machine à champ tournant, elle est réversible comme la machine à courant continu ou la machine asynchrone, ce qui montre son importance dans le domaine industriel

La suite de notre effort, qui sera présentée au chapitre III, sera consacrée à la modélisation du système turboalternateur et aux expériences de simulation pour valider le modèle généré.

# ***Chapitre III***

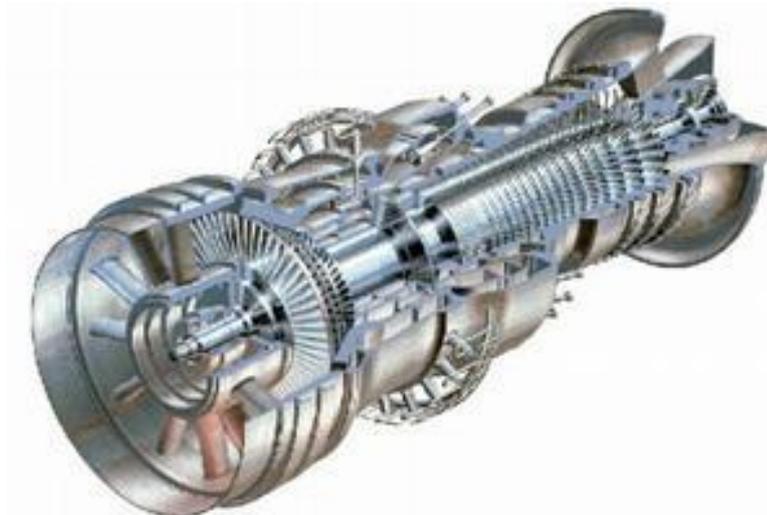
## *Modélisation d'un turboalternateur*

### III.1. Introduction

Un couplage direct d'une machine synchrone et d'une turbine à gaz est nécessaire pour la micro-turbine. L'utilisation de machines synchrones à aimants permanents à grande vitesse est en augmentation ; son principal avantage est qu'ils ont un rapport puissance sur masse et densité très élevé, ainsi que la possibilité d'être directement connectés à une turbine à gaz pour la production d'énergie électrique. Les micro-turbines et les véhicules électriques les utilisent largement.

### III.2. Micro turbine à gaz

Une petite turbine à gaz est un générateur de chaleur d'une puissance inférieure à un mégawatt et d'une vitesse de rotor entre des dizaines et des centaines de milliers de tours par minute. En raison de la structure compacte et de l'application technologique avancée du moteur à grande vitesse et du palier à air, la petite turbine à gaz présente de grands avantages en termes de durée de vie, de mobilité, de fiabilité, de flexibilité du carburant, de bruit, d'expansion, d'émission, de maintenance, etc. Équipement d'alimentation au gaz naturel pour la distribution du système électrique, il est largement utilisé dans les petites et moyennes entreprises, les immeubles de bureaux, les centres commerciaux, les hôpitaux et les hôtels.



**Fig. III.1** Micro turbine à gaz.

La turbine à gaz entraîne à travers un réducteur un alternateur dont la vitesse est constamment synchronisée avec la fréquence du réseau qu'il alimente.

**III.3. Éléments constitutifs****-L'entrée**

La veine d'entrée est chargée de réduire, par un processus de compression, la vitesse de l'air qui entre dans le moteur. Cette dernière doit être adaptée au compresseur. Lors de la conception de l'entrée, les ingénieurs doivent tenir compte de l'efficacité du processus de compression, de la traînée générée et du flux de masse dans l'entrée. La nature du régime de l'écoulement joue également un rôle très importants [30].

**-Le compresseur**

Le compresseur est utilisé pour accroître la pression de l'air. Cette compression permet d'optimiser les processus de combustion et d'extraction de puissance puisque la combustion du mélange fuel/air se fait dans un plus petit volume. D'autre part, l'augmentation du taux de compression entraîne une augmentation de l'efficacité thermique. Deux types de compresseurs existent : les compresseurs axiaux et les compresseurs centrifuges. Un paramètre important à prendre en compte est l'encombrement. Ainsi, si on dispose d'un espace réduit, les compresseurs axiaux sont moins encombrants. D'autre part, la surface faciale d'un compresseur axial est beaucoup plus petite que celle d'un compresseur centrifuge. Chaque ensemble rotor - stator du compresseur constitue un étage de compression. Le taux de compression qu'autorise un seul étage est de l'ordre de 2, toutefois il est beaucoup plus facile de multiplier les étages que dans le cas des compresseurs centrifuges. Les taux de compression autorisés aujourd'hui par les compresseurs axiaux sont de l'ordre de 30[30].

**-La chambre de combustion**

La chambre de combustion est conçue pour brûler un mélange de fuel et d'air et pour délivrer à la turbine les gaz résultant à une température uniforme et la plus élevée possible afin d'optimiser son fonctionnement. Mais la température des gaz ne doit pas dépasser la température maximale autorisée pour la turbine car sinon, ce dernier risque d'être endommagée.

Il existe deux types de chambres de combustion : les chambres tubulaires qui ne sont plus utilisées actuellement, et les chambres annulaires plus légères et plus simples. Le carburant est amené à la chambre de combustion sous très forte pression par des pompes, il est alors vaporisé par des injecteurs. Les gouttelettes ainsi formées doivent être les plus fines possible afin de pouvoir réduire la longueur de la chambre de combustion.[30]

**-La turbine**

La turbine récupère une partie de l'énergie cinétique des gaz générés par la réaction et qui sortent de la chambre de combustion. Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique, utilisée pour entretenir la rotation du compresseur et des différents accessoires. Près de trois quarts de l'énergie tirée des produits de combustion est nécessaire pour alimenter le compresseur.[1]

**-La tuyère**

Le rôle de la tuyère est d'augmenter la vitesse des gaz expulsés de la chambre de combustion et de canaliser le flux de gaz dans la turbine. En fait, le dispositif convertit l'énergie interne des gaz en énergie cinétique : les gaz entrent avec une température et une pression élevée, ils se détendent et refroidissent en même temps qu'ils sont accélérés. Cette accélération est amplifiée par un rétrécissement de la tuyère dans le cas où les gaz pénètrent en régime subsonique et par un élargissement de la tuyère dans le cas où ces mêmes gaz pénètrent en régime supersonique.

**-Récupérateur**

C'est un échangeur de chaleur gaz de combustion 1 air qui permet d'augmenter le rendement de la micro turbine en transférant de la chaleur des gaz d'échappement à l'air comprimé avant son entrée dans la chambre de combustion [31].

**III.4. Description de principe**

La turbine à gaz fonctionne sur le principe de la détente d'un fluide gazeux dans une turbine issue de la combustion d'un mélange d'air comprimé au niveau du compresseur et de gaz dans une chambre dite "de combustion". C'est le principe du réacteur d'avion !

La partie mobile est composée d'un arbre sur lequel sont montés le compresseur et la turbine. La partie fixe, quant à elle, accueille principalement la chambre de combustion.

Les gaz en sortie de turbine possèdent un niveau d'énergie suffisant qui peut être exploité dans une chaudière de post combustion en produisant de la vapeur.

La gamme de puissances électriques des turbines à gaz est large. Le rendement électrique des turbines gaz est lié à la qualité de l'alternateur. Un ordre de grandeur courant de rendement électrique est de l'ordre de 20 à 25 %.

Le rendement thermique, lui, peut être amélioré par la qualité de l'échangeur, l'exploitation des différentes sources de chaleur, la qualité de la combustion, etc. Un ordre de grandeur de rendement thermique se situe entre 55 et 70 % (avec postcombustion).[31]

**III.5. Etude des différents modèles**

Il existe différents modèles qui ont été trouvés dans la littérature relative à la modélisation des turbines à gaz. La structure de ces modèles est généralement de type modulaire, chaque modèle représentant une fonction de l'installation. Ces modules sont déterminés à partir des équations de la thermodynamique qui peuvent être sous la forme :

- D'équations différentielles.
- D'équations aux dérivées partielles.
- D'équations algébriques.[32]

III.5.1. Modèle du type Rowe

Ce modèle permet de simuler une grande gamme de turbine "Heavy-Duty" à un seul arbre en circuit ouvert dont la puissance varie entre une dizaine et une centaine de  $\sim 10^7$  W. Ce modèle est adapté aux études de fonctionnement en régime dynamique des réseaux électriques.

Il est utilisé par EDF pour simuler le comportement dynamique des turbines à gaz. Ce modèle comporte un contrôle de la vitesse, de la température, de l'accélération et prend aussi en compte les limites haute et basse du débit du combustible. Les hypothèses faites dans ce modèle supposent d'une part que la température ambiante est constante et d'autre part que la position de la vanne qui règle le débit d'air à l'entrée de la chambre de combustion est aussi constante. En général ces hypothèses ne sont pas vérifiées. C'est pourquoi, une amélioration de ce modèle a été entreprise de manière à pouvoir s'affranchir de ces contraintes.[14]

