

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



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES

THEME

Etude et modélisation d'un turbo-alternateur

Proposé et dirigé par :

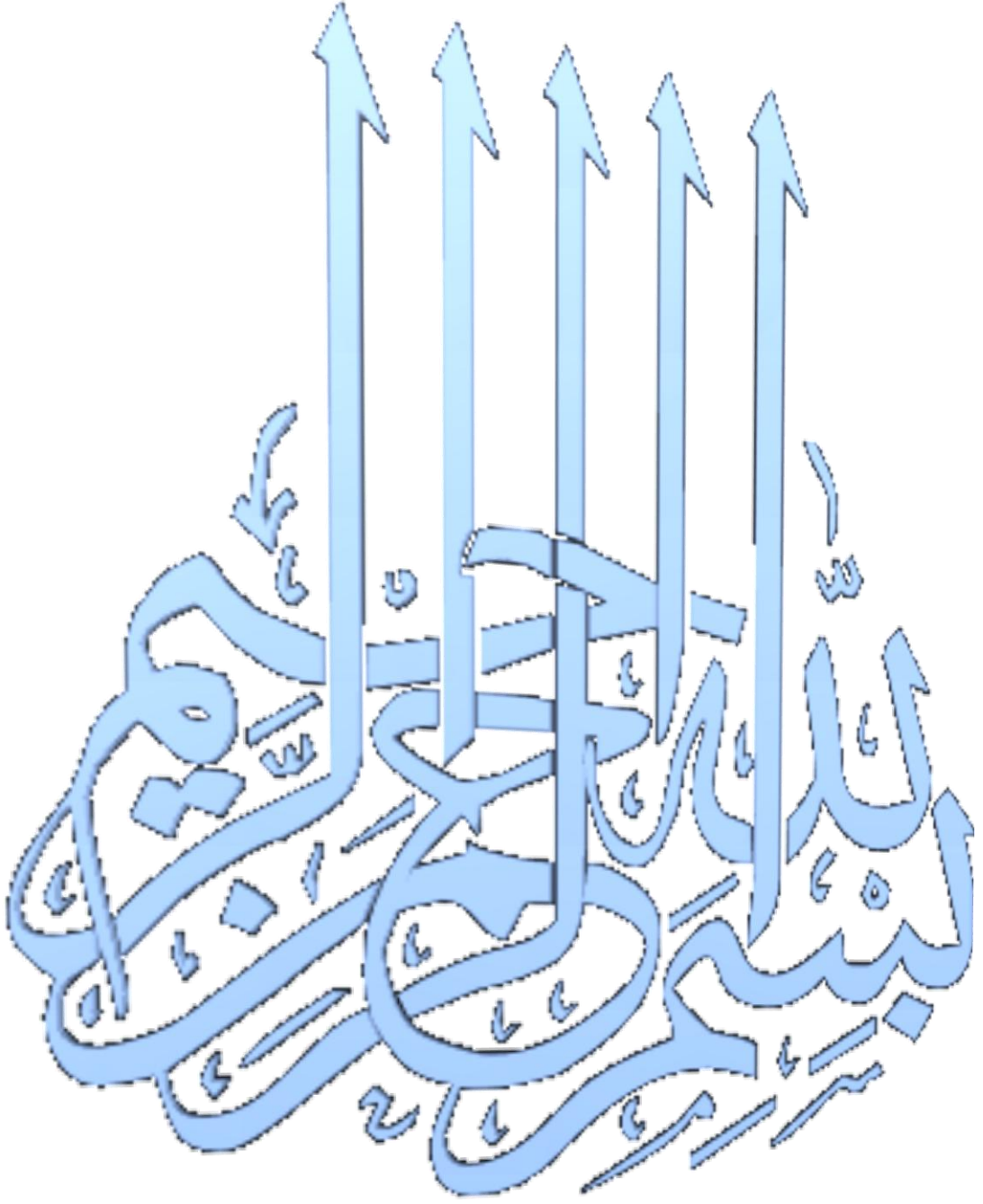
- Dr.GHEMARI Zine

Présenté par :

- ELKALI laid

Année Universitaire : 2013 / 2014

N⁰ d'ordre : 054



REMERCIEMENTS

*Je remercie tous les enseignants du département de génie électrique surtout **Dr : GHEMARI Zine** et **Mr : BEN DJAYMA Bachir***

Par ses connaissances et tout conseil et orientation, grâce à ses Connaissances et tout les enseignants qui ont participé à notre Formation et tous qui nous ont aidé pour la réalisation de ce travail mes sincères remerciements à tout ceux qui mon aidé de prés ou de loin.

E. Laid

Dédicace

Je dédie ce travail à :

-Ma mère et mon père, pour leurs soutiens tout le long de mes études.

-Mes frères.

- Ma grande famille.

- mes amis chacun avec son nom.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT	I
DEDICACE	II
LISTE DES FIGURES	III
NOMENCLATURE	VI
Introduction générale	1

Chapitre I. Généralité sur la turbine à gaz

I.1. Introduction	3
I.2. Le turbo alternateur	3
I. 3. Les types des turbines	4
I.4. Turbine à gaz	4
I.4.1. Le filtrage d'air	5
I.4.2. Le compresseur	6
I.4.2.1. Le rotor du compresseur	6
I.4.2.2. Le stator du compresseur	6
I.4.2.3. Aubes à orientation variable	7
I.4.2.4. Les vannes anti pompage	7
I.4.3. Le système de combustion	7
I.4.3.1. Les circuits d'air comburant	7
I.4.3.2. Le circuit de combustible	8
I.4.3.3. Les chambres de combustion	8
I.5. Les éléments principaux de la turbine a gaz.....	9
I.6. Classification des turbines à gaz.....	11
I.6.1. par le mode de construction.....	11
I.6.2. par le mode de travail.....	12
I.6.3. par le mode de fonctionnement thermodynamique	12
I.7. Turbine à gaz à circuit ouvert (simple)	13
I.7.1. Principes	13
I.7.2. Amélioration du rendement.....	15
I.7.3. Cycle réel d'une installation	16
I.8. Turbine à gaz à circuit fermé.....	17
I.8.1. Principes	17
I.9. Cycle combiné	18
I.10. Cogénération.....	19
I.11. Le cycle réversible de Brayton	19
I.12. La génération d'électricité.....	20

Sommaire

I.13. Conclusion.....	21
Chapitre II Etude théorique d’alternateur	
II.1 Introduction.....	22
II.2. Construction de l’alternateur.....	22
II.2.1 Stator.....	22
II.2.1.1 La carcasse.....	23
II.2.1.2 Le caisson des bornes.....	23
II.2.1.3 Le circuit magnétique.....	23
II.2.1.4 L’enroulement stator.....	23
II.2.2 Rotor.....	24
II.2.2.1 L’arbre.....	25
II.2.2.2 L’enroulement du rotor.....	25
II.2.2.3 Les frettes et les plateaux porte-frettes.....	26
II.2.2.4 Les connexions d’excitation.....	26
II.2.2.5 Les ventilateurs axiaux.....	26
II.2.3 Système de refroidissement de l’alternateur.....	26
II.3 Principe de fonctionnement des alternateurs.....	27
II.3.1 Fonctionnement d’un alternateur monophasé.....	27
II.3.2 Fonctionnement d’un alternateur triphasé.....	31
II.4 Champs alternatifs et champs tournants.....	31
II.4.1 Champ alternatif d’une bobine parcourue par un courant alternatif.....	32
II.4.2 Champ des courants triphasés circulant dans un enroulement triphasé.....	34
II.5 Système d’excitation de l’alternateur.....	35
II.5.1 Le rôle du système d’excitation.....	36
II.5.2 Classification des systèmes d’excitation.....	37
II.6 Les forces électromotrices.....	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.....	39
II.8. Diagramme de Fresnel.....	40
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.....	44
II.10. Analyse de fonctionnement d’un alternateur.....	44
II.10.1. Caractéristique à vide.....	44

Sommaire

II.10.2 Caractéristique en charge	45
II.11- Bilan des puissances d'un alternateur.....	46
II.11.1. Puissance absorbée	47
II.11.2. Puissance utile	47
II.11.3. Bilan des pertes	47
II.11.3.1. Pertes de puissance mesurable	47
II.11.3.2. Pertes supplémentaires	48
II.11.4 Rendement d'un alternateur	48
II.11.4.1 Rendement vrais.....	48
II.11.4.2.Rendement approché	48
II.12 Conclusion.....	49

Chapitre III. Modélisation d'un turboalternateur

III.1. Introduction.....	50
III.2. Micro turbine a gaz.....	50
III.3. Éléments constitutifs	50
III.4. Description de principe.....	51
III.5. Etude des différents modèles	52
III.5.1. Modèle du type Rowen.....	52
III.5.2. Modèle du type Camporeale	52
III.5.3. Modèle du type Schobeiri.....	53
III.6. Modélisation d'un micro turbine à gaz.....	53
III.7. Machine synchrone à aimants permanents	55
III.7.1. Le stator	56
III.7.2. Le rotor	56
III.7.2.1. Les rotors à pôles lisses	57
III.7.2.2. Rotor à pôles saillants.....	57
III.8. Caractéristiques d'une machine synchrone	58
III.9. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	58
III.9.1 Hypothèses simplificatrices:	58
III.9.2. Structure générale d'une MSAP	58
III.9.3. Mise en équations de la machine	59
III.9.4. Equations électriques.....	60
III.9.6. Passage au repère de Park.....	61
III.9.7. Choix du référentiel.....	62
III.9.7.1. Référentiel lié au stator.....	62
III.9.7.2. Référentiel lié au rotor	63

Sommaire

III.9.7.3. Référentiel lié au champ tournant	63
III.10. Modèle de la machine synchrone à aimant permanent dans le repère de Park.....	63
III.10.1. Equations électriques.....	63
III.10.2. Equations magnétiques	64
III.10.3. Expression du couple électromagnétique	64
III.10.4. Equations mécaniques	65
III.11. Simulation de l’alternateur à aimant permanent	65
III.11.1. Simulation de l’alternateur à vide :	65
III.11.2. Schéma Bloc de simulation	66
III.11.1.1. Résultats de simulation de l’alternateur à vide	66
III.11.1.2. Interprétation des résultats.....	68
III.11.2. L’alternateur alimenté une charge.....	68
III.11.2.1. Equations d'état.....	69
III.11.2.2. Schéma Bloc de simulation de l’alternateur en charge	69
III.11.2.3. Résultats de simulation	70
III.11.2.4. Interprétation des résultats.....	72
III.12. Conclusion	72
Conclusion générale.....	73

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 Le groupe turboalternateur.....	3
Figure I.2 Le système turbo-alternateur.....	4
Figure I.3 Turbine hydraulique et turbine à vapeur.....	4
Figure I.4 L'écoulement dans une turbine à gaz à cycle simple.....	5
Figure I.5 Corps compresseur.....	7
Figure I.6 Les quatorze chambres de combustion.....	8
Figure I.7 injecteur de flamme.....	9
Figure I.8 Les ensembles paliers.....	10
Figure I.9 Vue éclatée de la turbine à gaz avec l'ensemble rotor.....	11
Figure I.10 turbines à gaz à un arbre et à deux arbres.....	12
Figure I.11 Turbine à gaz à cycle simple et à un seul arbre.....	13
Figure I.12 Cycle théorique.....	14
Figure I.13 Temps nécessaire pour que le groupe prenne sa charge.....	15
Figure I.14 Turbine à gaz à un seul arbre, avec récupération.....	15
Figure I.15 Turbine à gaz à plusieurs arbres, avec cycle à refroidissement intermédiaire et réchauffage (type à deux corps), dont la charge est couplée à l'arbre de la turbine à basse pression.....	16
Figure I.16 Cycle réel.....	17
Figure I.17 Turbine à gaz à un seul arbre à circuit fermé.....	18
Figure I.18 Cycle combiné à un arbre.....	19
Figure I.19 Les diagrammes T - S et P- V du cycle Brayton idéal.....	20
Figure I.20 Turbomoteur à turbine libre TM 333.....	20

Chapitre II

Figure II.1 Vue d'ensemble de l'alternateur.....	24
Figure II.2 Rotor de l'alternateur.....	25
Figure II.3 Circuit de refroidissement de l'alternateur.....	27
Figure II.4 Spire stator MN.....	28
Figure II.5 Sens du courant dans MN.....	28
Figure II.6 Champ H d'un rotor.....	29
Figure II.7 Champ magnétique H pendant un tour.....	29
Figure II.8 Force électromotrice engendrée pendant un tour.....	30
Figure II.9 Positions du rotor.....	30

Listes des figures

Figure II.10 Stator triphasé	31
Figure II.11 Force électromotrice d'un alternateur triphasé	31
Figure II.12 Bobine à deux spires.....	32
Figure II.13 Variation du courant pendant une période.....	32
Figure II.14 Variation du champ magnétique pendant une période	32
Figure II.15 Champ magnétique : à gauche : $H_{tot} = H_m$, à droite : $H_{tot} = 0$	33
Figure II.16 Champ magnétique à gauche : $H_{tot} = -H_m$, à droite : $H_{tot} = 0$	33
Figure II.17 Enroulement triphasé.....	34
Figure II.18 Position des champs tournants H_2 et H_2'	34
Figure II.19 Position des champs tournants H_3 et H_3'	34
Figure II.20 Champs tournants.....	35
Figure II.21 Schéma unifilaire du système d'excitation de l'alternateur.....	36
Figure II.22 Schéma électrique et schéma monophasé équivalent de Behn-Eschenburg.....	39
Figure II.23 Zone linéaire et zone de saturation de la machine.	40
Figure II.24 Diagramme de Fresnel.....	40
Figure II.25 Schéma de couplage d'un alternateur à un réseau.....	41
Figure II.26 L'ordre de succession des phases est le même.	41
Figure II.27 Diagramme de Fresnel de l'alternateur couplé au réseau.....	42
Figure II.28 Fonctionnement à excitation constante.....	43
Figure II.29 Fonctionnement à puissance constante.....	43
Figure II.30 Maîtrise du déphasage du courant de l'alternateur à puissance constante.	44
Figure II.31 Caractéristique d'un alternateur à vide.....	45
Figure II.32 Caractéristiques d'un alternateur en charge.....	45
Figure II.33. Caractéristique de réglage.....	46
Figure II.34. Bilan des puissances d'un alternateur.....	46

Chapitre III

Figure III.1 Micro turbine Capstone 330 (Capstone)	50
Figure III.2 Vue éclatée de la turbine à gaz (Capstone A330).....	51
Figure III.3 Cycle d'une turbine à gaz avec régénérateur	51
Figure III.4 Modèle de la micro turbine	53
Figure III.5 Structures du rotor de la MSAP.....	56
Figure III.6 Un rotor complète d'une micro turbine.....	57
Figure III.7 Représentation d'une MSAP dans le repère (abc).....	58
Figure.III.8 Schéma représentatif de l'alternateur à modéliser.....	59

Listes des figures

Figure.III.9 Transformation triphasée- diphasée.....	61
Figure III.10 Schéma bloc de simulation de l'alternateur à vide	66
Figure.III.11 : Résultats de simulation de l'alternateur à vide.....	67
Figure III.12 Bloc de simulation de l'alternateur en charge	69
Figure III.13 Résultats de simulation de l'alternateur en charge	71

Nomenclature

e, e_1, e_2	La force électromotrice engendrée dans le conducteur
H	Le champ magnétique produit par le rotor
v	Vitesse du rotor
i	Le courant d'excitation de l'alternateur monophasé
E	La force électromotrice
f	Fréquence
N	Nombre total de conducteurs
Φ	Flux total sous un pôle
p	Nombre pair de pôle
K_d	Facteur de distribution
K_f	Facteur de forme
K	Coefficient de Kapp $[2,22K_dK_f]$
$[X]$	Soit $(E_{1,2,3})(V_{1,2,3})(I_{1,2,3})$ sont des grandeurs complexe pour représentation vectoriel
L	Inductance propre
M	Inductance mutuelle m avec les deux autres phases
L_s	Inductance synchrone
X_s	Reactance synchrone
Ω	Vitesse de rotation du champs tournant en rad/s
n	Vitesse de rotation du champs tournant en tr/s
U	Tension composée
V	Tension simple
U_{ex}	Tension d'excitation
I	Courant de charge
I_{ex}	Courant d'excitation
R_r	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
η_{Vrai}	Rendement vrai
$\eta_{approche}$	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

Nomenclature

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.
θ_r	La position du rotor
θ_0	L'angle électrique initial
v_{abcs}	Tension de phases statoriques
v_{ds}, v_{qs}	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
i_{abcs}	Courant de phases statoriques
i_{ds}, i_{qs}	Composantes du courant statorique dans le repère de Park
φ_{abcs}	Flux traversant les bobines statoriques
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Composantes du flux statorique dans le repère de Park
R_s	La résistance des phases statoriques
$P(\theta_r)$	La transformation de Park
R_s	Résistance statorique
L_d	Inductance statorique directe
L_q	Inductance statorique quadratique
w_r	Pulsation électrique rotorique
φ_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

- GIC : Le Graphe Informationnel Causal
 F.E.M : Force Electromotrice.
 F.M.M : Force Magnétomotrice.
 MTG : Micro Turbine A Gaz
 MSAP : Machine Synchrone A Aimants Permanents
 TAG : Turbine à GAZ
 REM : La Présentation Energétique Macroscopique

Introduction générale

À l'époque, l'absence de l'électricité dans la vie quotidienne a causé une grande difficulté pour effectuer l'homme leurs besoins. Il est nécessaire de générer l'électricité d'une manière efficace et continue. Il doit bâtir des industries capables à générer de l'électricité en grande quantité pour répondre à la consommation progressive d'électricité. Les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydrauliques sont les trois importants modes de production dans le monde. Diverses sources d'énergie primaire sont convertis en énergie électrique par les centrales électriques, ils ne diffèrent que par leur source primaire d'énergie (thermique, eau, vent, nucléaire, ...).

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

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

L'utilisation de la turbine à gaz de grande puissance (> 1 MW) est entraînée l'alternateur pour le but de générer l'électricité. Dans les centrales thermiques, le gaz est brûlé dans les chambres de combustion en présence d'air comprimé pour produire des gaz chauds. Ces gaz chauds sous pression, entraînent la turbine à une vitesse de 3000tr/min. L'énergie mécanique qui fournie par la turbine est transformée en énergie électrique par l'alternateur. Les gaz chauds sont ensuite dirigés vers l'échappement.

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

Le premier chapitre va décrire une généralité sur la turbine à gaz, sa constitution, son fonctionnement et ses classifications pour donner une idée claire sur cette dernière.

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

Le troisième chapitre est la partie spéciale de notre mémoire où on va présenter la modélisation et la simulation du turbo-alternateur. Nous allons aussi déterminer notre contribution dans ce domaine.

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

Chapitre I
Généralité sur la
turbine à gaz

I.1. Introduction

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

Actuellement, le terme turbine désigne un équipement de production d'énergie, la turbine étant par fois composée de plusieurs étages [1].

I.2. Le turbo alternateur

Les turboalternateurs sont des alternateurs entraînés à grande vitesse de rotation par une turbine à vapeur ou une turbine à gaz (plus souvent appelée turbine à combustion) pour la génération de puissance électrique. Ils vont transformer la puissance mécanique d'un fluide en mouvement, puis en électricité. Le fluide exploité peut être liquide, comme l'eau d'une rivière pour une centrale hydroélectrique, ou gazeux, comme la vapeur produite par une centrale nucléaire [1][2][3].



Figure I.1 Le groupe turboalternateur [17].

Le couplage de l'alternateur fait par une turbine à vapeur ou une turbine à gaz tournant à grande vitesse dans les centrales électriques thermiques. Ce type d'alternateur tourne généralement à 1500 tours par minute (rotor à 4 pôles) ou à 3000 tours par minute (rotor à 2 pôles), pour les réseaux de distribution à 50 Hz, et le contraire dans les centrales hydrauliques, dont les turbines tournent plus lentement, ont des rotors comportant un nombre important de pôles (14, 16 pôles). L'axe de rotation de l'arbre peut être vertical ou horizontal et le diamètre de cet arbre est grand.

La réalisation de l'arbre de turboalternateur est sous forme d'un cylindre en acier forgé à haut résistance mécanique [1],[4].

La figure suivante présente le système turbo-alternateur:

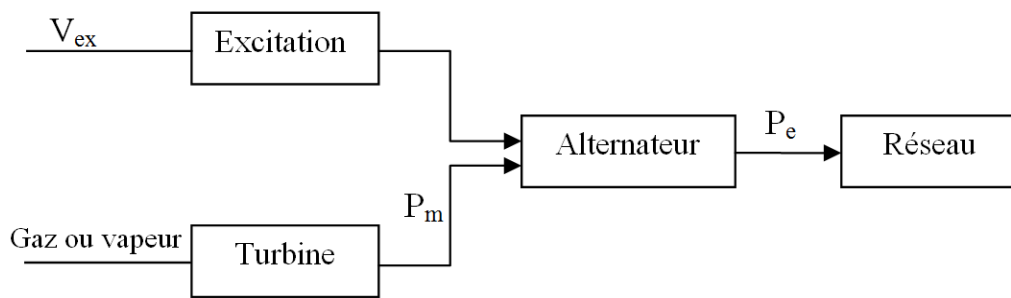


Figure I.2 Le système turbo-alternateur [4].

I. 3. Les types des turbines

Une roue ou un rotor à ailettes, à hélice, à lames, à aubes ou à augets est l'élément de base d'une turbine, ce dernier est disposés sur sa circonférence, de façon que le fluide circulant exerce une force tangentielle qui va tourner la roue et lui donne l'énergie mécanique. Cette énergie est transmise ensuite par un arbre qui fait tourner l'alternateur.

Il existe les types de turbines suivants : turbines hydrauliques à eau (Figure I.3.a), turbines à vapeur et turbines à gaz (Figure I.3.b) [5].