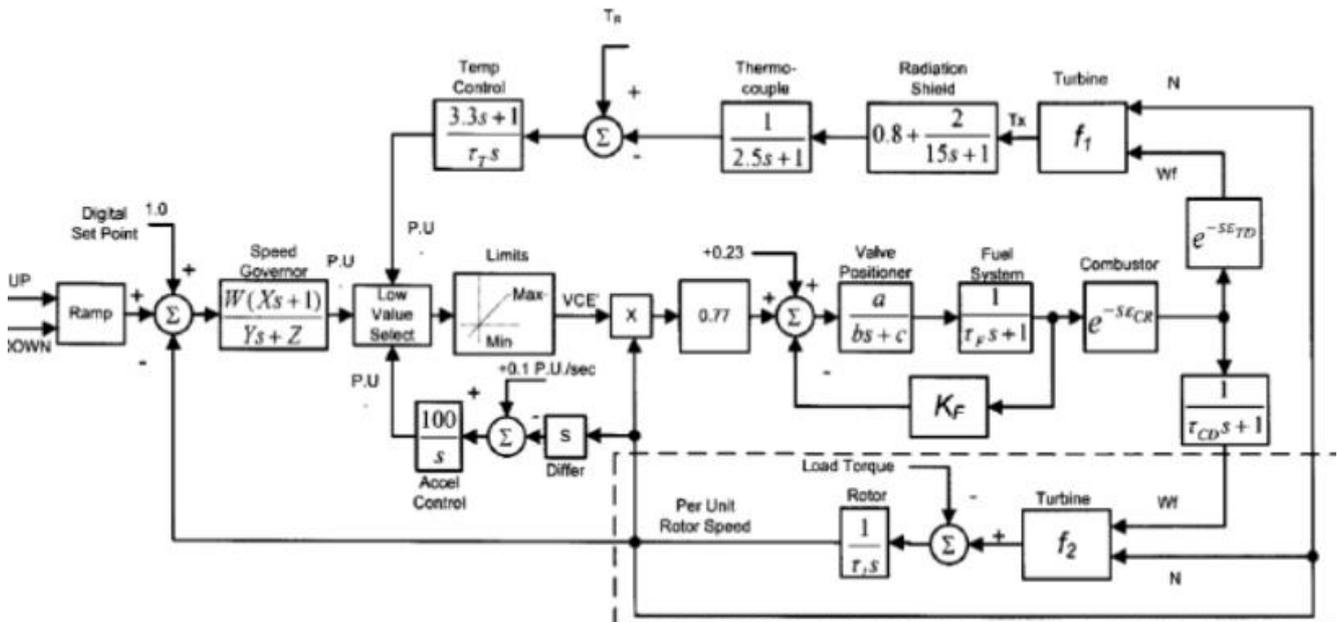


Fig. III.2: modèle amélioré d'une turbine à gaz[14].

Le modèle inclut les fonctions suivantes:

- Régulation de la vitesse.
- Contrôle de l'accélération.
- Contrôle de l'entrée d'air du compresseur.
- Alimentation en combustible de la chambre de combustion.

Mesure de la température des gaz d'échappement.[14]

### III.5.2. Modèle du type Caporale

Ce modèle facilite la simulation des turbines « Heavy-Duty » et d'un en cercle ouvert et comprend une installation simple ou complexe. L'installation simple comprend le compresseur, la chambre de combustion et la turbine et le complexe comprend récupérateur de chaleur, le réfrigérant et le réchauffeur.

Essentiellement, la composition du modèle adimensionnel est par des équations différentielles et algébriques représentatives des comportements thermodynamiques et mécaniques de la turbine. Pour modéliser les différents blocs du modèle comme par exemple le phénomène de propagation de la pression est beaucoup d'approximations ont été réalisées. La validation du comportement dynamique.

### III.5.3. Modèle du type Schobert

Ce modèle dynamique permet de simuler des installations complexes comprenant des turbines "Heavy-Duty" ou "aérodérivatives" à un ou plusieurs arbres. Ce modèle est plus complet comparé à celui de car la représentation physique des différents blocs est beaucoup plus poussée. Ce modèle est unidimensionnel (écoulement dans une seule dimension) et inclut aussi bien des équations aux dérivées' partielles que des équations différentielles et algébriques. Il nécessite cependant des techniques de discrétisation spatiale et temporelle pour sa résolution. Il n'est donc pas approprié pour des études de fonctionnement de réseau électrique.[14]

### III.6. Modélisation d'un micro turbine à gaz

La chaleur échappée est utilisée pour préchauffer l'air avant qu'il entre dans la chambre de combustion. Cela réduit alors la consommation du gaz par à peu près de 50 pour cent. La chambre de combustion mélange l'air chauffé avec le gaz et le brûle. Ce mélange entraîne, par explosion dans la turbine, le compresseur de gaz et le générateur jusqu'à 96 000 tours/min.[14]Lair chauffé est échappé dans le récupérateur avant d'être évacué à la sortie de l'échappement. Le débit de masse de gaz  $m_f(t)$  et le débit de masse d'air  $m_0(t)$  peuvent être considérés comme proportionnels avec le gain (62,5) : [14]

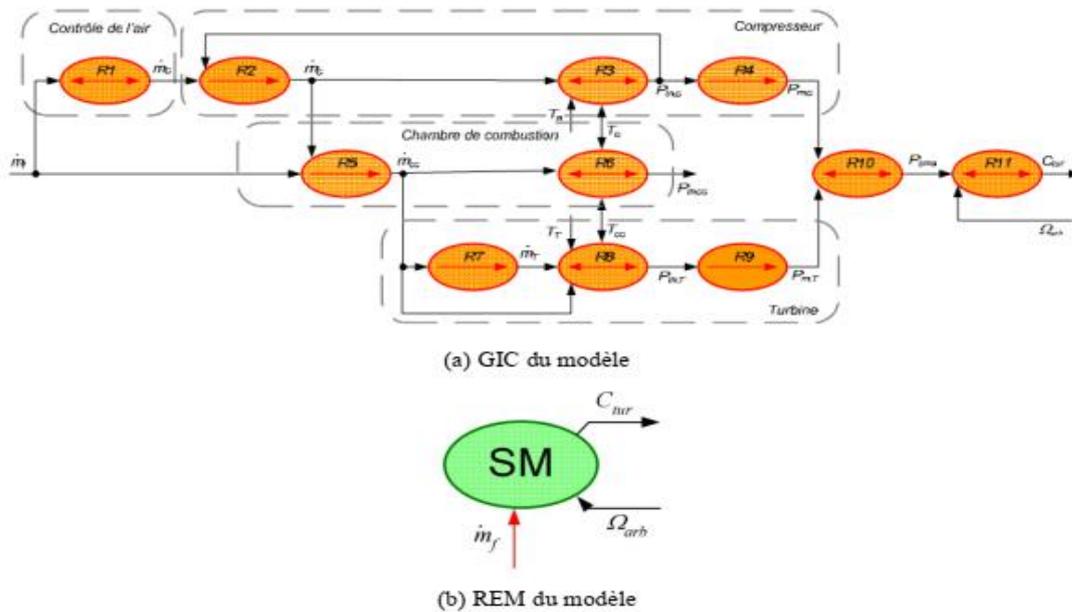


Fig. III.3 Modèle de la micro turbine

$$R1 : \dot{m}_0(t) = k \dot{m}_f(t) \tag{III.1}$$

Un compresseur est utilisé pour pressuriser le débit de masse d'air en entrée, et pour augmenter la température de l'air en entrée de la chambre de combustion. Le débit de masse d'air à la sortie du compresseur est le même qu'à l'entrée avec un temps de retard :

$$R2 : \dot{m}_c(t) = \dot{m}_0(t - \tau_c) \tag{III.2}$$

Le retard  $\tau_c$  (1,3 ms) dépend de la vitesse du gaz et de la longueur du compresseur. L'apport thermique généré dans le compresseur est exprimée par :

$$R3 : P_{th,c} = 1.19 \cdot 10^{-3} C_p (\dot{m}_0(t) + \dot{m}_c(t)) \frac{T_c - T_a}{2} \tag{III.3}$$

Où

$C_p$  : est le coefficient de puissance thermique.

$T_a$  (210 °C) et  $T_c$  (25 °C) sont la température ambiante du compresseur et la température d'entrée.

La puissance mécanique du compresseur  $P_{m,c}$  est régie par l'équation suivante :

$$R4 : \tau_c \frac{dP_{m,c}}{dt} = P_{th,c} - P_{m,c} \tag{III.4}$$

Le débit de masse d'air du compresseur et le débit de masse de carburant sont injectés dans l'entrée de la chambre de combustion. L'air et le gaz sont mélangés et brûlent dans la chambre de combustion. Le temps de retard associé à ce processus est  $\tau_{cc}$  (1,4 ms):

$$R5 : \dot{m}_{cc}(t) = \dot{m}_c(t - \tau_{cc}) + \dot{m}_f(t - \tau_{cc}) \tag{III.5}$$

La puissance thermique générée dans la chambre de combustion ne participe pas à la puissance mécanique de la micro turbine, et est exprimée par :

$$R6 : P_{th,cc} = 119.10^{-3} C_p \dot{m}_{cc}(t) [T_{cc} - T_c] \quad (III.6)$$

Où

$T_{cc}$  : est la température en sortie de la chambre de combustion (982 °C).

Le débit de masse de gaz à la sortie  $\dot{m}_{cc}(t)$  de la chambre de combustion est une grandeur d'entrée de la turbine. Le temps de retard associé avec ce processus est  $\tau_T$  (0,294 ms), et le débit de masse d'air de la turbine est donné par :

$$R7 : \dot{m}_T(t) = \dot{m}_{cc}(t - \tau_T) \quad (III.7)$$

La puissance thermique générée dans cette étape est exprimée par :

$$R8 : P_{th,T} = 119.10^{-3} C_p (\dot{m}_T(t) + \dot{m}_{cc}(t)) \frac{[T_{cc} - T_T]}{2} \quad (III.8)$$

Où  $T_T$  est la température en sortie de la turbine (316 °C).

La puissance mécanique de la turbine  $P_{m,T}$  est régie par l'équation différentielle suivante :

$$R9 : \tau_T \frac{dP_{m,T}}{dt} = P_{th,T} - P_{m,T} \quad (III.9)$$

La puissance mécanique en sortie de la MTG est obtenue à partir de la puissance mécanique du compresseur et de la puissance mécanique de la turbine respectivement :

$$R10 : P_{sma} = P_{m,T} - P_{m,c} \quad (III.10)$$

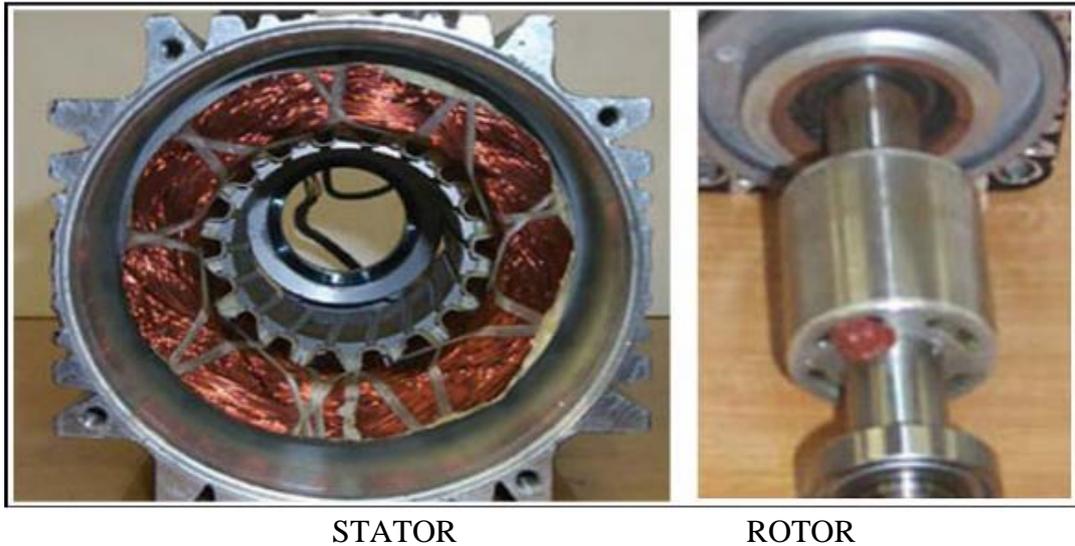
### III.7. Machine synchrone à aimants permanents

Aimant permanentes un matériau ferromagnétique qui possède une aimantation rigide susceptible de créer un champ magnétique extérieur et de maintenir en permanence une force magnétique.[33]

La machine synchrone sont des machines électriques tournantes, convertisseurs d'énergie, réversibles qui peuvent fonctionner en moteur ou en génératrice.

Lorsqu'une machine synchrone fonctionne en génératrice, c'est-à-dire transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique et fournit un courant alternatif. La machine synchrone utilisée depuis plusieurs décennies pour la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et pour l'entraînement à la vitesse de synchronisme d'une ou de plusieurs charges. Ce synchronisme est une conséquence directe de la construction de la machine, qui est une des plus simples, représente un stator produisant un champ tournant, dans lequel baigne un rotor présentant les caractéristiques d'un aimant, très souvent réalisé à partir d'un électro-aimant, ainsi le champ tournant entraîne le rotor à une vitesse reliée exclusivement à la fréquence du courant alternatif imposé aux bobinages satiriques.[34]

Comme tout moteur, la machine synchrone est constituée d'une partie mobile : le rotor et d'une partie fixe : le stator.



**Fig. III.4 :** stator et rotor de la machine synchrone à aimants permanents.

### III.7.1. Le stator

Le stator est habituellement l'induit (siège de la transformation de puissance). Le stator est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile, découpé en paire de pôles. Les bobinages sont insérés dans des encoches au sein de culasse en ferrite.

La machine synchrone triphasé comporte un stator fixe et un rotor mobile de l'axe dissymétrie de la machine. Dans les encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à  $p$  paires de pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à  $2\pi/3$ . [35]

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants satiriques. On note :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (\text{III.11})$$

Soit :

$\omega$  : La pulsation des courants satiriques [rad / s].

$P$  : Le nombre des paires de pôles de la machine.

$\Omega$  : La vitesse de rotation de la machine [rad / s].

### III.7.2. Le rotor

De la même manière, l'inducteur est généralement le rotor. Suivant la technologie utilisée, le champ magnétique est créé par des bobinages ou des aimants permanents.

Lorsque que l'inducteur est bobiné, il est nécessaire de conserver des balais afin de l'alimenter (mais cette fois sans commutation).

Cette année, seule la machine synchrone bushes (sans balai, donc à aimants permanents).

Le rotor est un circuit tournant, portant les pôles inducteurs, produisant le champ magnétique. Le circuit rétorque est soit parcouru par un courant continu, alimenté en courant continu et tourne à la même vitesse que le champ satirique. Il n'est donc pas nécessaire de le feuilleter. Pour des raisons économiques, il est souvent constitué de tôles épaisses. Il est constitué d'électroaimants parcourus par un courant d'excitation continu ou parfois simplement constitué d'aimants permanents (porté par le rotor). Il a pour rôle de créer un champ magnétique tournant à l'aide d'un rotor magnétisant mis en rotation. Il possède  $p$  paires de pôles. Le courant à l'inducteur est apporté par l'intermédiaire de bagues et de balais.

#### III.7.2.1. Les rotors à pôles lisses

Ce mode de construction assure une grande robustesse mécanique, il permet d'obtenir des fréquences de rotation élevées (3000 et 1500 tr/min). Il est systématiquement adopté pour les alternateurs de fortes puissances et utilisé pour la production d'énergie électrique dans les centrales thermiques et les centrales nucléaires. Le rotor est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches. Il possède les plus souvent deux pôles.

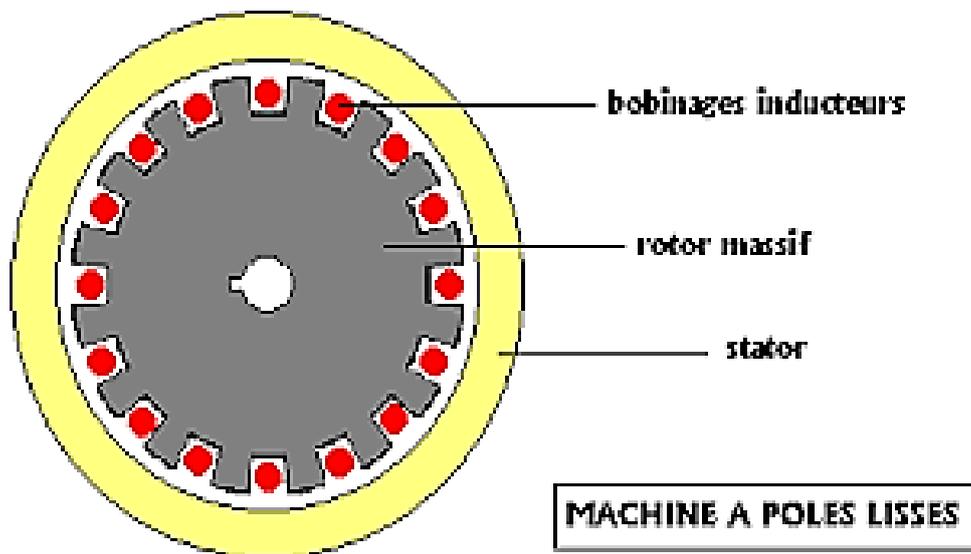


Fig.III.5 : rotors à pôles lisses.

### III.7.2.2. Rotor à pôles saillants

Ce type de construction n'autorise pas de grandes vitesses de rotation (<1500 tr/min), et de ce fait fournissant moins de puissance, il est utilisé pour la production d'énergie de 50 à 400 Hz dans les centrales hydrauliques et les groupes électrogènes. C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine.

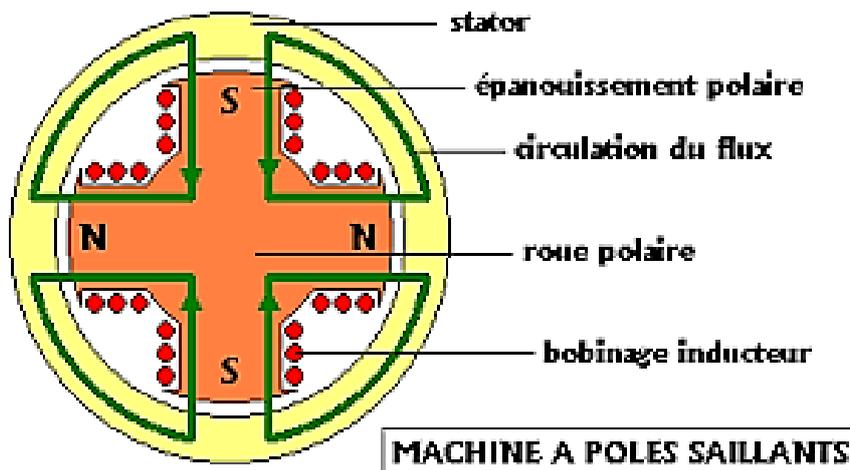


Fig. III.6 :Rotor à pôles saillants

### III.8. Caractéristiques d'une machine synchrone

La machine synchrone est une machine réversible de conversion électromécanique. Elle est principalement utilisée dans le domaine de production d'énergie électrique à partir d'énergie mécanique où elle porte le nom d'alternateur lorsque sa vitesse est fixe (exemple de centrale thermique, hydraulique, nucléaire ...). Lorsque sa vitesse est variable (exemple de centrale éolienne), elle est dite génératrice synchrone. Elle est rarement utilisée dans le domaine de production d'énergie mécanique à partir d'énergie électrique où elle porte le nom de moteur synchrone car sa vitesse de rotation doit être proportionnelle à la fréquence d'alimentation.