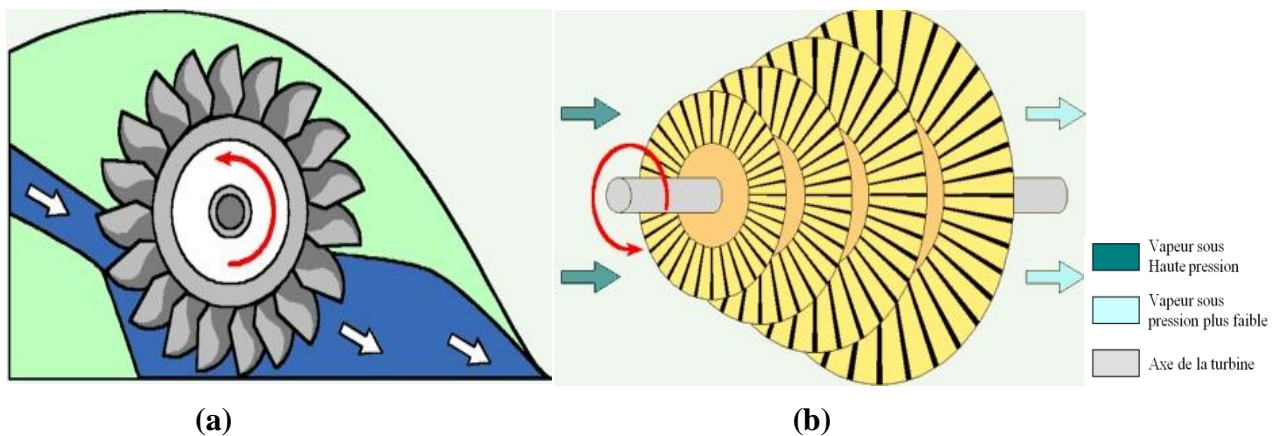


Figure I.3 Turbine hydraulique et turbine à vapeur [5].

Le couple moteur appliqué au rotor de l'alternateur dépend du type de station électrique, celle-ci peut être thermique, hydraulique ou nucléaire. L'entraînement de l'alternateur se fait par l'intermédiaire d'une turbine après conversion de l'énergie primaire. Dans le cas d'une centrale nucléaire ou thermique, cette conversion induit une vapeur comprimée agissant ainsi sur la turbine, mais pour une centrale hydraulique la turbine est choisie en fonction de la hauteur de la chute d'eau [4].

Dans notre travail, on va choisir la turbine à gaz parce que la plus utilisée dans l'industrie algérienne.

I.4. Turbine à gaz

La turbine à gaz est considérée comme un moteur à combustion interne de tous les points de vue ou bien comme un système autosuffisant. En effet, le compresseur de la turbine prend et comprime l'air

atmosphérique, la chambre de combustion agrandie la puissance énergétique de l'air et les processus de détente qui a lieu dans la section turbine transforment cette puissance à une énergie mécanique utile. L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel.

Une turbine à gaz constitue par un compresseur axial qui absorbe l'air à la pression atmosphérique, une chambre de combustion, où l'air comprimé est réchauffé à pression constante par la combustion d'une certaine quantité de combustible (gaz naturel, gasoil ou kérosène) et enfin une turbine de détente des gaz jusqu'à la pression atmosphérique [6].

Le fonctionnement de la turbine est résumé comme suit :

- ✓ Aspiration de l'air ambiant extérieur ;
- ✓ Compression ;
- ✓ Combustion du mélange air combustible ;
- ✓ Détente des gaz brûlés ;
- ✓ Echappement.

Ceux-ci sont schématiquement représentés ci-dessous :

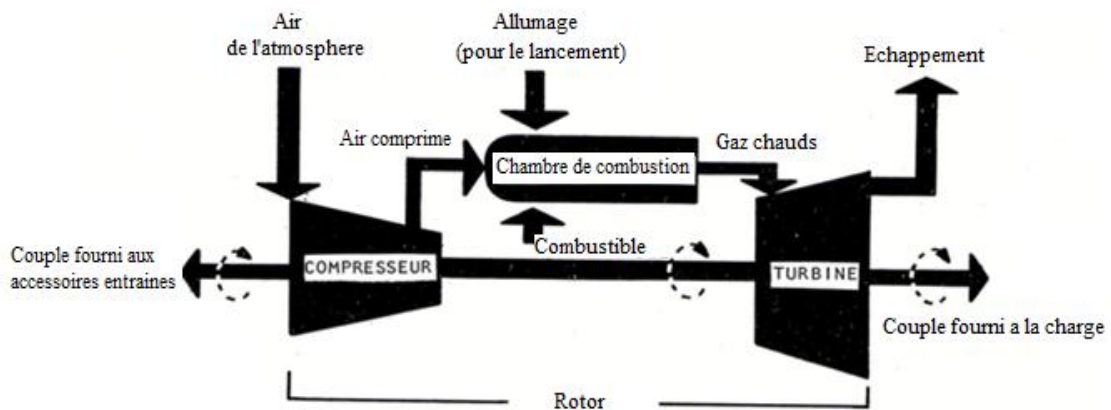


Figure I.4 L'écoulement dans une turbine à gaz à cycle simple [7].

I.4.1. Le filtrage d'air

L'air atmosphérique absorbé est traité par la filtration d'air. C'est-à-dire enlever de l'air tout corps étranger aussi bien à l'état poussière que de gouttelette pour éviter les dangers d'encrassement et de corrosion avant sa pénétration dans le compresseur.

La composition du système d'admission de l'air est par l'ensemble filtre à air autonettoyants, la gaine suivie de silencieux et le coude puis de caisson d'aspiration.

I.4.2. Le compresseur

Le compresseur est de type axial et multi-étages (17 étages). L'accroissement progressif de la pression d'étage en étage est obtenu par la diminution progressive de la vitesse de l'air au fur et à mesure de son passage dans les étages successifs.

Il est formé par:

- ✓ Un rotor de 17 étages d'aubes ;
- ✓ Corps formant le stator ;
- ✓ Une couronne d'aubes à orientation variables appelée IGV à l'entrée du compresseur ;
- ✓ Deux rangées d'aubes de guidage fixe, à la sortie du compresseur.

Le compresseur absorbe l'air ambiant à travers un caisson de filtre et un silencieux. L'air découlant du système d'admission traverse une succession d'étages composés chacun par une rangée d'aubes mobiles ou rotoriques, et une rangée d'aubes fixes ou statoriques.

Les aubes rotor offrent l'énergie nécessaire à la compression de l'air dans chaque étage. Les aubes stator guident l'air suivant une direction bien définie vers l'étage suivant.

I.4.2.1. Le rotor du compresseur

Il est composé par:

- ✓ Un arbre avant sur lequel sont montées les aubes rotor du 1^{er} étage.
- ✓ 15 disques aubes composants les étages 2 à 16.
- ✓ Un arbre arrière sur lequel sont montées les aubes du 17^e étage.

I.4.2.2. Le stator du compresseur

Le stator du compresseur est aussi nommé corps, il compose généralement de quatre parties:

❖ Le corps d'admission

Couramment nommé corps d'entrée, il se situe sur la partie avant de la machine. Son rôle primaire est de conduire l'air uniformément depuis le caisson d'aspiration jusqu'au compresseur.

❖ Le corps avant

Il comporte les quatre premiers étages du compresseur.

❖ Le corps arrière

Il comporte les étages 5 à 10. L'air enlevé du 10^{ème} étage est évacué directement vers le caisson d'échappement à travers des vannes anti pompages. Ceci est accompli durant les phases de démarrage et d'arrêt afin d'éviter les pulsations du compresseur.

❖ Le corps d'échappement

Il est le corps le plus long. Il localise au milieu de la machine, contenant aussi les sept derniers étages du compresseur plus deux rangées d'aubes de guidage fixes et le diffuseur d'échappement du compresseur.

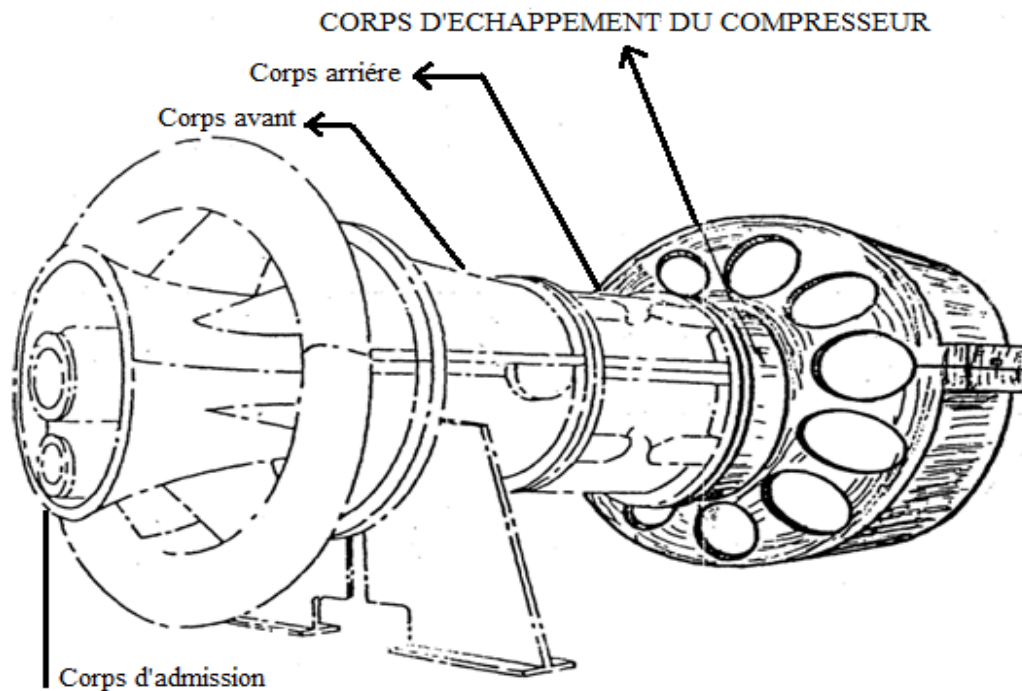


Figure I.5 Corps compresseur [7].

I.4.2.3. Aubes à orientation variable

Ces aubes sont habituellement nommées IGV, elles se situent à l'extrémité arrière du corps d'admission du compresseur. Avec le changement de leur position, elles permettent de régler la quantité d'air appelée et l'éviction du pompage du compresseur au démarrage et à l'arrêt. Le mouvement de rotation est obtenu par l'intermédiaire d'une crémaillère annulaire.

I.4.2.4. Les vannes anti pompage

Pendant les régimes transitoires, certains étages du compresseur connaissent le phénomène de pompage, des pulsations s'y développent. Un prélèvement d'air comprimé est réalisé au niveau du 10^{ème} étage pour éviter ce phénomène.

L'air est prélevé à travers une gorge annulaire du corps arrière du compresseur prévu à cet effet. Cet air est soutiré de là au niveau de quatre brides, des tuyauteries relient chacune à une vanne d'extraction d'air dite vanne anti pompage. Ces vannes sont à commande pneumatique.

I.4.3. Le système de combustion

I.4.3.1. Les circuits d'air comburant

Autour des pièces de transition et dans les espaces annulaires qui entourent chacun des tubes de flamme, l'air sortant du compresseur est groupé. Quatorze (14) tubes de flamme sont existés à travers

le tubulateur qui est un dispositif de l'injecteur ainsi que par des trous calibrés percés dans le chapeau et le tube de flamme, la pénétration de l'air est effectuée dans la zone de réaction de la chambre de combustion.

I.4.3.2. Le circuit de combustible

Le but d'utiliser le système de combustible gazeux dans la turbine est pour fournir le gaz aux chambres de combustion à la pression et au débit requis pour répondre à tout instant à les nécessités du régime de fonctionnement de démarrage, d'accélération et de prise en charge.

La vanne d'arrêt et de détente du gaz et la vanne de réglage du débit de gaz sont les constituants essentiels de ce circuit.

I.4.3.3. Les chambres de combustion

Le découlement du flux d'air à haute pression est accompli dans le compresseur et le refoulement est fait dans l'espace annulaire établi à l'arrière du corps de refoulement.

L'air entrant dans la chambre permet l'oxydation du combustible ainsi que la dilution des produits de combustion très chauds pour les conduire à l'entrée de la turbine.

La constitution de la chambre de combustion est par une enveloppe extérieure nommée carter de chambre, d'un tube de flamme, du chapeau interne de l'injecteur et d'une pièce de transition.

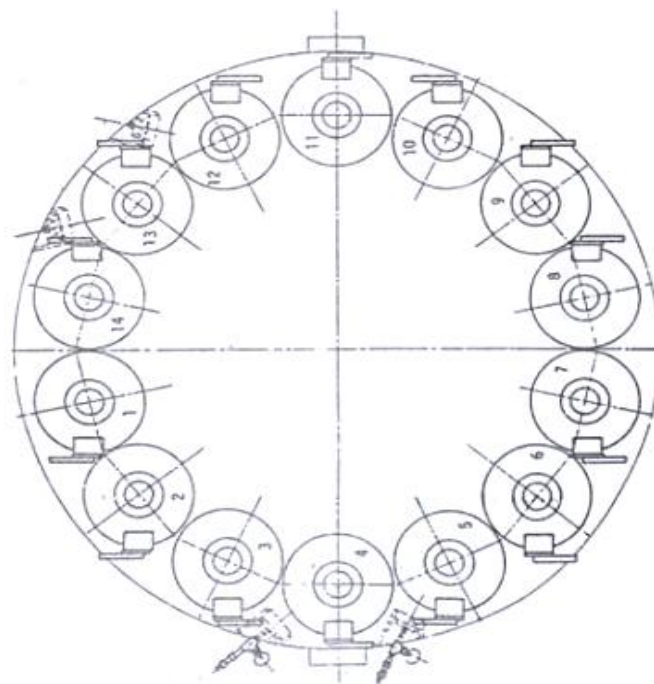


Figure I.6 Les quatorze chambres de combustion [7].

❖ Injecteur de combustible

Généralement, chaque chambre de combustion est équipée par un injecteur de combustible, ce qui permet d'injecter une quantité de gaz déterminée dans l'endroit de réaction du tube de flamme, de progresser la combustion et de diminuer l'émission de fumée pendant l'emploi de la machine.

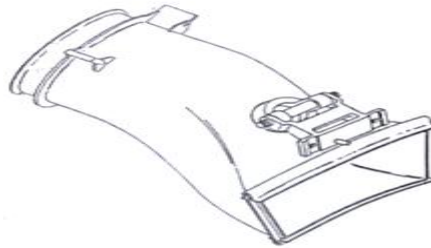


Figure I.7 injecteur de flamme [7].

❖ Bougie d'allumage

A l'aide de deux bougies à haute pression, l'allumage est effectué. Ces bougies sont de type électrode rétractable. Au moment de l'allumage, une étincelle est créée provoquant l'allumage des chambres douze et treize où sont logées ces bougies. Les tubes de l'interconnexion reliant les autres chambres permettent l'allumage de ces dernières.

Lorsque le groupe monte en vitesse, ce qui implique un accroissement de la pression dans les chambres, les électrodes des bougies se rétractent pour quitter de la zone chaude de combustion.

I.5. Les éléments principaux de la turbine a gaz

La section turbine est à trois étages. Dans cette partie, l'énergie comprise dans les gaz chauds sous pression du système est convertie en énergie mécanique. La structure de chaque étage est par une directrice (aubage fixe), suivie d'une roue aube.

Les éléments principaux constituant la turbine sont :

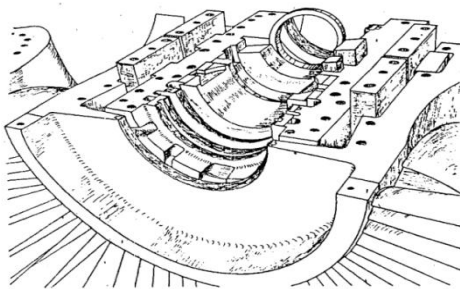
- ✓ **Le rotor turbine et son aubage :** il est la partie en rotation. La composition de ce dernier est par l'arbre avant, de trois disques constituant les roues turbine, de l'arbre arrière et de deux entretoises inter disques.
- ✓ **Le corps turbine.**
- ✓ **Les directrices et les diaphragmes :** il monte sur le corps turbine les trois étages de directrices à aubes fixes. Les directrices conduisent les gaz chauds sur les aubes des roues de chaque étage provoquant aussi la rotation du rotor. Les diaphragmes ont pour rôle de réduire les fuites entre le bordage intérieur et le rotor.
- ✓ **Les segments de protection.**
- ✓ **Les cadres d'échappement et le diffuseur.**
- ✓ **Les paliers et les accouplements :** la turbine à gaz possède trois paliers pour le support du rotor. Ces ensembles de paliers sont localisé dans trois logements :
 - Le premier dans le corps d'admission. Celui-ci a pour rôle de supporter le rotor turbine compresseur.

- Un second dans le corps d'échappement. Il est installé dans l'axe de la machine, sa demi-partie inférieure supporte l'arbre de la roue avant du rotor et sa butée permet l'allongement due aux différences de température.
- ✓ Un troisième dans le cadre d'échappement. Il se place au centre du cadre d'échappement, il a pour rôle le support de l'arbre arrière turbine.

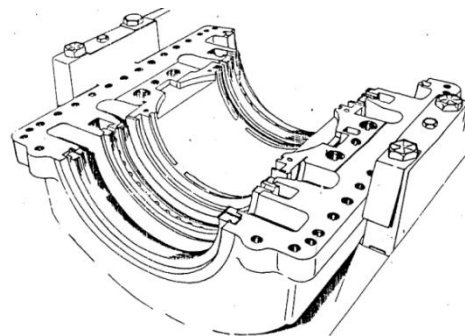
La lubrification de ces paliers s'effectue avec de l'huile sous pression qui provient du circuit de graissage.

L'utilisation des accouplements est pour transmettre le couple moteur de démarrage à la ligne d'arbre. Il existe deux types d'accouplements :

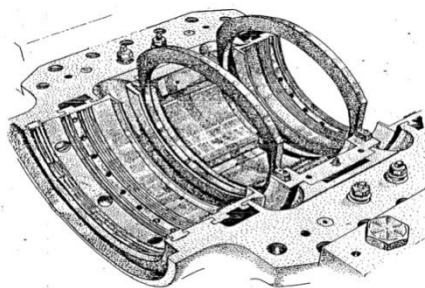
- ❖ **L'accouplement auxiliaire** : il permet de relier le réducteur des auxiliaires à l'arbre avant compresseur aussi il garantit la transmission du couple à la ligne d'arbre.
- ❖ **L'accouplement de puissance** : la liaison entre le rotor turbine et l'alternateur est assuré par l'accouplement de puissance.



Ensemble palier n° 1.



Ensemble palier n° 2.



Ensemble palier n° 3.

Figure I.8 Les ensembles paliers [7].

- ✓ **Le vireur** : Le rôle du vireur est de tourner le rotor turbine lors de refroidissement. Durant le refroidissement, il tourne le rotor turbine à une vitesse déterminée afin de prévenir les déformations de l'arbre et de protéger les paliers des dommages thermiques [7].

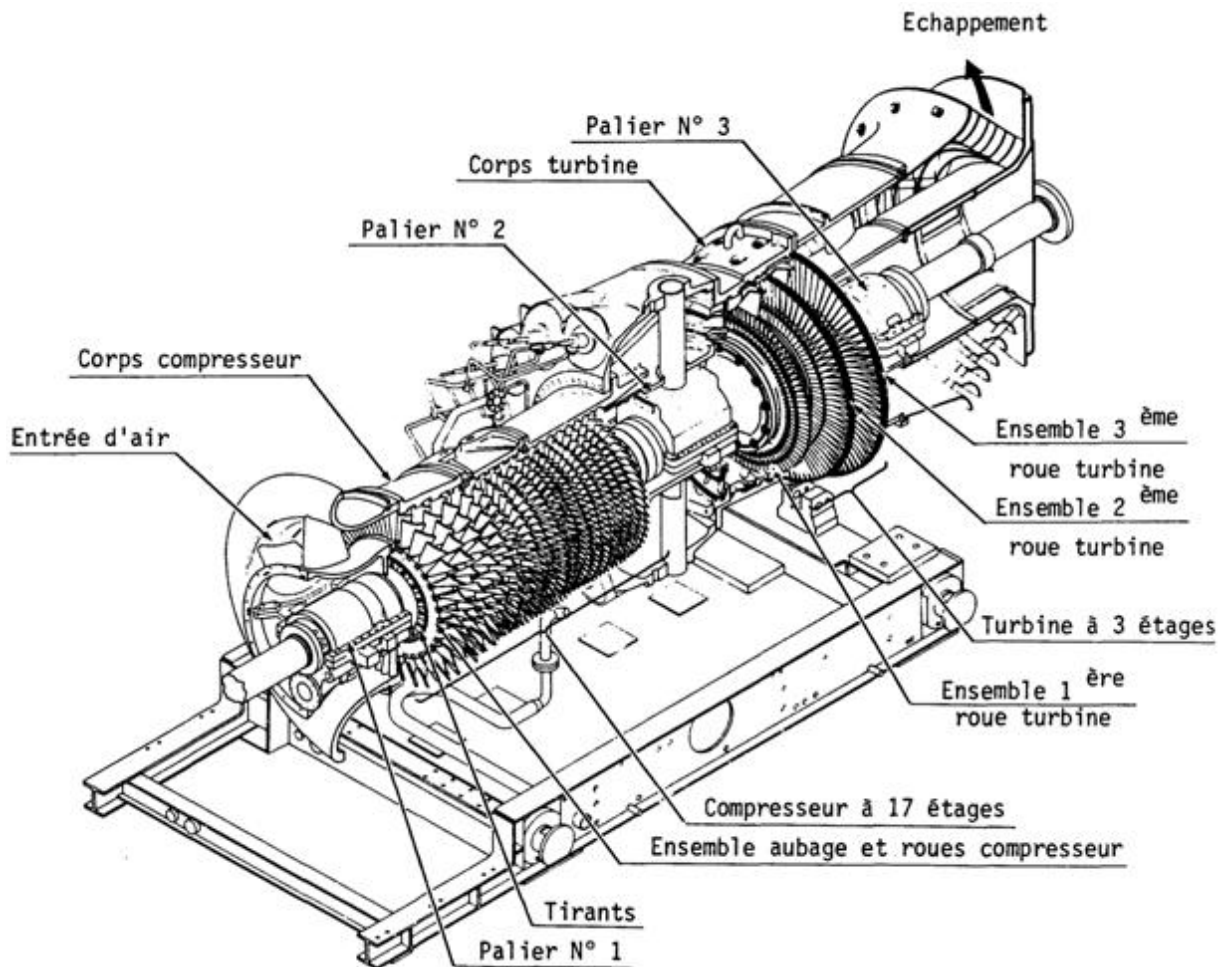


Figure I.9 Vue éclatée de la turbine à gaz avec l'ensemble rotor [7].