### III.9. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

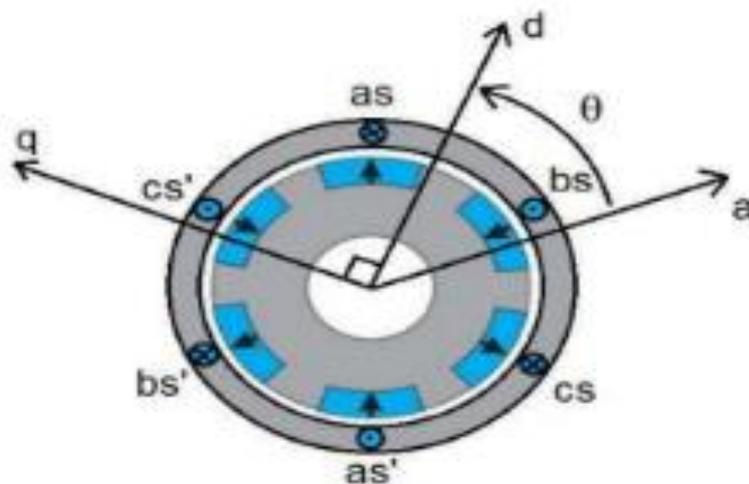
L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement. Les lois modernes de commande de plus en plus performantes permettent un meilleur contrôle des régimes transitoires tout en assurant, dans une grande plage de fonctionnement, un asservissement précis de la vitesse. Tous ces perfectionnements demandent une bonne connaissance de la machine et de son convertisseur, notamment en régime transitoire. Dans notre cas, nous en déduisons des lois de conception adaptées à machines synchrones aimantes permanentes. [36]

### III.9.1 Hypothèses simplificatrices

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus simple sera le modèle. Cela permet une étude et une exploitation plus aisée. Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courant alternatif [36]. Dans ce but, on adopte les suppositions suivantes :

- La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements, ce qui permet d'avoir des relations linéaires entre les flux et les courants.
- Les f.m.m. sont réparties sinusoïdalement dans l'entrefer de la machine, il y a une symétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements.
- On ne tient pas compte de l'hystérésis et les pertes par courants de Foucault dans les parties magnétiques.
- La variation des résistances en fonction de la température est négligeable.[37]

### III.9.2. Structure générale d'une MSAP



**Fig. III.7:** schéma d'une machine synchrone à aimant permanent à étudier.

La machine que nous allons étudier par la mise en équations correspond à la structure représentée par la figure (III.7). C'est une machine synchrone triphasée hexa polaire (nombre de paires de pôle  $P=3$ ), dont le rotor est triple d'un système d'aimants permanents, assurant une répartition d'induction sinusoïdale dans l'entrefer. Ce rotor ne comporte pas le système d'amortisseurs, ni des pièces polaires. L'absence de ces pièces polaires donne à la machine la

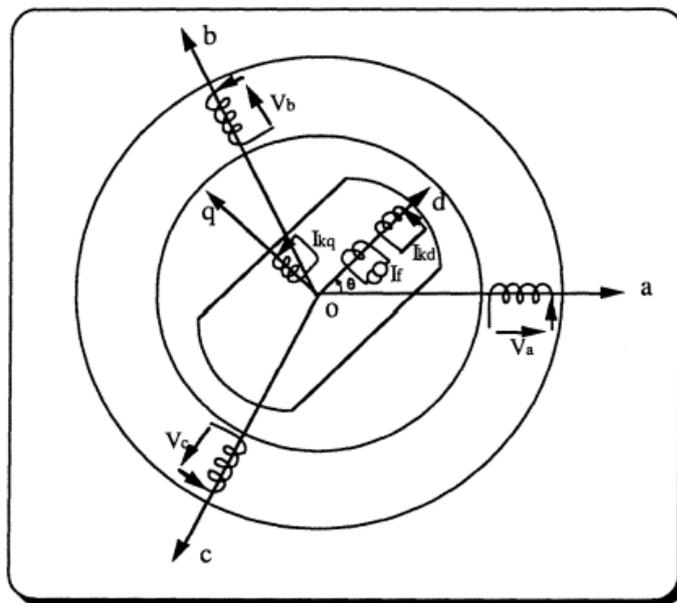
structure d'une machine à pôles saillant. Le stator comporte trois axes a, b, et c identiques et décalés entres eux d'un angle électrique de  $2\pi/3$ . [38]

Par convention le rotor est lié à deux axes caractéristiques : [39]

- L'axe d'aimantation rotorique, noté (d), il est appelé axe direct ou encore longitudinal.
- L'axe inter polaire (q), appelé axe en quadrature ou transversal. Il est déphasé de  $\pi/2$  en avant, par rapport à l'axe d. La position de rotor est repérée par l'angle électrique ( $\theta$ ) que fait son axe (d) avec l'axe immobile de la phase (a) du stator.

**III.9.3. Mise en équations de la machine**

La machine synchrone à aimants permanents étudiée ici composé un stator lisse triphasé, connecté en étoile à neutre isolé, de constitution symétrique à p paires de pôles, invariant dans une rotation de  $2\pi/3p$ . L'excitation au rotor est créée par des aimants permanents symétriques par rapport à p axes polaires (directs) et p axes interpolaires (en quadratures) décalés de  $\pi/2p$  par rapport aux précédents. L'entrefer qui peut être variable admet les mêmes axes de symétrie. Les aimants peuvent être modélisés par des enroulements alimentés par une source de courant continu constant disposés suivant les axes polaires. Le rotor est aussi muni d'amortisseurs modélisés par p enroulements en court-circuit suivant les axes polaires enroulements en court-circuit suivant les axes inter polaires. [40]



**Fig.III.8** Schéma général de la machine synchrone. [40]

Il est classique d'introduire les angles électriques égaux à p fois les angles mécaniques, ce qui permet d'avoir la même représentation pour une machine quel que soit le nombre de paires de pôles (figure III.7).

**III.9.4. Equations électriques**

Les équations dynamiques par phase de la machine s'écrivent comme suit:[41]

$$\begin{aligned}
 v_{as} &= R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\
 v_{bs} &= R_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\
 v_{cs} &= R_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{III.12}$$

La forme matricielle du système précédent est donnée par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}
 \tag{III.13}$$

Avec :  $R_s$  La résistance des phases satiriques.

$[v_a, v_b, v_c]^t$  Les tensions des phases satiriques.

$[i_a, i_b, i_c]^t$  Les courants des phases satiriques.

$[\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c]^t$  Les flux totaux à travers les bobines satiriques.

Les équations (III.13) peuvent s'écrire sous forme matricielle :[41]

$$[v_{s,abc}] = [R_s][I_{s,abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s,abc}]
 \tag{III.14}$$

**III.9.5. L'équation magnétique**

➤ Flux satirique

$$[\varphi_s] = [L_s] \cdot [i_s] + [M_{sf}] \cdot [i_f]
 \tag{III.15}$$

➤ Flux rétorque

$$[\varphi_f] = [L_f] \cdot [i_f] + [M_{sf}] \cdot [i_s] \quad [L_f] = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

La matrice  $[L_s]$  est une matrice carrée d'ordre 3, elle contient des termes constants que nous regroupons dans  $[L_{s0}]$  et les termes variables dépendant de  $\theta$ , que nous regroupons dans  $[L_{s2}(\theta)]$  [42] :

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}] \quad (\text{III.17})$$

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

$$[L_{s2}] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos\left(2\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

$[M_{sf}]$ : Est la matrice inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

$$[M_{sf}] = M_f \begin{bmatrix} \cos(2\theta) \\ \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [M_{sf}] = [M_{sf}]^t \quad (\text{III.20})$$

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} ([L_s] \cdot [i_s] + [M_{sf}] \cdot [I_f]) \quad (\text{III.21})$$

$$[V_f] = [R_f] \cdot [I_f] + \frac{d}{dt} ([L_f] \cdot [I_f] + [M_{sf}] \cdot [L_s]) \quad (\text{III.22})$$

### III.9.6. Passage au repère de Park

L'idée de cette transformation est inventée par Park, elle est utilisée pour la machine synchrone à pôles saillants, plus une excitation continue. L'axe direct « d » coïncide avec l'axe longitudinal, l'axe en quadrature « q » coïncide avec l'axe transversal, et l'axe homopolaire « O » coïncide avec l'axe de la machine (arbre).

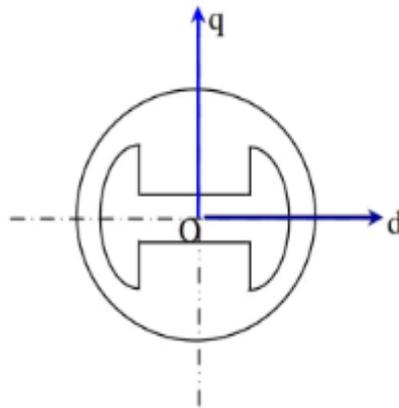


Fig. III.9 :Naissance du repère de Park.

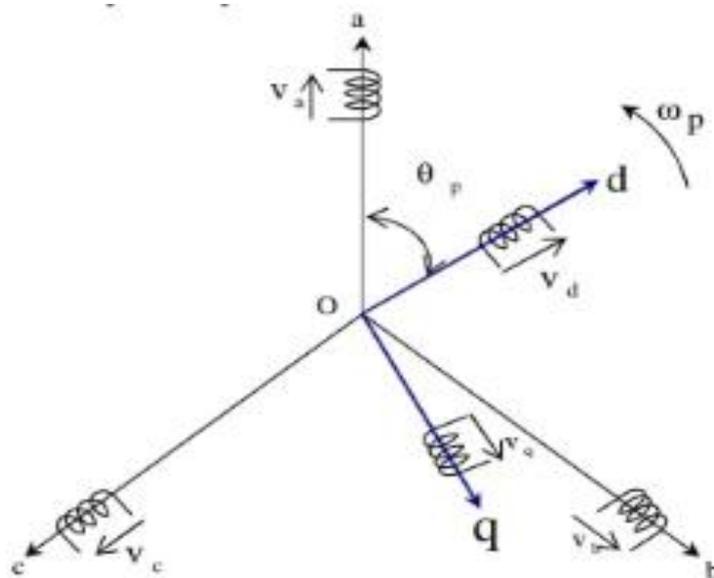


Fig. III.10 : Représentation des tensions triphasées et leurs équivalences de systèmes de tensions diphasées tournant (dq0)

La matrice condensée des tensions dans le repère (dq0), est exprimée en fonction des matrices condensée des tensions dans le repère (abc) par la relation (III.20).

$$[V_{dp0}] = [P(\theta_p)] \cdot [V_{abc}] \tag{III ,23}$$

Par conséquent, les expressions des matrices de Park et Park inverse sont données par les relations (III.23),(III.24)

$$[P(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

$$[P(\theta_r)]^{-1} = [P(\theta_r)]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

La matrice de Park est normée, par conséquent son inverse est égale à sa transposée.

La transformation de Park est utilisée pour toute grandeur d'espace (flux, courants ...).

Si le système des tensions est équilibré, la matrice de Park, se réduit à :

$$[P_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & \cos(\theta_p - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_p - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_p) & \cos(\theta_p + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_p + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

### III.9.7. Choix du référentiel

On étudie la théorie des processus transitoires des machines électriques par utilisation des trois systèmes d'axes de coordonnées qui sont des cas particuliers du système d'axes.