I.6. Classification des turbines à gaz

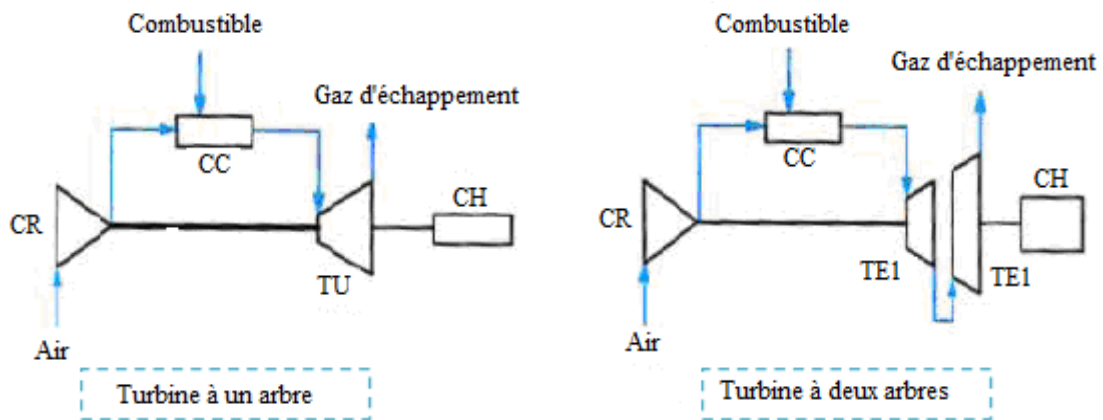
On distingue trois modes de classification de turbines à gaz qui sont exposés ci-dessous :

- ✓ par le mode de construction ;
- ✓ par le mode de travail ;
- ✓ par le mode de fonctionnement thermodynamique.

I.6.1. par le mode de construction

La définition de différents types de turbines à gaz permet d'utiliser le type qu'on doit choisir. 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 de deux parties, la première garantit l'autonomie de la turbine (GG), la deuxième est liée à la charge. Un troisième type des turbines dites dérivées de l'aéronautique; elles ont une conception spéciale suivant le domaine dans lequel elles sont utilisées. Dans ce type, la partie qui garantit l'autonomie de la

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



CR compresseur

CC chambre de combustion

Ch charge

TU turbine

TE1 turbine d'entraînement de compresseur

TE2 turbine d'entraînement de la charge

Figure I.10 turbines à gaz à un arbre et à deux arbres [7].

I.6.2. par le mode de travail

On classe deux types de turbine :

✚ **Turbine à action** : Où l'énergie thermique est convertie absolument en énergie cinétique dans la directrice. La transformation des gaz dans la roue se fait sans changement de pression statique $P_1 > P_2 = P_3$.

✚ **Turbine à réaction** : Dans ce type de turbine; une conversion d'une partie d'énergie thermique en énergie cinétique et mécanique est fait dans la roue. La transformation des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique $P_1 > P_2 > P_3$. Le taux de réaction caractérisera le pourcentage d'énergie thermique totale.

I.6.3. par le mode de fonctionnement thermodynamique

Il existe deux cycles thermodynamiques :

✚ **Turbine à gaz à cycle ouvert** : l'aspiration et l'échappement dans cette turbine s'accomplissent directement dans l'atmosphère.

Ce type de turbine qui est le plus répandu et se divise en deux classes :

❖ **Turbine à cycle simple** : un seul fluide pour la génération d'énergie mécanique est utilisé dans ce type turbine, après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers l'échappement.

❖ **Turbine à cycle régénéré** : Dans ce type de turbine, le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'agrandir le rendement d'équipement.

Actuellement, une large utilisation de la turbine à gaz est dans différents domaines et particulièrement dans le domaine des hydrocarbures à cause de leur grande gamme de puissance et leurs propres avantages.

✚ **Turbine à gaz à cycle fermé** : dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle.

On va détailler dans la suite la turbine à gaz à circuit ouvert et fermé pour leurs importances et leurs utilisations dans le domaine de génération de l'électricité [6].

I.7. Turbine à gaz à circuit ouvert

I.7.1. Principes

En 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. Totalemment, la turbine est composée trois éléments (figure I.11):

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

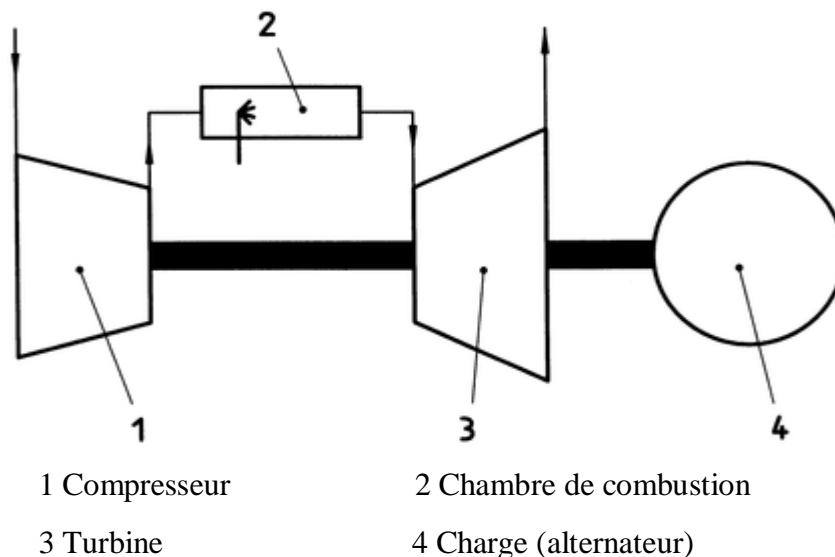
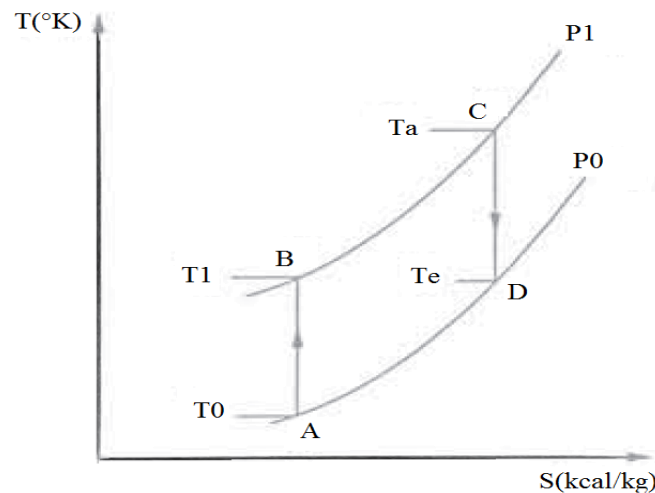


Figure I.11 Turbine à gaz à cycle simple et à un seul arbre [29].

On divise le cycle de fonctionnement en trois phases. La première phase est la compression de l'air puisé dans l'atmosphère, la seconde correspond à l'apport de chaleur dans la chambre de combustion. Cette apport énergétique se fait par une combustion d'un mélange constitué d'une partie de l'air comprimé (30 %environ) et d'un combustible qui peut être du gaz naturel, du fuel lourd...Le reste de l'air comprimé permet de refroidir les parois de la chambre de combustion et mélangé aux gaz chauds

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 Brayton (voire la section I.11) et la figure I.12 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 qualifiera d'isentropique (la variation d'entropie est nulle).



AB : compression isentropique

CD : détente isentropique

BC : combustion isobare

DA : refroidissement isobare

Figure I.12 Cycle théorique [8].

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.13.

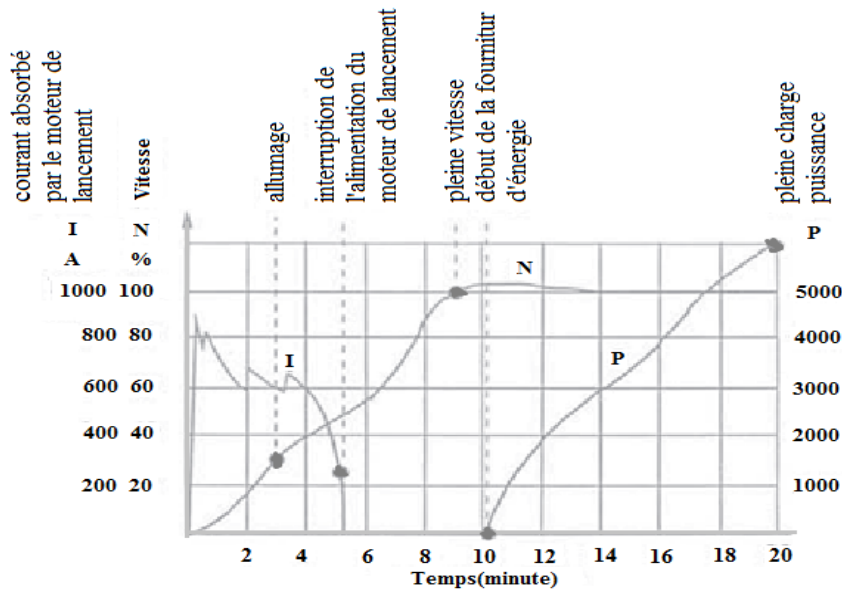
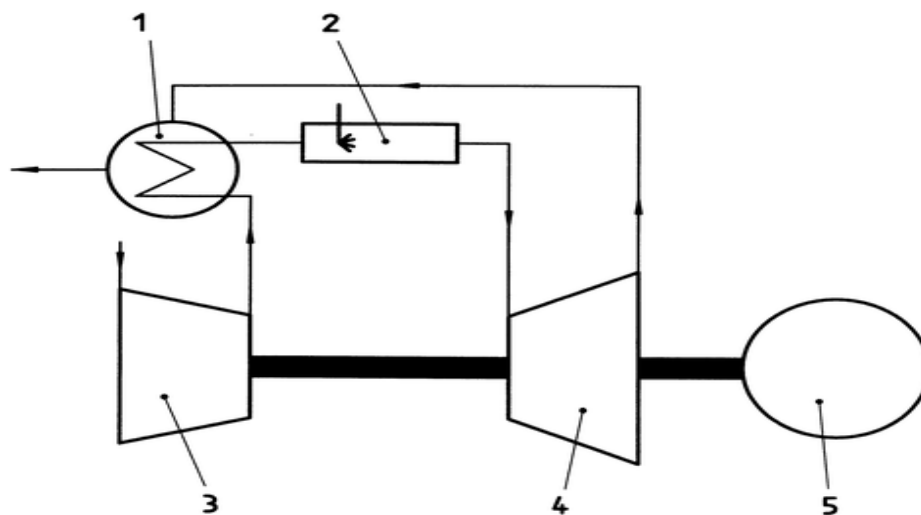


Figure I.13 Temps nécessaire pour que le groupe prenne sa charge [8].

I.7.2. Amélioration du rendement

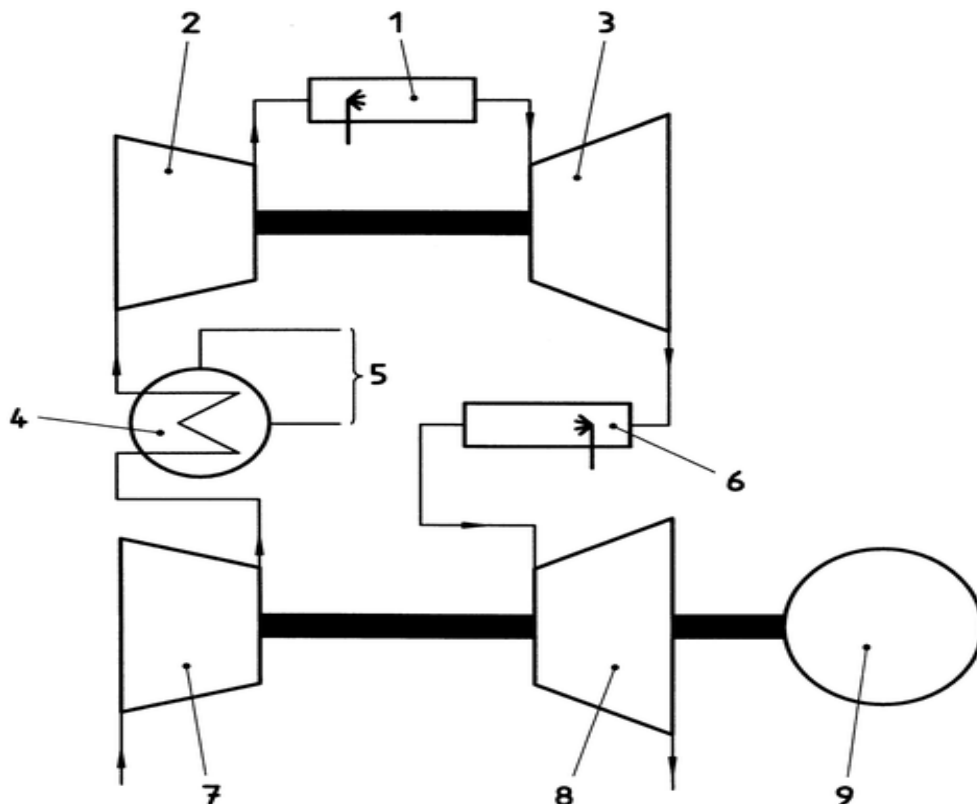
Pour agrandir le rendement d'un tel équipement, une première solution est de récupérer sous forme de chaleur une partie de l'énergie restante dans les gaz d'échappement de la turbine avant leur rejet dans l'atmosphère. Pour cet effet, on utilise un échangeur et la chaleur récupérée sert à réchauffer l'air sortant du compresseur avant son entrée dans la chambre de combustion. Avec d'un tel équipement, on peut parvenir un rendement compris entre 23 et 25 %. Ce rendement est bien supérieur au rendement d'une turbine à une seule ligne d'arbre sans échangeur. On présente l'installation dans la figure I.14.



- 1 Régénérateur ou récupérateur
- 2 Chambre de combustion
- 3 Compresseur
- 4 Turbine
- 5 Charge

Figure I.14 Turbine à gaz à un seul arbre, avec récupération [29].

Le rendement peut être encore augmenté en utilisant d'une part une réfrigération pendant la compression qui permet de réduire le travail à procurer par le compresseur et d'autre part un réchauffement pendant la détente qui permet d'amoindrir la quantité de combustible nécessaire pour l'accroissement de la température de la chambre de combustion. On se rapproche donc d'un cycle dont la détente et la compression se font de façon isotherme. Le rendement est alors compris entre 28 et 30%. Le schéma de l'installation est illustré sur la figure I.15.



- | | |
|------------------------------|--|
| 1 Chambre de combustion | 2 Compresseur haute pression |
| 3 Turbine haute pression | 4 Refroidisseur intermédiaire |
| 5 Fluide de refroidissement | 6 Chambre de combustion de réchauffage |
| 7 Compresseur basse pression | 8 Turbine basse pression |
| 9 Charge | |

Figure I.15 Turbine à gaz à plusieurs arbres, avec cycle à refroidissement intermédiaire et réchauffage (type à deux corps), dont la charge est couplée à l'arbre de la turbine à basse pression [29].

I.7.3. Cycle réel d'une installation

La figure ci-dessous montre le cycle réel d'un équipement comportant une réfrigération, une réchauffe et une récupération.

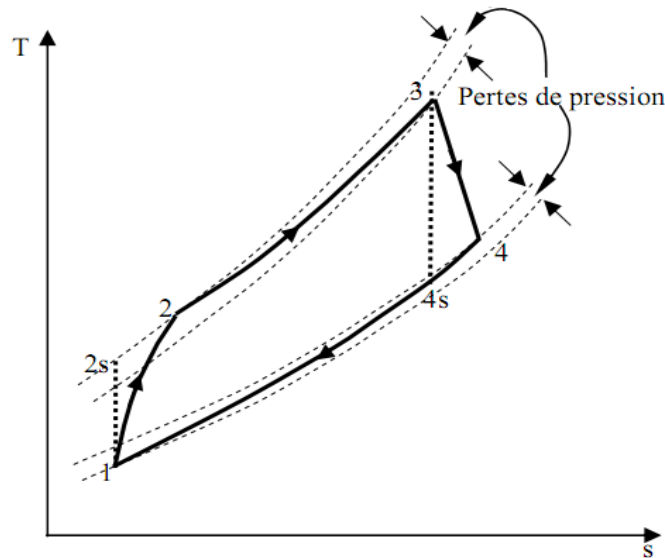


Figure I.16 Cycle réel [9].

I.8. Turbine à gaz à circuit fermé

I.8.1. Principes

La figure I.17 présente une installation sous une forme simple. Le principe de la turbine à cycle fermé est 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;
- ✓ après son passage dans le pré-réfrigérateur, le gaz est envoyé dans le compresseur.

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

- ✓ 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.

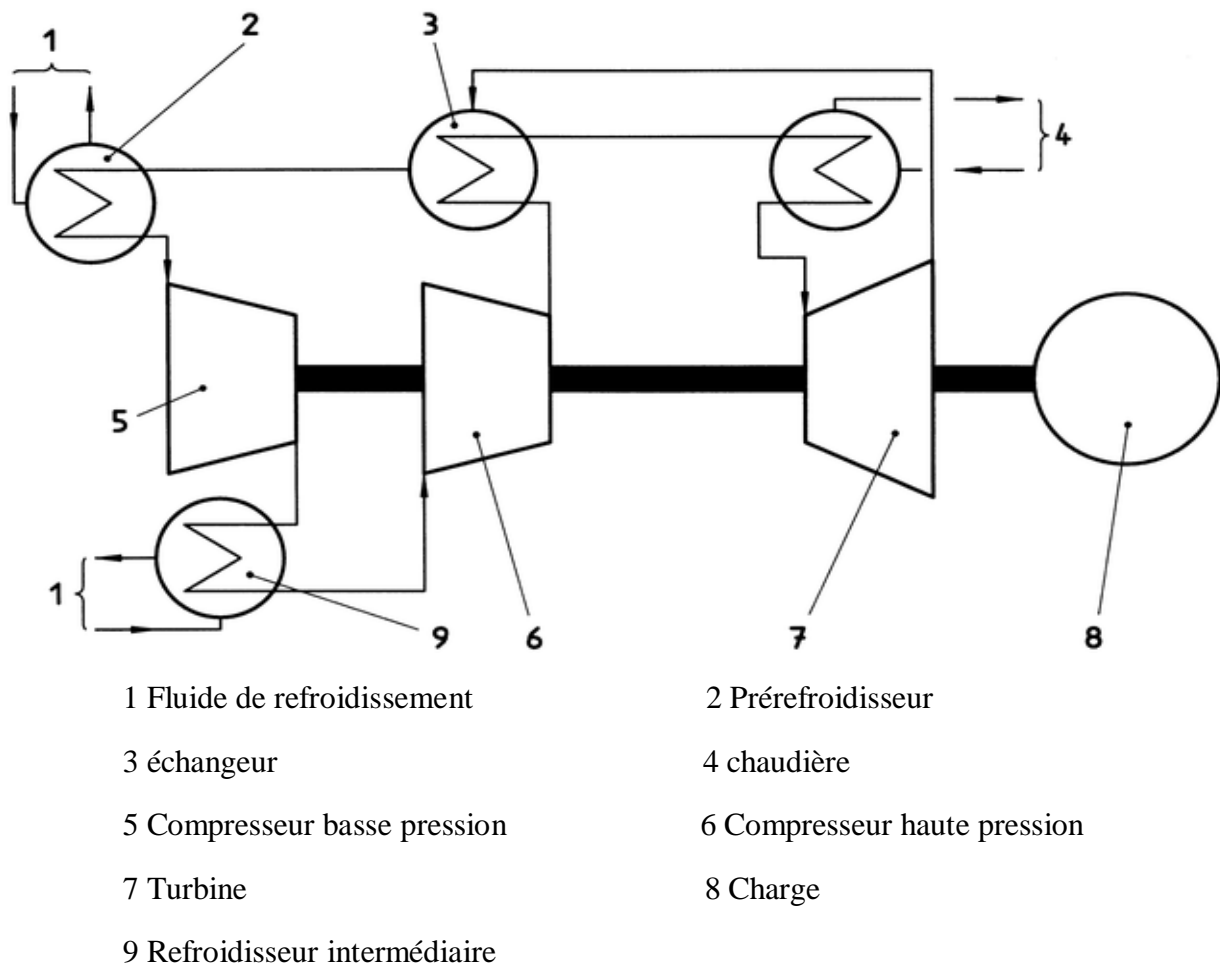


Figure I.17 Turbine à gaz à un seul arbre à circuit fermé [29].

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

I.9. Cycle combiné

Une installation comprenant deux sortes de turbines est appelée installation à cycle combiné. Le plus souvent ce sont des turbines à gaz et à vapeur. Le principe d'une telle installation est de récupérer les gaz d'échappements de la turbine à gaz et de les envoyer dans une chaudière de récupération pour qu'elle produise de la vapeur. La vapeur ainsi produite est envoyée dans une turbine à vapeur qui va engendrer de l'électricité. La turbine à gaz va aussi créer de l'électricité. Le rendement d'une telle installation varie entre 50 et 60 %. Le schéma de principe est donné figure I.18

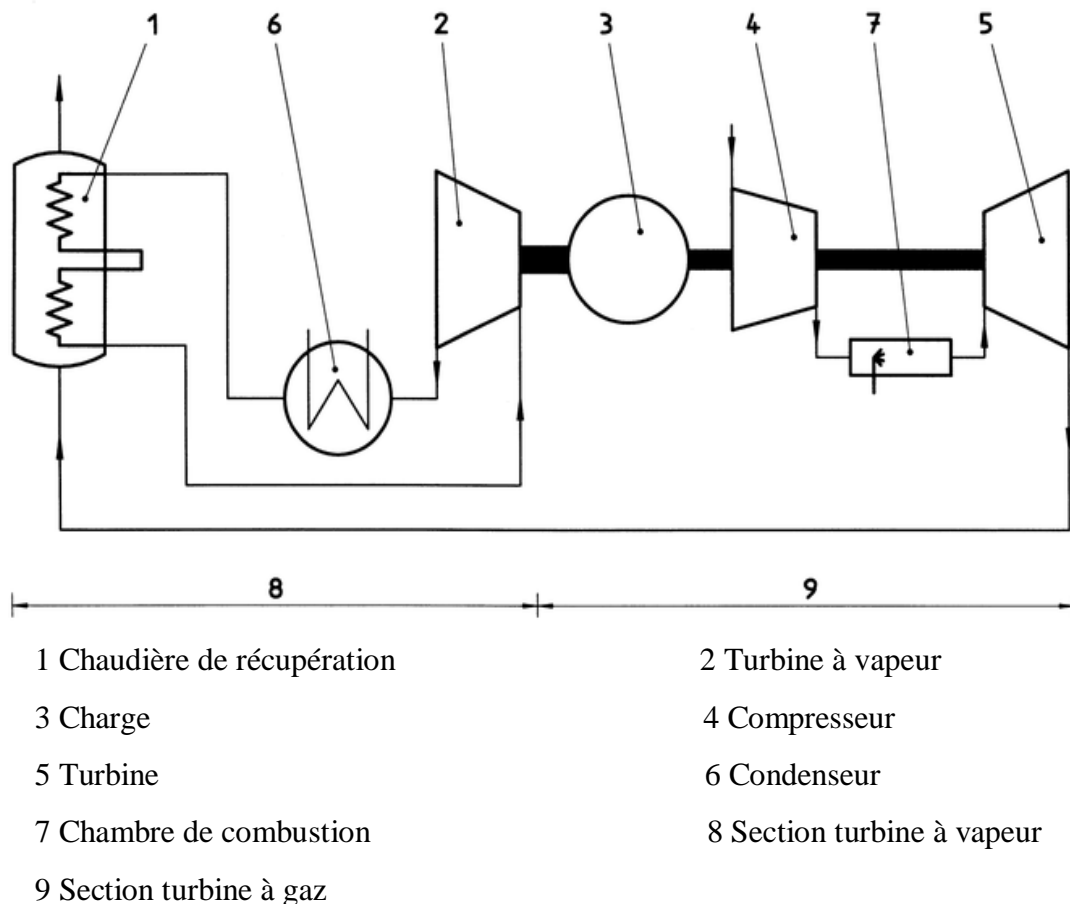


Figure I.18 Cycle combiné à un arbre [29].