#### III.9.7.1. Référentiel lié au stator

Ce système d'axes est immobile par rapport au stator ( $\omega_a = 0$ ).

$$\begin{bmatrix} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Psi_{sa}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_m \Psi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

C'est un avantage pour ce système d'axes puisqu'il ne nécessite pas une transformation vers le système réel. Ce système peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif avec le branchement de résistances supplémentaires au niveau du circuit du stator.

L'utilisation de ce système est possible pour les machines à courant alternatif et les transformateurs.

**III.9.7.2. Référentiel lié au rotor**

Ce système d'axes est immobile par rapport au rotor tournant à une vitesse  $\omega_m$ .

$\omega_\alpha = \omega_m$  et remplaçant les indices U, V par d, q :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_m \Psi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_m \Psi_{ds} \\
 V_{dr} &= 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} \\
 V_{qr} &= 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{III.28}$$

Le système d'axes d,q est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

**III.9.7.3. Référentiel lié au champ tournant**

Où U et V sont fixes par rapport au champ tournant. Dans ce cas,  $\omega_\alpha = \omega_s$ . Ce repère devient intéressant lors d'une étude de la commande de la machine asynchrone ; car les grandeurs transformées selon les axes d et deviennent des constantes, c'est à dire des grandeurs continues, faciles à réguler.

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_s \Psi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Psi_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Psi_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{III.29}$$

Le système d'axes d,q est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

**III.10. Modèle de la machine synchrone à aimant permanent dans le repère de Park**

Les équations obtenues dans le repère  $(a, b, c)$  sont non - linéaires et couplées. Elles sont fonctions de la position du rotor  $\theta$ . Ceci fait apparaître des difficultés pour la résolution du système. Pour simplifier ce problème, la plupart des travaux dans la littérature font appel à l'utilisation de la transformation de Park. Cette transformation, appliquée aux variables réelles (tension, courant, flux), permet d'obtenir des variables fictives appelées les composantes d-q de Park. Ceci peut être interprété comme étant une substitution des enroulements orthogonaux d'axe (d-q) tournant à une vitesse  $\omega$  par rapport au stator (Figure.III.8) aux enroulements triphasés(a,b,c). Ce changement de repère rend les équations dynamiques de la machine plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse.[43]

**III.10.1. Equations électriques**

Le système d'équations suivant montre les équations électriques de la machine synchrone aimant permanent qui fonctionne moteur.[44]

$$[V_{dq}] = [T][V_{abc}] \tag{III.30}$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Après développement des équations, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega \cdot \phi_q \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_q}{dt} - \omega \cdot \phi_d \end{cases}$$

$V_{ds}, V_{qs}$  : Composantes de la tension au stator dans le repère de Park.

$R_s$  : Résistance statorique.

$i_{ds}, i_{qs}$  : Composantes du courant statorique dans le repère de Park.

$L_d$  : Inductance statorique directe.

$\omega_r$  : Pulsation électrique rotorique.

$\phi_f$  : Flux d'excitation des aimants permanents.

**III.10.2. Equations magnétiques**

Les flux peuvent être formulés par les équations suivantes:[45]

Sur l'axe d

$$\Phi_d = L_d \cdot i_d + \Phi_{sf} \tag{III.31}$$

$\Phi_d$  : Constante indiquant le champ dû à l'aimantation permanente du rotor :

Sur l'axe q:

$$\Phi_q = L_q \cdot i_q \tag{III.32}$$

Le modèle de MSAP peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - L_q \cdot \omega \cdot i_{qs} + L_d \frac{d\Phi_s}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} - L_d \cdot \omega \cdot i_{ds} + L_q \frac{d\Phi_s}{dt} + \omega \Phi_e \end{cases} \tag{III.33}$$

Avec :

$\Phi$  : Flux dû aux aimants.

R : Résistance d'une phase statorique.

$i_d$  : Inductance suivant l'axe d.

$i_q$  : Inductance suivant l'axe q.

$\omega$  : Pulsation des tensions et des courants triphasés

**III.10.3. Expression du couple électromagnétique**

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$C_{em} = \frac{d\omega e}{d\theta_{geo}} = P \frac{d\omega e}{d\theta} \tag{III.34}$$

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q) \quad (\text{III.35})$$

En remplaçant  $V_d$  et  $V_q$  par leur expression on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[ R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left( \frac{d\theta_q}{dt} i_d + \frac{d\theta_d}{dt} i_q \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d \cdot i_d - \varphi_q \cdot i_q) \right] \quad (\text{III.36})$$

- $\frac{3}{2} [R_s (i_d^2 + i_q^2)]$  : représente la puissance dissipée en pertes joules dans les enroulements du stator.
- $\frac{3}{2} \left[ \frac{d\theta_q}{dt} i_d + \frac{d\theta_d}{dt} i_q \right]$  : représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.
- $\frac{3}{2} \left[ \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d \cdot i_d - \varphi_q \cdot i_q) \right]$  : représente la puissance électromagnétique

Sachant que :

$$P\Omega = P\omega_r = \omega \text{ et } P_e = C_e \Omega \quad (\text{III.37})$$

Avec :

$\omega$  : La pulsation électrique.

$p$  : Le nombre de paire de pôles de la machine.

$\omega_r$  : La vitesse de rotation de la machine (rotor).

$$C_e = \frac{3}{2} [P(\varphi_d \cdot i_q - \varphi_q \cdot i_d)] \quad (\text{III.38})$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire :

$$C_e = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_q \cdot i_d + i_q \cdot \Phi_f] \quad (\text{III.39})$$

Si le rotor est lisse ( $L_d=L_q$ ), cette équation se simplifie en :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot P i_q \cdot \Phi_f \quad (\text{III.40})$$

**III.10.4. Equations mécaniques**

L'équation fondamentale de la mécanique peut s'écrire:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m - B\omega_m \quad (\text{III.41})$$

Où :

$$\omega_r = P\omega_m \quad (\text{III.42})$$

Avec :

$T_e$  : Couple électromagnétique de la machine.

$T_m$  : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine.

B : Coefficient de frottement visqueux.

J : Moment d'inertie total ramené sur l'arbre du rotor.

P : Nombre de pôles.

$\omega_m$  : Vitesse mécanique du rotor.[45]

**III.11. Simulation de l'alternateur à aimant permanent**

Dans cette partie la GSAP sera simulée en deux cas distincts :

1. A vide : la GSAP sera entraînée par un couple moteur d'une valeur de 7.85 N.m durant 0.08S puis on laisse tourner librement.
2. La GSAP alimente une charge (Rch,Lch) monté en étoile, le couple moteur initial est de 7.85 N.m mais à 0.5 S, il sera diminué à 5.38. [19]

**III.11.1. Simulation de l'alternateur à vide**

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

Les expressions des tensions et couples deviennent :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \cdot \varphi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

III.11.2. Schéma Bloc de simulation

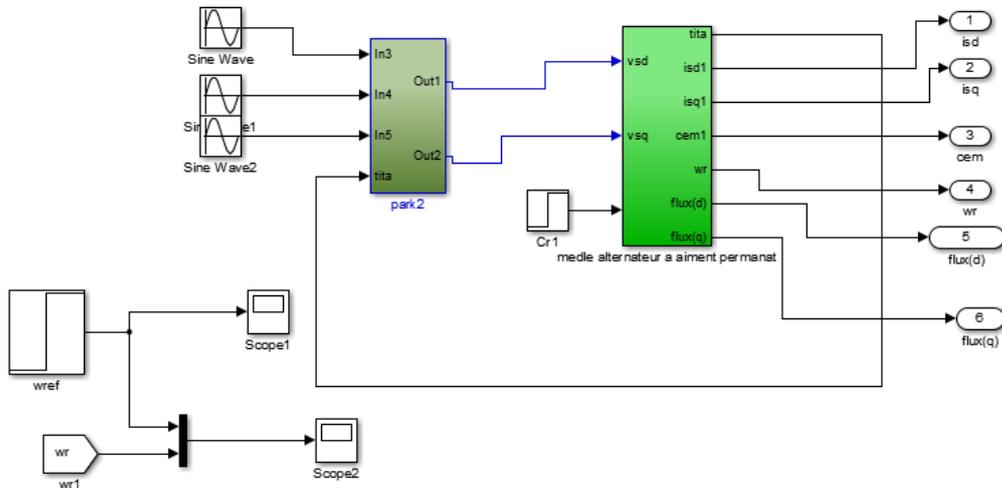
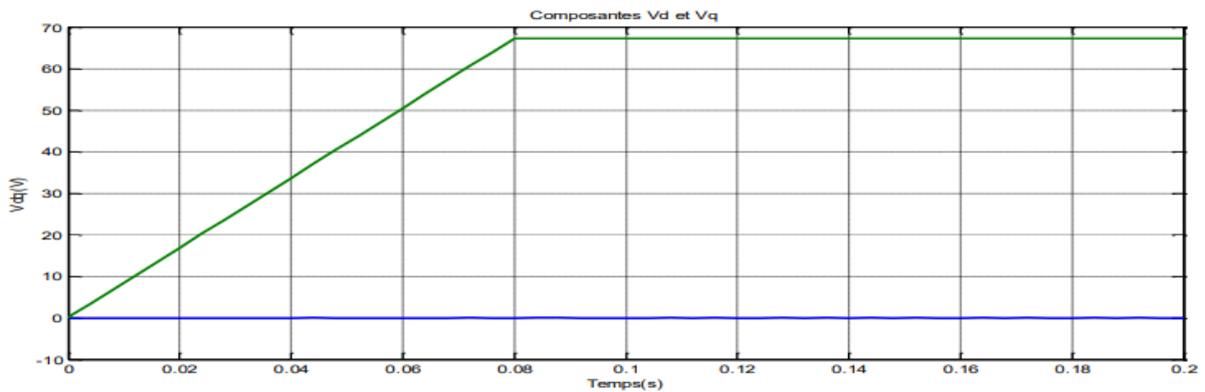