I.10. Cogénération

On appelle installation de cogénération, une installation qui génère simultanément de l'énergie thermique et électrique à partir d'une seule source d'énergie primaire. L'énergie thermique sert pour des procédés industriels ou pour des besoins climatiques. Le rôle d'un tel équipement est la génération d'énergie thermique. Il ne faut pas confondre le terme cogénération avec celui de cycle combiné. Car les productions d'énergie thermique et électrique proviennent de la même machine (turbine ou moteur à gaz, turbine à vapeur ou encore moteur diesel). On peut aussi faire de la cogénération avec un cycle combiné, même si ce n'est pas souvent le cas [8].

I.11. Le cycle réversible de Brayton

La transformation de la chaleur dégagée de la combustion du carburant en énergie mécanique dans une turbine à gaz est accomplie suivant le cycle de Brayton.

Le cycle de Brayton est le procédé thermodynamique qui gouverne le fonctionnement de turbines à combustion ou gaz, ces turbines emploient selon trois types de cycle thermique (simple, combiné et cogénération) [9].

La composition de cycle réversible de Brayton est par quatre transformations suivantes :

- ✓ une compression isentropique;
- ✓ un apport de chaleur ou combustion isobare ;
- ✓ une détente isentropique ;
- ✓ un retrait de chaleur isobare [10].

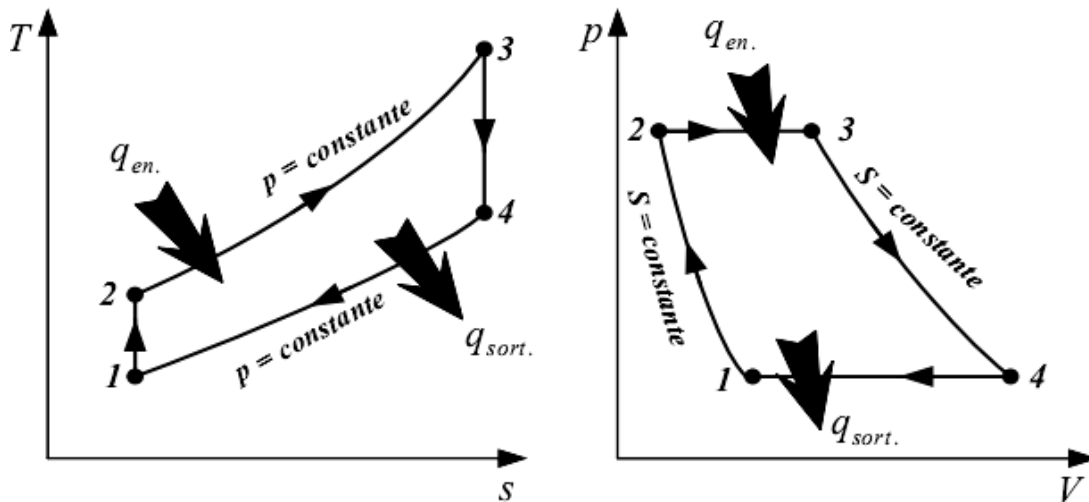


Figure I.19 Les diagrammes T - S et P- V du cycle Brayton idéal [31]

I.12. La génération d'électricité

L'arbre de la turbine entraîne un réducteur dont l'arbre à petite vitesse entraîne un alternateur (voir figure I.20). Le système mécanique est simple et peut être comparé à un groupe turboalternateur à vapeur. Il produit uniquement de l'électricité avec une turbine à gaz n'est intéressant que pour des conditions d'exploitation imposant ce système [6].

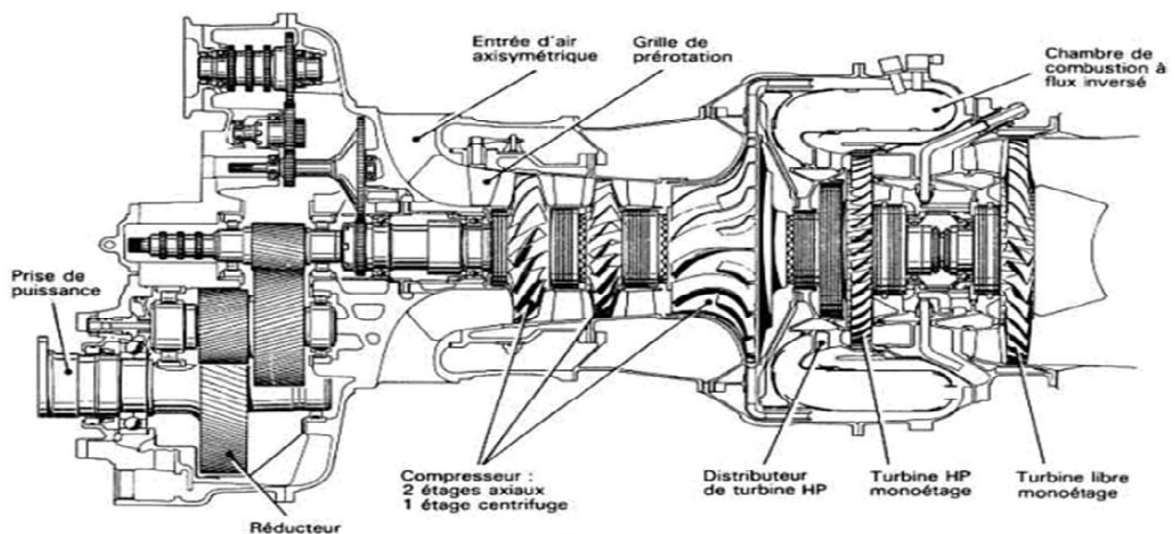


Figure I.20 Turbomoteur à turbine libre TM 333 [6].

I.13. Conclusion

La turbine à gaz contribue dans une large mesure aux motorisations actuelles. Tandis que dans le domaine des fortes puissances (production d'électricité) elles se démarquent par leur adaptation à des cycles combinés ou de cogénérations très performantes.

Au cours de ce chapitre, nous avons fait une description complète des turbines en générale et les turbines à gaz en particulier parce que, on a choisi ce type pour notre étude.

On a vu aussi que la turbine à gaz est convertie l'énergie thermique en énergie mécanique lors fonctionnement, c'est-à-dire la sortie de la turbine est un couple mécanique. L'utilisation de la turbine est pour entraîner l'alternateur.

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

Chapitre II
ÉTUDE
THÉORIQUE
D'ALTERNATEUR

II.1 Introduction

L'alternateur est une machine synchrone à courant alternatif qui est utilisé dans l'industrie tel que dans la production d'énergie électrique dans les centrales (hydraulique, thermique, nucléaire ...), groupes électrogène automobile, la marine, ...etc, il est la source primaire de toute l'énergie électrique de consommation. Cette machine constitue les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Plus de 95 % de l'énergie électrique est produite par des alternateurs

L'alternateur converti l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif, Le rotor de l'alternateur est entraîné en rotation par la turbine qui assure l'énergie mécanique, ce dernier fournit des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation, il est donc constitué de deux parties principales. Une partie fixe est appelée stator et une partie mobile est appelée rotor.

II.2. Construction de l'alternateur

La composition de l'alternateur est par une partie fixe qui s'appelle stator et une partie tournante s'appelle rotor.

- ❖ Le stator est appelé induit. La constitution de ce dernier est par les enroulements qui vont être le siège du courant électrique alternatif induit par le changement du flux de champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit [1].
- ❖ Le rotor est nommé l'inducteur.
- ✓ D'une part, ce rotor probablement constitue d'un aimant permanent (engendrant dans ce cas, un champ constant), c'est-à-dire, la tension fournie par la machine n'est pas réglable (si on considère que les pertes dans les conducteurs sont négligeables) et sa valeur efficace et sa fréquence varient avec la vitesse de rotation (exemple : micro turbine à gaz qui entraîne l'alternateur).
- ✓ D'une autre part, la constitution de ce rotor est un électroaimant pour assurer l'induction, c'est à dire l'alimentation du bobinage est en courant continu par un collecteur à bague rotatif (un double bague avec balais) amenant une source extérieure ou par un exciteur à diodes tournantes et sans balais (voire la section II.5.3). Un système de régulation permet l'ajustement de la tension et de la phase du courant produit (exemple : turbine à gaz ou à vapeur qui entraîne l'alternateur).

II.2.1 Stator

Le stator de l'alternateur est constitué par un ensemble fixe (statique). C'est une partie active, construit par l'enroulement stator et le circuit magnétique qui convertissent l'énergie mécanique du rotor en énergie électrique et permettant sa transmission vers l'extérieur.

L'ensemble circuit magnétique-enroulement est accroché à la carcasse de l'alternateur qui distribue aux fondations les efforts mécaniques enfantés en fonctionnement normal ou accidentel. L'ensemble du stator forme un guide de ventilation des organes internes et supporte également les structures d'extrémités [7].

Les éléments constitutifs du stator sont:

II.2.1.1 La carcasse

L'ensemble de tôles soudées électriquement entre elles qui couverte l'extérieure de l'alternateur est appelé carcasse.

Cette carcasse porte à chacune de ses extrémités les paliers. Elle possède aussi un caisson de bornes, de plus, elle est dimensionnée pour pouvoir supporter sans encombre les sollicitations dues à ses fonctions (transport, fonctionnement normal ou accidentel, etc.).

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.

II.2.1.3 Le circuit magnétique

L'utilisation d'un empilage de segments de tôle magnétique spéciale pour construire le circuit magnétique. Il considère parmi les deux composants actifs du stator. Un système de ressorts nommé suspension élastique est utilisé pour connecter le circuit magnétique avec la carcasse. Cette suspension permet la réduction de propagation des vibrations radiales aux composants du stator, ainsi qu'aux fondations.

II.2.1.4 L'enroulement stator

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

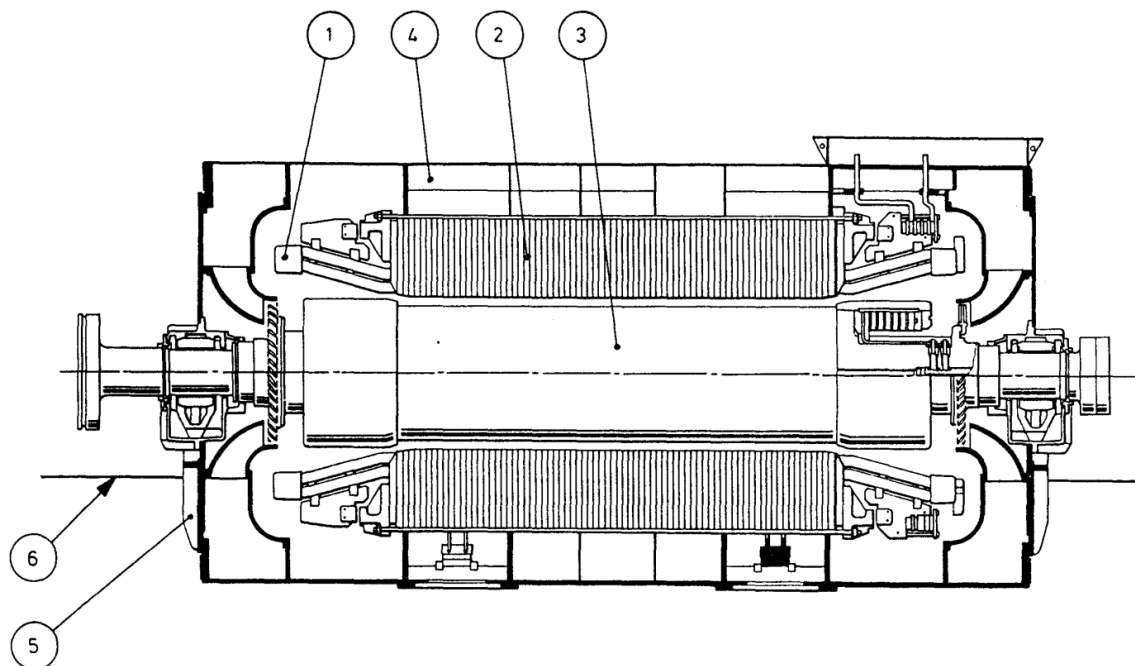
Deux parties de l'enroulement stator sont:

- 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.

Il y aussi des éléments secondaires du stator sont :

❖ **Les plaques d'assise** sur lesquelles repose l'alternateur.

❖ Le dispositif de réglage latéral permettant l'ajustement définitif de la position du stator sur la fosse du massif.



1 - Enroulement stator.

2 - Circuit magnétique.

3 - Rotor.

4- Carcasse alternateur.

5- Paliers.

6- Fondation.

Figure II.1 Vue d'ensemble de l'alternateur [7].

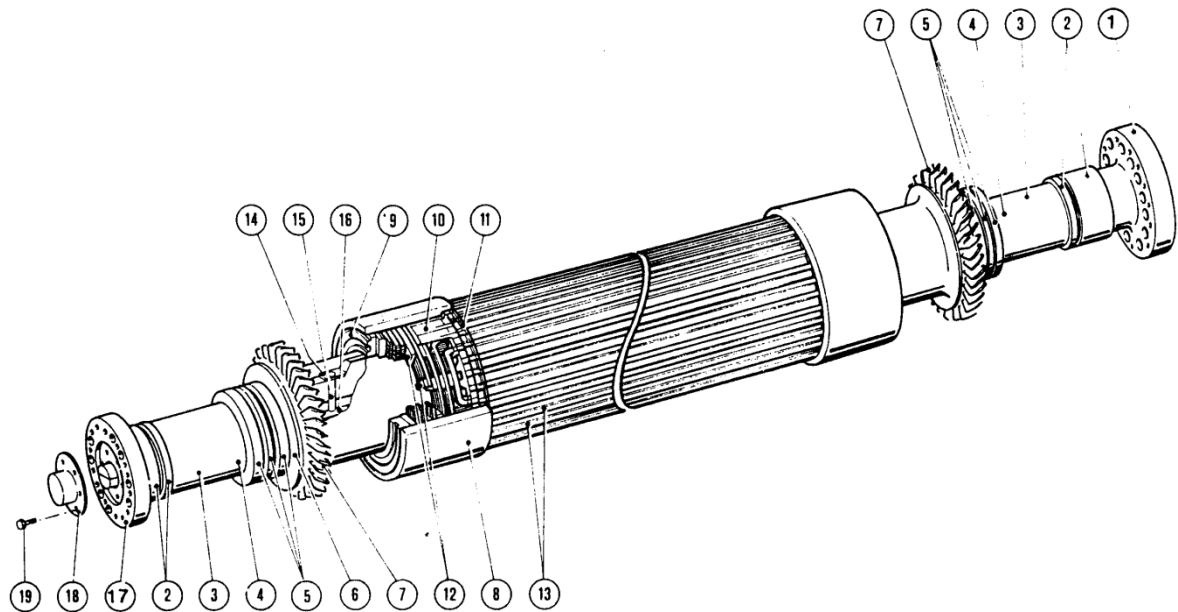
II.2.2 Rotor

La partie tournante de l'alternateur est le rotor qui entraîne par la turbine. Le rotor porte deux paires de pôles successivement nord et sud, avec une alimentation de ses bobines inductrices est par un courant continu.

La division de l'enroulement inducteur est en plusieurs bobines domiciliées dans des encoches longitudinales fraisées dans le fût du rotor. Il compose deux ventilateurs axiaux, aussi relié à la turbine par le plateau d'accouplement. Le rotor de l'alternateur tourne dans des coussinets montés sur des paliers [7].

Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils sont entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à haute vitesse par des turbines à vapeur [11].

Dans notre étude, c'est le rotor à pôles lisses qui est utilisé.



- | | |
|---|---|
| 1- Plateau d'accouplement coté turbine. | 11- Verrou de frettes. |
| 2- Portée des couvercles extérieurs. | 12- Calage des têtes de bobines. |
| 3- Fusées. | 13- Encoches longitudinales. |
| 4- Sans objet. | 14- Connexion extérieure. |
| 5- Portée des couvercles intérieurs | 15- Tiges de connexions radiales. |
| 6- Plateaux porte-ventilateurs. | 16- Connexion centrale. |
| 7- Ventilateurs axiaux. | 17- Plateau d'accouplement coté excitation. |
| 8- Frettes. | 18- Couvercle de protection. |
| 9- Plateau porte-frette. | 19- Vis de fixation du couvercle. |
| 10- Amortisseurs. | |

Figure II.2 Rotor de l'alternateur [7].

Le rotor de l'alternateur est divisé en plusieurs parties sont:

II.2.2.1 L'arbre

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

On distingue deux zones, la première incluse dans le fût et la deuxième hors du fût. Il est formé d'un empilage de spires domicilié dans les encoches du rotor.

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. Ces derniers permettent de réduire les déformations que la frette pourrait prendre si elle était seule, montée avec serrage sur le fût.

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

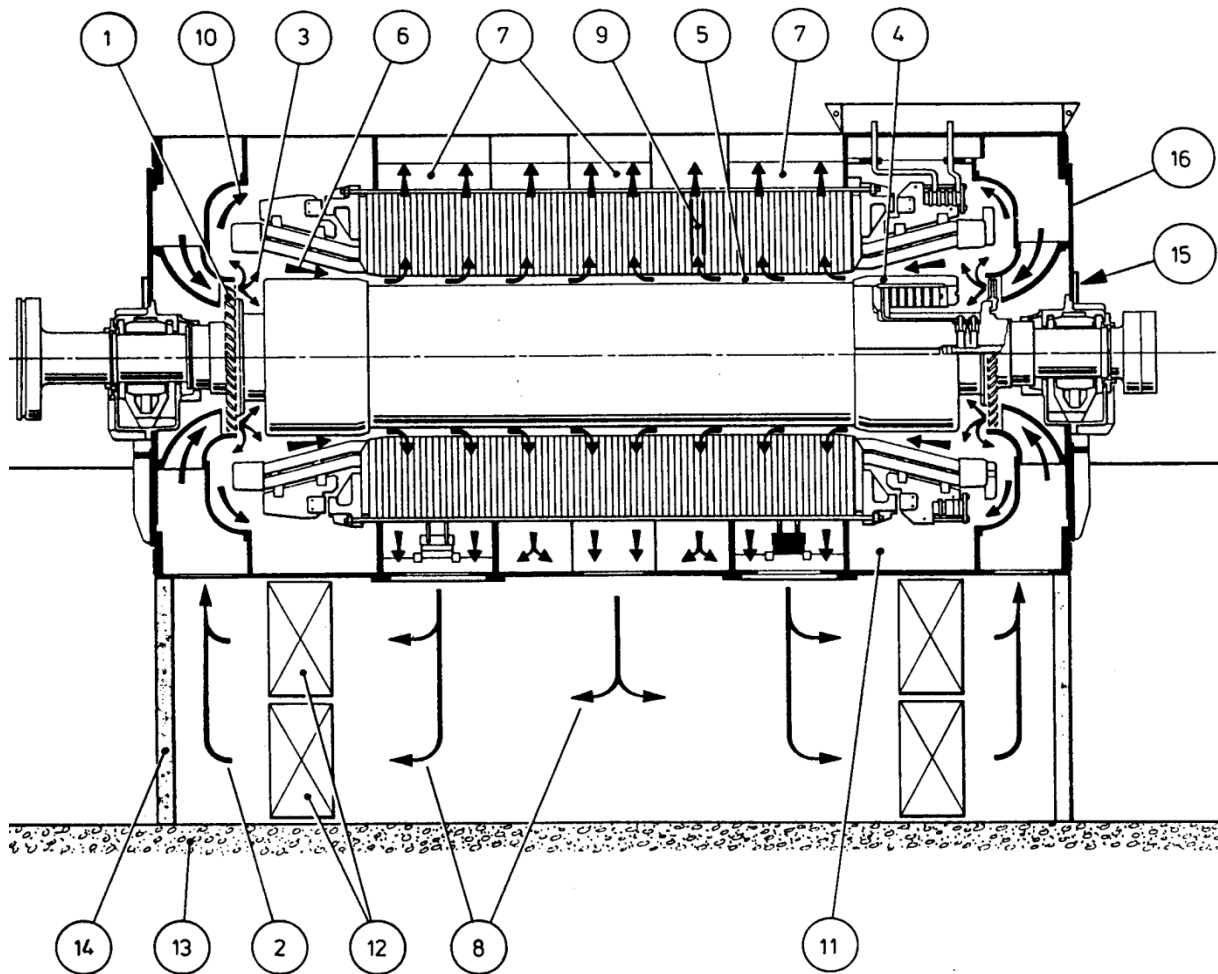
Les pertes joule du rotor et du stator, ainsi que les pertes fer sont quittées par la circulation d'air à l'intérieur de l'alternateur. Pour simplifier la maintenance de l'alternateur et de ses auxiliaires, il faut utiliser l'air.

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.

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 [7].



- | | |
|---|--|
| 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. |

Figure II.3 Circuit de refroidissement de l'alternateur [7].

II.3 Principe de fonctionnement des alternateurs

On va expliquer le fonctionnement d'un alternateur monophasé pour bien comprendre le fonctionnement d'un alternateur triphasé, dans la section suivante, on montre ce principe [12].