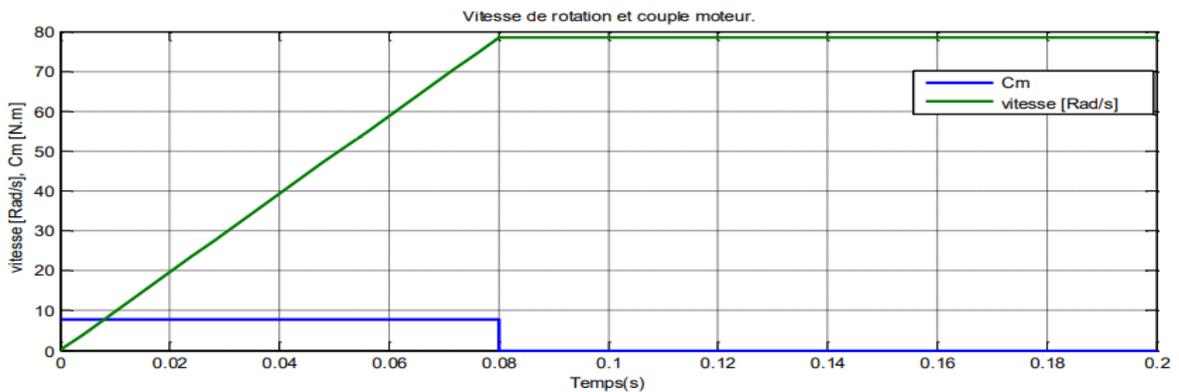
Fig. III.11 Schéma bloc de simulation de l'alternateur à vide

III.11.2.1. Résultats de simulation de l'alternateur à vide

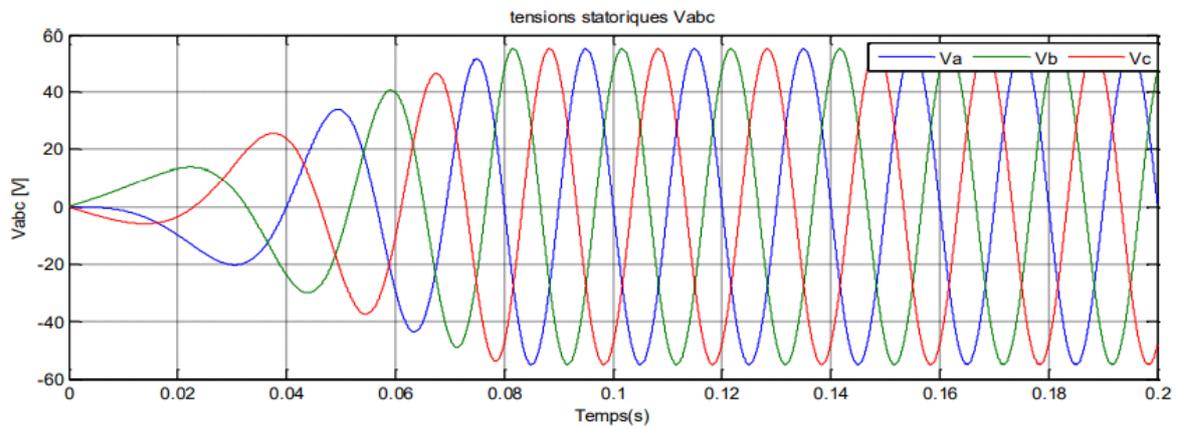
1) Evolution de la tension :



2) Evolution la vitesse de rotation et le couple moteur :



## 3) Evolution des tensions statoriques :



## 4) Les tensions statoriques zoomées :

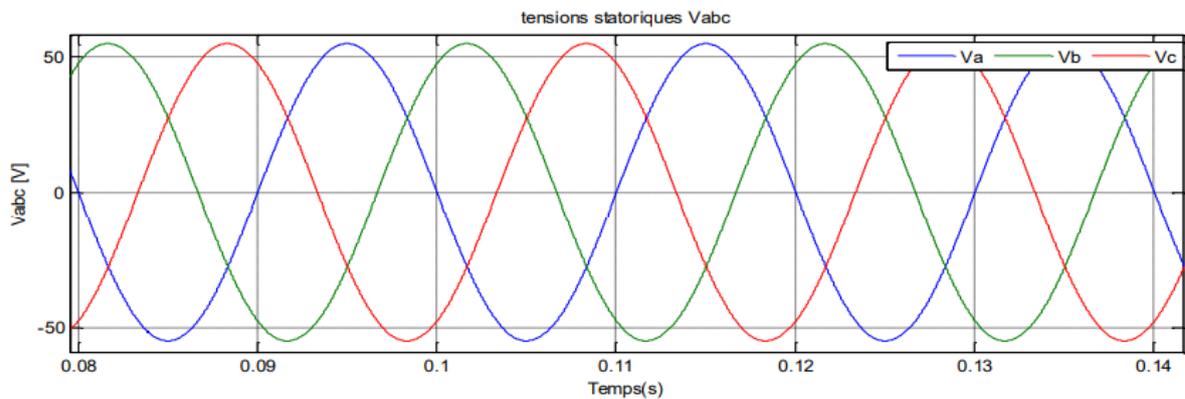


Fig.III.12 : Résultats de simulation de l'alternateur à vide.

## III.11.1.2. Interprétation des résultats

Pendant une durée de 0,08 s, l'alternateur est alimenté par un couple moteur de 7,85 N.m, qui est ensuite annulé pour permettre à l'alternateur de tourner librement, c'est-à-dire de fonctionner à vide, où les frottements sont nuls. D'après la figure II.11.2, la vitesse est stabilisée à 78,5 rad/s, et les tensions de phase sont précisément sinusoïdales en régime permanent, avec une valeur crête de 55V et une fréquence de 50 HZ, comme indiqué sur la figure ( II.11.3).

III.11.2. L'alternateur alimente une charge

L'alternateur alimente dans ce cas une charge électrique (Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur l'alternateur. [46])

$$V_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_{qs} \quad (III.45)$$

$$V_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \varphi_f$$

D'autre part, l'application des tensions  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  sur la charge donne :

$$V_{ds} = R_{ch} i_{ds} + L_{ch} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_{ch} i_{qs} \quad (III.46)$$

$$V_{qs} = R_{ch} i_{qs} + L_{ch} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_{ch} i_{ds}$$

En remplaçant les expressions de  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  dans (III.46), on aura le système suivant :

$$\begin{aligned} 0 &= -(R_s + R_{ch}) i_{ds} - (L_d + L_{ch}) \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r (L_q + L_{ch}) i_{qs} \\ 0 &= -(R_s + R_{ch}) i_{qs} - (L_d + L_{ch}) \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_d + L_{ch}) i_{ds} + \omega_r \varphi_f \end{aligned} \quad (III.47)$$

En introduisant la transformée de LAPLACE dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{aligned} s i_{ds} &= \frac{1}{(L_d + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch}) i_{ds} + \omega_r (L_q + L_{ch}) i_{qs}] \\ s i_{qs} &= \frac{1}{(L_q + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch}) i_{qs} + \omega_r (L_d + L_{ch}) i_{ds} + \omega_r \varphi_f] \end{aligned} \quad (III.48)$$

Considérons le flux d'excitation  $\varphi_f$  comme grandeur de commande, et les courants  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$  comme variables d'état.

III.11.2.1. Equations d'état

On cherche à obtenir un système d'équations sous forme d'équation d'état :

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][v]$$

$$[x] = [i_{ds} \ i_{qs}]^t, [v] = [0 \ \varphi_f]^t \quad (III.49)$$

Le système d'équations (III.44), peut être écrit sous la forme matricielle suivante.

$$\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & \omega_r \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\omega_r \frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & \frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_r \varphi_f}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (III.50)$$

On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & \frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (III.51)$$

$$[B][v] = \omega_r \frac{1}{L_q+L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (III.52)$$

III.11.2.2 Schéma Bloc de simulation de l'alternateur en charge

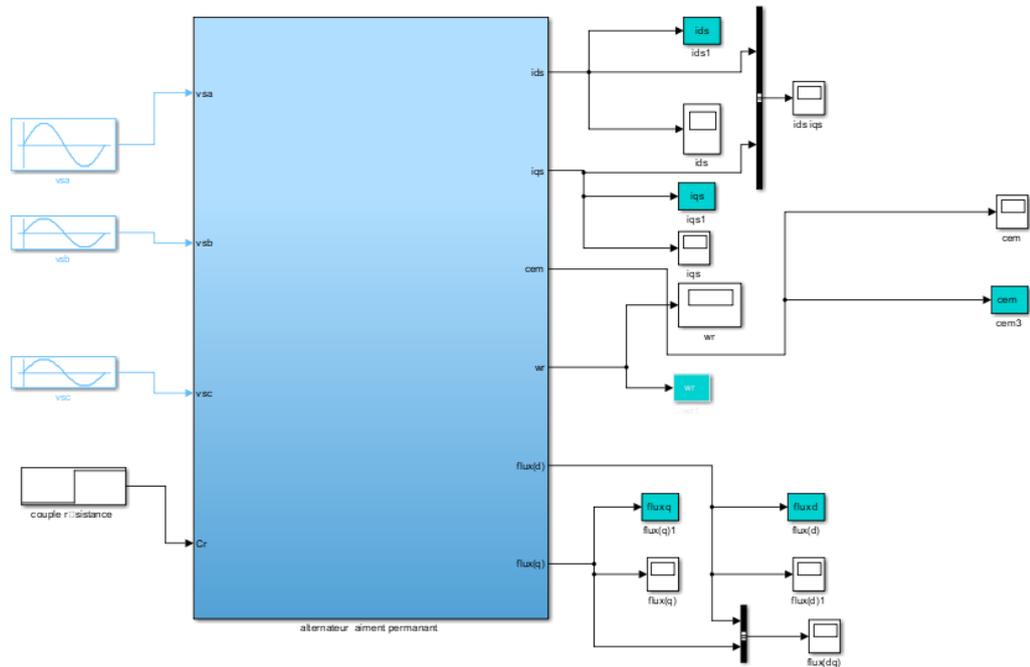
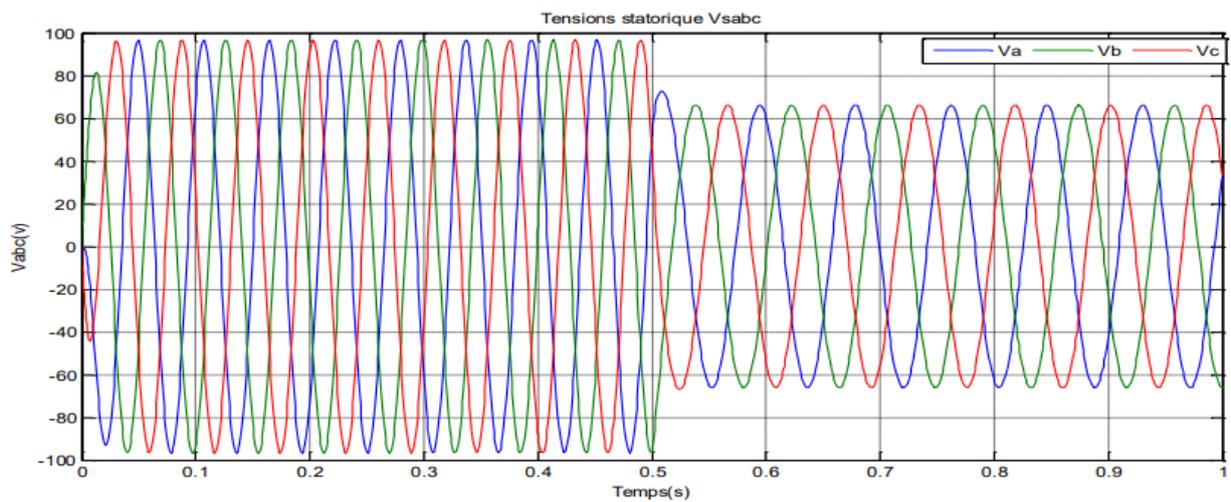


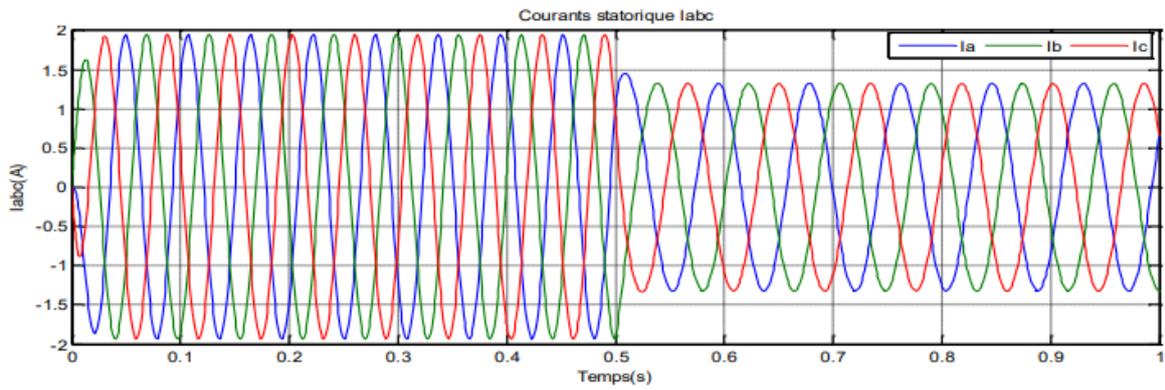
Fig. III.13 Bloc de simulation de l'alternateur en charge

III.11.2.3. Résultats de simulation

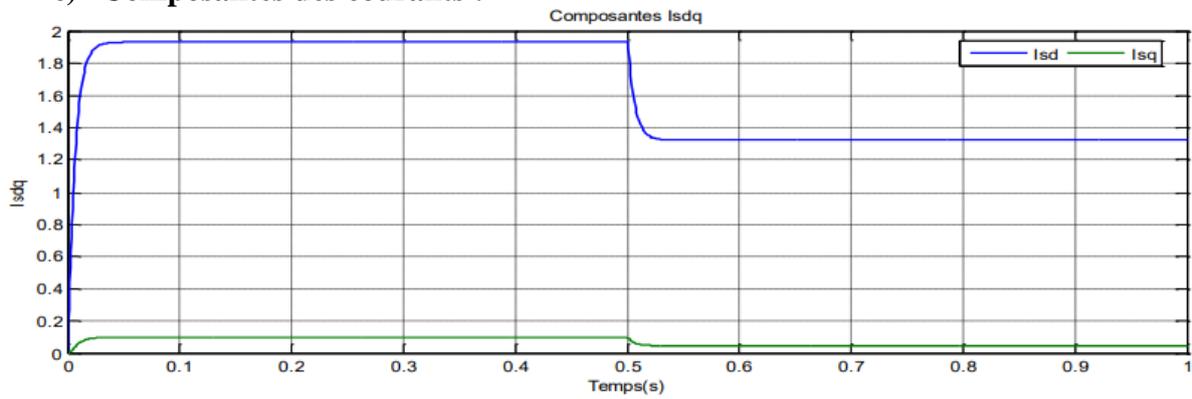
a) Tensions statoriques :



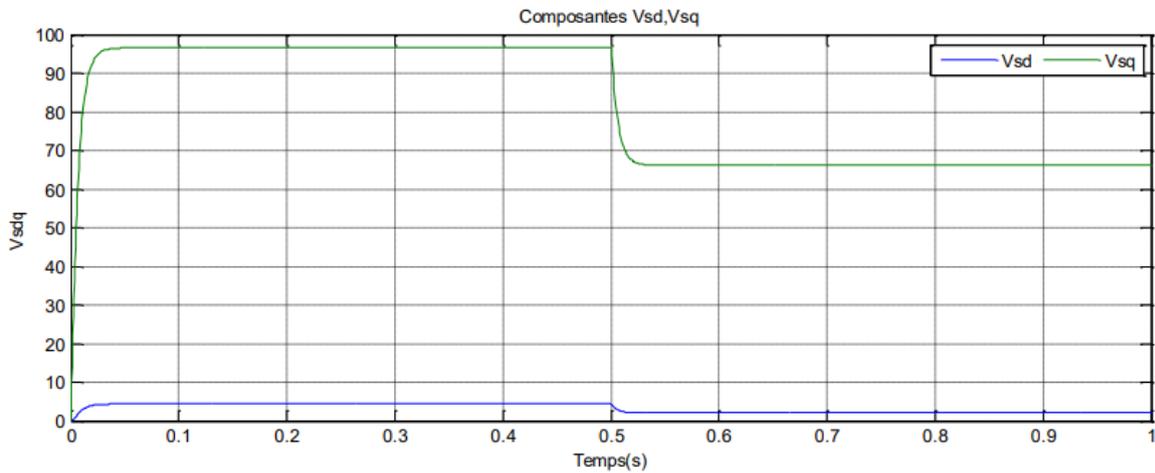
b) Courants statoriques :



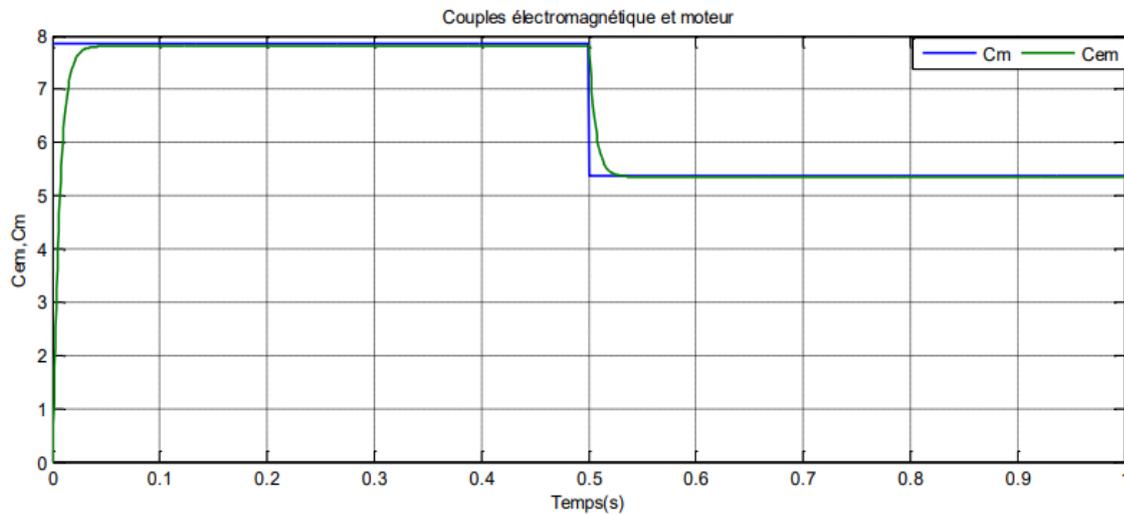
c) Composantes des courants :



d) Composantes Vsd , Vsq :



## e) Couples électromagnétiques et moteur



## f) Vitesse de rotation

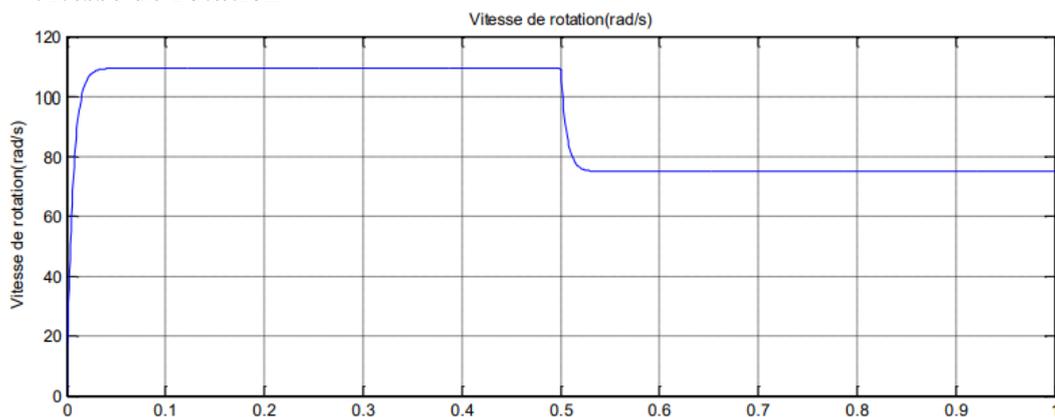


Fig. III.14 Résultats de simulation de l'alternateur en charge

### III.11.2.4. Interprétation des résultats

Ces simulations de l'alternateur montrés des importants résultats :

- L'application de deux couples moteurs différents est pour voir l'effet de la charge électrique sur le comportement de l'alternateur à aimant permanent.
- La vitesse mécanique varie de 109.5tr/min jusqu'à 74.85 tr/min par la réduction du couple moteur de 7.85 N.m à 5.38 N.m c'est-à-dire, la vitesse est en fonction du couple mécanique.
- La tension et le courant sont réduits de 96.7 V à 66.2 V et de 1.93A à 1.32 A successivement.