II.3.1 Fonctionnement d'un alternateur monophasé

Par souci de simplification, on suppose que le stator ne comporte qu'une spire MN (figure II.4). 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.

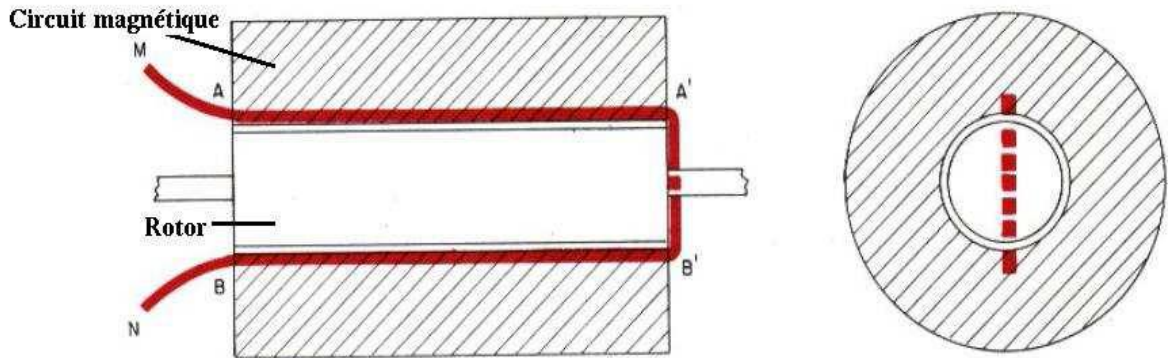


Figure II.4 Spire stator MN [12].

On passe un courant continu dans le rotor et on tourne ce rotor à une vitesse ν . 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 ν du rotor :

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

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.5

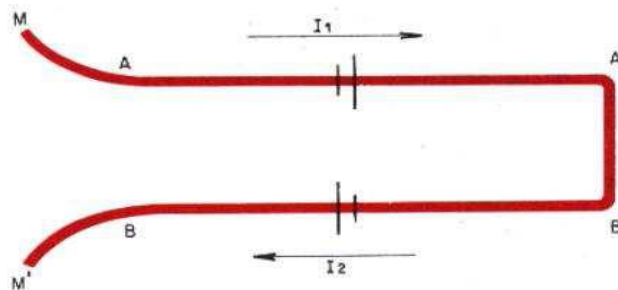


Figure II.5 Sens du courant dans MN [12].

De même pour la force électromotrice e_2 dans BB' :

$$e_2 = K_2 H \nu \quad (\text{II-2})$$

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

$$E = K H \nu \quad (\text{II-3})$$

En pratique, la bobine possède plusieurs spires afin d'augmenter la force électromotrice totale produite correspondant à la force électromotrice engendrée par toutes les spires.

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 créé ne sera pas le même en chaque point pour un alternateur possédant deux pôles (Nord et Sud).

La figure II.2.2 donne un aperçu de la valeur du champ en différents points :

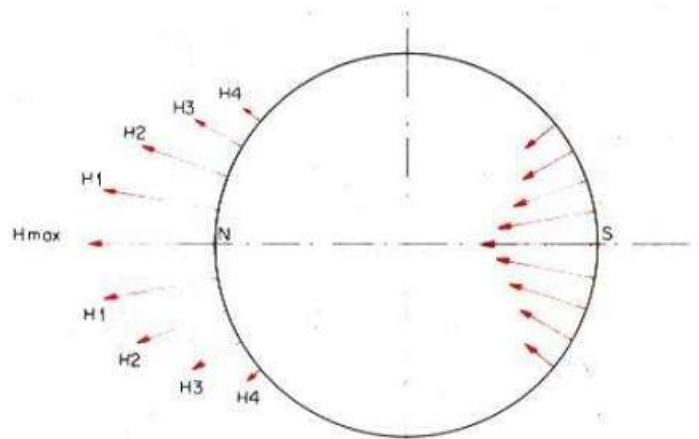


Figure II.6 Champ H d'un rotor [12].

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 $K H_{max} \omega$.

- ✓ $\frac{1}{36}$ éme de seconde après elle sera à : $K H_1 \omega$
- ✓ $\frac{2}{36}$ éme de seconde après elle sera à : $K H_2 \omega$
- ✓ $\frac{3}{36}$ éme de seconde après elle sera à : $K H_3 \omega$

Ainsi quand le pôle sud sera devant le conducteur AA', c'est-à-dire $\frac{18}{36}$ éme de seconde après, elle reprendra la valeur de $K H_{max} \omega$ 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 :

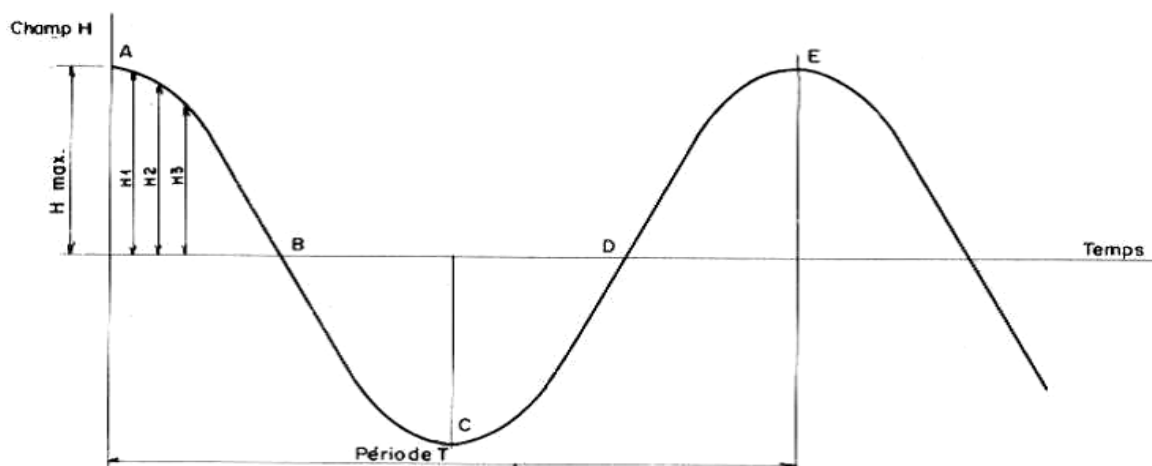


Figure II.7 Champ magnétique H pendant un tour [12].

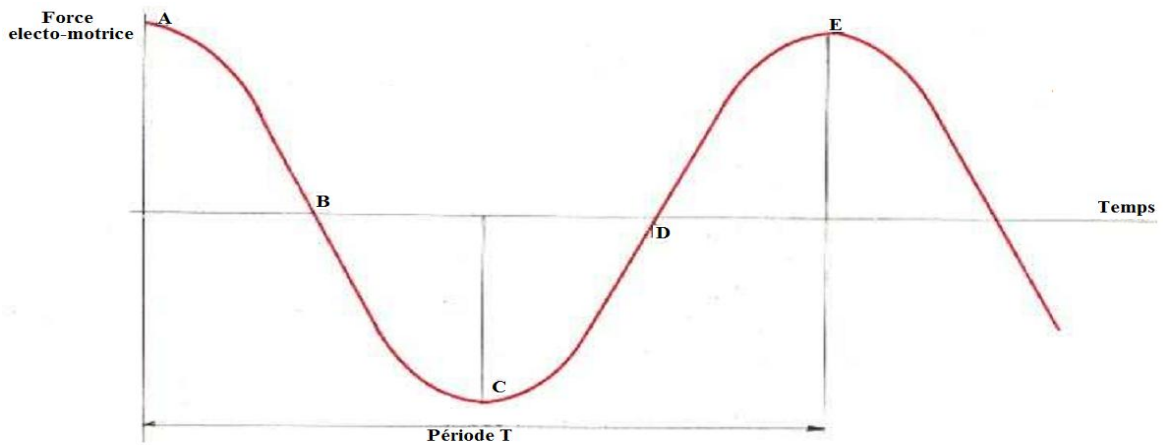


Figure II.8 Force électromotrice engendrée pendant un tour [12].

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

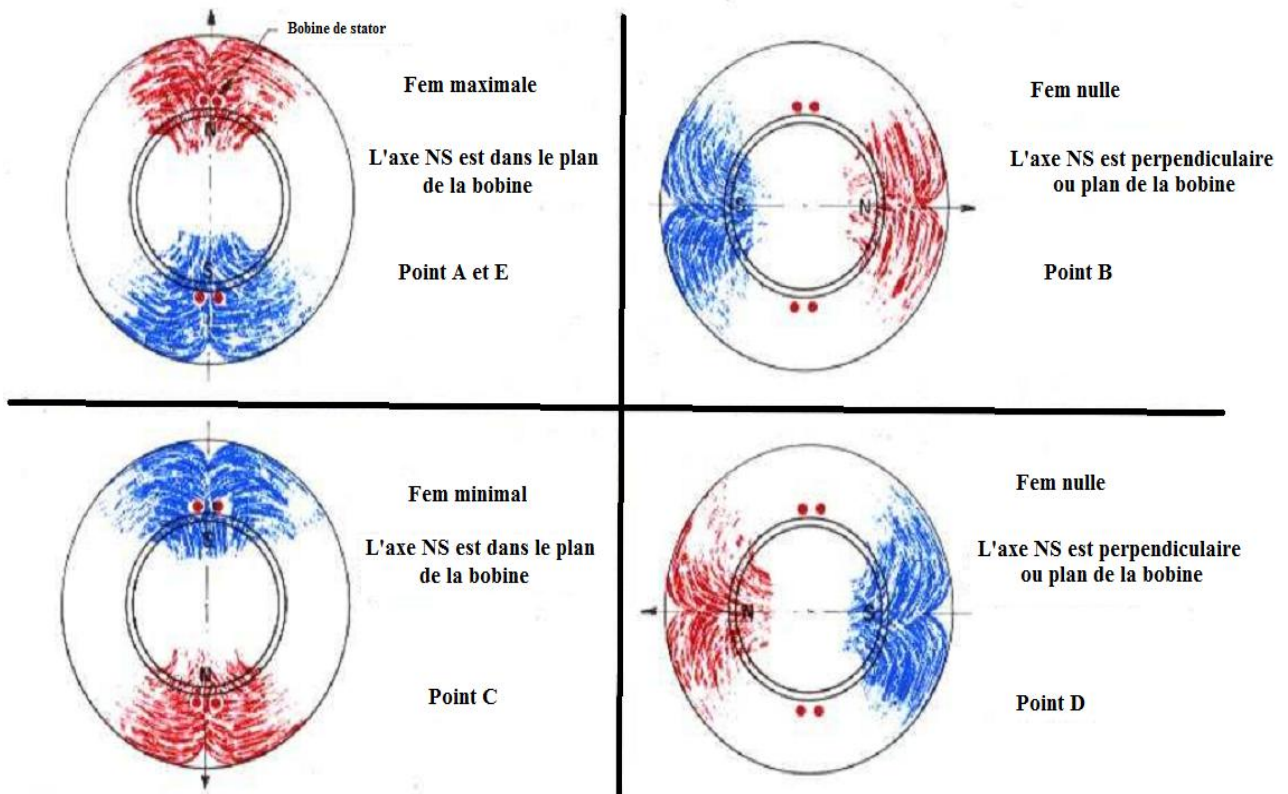


Figure II.9 Positions du rotor [12].

Le courant qui vérifie l'équation (II-2) est appelé le courant inducteur i ou le courant d'excitation de l'alternateur:

$$H_{max} = K i \tag{II-4}$$

La force électromotrice est une fonction relative au courant d'excitation de l'alternateur et à la vitesse du rotor qu'on exprime souvent en nombre de tours n dans l'unité de temps (tours par seconde) :

$$E_{max} = K i n \tag{II-5}$$

II.3.2 Fonctionnement d'un alternateur triphasé

La figure II.10 illustre un enroulement statorique triphasé (A_1 , A_2 , A_3) dont les axes sont décalés de 120° l'un par rapport à l'autre.

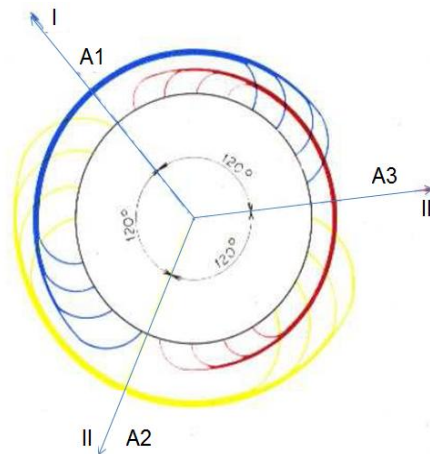


Figure II.10 Stator triphasé [12].

Pour chaque bobine, nous aurons une force de même valeur maximale, égale à $K i n$ 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 :

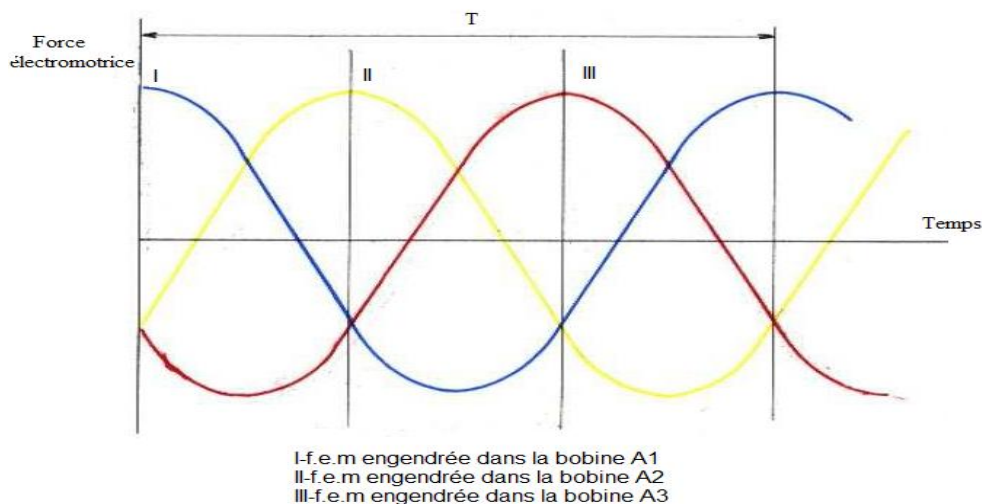


Figure II.11 Force électromotrice d'un alternateur triphasé [12].

Dans les phases A_1 , A_2 , A_3 , nous remarquons des forces électromotrices maximales dans les bobines.

II.4 Champs alternatifs et champs tournants

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

Soit une bobine possédant 2 spires AA' et BB' dans laquelle circule un courant alternatif i

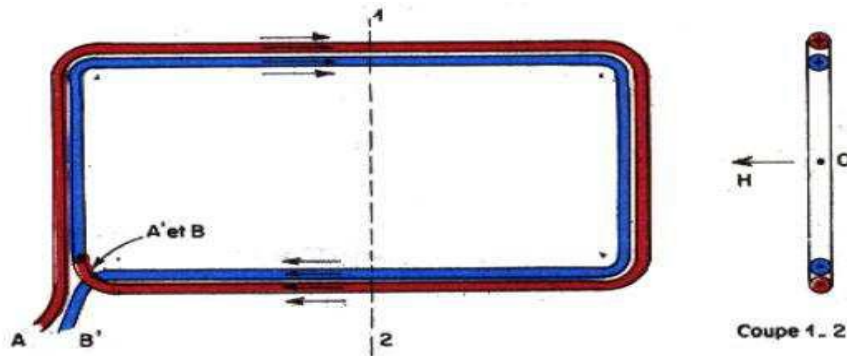


Figure II.12 Bobine à deux spires [12].

Les résultats précédents montrent que le champ H créé par la bobine est:

$$H = K i \quad (\text{II-6})$$

La courbe de la figure suivante montre la valeur du courant i :

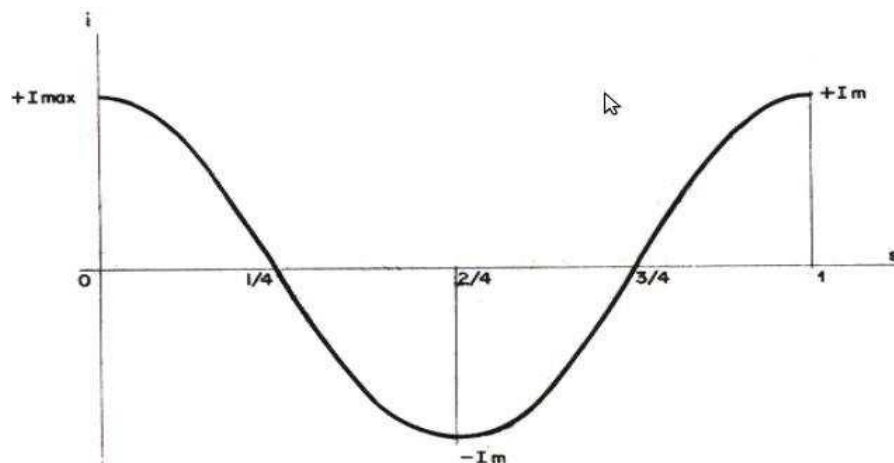


Figure II.13 Variation du courant pendant une période [12].

De la même manière, la valeur du champ H est variée:

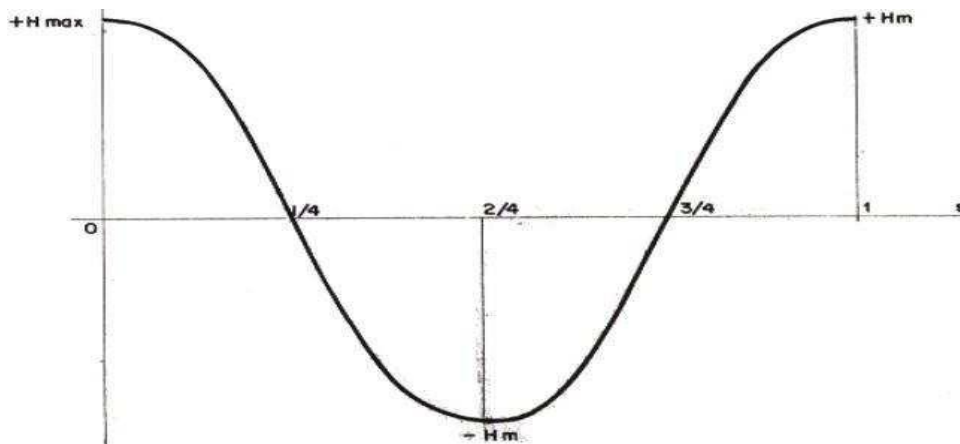


Figure II.14 Variation du champ magnétique pendant une période [12].

À chaque spire, il est à présent intéressant d'associer un courant continu égal à I_m .

Par chaque bobine, $\frac{H_m}{2}$ 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.14).

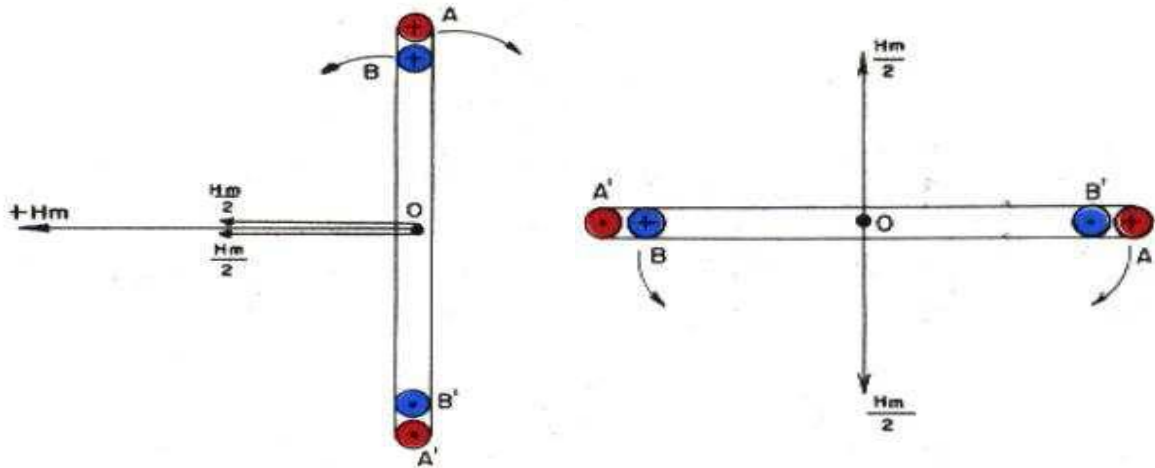


Figure II.15 Champ magnétique : à gauche : $H_{tot} = H_m$, à droite : $H_{tot} = 0$ [12].

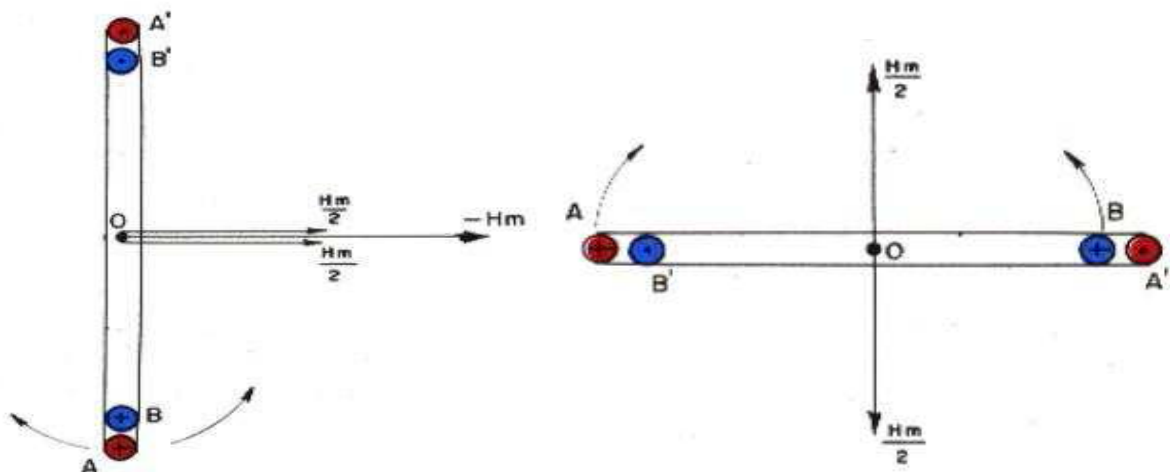


Figure II.16 Champ magnétique à gauche : $H_{tot} = -H_m$, à droite : $H_{tot} = 0$ [12].