## Conclusion

dans le dernier chapitre, nous avons examiné une variété de modèles de turbo-alternateur, qui sont tous basés sur des équations mathématiques pour refléter le principe de fonctionnement. Pour rendre le modèle plus simple, nous avons utilisé la matrice de Park. Nous avons également présenté certaines des données que nous avons obtenues de la modélisation de l'alternateur, et nous sommes arrivés à la conclusion que l'énergie électrique est très importante, et que l'énergie électrique de la charge est étroitement proportionnelle à l'énergie mécanique fournie par la turbine.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### *Conclusion générale*

De ce travail nous obtenons :

Le turboalternateur est un système électromécanique qui se compose de deux sous-systèmes : la turbine, qui convertit l'énergie thermique donnée par la chambre de combustion en énergie mécanique, et l'alternateur, qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Ce système est appelé un système car il convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Nous avons utilisé la modélisation du turboalternateur, comme le démontre notre étude. Le modèle extrait est un système en trois phases, et pour simplifier ce dernier, nous avons utilisé la transformation de Park. Conversion en système biphasé Des études de simulation de vide et de charge sont utilisées pour valider ce modèle.

Le logiciel Matlab Simulink est utilisé.

Enfin, on obtient les résultats de simulation du générateur à turbine à vide montrent que la vitesse est stabilisée à une valeur constante et que les tensions sont parfaitement sinusoïdales à l'état stable, mais les résultats de la simulation du turboalternateur chargé montrent que la vitesse mécanique est réduite avec la réduction du couple du moteur, et que la même chose est vraie pour les tensions et les courants, indiquant que la puissance électrique est une fonction directe de la puissance mécanique.

# Annexe

**Les paramètres de la machine synchrone à aimant permanent (alternateur) qui ont utilisés pour la simulation sont:**

**À vide :**

$R_s=2.875\Omega$  ;  $L_d=0.0085H$ ;  $L_q=0.0085H$  ;  $J=0.008Kg.m^2$  ;  $f=0Nm/rd/s$  ;  $p=4$  ;  
 $\varphi=0.175Wb$  ;  $P=1 KW$ .

**En charge :**

$R_s=0.895\Omega$  ;  $L_d=0.012H$  ;  $L_q=0.0211H$  ;  $J=0.00141 Kg.m^2$ ;  $f=0.001Nm/rd/s$  ;  $p=3$  ;  
 $\varphi=0.9Wb$  ;  $R_{ch}=50\Omega$  ;  $L_{ch}=0.002H$  ;  $P=1 KW$

# Les références

- [1] ENSPM Formation Industrie - IFP Training. Machines Tournantes : turbines à gaz technologie et fonctionnement. 2005.
- [2] Manuel d'installations, d'utilisation et de maintenance
- [3] <http://www.techniques-ingenieur.fr>
- [4] Bouam Abdallah « Amélioration Des Performances Des Turbines A Gaz Utilisées Dans L'industrie Des Hydrocarbures Par L'injection De Vapeur D'eau », THESE DE DOCTORAT 2008, Université de Boumerdes.
- [5]. <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-brayton-cycle-moteur-a-turbine-a-gaz-definition/>
- [6] GE oil & gas - Nuovo Pignone. Gas turbine - hdgt basic for technicians Training manual.
- [7] Veronique, P. Interactions rotor-stator en turbine : étude de l'effet potentiel remontant. Thèse de doctorat : Mécanique, Lyon : Ecole Centrale De Lyon : 2011, PP. 2.
- [8] Cla, Les compresseurs [en ligne] (page consultée le 22/05/2019)  
<http://cla.vidal.free.fr/compr.htm>.
- [9] GE oil & gas - Nuovo Pignone. Manuel de formation pour la conduite et l'entretien d'une turbine a gaz MS 5002 C.
- [10] Total. Exploration et Production Les Équipements Les Turbines. 2007.
- [11] GE oil & gas - Nuovo Pignone. Heavy Duty Gas Turbine Operating Principles.
- [12] G. Danieus, "Energétique et turbomachines (691/IGM)"
- [13] <https://www.iso.org>
- [14] Gérald Claeys « Modélisation de la production indépendante dans les réseaux de distribution » thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble , France, 2001
- [15]: [www.wikipedia.fr/cycle combiné](http://www.wikipedia.fr/cycle combiné).
- [16]. <https://www.autosource.fr/quest-ce-quun-turbo-moteur-et-quel-est-son-role/>
- [17].: Christophe Palermo IUT de Montpellier Département Mesures Physiques & Institut d'Electronique du Sud Université Montpellier 2
- [18]. FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE DÉPARTEMENT DE L'ÉLECTROTECHNIQUE Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique présenté par Ahsene Mehidi , Système de protection du turbo-alternateur, 2018
- [19]. THEME Etude et modélisation d'un turbo-alternateur [univ-msiladz](#) › handle › 2014.32.pdf PDF by ENGE DE MASTER — UNIVERSITE DE M'SILA. F

- [20].maxicours construction-et-caracteristiques-des-alternateurs
- [21].Faculté des Sciences et de la technologie (FST).Techniques de bobinage des stators des machines à courant alternatif par guesbaya, nadjib.
- [22].THEME Etude et modélisation d'un turbo-alternateuruniv-msila.dz › handle › 2014. by ENGE DE MASTER — UNIVERSITE DE M'SILA.
- [23].Ould Mohamed Brahim et all « étude d'un turboalternateur, modélisation et simulation de l'alternateur » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2010
- [24].modelisation électromagnétique des développant et du circuit magnétique de turbo-alternateur Jeremie Foulon stage de fin de deuxième année de master (mars-september 2009)
- [25].La Sécurité de fonctionnement du groupe électrogène CUMMINS GANDONOU, H. Edmonda. D. SACRAMENTO, Jean Christian. E. FAGBEMI, Latif DJOSSOU, R. Thierry AGBANGLANON, Brice 2013
- [26].Commande de la puissance injectée par un générateur synchrone connecté au réseau électrique Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique par Khalfa Djalal Eddine et Boutiche Abdallah.université Mohamed Boudiaf-Msila 2016-2017
- [27].étude de couplage d'alternateurs au réseau électrique et essais par AZROU TARIK ET BOUZID HAKIM.univ de TIZI OUZOU.2007-2008
- [28].Saada Adil et Roubache Toufik « étude de la protection des alternateurs » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005.
- [29 ].Guy Chateigner et all « manuel de génie électrique» livre, édition Dunod, Paris, France, 2006
- [30] : <https://hmf.enseiht.fr> › partiea›fctEléments constituant une turbine à gaz.
- [31] : [https:// energiepluslesite.betechniques/cogeneration9/turbine/](https://energiepluslesite.betechniques/cogeneration9/turbine/)
- [32] : Régulation de la vitesse de rotation d'une turbine à gaz par un contrôleur intelligent par Hafid Salaheddine,UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI D'OUUM EL BOUAGHIFACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUÉSDEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE.
- [33] :Chemouri Boudjemaa et Gafer Boubekeur «Commande non-linéaire d'une machine synchrone à aimants permanents» mémoire d'ingénieur, université de M'Sila, Algérie, 2006.
- [34] :Universite du Quebec a trois-rivieres, Etude par simulation d'un system de positionnement par une machine synchrone a aimants permanents alimente par courants imposes,par BERNARD J.HEBERTIng. Décembre 1989.
- [35] : Ferroudj Abdelmalek « Commande Non-Linéaire de la MSAP Sans Capteur de Vitesse. Apportdes Méthodes de L'intelligence Artificielle » Mémoire de Magister, université de Batna, Algérie,2011.

- [36] : AmeerAissa « commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimant permanent dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissant »Magister enÉlectrotechnique, Université de Batna 2005.
- [37] : Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents par Hamichi Azedine et Benkerrou Farid, université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [38] : commande de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) par les réseaux de neurones artificiels, par ARIF salim,BOUCHAALA abdelbari UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2019.
- [39] : L. CHEDOT « Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents internes à large espace de fonctionnement. Application à l'alternateur », 09 novembre 2004.
- [40] : Saeed Afsharnia. Contrôle vectoriel des machines synchrones à aimants permanents : identification des paramètres et minimisation des ondulations de couple. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1995. Français. ffNNT : 1995INPL043Nff.ftel-01751177ff.
- [41] : Zegeub Boubaker. Commande d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents Sans Capteur de Vitesse.Utilisation d'Un Observateur Non Linéaire. Université de Batna Faculté des Sciences de l'ingénieur Département d'électrotechnique.2008
- [42] :K.Zahia, " Etude et commande de la machine synchrone à aimant permanent MSAP ", Mémoire de Master, Université de Ahmed Draia Adrar
- [43] : ZEGHOUDI Souhila, COMMANDE PAR PASSIVITE DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS, Université Abou Bakr Belkaid.2014/2015.
- [44] : ELKALI laid,Etude et modélisation d'un turbo-alternateur, université de M'SILA,2013/2014.
- [45] : Benkhaled Bilal « Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne » mémoire de master, université de M'sila, Algérie, 2013.
- [46] : Marouf Adel « Étude et modélisation d'une chaîne de production éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » mémoire de master, université de M'sila, Algérie, 2012.