On conclut que le champ résultant créé est le même en prenant :

- ✓ deux spires fixes parcourues par un courant alternatif d'intensité maximale I_m
- ✓ en séparant les deux spires précédentes parcourues par un courant continu d'intensité maximale I_m

On nomme les deux champs $\frac{H_m}{2}$ champs tournants.

Par une bobine traversée par un courant alternatif, le champ engendré est similaire au champ résultant créé par deux champs tournants égaux à la moitié du champ maximal (H_m) 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 [12].

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

L'expérience précédente va généraliser par l'utilisation d'un enroulement triphasé, on va obtenir la figure suivante:

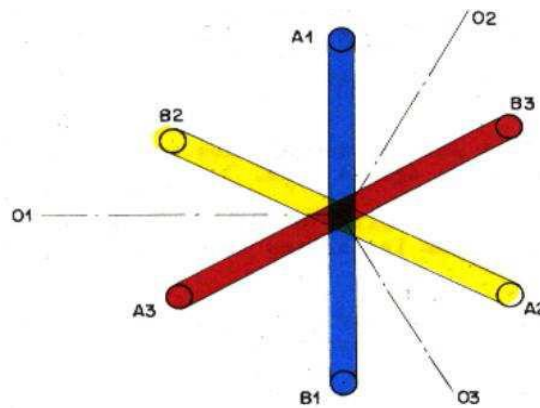


Figure II.17 Enroulement triphasé [12].

Si on suppose que dans le temps égale à zéro, le champ est maximal dans la bobine $A1 B1$, à cet instant les deux champs tournants $H1$ et $H1'$ sont dans le même sens. Le champ généré par la bobine $A2 B2$ ne sera maximal que lorsque les deux champs tournants $H2$ et $H2'$ auront eu le temps de parcourir $1/3$ de tour. A l'instant zéro ils auront donc la position présentée par la figure suivante:

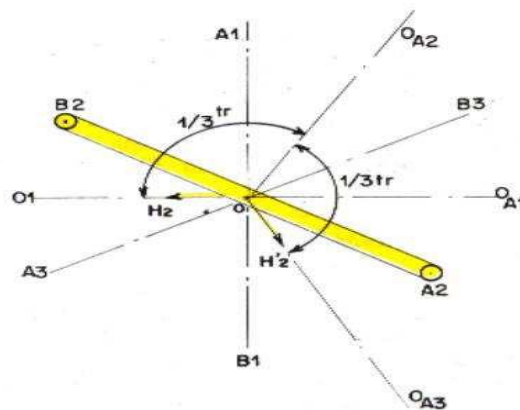


Figure II.18 Position des champs tournants $H2$ et $H2'$ [12].

Le champ généré par la bobine $A3 B3$ ne sera maximal que lorsque les deux champs tournants $H3$ et $H3'$ auront tourné de $2/3$ de tour, au temps zéro leur position est donnée par la figure suivante :

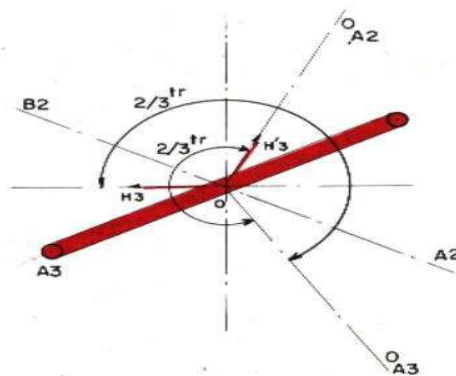


Figure II.19 Position des champs tournants $H3$ et $H3'$ [12].

En reportant les champs tournants sur une seule figure on obtient :

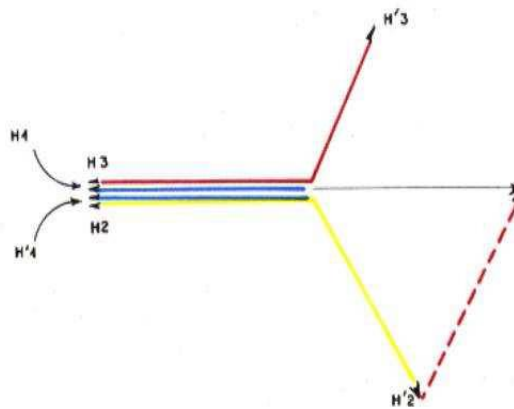


Figure II.20 Champs tournants [12].

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 [12]

II.5 Système d'excitation de l'alternateur

En générale, l'excitation des alternateurs effectue par une génératrice à courant continue qui entraînée par l'arbre, ou par le réducteur de vitesse pour les puissances les plus élevées (jusqu'à 250MW).

- Le prélèvement de la puissance d'excitation est fait sur l'arbre du groupe par un alternateur d'excitation dont l'enroulement induit alimentant un pont redresseur.
- La puissance d'excitation est partagée entre deux transformateurs. Un transformateur de courant alimentant un pont de diodes et un transformateur de tension alimentant un pont de thyristors contrôlés par le régulateur de tension[5]

Le groupe étant à la vitesse nominale, la tension stator est égale à la consigne du régulateur de tension. Le dispositif de synchro-couplage agit sur la vitesse du groupe pour la synchronisation avec le réseau et sur la consigne de la régulation de tension pour l'égalité des tensions.

Après couplage, la prise de charge, s'effectue à tension stator constante et égale à la consigne de tension.

La désexcitation intervient par un ordre normal d'arrêt ou par un ordre issu d'une protection. L'ordre fait ouvrir le disjoncteur et ensuite le contacteur d'excitation.

La décharge rapidement du courant de l'excitation de l'excitateur est dans la résistance. Dans l'induit de l'excitateur au travers des diodes tournantes, le courant du rotor est déchargé [7].

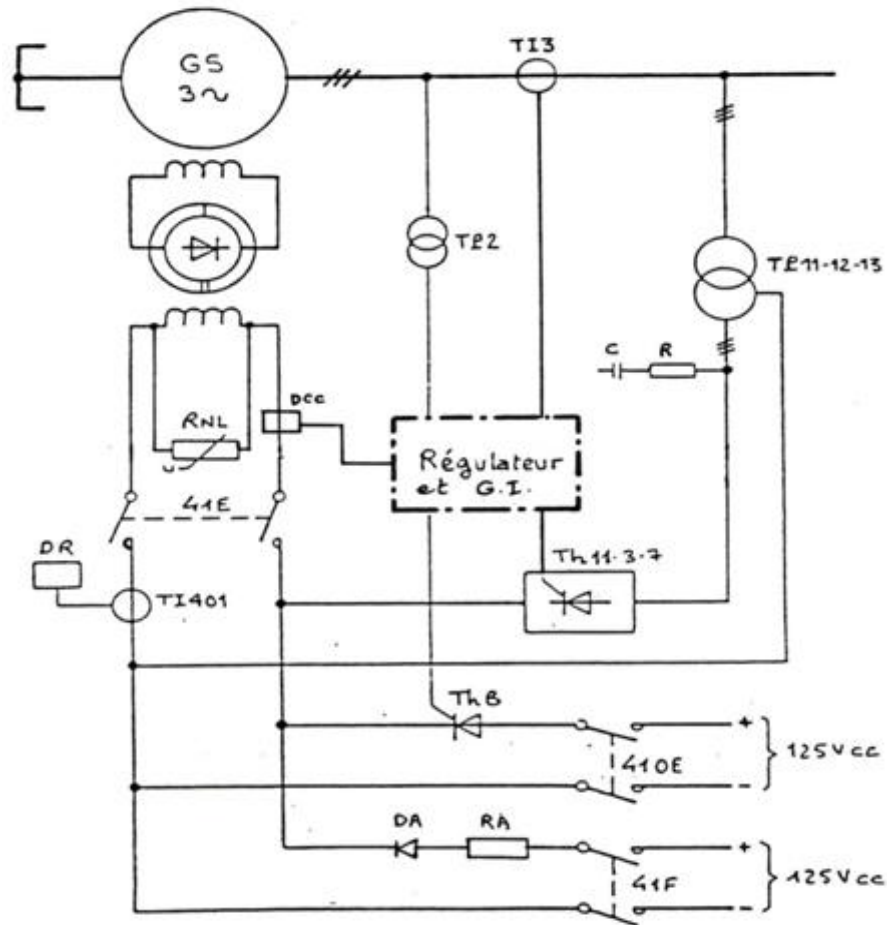


Figure II.21 Schéma unifilaire du système d'excitation de l'alternateur [7].

II.5.1 Le rôle du système d'excitation

Si la chute de la tension est importante, le système d'excitation doit être conçu pour donner rapidement une surexcitation qui, en freinant la réduction du flux magnétique de la machine, pour éviter la perte du synchronisme, dans le cas, le défaut n'est pas trop sévère ou s'il est écarté rapidement. Cette surexcitation minimise la chute de tension transitoire que subissent les récepteur proche la machine synchrone.

Le déclenchement de la machine initialement en charge se produit la surtension, dans des limites non dangereuses, le système d'excitation doit alors désexciter de manière à maintenir la surtension aux bornes de la machine.

La surtension est caractérisée par les paramètres suivants:

1. la tension maximale que peut délivrer le système d'excitation.
2. la vitesse d'accroissement de tension d'excitation [13].

II.5.2 Classification des systèmes d'excitation

On excite l'alternateur par l'application d'une tension continue sur l'inducteur tournant. Différents modes d'excitation qui sont existé et on cite les suivants [14]:

a- système d'excitation directe

L'excitatrice est couplée sur le même arbre que la machine synchrone

b- système d'excitation indirecte

L'excitation est libre de la machine.

c- Système d'excitation sans balais

Dans ce type d'excitation, l'excitatrice à courant continu est changée par un alternateur à induit tournant dont le redressement du courant de sortie est par un pont redresseur qui lui est solidaire.

d- système d'auto-excitation

Le prélèvement de la tension d'excitation est à partir du stator de la machine synchrone puis le redressement est à l'aide d'un pont redresseur à diode ou thyristor [14].

Les systèmes d'excitation à redresseur sont les plus utilisés dans les modernes alternateurs. Les types des ponts redresseurs les plus usés sont [5] :

❖ Pont de diodes fixes

Le redresseur à diodes monté en harmonie et le courant continu est amené au rotor de l'alternateur par des bagues.

❖ Pont de thyristors fixes

Cette excitation marche à tension constante et est dimensionnée pour les caractéristiques de plafond. Son induit débite sur un pont de thyristors contrôlé par le régulateur de tension.

❖ Pont de diodes tournantes

L'excitation est construite avec inducteur fixe et induit tournant, alimentant un pont de diodes monté sur le rotor et débitant directement le courant continu vers l'inducteur de l'alternateur.[5]

II.6 Les forces électromotrices

II.6.1 Forces électromotrices théoriques

Pour exprimer la force électromotrice, on suppose que les f.é.m induites dans tous les brins actifs sont en phases d'une part (soit une seule encoche par pôle et par phase) et que ces f.é.m sont rigoureusement sinusoïdales (soit un champ radial rigoureusement sinusoïdal).

Pour mieux expliquer le phénomène, on a deux conducteurs d'une même spire occupent au même instant la même position par rapport à deux pôles consécutifs, compte tenu du couplage, les deux f.é.m s'additionnent arithmétiquement.

Si les différentes spires sont superposées, donc tous les conducteurs d'un même pôle 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 [5]:

Où :

$$E = 4,44 f \phi \frac{N}{2} \quad (\text{II.8})$$

Alors :

$$E = 2,22 f N \phi \quad (\text{II.9})$$

N : Nombre total de conducteurs.

Φ : Flux total sous un pôle.

Il peut remplacer f par pn pour trouver :

$$E = 2,22 p n N \phi \quad (\text{II.10})$$

Où

p : nombre pair de pole

n : vitesse de rotation en (tr/s)

II.6.2 Forces électromotrices réelles

L'expression suivante montre la force électromotrice réelle [5]:

$$E = 2,22 K_d K_f f N \phi \quad (\text{II.11})$$

Où :

K_d : Facteur de distribution.

K_f : Facteur de forme.

Le produit $K = 2,22 K_d K_f$ est nommé coefficient de Kapp, il doit être évalué pour chaque alternateur. Notons cependant que pour un alternateur triphasé, $K_d < 1$ et $K_f > 1$ ont un produit voisin de l'unité et la f.é.m réelle ne diffère de la théorique que de quelques pour cent.

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

$$E = K f N \phi \quad (\text{II.12})$$

II.6.3 Réaction magnétique d'induit

En charge, le courant dans l'induit (stator) engendre un deuxième champ magnétique tournant qui modifie les caractéristiques de la machine. C'est ce que l'on appelle la réaction magnétique d'induit.[7]

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

La figure II.22 présente le circuit triphasé correspondant aux caractéristiques de la machine. L'écriture des équations de maille de chaque phase met en évidence un schéma monophasé équivalent simple basé sur une inductance équivalente dite inductance synchrone. Ce modèle s'appelle le modèle linéaire de Behn-Eschenburg. Il est basé sur la linéarité du circuit magnétique qui constitue la machine, cette linéarité qui se traduit par la légitimité d'utilisation des inductances (propre et mutuelle). Pourtant, quand on relève la valeur efficace de la force électromotrice E , chaque phase peut être ainsi caractérisée par sa force électromotrice interne, sa résistance série R , son inductance propre L et son inductance mutuelle M avec les deux autres phases.

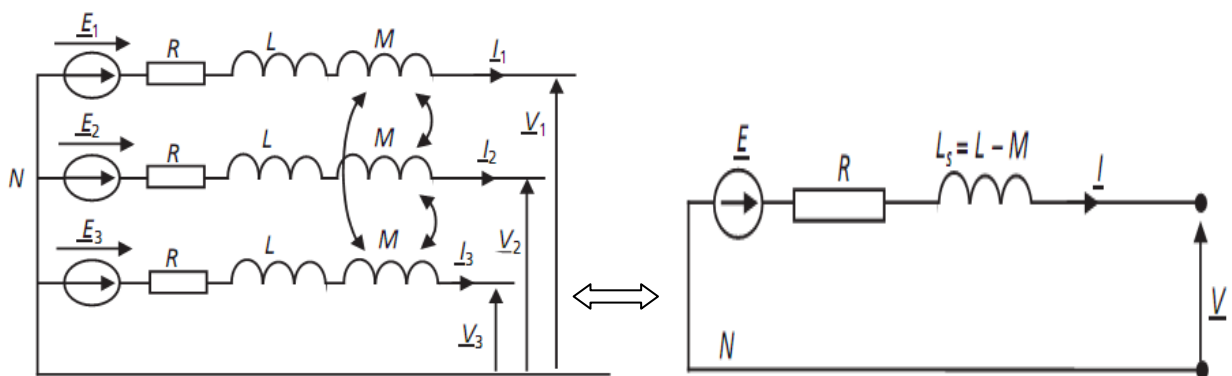


Figure II.22 Schéma électrique et schéma monophasé équivalent de Behn-Eschenburg [15].

Les relations de maille:

$$\begin{cases} \underline{E}_1 = R \underline{I}_1 + jL\omega \cdot \underline{I}_1 + jM\omega \cdot \underline{I}_2 + jM\omega \cdot \underline{I}_3 + \underline{V}_1 \\ \underline{E}_2 = R \underline{I}_2 + jL\omega \cdot \underline{I}_2 + jM\omega \cdot \underline{I}_1 + jM\omega \cdot \underline{I}_3 + \underline{V}_2 \\ \underline{E}_3 = R \underline{I}_3 + jL\omega \cdot \underline{I}_3 + jM\omega \cdot \underline{I}_1 + jM\omega \cdot \underline{I}_2 + \underline{V}_3 \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Si la machine est équilibrée ou sans neutre,

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{0} \quad \text{C'est-à-dire :}$$

$$\underline{E}_1 = R \underline{I}_1 + jL\omega \cdot \underline{I}_1 + jM\omega \cdot (\underline{I}_2 + \underline{I}_3) + \underline{V}_1 \quad (\text{II.14})$$

Soit :

$$\underline{E}_1 = [R + j(L - M)\omega] \cdot \underline{I}_1 + \underline{V}_1 \quad (\text{II.15})$$

Les relations de maille du schéma monophasé équivalent :

$$\underline{E} = [R + jL_s\omega] \cdot \underline{I} + \underline{V} \quad (\text{II.16})$$

L_s : inductance dite « synchrone »

On parle aussi de la « réactance synchrone »:

$$X_s = L_s \cdot \omega \quad (\text{II.17})$$

En fonction du courant d’excitation I_{ex} , on constate que celle-ci présente une saturation. On représente sur la figure II.23 l’aspect typique de la tension $E(I_{ex})$ ainsi que le schéma équivalent résiduel en mode saturé. En effet, si le fonctionnement de la machine fait intervenir une saturation magnétique, l’inductance synchrone n’est plus valable et le modèle devient faux. On fait alors intervenir uniquement dans le modèle l’inductance de fuites de la machine (qui n’est pas saturable) et la tension à vide réelle (mesurée au préalable).

L’étude des fonctionnements en régime saturé fait intervenir des méthodes particulières non développées ici. [15]

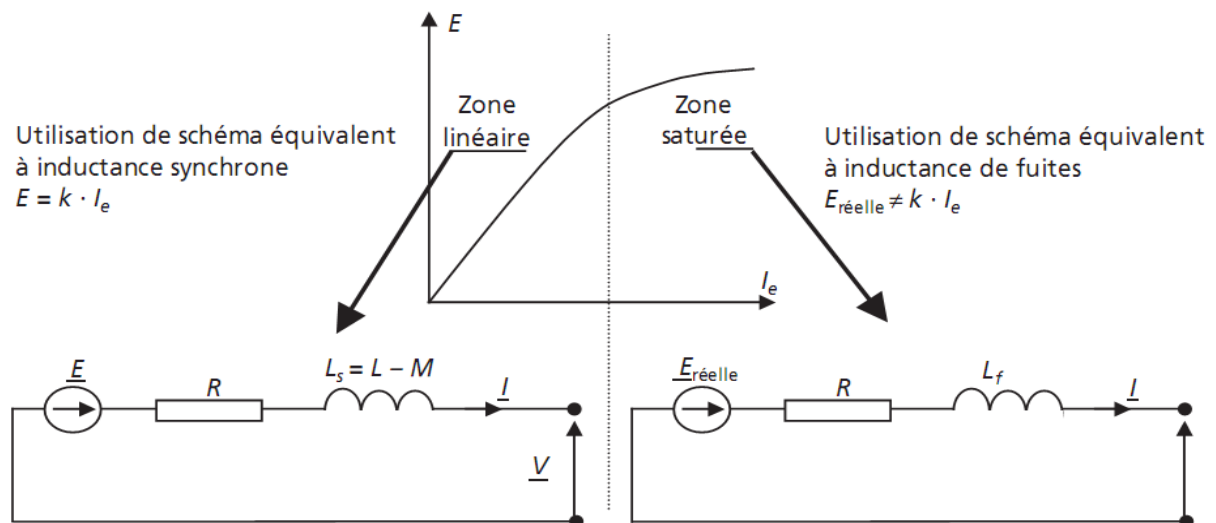


Figure II.23 Zone linéaire et zone de saturation de la machine [15].

Il est possible de tracer le diagramme de Fresnel correspondant à l’équation des tensions d’une phase de l’alternateur qui va présenter dans la section suivante.

II.8. Diagramme de Fresnel

Pour des études graphiques des systèmes monophasés en régime permanent sinusoïdal, le vecteur de Fresnel est le formalisme vectoriel le plus simple [16]. La figure (II.24) illustre la représentation vectorielle du diagramme de Fresnel [17]:

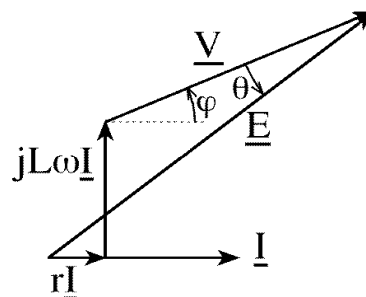


Figure II.24 Diagramme de Fresnel [17].

II.9 Couplage des alternateurs

II.9.1 Couplage d'un alternateur à un réseau

Le plus souvent, on couple un alternateur à un réseau en fonctionnement, ce réseau impose la tension V sur les phases auxquelles on va relier l'alternateur. Si ce réseau est très puissant, sa réactance vue des phases est négligeable devant celle réactance d'alternateur (Figure II.25). On ferme l'interrupteur K après avoir amené E à V et lors d'un passage des f.é.m. E_A, E_B, E_C en phase avec les tensions du réseau (Figure II.26) [5].

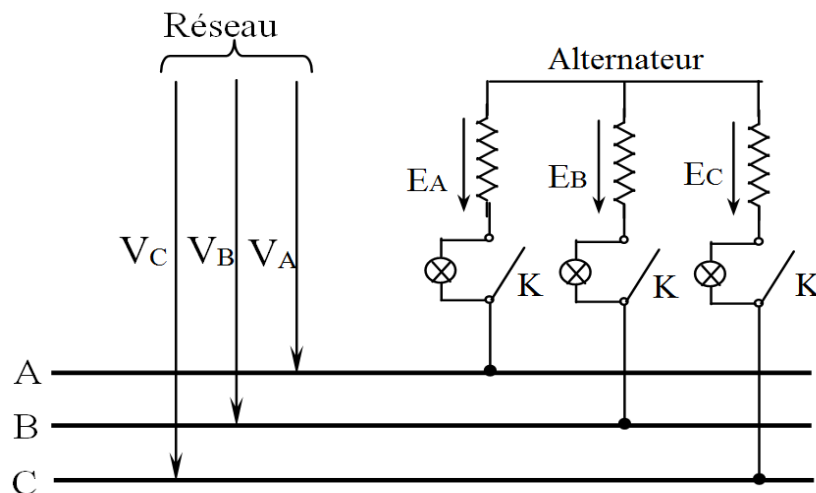


Figure II.25 Schéma de couplage d'un alternateur à un réseau [5].

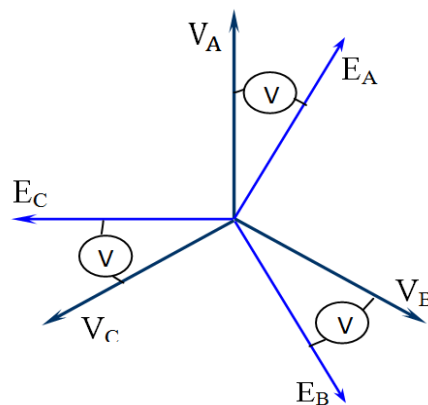


Figure II.26 L'ordre de succession des phases est le même [5].

Il doit respecter les conditions ci-dessous pour ce type de couplage [5]:

- ❖ En plate-forme, pour un petit alternateur à basse tension, on peut utiliser des lampes montées aux bornes de l'interrupteur de couplage sont remplies. (les lampes dont d'éclat est fonction des tensions $V_A - E_A, V_B - E_B, V_C - E_C$ à leurs bornes doivent pouvoir supporter 2V):
1. Les trois lampes doivent s'allumer et s'éteindre en même temps, sinon l'ordre de succession des phases est à corriger.

2. Les cycles d'allumage et d'extinction doivent être très lents, sinon il faut régler à la vitesse de l'alternateur.
 3. Les extinctions doivent être complètes, sinon il faut corriger l'excitation de l'alternateur. On couple lors d'une extinction.
- ❖ Pour les unités de moyenne ou forte puissance après leur installation en centrale, il n'y a plus à vérifier l'ordre de succession des phases. On vérifie grâce aux voltmètres montés aux secondaires des transformateurs de potentiel de la f.é.m et de la tension du jeu de phases.

Dans les centrales électriques modernes, on utilise des appareils de synchronisation, tels que le synchroscope, petit moteur qui tourne à une vitesse proportionnelle à la différence des fréquences du réseau et de l'alternateur, indique s'il faut accélérer ou ralentir celui-ci, de plus quand l'aiguille de cet appareil de mesure passe face ou repère zéro on sait que les tensions correspondantes sont en phase [5].

Le cas particulier d'un alternateur couplé à un réseau est important à étudier. Dans ce cas, la tension aux bornes de l'alternateur, V , est constante (en amplitude et en phase) puisque c'est la tension du réseau. Par ailleurs, on néglige souvent la résistance R du schéma équivalent devant l'inductance synchrone. Le diagramme de Fresnel de la relation de maille du schéma monophasé équivalent est alors représenté sur la figure II.27. On y précise les relations particulières qui relient les projections de la tension $jX_s I$ aux puissances active ($P = 3VI \cos\varphi$) et réactive ($Q = 3VI \sin\varphi$)[15].

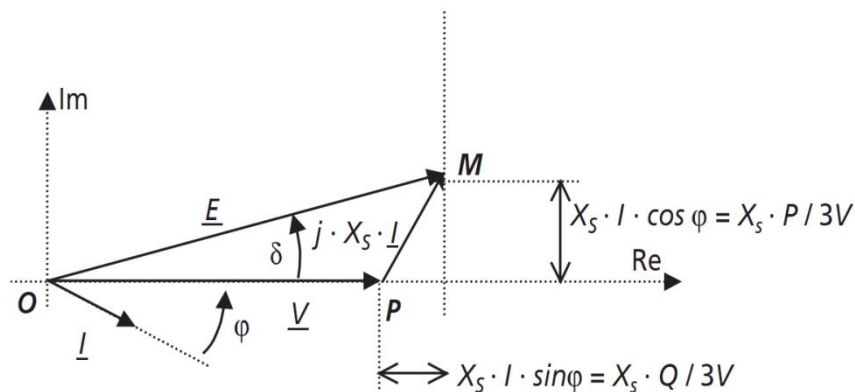


Figure II.27 Diagramme de Fresnel de l'alternateur couplé au réseau [30].

D'après cette figure, on voit que les projections du vecteur $jX_s I$ sur les axes du repère représentent à un coefficient près la puissance active et la puissance réactive fournies par l'alternateur.

❖ Alternateur à excitation constante

L'amplitude de la force électromotrice E est constante et le point M est sur un cercle de centre O et de rayon $E = k I_{ex}$ dans le cas où le courant inducteur est constant. La puissance réactive peut être positive ou négative, et la puissance active possède un maximum pour le cas où $\delta = 90^\circ$. Dans ce cas :

$$P_{max} = \frac{3V}{X_s} E \quad (\text{II.18})$$

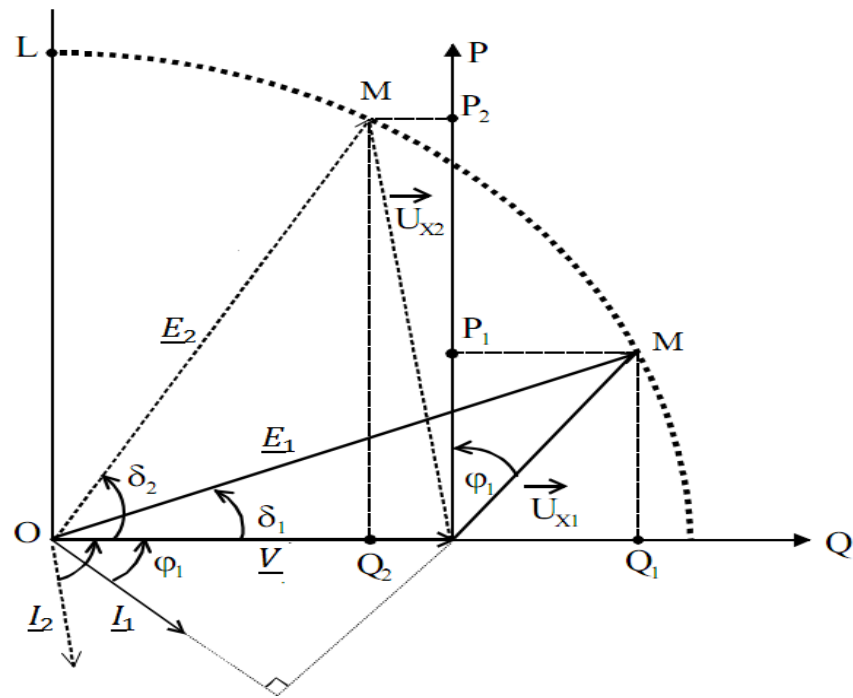


Figure II.28 Fonctionnement à excitation constante [30].

❖ Alternateur avec puissance constante et excitation variable :

Le point M se localise sur une droite horizontale, dans le cas, la puissance est constante. En modifiant la valeur du courant inducteur, on modifie l'amplitude de tension E comme illustré sur la figure II.29 . Ceci a pour conséquence de permettre que le courant fourni par l'alternateur soit en avance, en phase ou en retard par rapport à la tension V (voir figure II.30).

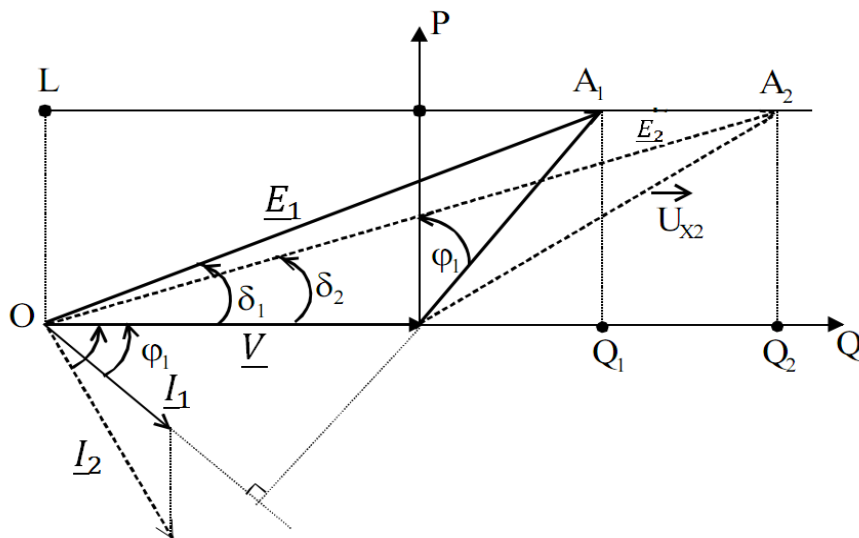


Figure II.29 Fonctionnement à puissance constante [30].

On constate que l'alternateur offre une puissance constante, ce qui permet la maîtrise de sa puissance réactive en jouant sur la valeur de son excitation. Une application nommée «compensateur synchrone» est existée qui consiste à coupler un alternateur à vide sur un réseau, uniquement dans le

but de fournir ou consommer la puissance réactive sur ce réseau. L'objectif visé étant évidemment de compenser au maximum l'énergie réactive consommée (ou fournie) par des charges fixes de façon à développer le facteur de puissance global de la charge du réseau [15].

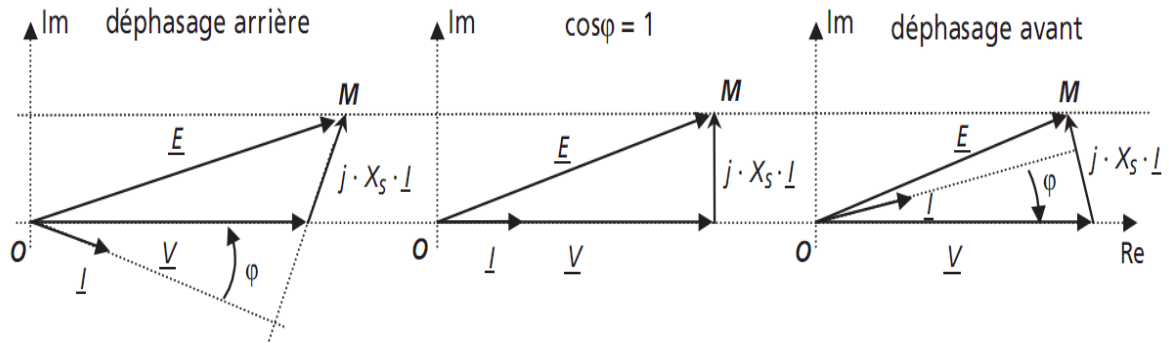


Figure II.30 Maîtrise du déphasage du courant de l'alternateur à puissance constante [30].

II.9.2 Fonctionnement en parallèle des alternateurs

L'énergie débite ou absorbé par un réseau est fournie par un ensemble des alternateurs montés en parallèle sur le réseau.

Cette fonctionnement en parallèle suppose :

- ❖ L'égalité des fréquences.
- ❖ La possibilité de charger ou de décharger chaque unité à volonté :
 - La puissance active se réglé par l'admission d'eau ou de vapeur à la turbine.
 - La puissance réactive se réglé par l'excitation.

II.10. Analyse de fonctionnement d'un alternateur

Dans la suite, on va étudier les caractéristiques de l'alternateur à vide et en charge pour analyser leur fonctionnement.

II.10.1. Caractéristique à vide

La caractéristique à vide est obtenue en mettant l'alternateur en circuit ouvert, on l'entraîne à sa vitesse de synchronisme (en effet la f.é.m est également proportionnelle à la vitesse de rotation) et en branchant un voltmètre aux bornes de l'induit, on mesure la tension entre neutre et phase pour un montage « étoile » ou entre lignes si le montage est « triangle ». L'inducteur est alimenté par le système d'excitation de l'alternateur ou par une source auxiliaire (la section II.5.3 précédente). Un voltmètre alternatif mesure la valeur efficace $U_V = E_V$ (Figure II.31) [5].

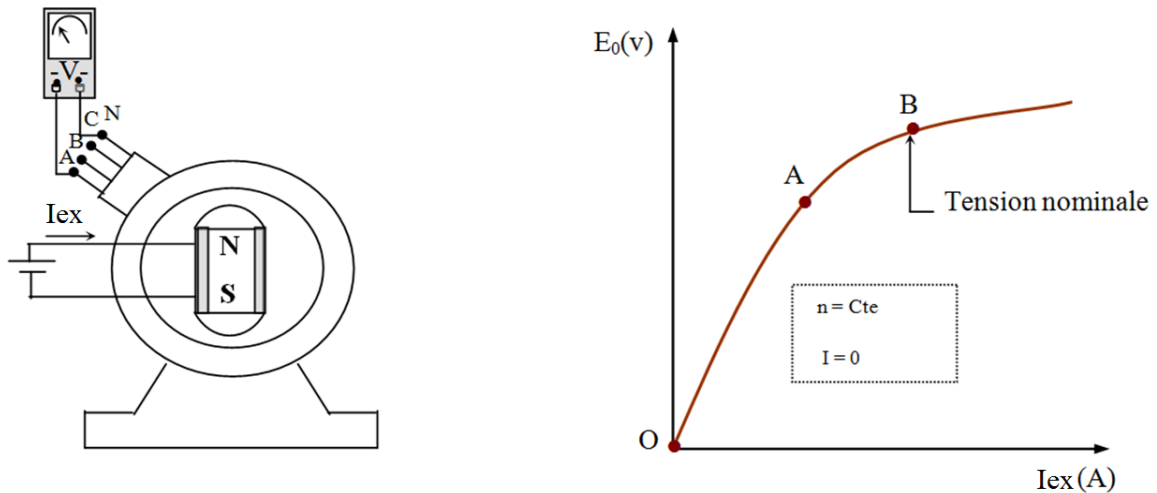


Figure II.31 Caractéristique d'un alternateur à vide [5].

Cette caractéristique est constituée d'une partie linéaire OA pour laquelle la f.é.m. E est proportionnelle au courant d'excitation I_{ex} , puis d'un coude AB au-delà duquel l'alternateur est pratiquement saturée, alors la f.é.m. n'augmente plus que faiblement le courant d'excitation continue à croître [5].

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 (Figure II.32).
- ✓ Les caractéristiques de réglage qui montrent comment il faut faire varier le courant inducteur pour maintenir la tension U constante (Figure II.33) [5].

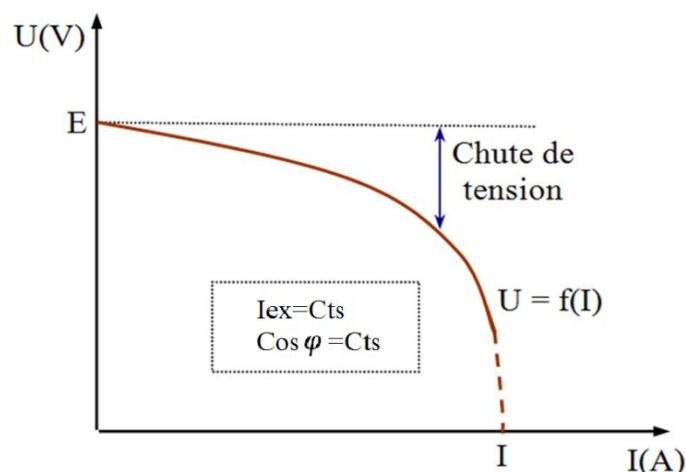


Figure II.32 Caractéristiques d'un alternateur en charge [5].

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.

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 $\cos\varphi$ constant [5] .

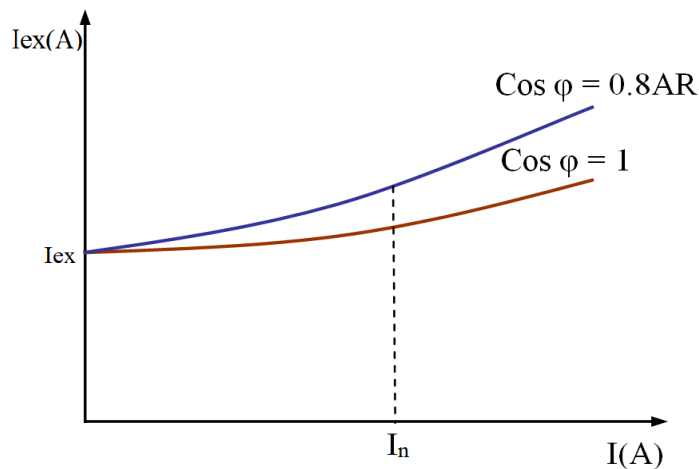


Figure II.33. Caractéristique de réglage [5].

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.

Conséquences :

- ✓ En utilisation normale, un alternateur doit fournir une tension dont la valeur efficace est la plus constant possible. La charge pouvant varier dans des proportions importantes, un dispositif électronique de régulation (asservissement), agissant sur l’intensité du courant d’excitation, est donc nécessaire.
- ✓ Si I_{ex} devient trop grand, la machine risque de saturer, il n’est alors plus possible de contrôler E avec I_{ex} . L’asservissement devient impossible. Il faut éviter la saturation [7].

II.11- Bilan des puissances d’un alternateur

Les différentes puissances sont représentées sur la figure (II.34) :

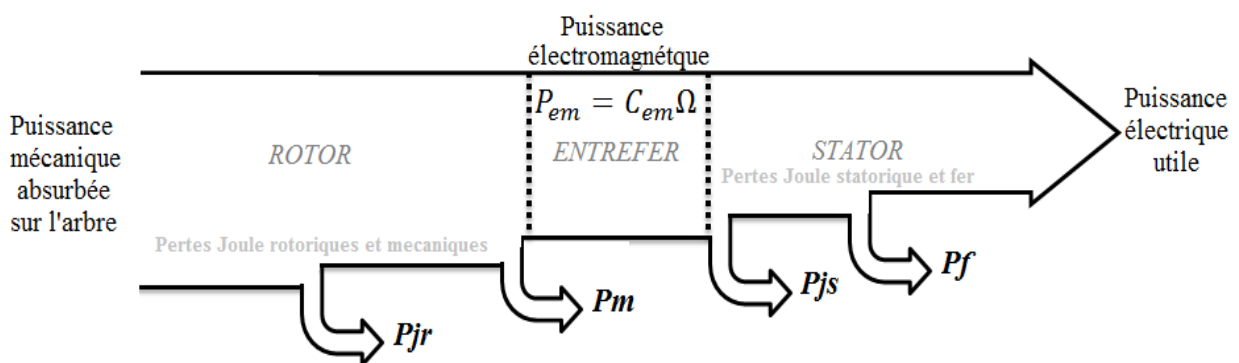


Figure II.34. Bilan des puissances d’un alternateur [30].

II.11.1. Puissance absorbée

Dans notre étude, la turbine à gaz entraîne l'arbre de l'alternateur, c'est à dire que cette turbine fournit une puissance mécanique à l'entrée de l'alternateur (puissance absorbée par l'alternateur) et on montre sa par la formule suivante[5]:

$$P_a = C_m \Omega = \frac{C_m 2\pi n}{60} \quad (\text{II.19})$$

Où :

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

n : Vitesse de rotation du champ tournant en tr/s.

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

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

$$P_a = C_m \Omega + U_{ex} I_{ex} = \frac{C_m 2\pi n}{60} + U_{ex} I_{ex} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

I_{ex} : Courant d'excitation.

U_{ex} : Tension d'excitation.

II.11.2. Puissance utile

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

$$P_u = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad (\text{II.21})$$

$$P_u = 3VI \cos \varphi \quad (\text{II.22})$$

D'où

U : Tension composée

V : Tension simple

II.11.3. Bilan des pertes

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

II.11.3.1. Pertes de puissance mesurable

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

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

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

$$P_{js} = \frac{3}{2} R I^2 \quad (\text{II.23})$$

Où :

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

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

$$P_{jr} = R_r I_{ex} = U_{ex} I_{ex} \quad (\text{II.24})$$

R_r : La résistance du circuit d'excitation

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

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

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

II.11.3.2. Pertes supplémentaires

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

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

On observe que toutes ces pertes échappent pratiquement au calcul et à la mesure.

II.11.4 Rendement d'un alternateur

Deux façons sont exprimés les deux types du rendement de l'alternateur:

II.11.4.1 Rendement vrais

La formule du rendement vrai est montée ci-après :

$$\eta_{Vrai} = \frac{\text{puissance électrique active fournie}}{\text{puissance mécanique absorbée} + \text{puissance nécessaire à l'excitation}} \quad (\text{II.25})$$

II.11.4.2. Rendement approché

Le rendement approché est donné par la relation suivante:

$$\eta_{approché} = \frac{\text{puissance électrique active fournie}}{\text{puissance électrique active} + \text{pertes mesurable}} \quad (\text{II.26})$$

II.12 Conclusion

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

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

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

Chapitre III
Modélisation d'un
turboalternateur

III.1. Introduction

La micro-turbine nécessite un couplage direct d'une machine synchrone (alternateur) et d'une turbine à gaz.

L'utilisation des machines synchrones à aimants permanents à haute vitesse est en croissance, leur avantage principal réside dans le fait que leur puissance massique et volumique est très élevée, à côté de leur capacité d'être couplées directement à une turbine à gaz pour la production d'énergie électrique. Elles trouvent une large application dans les micro-turbines et les véhicules électriques.

Dans ce chapitre, on présente le modèle adopté pour chaque élément de la micro turbine d'une part et la modélisation de l'alternateur à aimant permanent d'une autre part[18].

III.2. Micro turbine a gaz

La déréglementation dans la production de l'énergie électrique et son marché émergeant ont créé un intérêt renouvelé dans les générateurs fonctionnant en parallèle avec le réseau de distribution.

L'installation de micro turbines est plus rentable et moins dispendieux que de construire des centrales avec leurs lignes de distribution, surtout, dans les régions qui ont atteint la limite de puissance électrique disponible, les régions isolées et les pays à faible électrification.

Il est important de souligner que la micro turbine n'est pas une technologie récente, mais qu'elle est développée depuis près d'un quart de siècle. Ses avantages sont liés à son faible coût à l'installation, sa capacité d'être installée en batterie, des coûts de maintenance relativement faible. En effet l'arbre, étant la seule partie tournante, la micro turbine ne nécessite aucun circuit de refroidissement [18].



Figure III.1 Micro turbine Capstone 330 (Capstone) [18].

III.3. Éléments constitutifs

La turbine à gaz est à un seul arbre, ses principaux composants sont [18] :

- Une enveloppe
- Un récupérateur
- Un compresseur
- Une chambre de combustion
- Une turbine

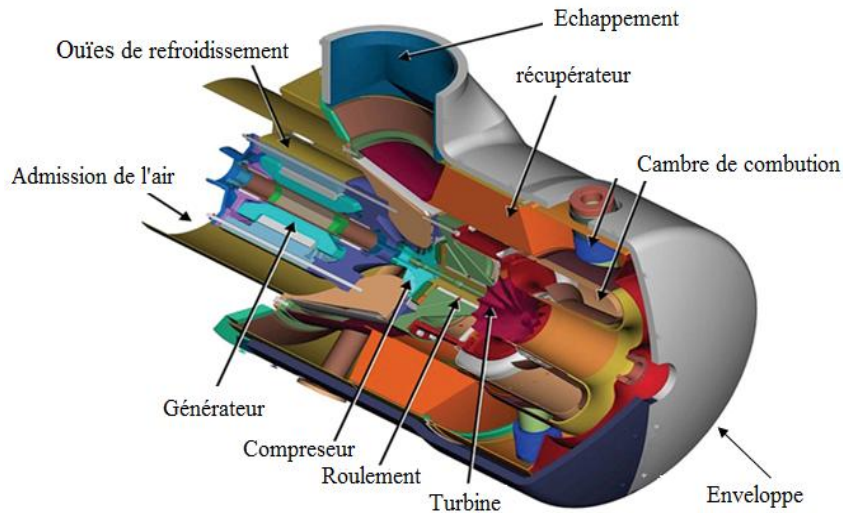


Figure III.2 Vue éclatée de la turbine à gaz (Capstone A330) [18].

III.4. Description de principe

La figure III.3 présente le principe de fonctionnement de la turbine à gaz en cycle ouvert et peut être divisée en trois composants principaux: un compresseur, une chambre de combustion, et une turbine. L'énergie mécanique qu'absorbe le compresseur est transférée à l'air frais aspiré de l'atmosphère (1), celui-ci voit sa pression et sa température augmenter (2). Dans la chambre de combustion, cet air oxyde le gaz naturel dans le processus de combustion qui se fait à pression constante. Les gaz produits à haute température (3) vont se détendre à travers une turbine et transformer leur énergie en énergie mécanique sur l'arbre de la turbine dont une partie servira pour la compression de l'air, le reste est converti en énergie électrique par la machine synchrone à aimants permanents.

A leur sortie de la turbine les gaz d'échappement (4) à travers un récupérateur font augmenter la température de l'air comprimé (5) avant son entrée dans le brûleur, afin d'augmenter le rendement thermique de l'ensemble [18].

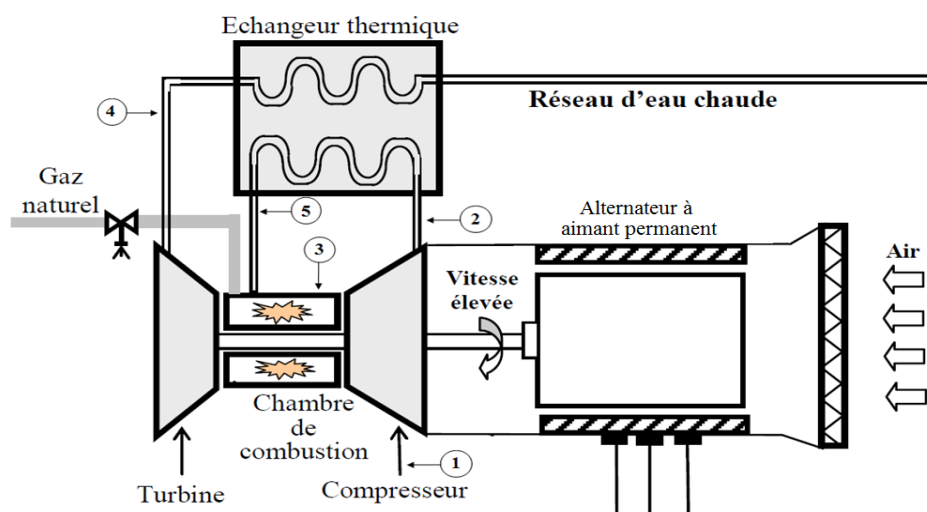


Figure III.3 Cycle d'une turbine à gaz avec régénérateur[20].

III.5. Etude des différents modèles

Dans la littérature, les différents modèles qui ont été utilisés pour la représentation mathématique des turbines à gaz sont: modèle du type Rowen, modèle du type Schobeiri et modèle du type Camporeale. Généralement, La structure de ces modèles est de type modulaire, chaque module représentant une fonction de l'installation. À partir des équations de la thermodynamique, on peut déterminer ces modules, ces équations peuvent être sous la forme:

- ✓ Des équations différentielles;
- ✓ Des équations aux dérivées partielles;
- ✓ Des équations algébriques.

La résolution de deux premiers types d'équations est par l'usage des méthodes numériques qui convertissent en équations algébriques. En utilisant diverses méthodes pour résoudre ces équations algébriques comme par exemple la méthode aux différences finies ou la méthode de Newton – Raphson. Pour éviter les problèmes de résolution et de temps de calcul, il ne doit pas être l'ordre de ces équations trop élevé [8].

III.5.1. Modèle du type Rowen

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 MW peut être simulée par le modèle du type Rowen.

Généralement, l'étude de fonctionnement en régime dynamique des réseaux électriques est faite par ce modèle. Il comprend 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. Dans ce modèle, les hypothèses construites 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. Ces hypothèses ne sont pas généralement vérifiées. Pour ce la, une amélioration de ce modèle a été entreprise de manière à pouvoir s'affranchir de ces contraintes [8].

III.5.2. Modèle du type Camporeale

Ce modèle permet de simuler des turbines « Heavy-Duty » à un seul arbre en circuit ouvert soit dans une installation simple comprenant le compresseur, la chambre de combustion et la turbine ou une installation plus complexe faisant intervenir le 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

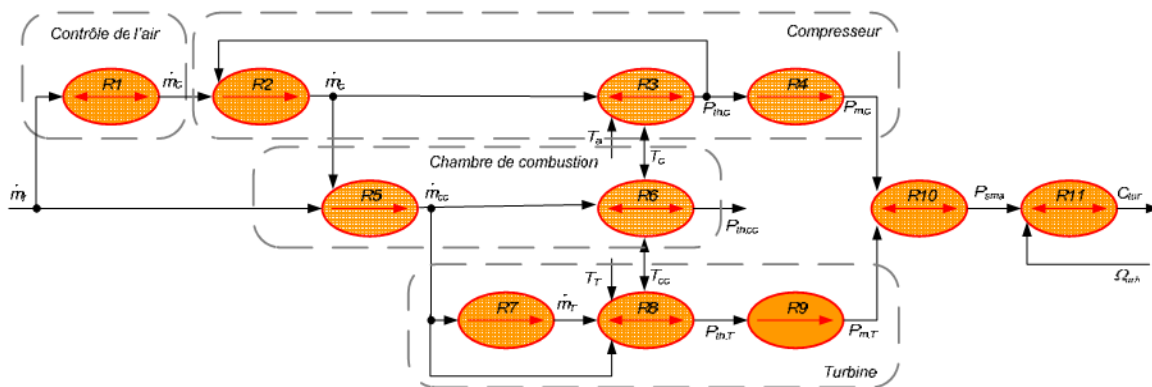
pression est beaucoup d'approximations ont été réalisées. La validation du comportement dynamique de ce modèle est faite seulement par simulation, C'est-à-dire, il n'y a pas des résultats expérimentaux pour la comparaison [8].

III.5.3. Modèle du type Schobeiri

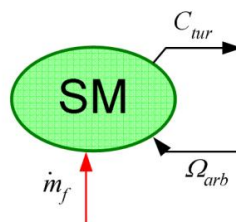
La simulation des installations complexes comprenant des turbines « Heavy-Duty » ou « aérodérivatives » à un ou plusieurs arbres peut être effectuée par ce modèle dynamique. Il est utilisé dans un outil appelé GETRAN spécialement développé pour la conception des turbines à gaz destinées aux applications aéronautiques et à la production d'énergie électrique. Ce modèle est unidimensionnel (écoulement dans une seule dimension) et inclut aussi bien des équations aux dérivées partielles que des équations différentielles et algébriques. Pour sa résolution, des techniques de discrétisation spatiale et temporelle sont nécessaires. Il n'est pas adéquat pour des études de fonctionnement de réseau électrique [8].

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

La figure III.4 montre le modèle d'un micro turbine à gaz. Ce modèle est appelé le graphe informationnel causal (GIC) et on remarque d'après la figure III.4.a que ce graphe probablement vu comme un système ayant deux entrées: le débit de gaz et la vitesse (Ω_{arb}) et ayant une sortie qui est le couple développé par la TAG (C_m). Un bloc est appelé « SM » qui résume le graphe informationnel causal par la présentation énergétique macroscopique (REM) du modèle à la figure III.4.b [19][20].



(a) GIC du modèle



(b) REM du modèle

Figure III.4 Modèle de la micro turbine [20].

Le débit de masse de gaz $\dot{m}_f(t)$ et le débit de masse d'air $\dot{m}_0(t)$ sont relatifs au gain k :

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

La pressurisation du débit de masse d'air en entrée et l'augmentation de la température de l'air à l'entrée de la chambre de combustion est faite par le compresseur. Le débit de masse d'air à la sortie du compresseur est le même qu'à l'entrée avec un temps de retard :

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

Le retard τ_c dépend de la vitesse du gaz et de la longueur du compresseur. La puissance thermique engendrée dans le compresseur est donnée par :

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

Avec :

C_p : est le coefficient de puissance thermique.

T_a et T_c sont la température ambiante du compresseur et la température à la sortie.

L'équation suivante montre la puissance mécanique du compresseur $P_{m,c}$:

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

L'injection du débit de masse d'air du compresseur et du débit de masse de fuel est à 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 τ_{cc} :

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

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

$$R6 : P_{th,cc} = 1.19 \cdot 10^{-3} C_p \dot{m}_{cc}(t) [T_{cc} - T_c] \quad (III.6)$$

Où

T_{cc} : est la température en sortie de la chambre de combustion.

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

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

L'expression de la puissance thermique engendrée dans cette étape est:

$$R8 : P_{th,T} = 1.19 \cdot 10^{-3} C_p (\dot{m}_T(t) + \dot{m}_{cc}(t)) \frac{[T_{cc} - T_T]}{2} \quad (III.8)$$

Où

T_T : est la température en sortie de la turbine.

L'équation différentielle suivante exprimée la puissance mécanique de la turbine $P_{m,T}$:

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

L'obtention de la puissance mécanique à la sortie de la MTG est à partir de la puissance mécanique du compresseur et de la puissance mécanique de la turbine respectivement :

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

Alors, le couple est déduit en utilisant la vitesse de la turbine :

$$R11 : C_m = \frac{P_{sma}}{\Omega_{arb}} \quad (III.11)$$

III.7. Machine synchrone à aimants permanents

L'aimant permanent est défini par la manière suivante : «Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique qui possède une aimantation rigide susceptible de créer un champ magnétique extérieur et de maintenir en permanence une force magnétique» [21].

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs[24]. Actuellement, les machines à aimants se développent d'une manière importante, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés, les puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatts. Toutefois, leur domaine d'emploi privilégié reste dans des puissances plus petites (quelques dizaines de kilowatts), où l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que les machines à rotor bobiné. Les machines synchrones à aimants permanents sont avec ou sans pièces polaires (pôles lisses ou saillants) [22].

Le stator de la machine a un bobinage conventionnel identique à celui de la machine synchrone usuelle. Le champ magnétique d'excitation du rotor est fourni par des aimants permanents contrairement à la machine conventionnelle où c'est un courant continu qui le crée. L'absence de pertes joule rotorique augmente le rendement de la machine.

La machine à aimants permanents montés en surface peut être considérée comme une machine à pôles lisses et puisque l'entrefer est généralement important, l'effet de la réaction d'annature sur le flux des pôles est très faible [19].

III.7.1. Le stator

La machine synchrone triphasé comporte un stator fixe et un rotor mobile de l'axe de symétrie 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 $2\pi/3$.

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. On note [22] :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (\text{III.12})$$

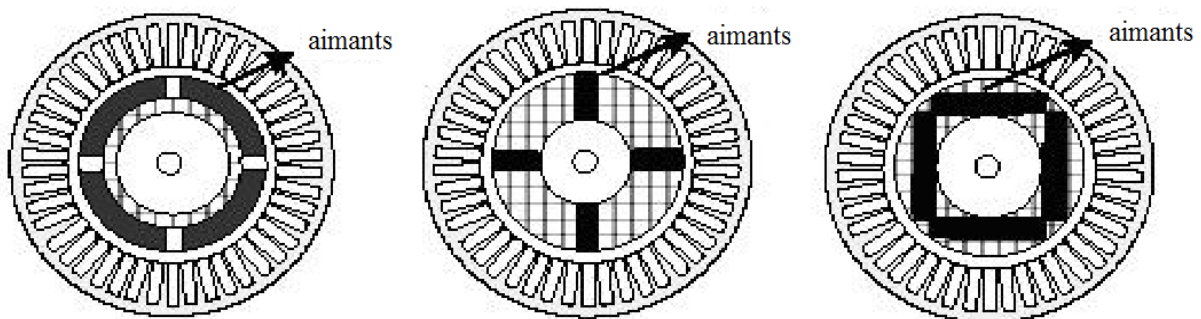
ω : La pulsation des courants statoriques.

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

Ω : La vitesse de rotation de la machine.

III.7.2. Le rotor

On distingue suivant la structure du rotor utilisé les différents types de machines synchrones à aimants permanents : machines à pôles lisses (aimants collés), et machines à pôles saillants (aimants enterrés ou à concentration de flux). La représentation de la machine synchrone avec différentes structures du rotor est donnée par la figure III.5 [22].



(a) aimants collés

(b) concentration de flux

(c) aimants enterrés

Figure III.5 Structures du rotor de la MSAP [22].

- Les aimants permanents qui montrés dans la figure III.5.a sont collés sur la surface cylindrique d'une machine pour la structure à pôles lisses. Dans ce cas, les aimants sont magnétisés dans le sens radial. Le principal intérêt réside dans la simplicité de sa réalisation, car l'inductance du rotor est pratiquement constante.
- Dans le cas des machines à concentration de flux les aimants sont aussi magnétisés dans le sens radial comme le montre la figure III.5.b.
- Une autre structure de rotor possible est montrée à la figure III.5.c, consiste à enterrer les aimants dans le rotor, dans ce cas ils sont magnétisés tangentiellement [22].

Dans notre étude le rotor de machine synchrone (alternateur) qui couplé avec le micro turbine est un rotor collés a pole lisse comme montré par la figure suivante:

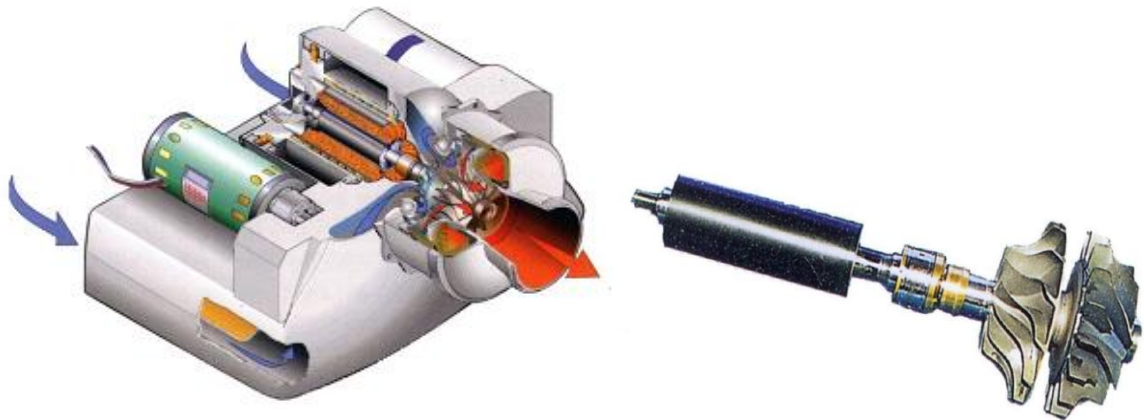


Figure III.6 Un rotor complète d'une micro turbine [32].

Le changement du bobinage rotorique par des aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable. [22]

III.7.2.1. Les rotors à pôles lisses

- La répartition des encoches permet d'obtenir un champ sinusoïdal.
- Ce sont les rotors utilisés dans les alternateurs des centrales thermiques (nucléaires, gaz, mazout, charbon).
- Ordre de grandeur pour un alternateur de 100 MVA 3000 tr/min : rotor de 1 m de diamètre et 5 m de longueur axiale. [22]

III.7.2.2. Rotor à pôles saillants

- Souvent plusieurs paires de pôles ($p \gg 1$), C'est le rotor seul qui présente des saillances.
- Les pôles saillants conviennent pour les alternateurs lents (centrales hydrauliques, par exemple centrales de pompage) car ils permettent une construction avec un grand nombre de pôles.
- Forme souvent aplatie. Exemple : pour un alternateur de 100 MVA 300 t/m : rotor de 5 m de diamètre et 1 m de longueur axiale) [22]

III.8. Caractéristiques d'une machine synchrone

Les machines synchrones constituent la première catégorie importante de machines à courant alternatif. Comme toutes les autres machines, elles sont réversibles et peuvent fonctionner indifféremment en générateur (il s'agit alors des alternateurs) ou en moteur (il s'agit alors des compensateurs synchrones).

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

III.9.1 Hypothèses simplificatrices:

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) obéit à certaines hypothèses simplificatrices

- ✓ Absence de la saturation dans le circuit magnétique.
- ✓ La distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice (fmm), créée par les enroulements du stator.
- ✓ L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligés.
- ✓ L'effet des encoches est négligé.
- ✓ La résistance des enroulements ne varie pas avec la température

La structure de la machine à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation est créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air.[23]

III.9.2. Structure générale d'une MSAP

La structure électrique d'une MSAP triphasée est constituée au stator d'un enroulement triphasé figuré par les trois axes (a, b, c), et au rotor des aimants permanents assurant son excitation[24].

La figure suivante présente la structure générale d'une machine synchrone à aimants permanents [25]:

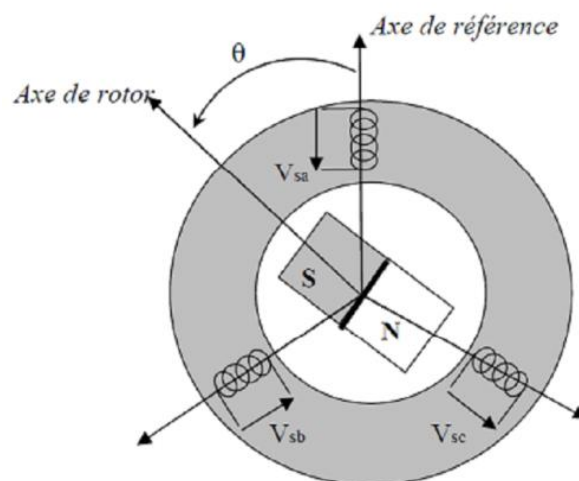


Figure III.7 Représentation d'une MSAP dans le repère (abc) [25].

Le stator comporte trois phases a, b et c identiques et décalées l'une par rapport à l'autre par un angle $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$ électrique de par contre le rotor comprend deux axes caractérisés par [25]:

- Un axe d'aimantation rotorique longitudinale (d) ;
- Un axe inter polaire en quadrature (q), déphase de $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ par rapport à l'axe (d) ;
- La position du rotor est localisée par l'angle électrique.

$$\theta = \theta_0 + \omega t \quad (\text{III .13})$$

θ_0 : L'angle électrique initial ;

ω : La pulsation des grandeurs électriques.

III.9.3. Mise en équations de la machine

La base de la plus part des modèles de machines électriques les plus utilisés est sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes, d et q.

Dans le repère classique, il y'a trois axes orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine.

D'habitude, l'axe de la phase a (as) est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, un seul axe portant un enroulement qui schématise l'aimant permanent (d'indice F correspondant à la direction de l'aimantation). L'angle donne la position du rotor par rapport au stator. La figure (III.8) montre le modèle de l'alternateur à aimant permanent qui sera développé dans notre travail [23]:

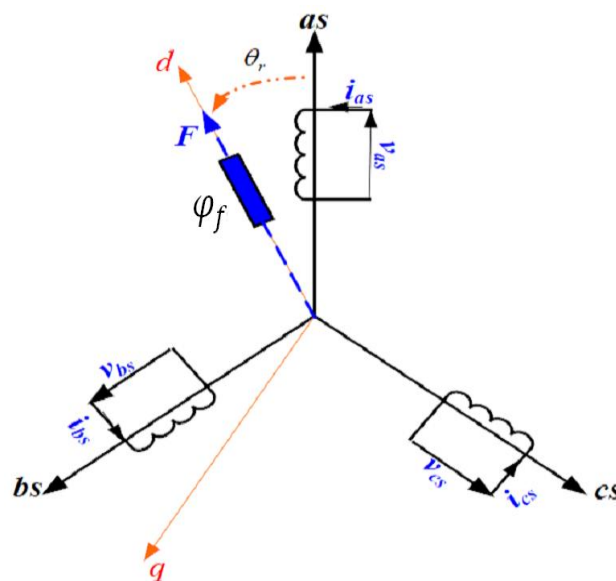


Figure.III.8 Schéma représentatif de l'alternateur à modéliser [23].

III.9.4. Equations électriques

Les équations de tensions des phases statoriques servent au point de départ pour l'élaboration du modèle dynamique de la machine synchrone à aimants permanents.

Le système d'équations suivant exprime les tensions en fonction des courants et des flux [23]:

$$\begin{cases} v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d \varphi_{as}}{dt} \\ v_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d \varphi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d \varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

La forme matricielle du système précédent est donnée par :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

$[v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^t$: Vecteur tension de phases statoriques

$[i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t$: Vecteur courant de phases statoriques

$[\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques

R_s : La résistance des phases statoriques

III.9.5. L'équation magnétique

Puisque la machine est non saturée et équilibrée les flux sont liés aux courants par [26]:

$$\begin{cases} \varphi_a = L_a I_a + M_{ab} I_b + M_{ac} I_c + M_{af} I_f \\ \varphi_b = L_b I_b + M_{ba} I_a + M_{bc} I_c + M_{bf} I_f \\ \varphi_c = L_c I_c + M_{ca} I_a + M_{cb} I_b + M_{cf} I_f \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

$$\text{Pour un réseau symétrique } L_a = L_b = L_c = L \quad (\text{III.17})$$

$$M_{af} = M_f \cos(\theta) ; \quad M_{bf} = M_f \cos(\theta - 2\pi/3) ; \quad M_{cf} = M_f \cos(\theta + 2\pi/3) \quad (\text{III.18})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + M_f I_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Tel que

M : Mutuelle inductance entre phases du stator.

L : Inductance propre d'une phase statorique.

$M_f I_f$: Flux constante du aux aimants permanents (φ_f)

III.9.6. Passage au repère de Park

La simplification du modèle dynamique de la machine est par l'application d'un changement du repère. Grâce à une transformation mathématique, on peut effectuer ce changement, alors elle transforme les trois bobines statoriques déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ en deux bobines fictives équivalentes diphasées $\frac{\pi}{2}$ de et situées sur le rotor comme illustre dans la figure (III.9) [23].

Les deux bobines sur les axes (d, q) tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [24].

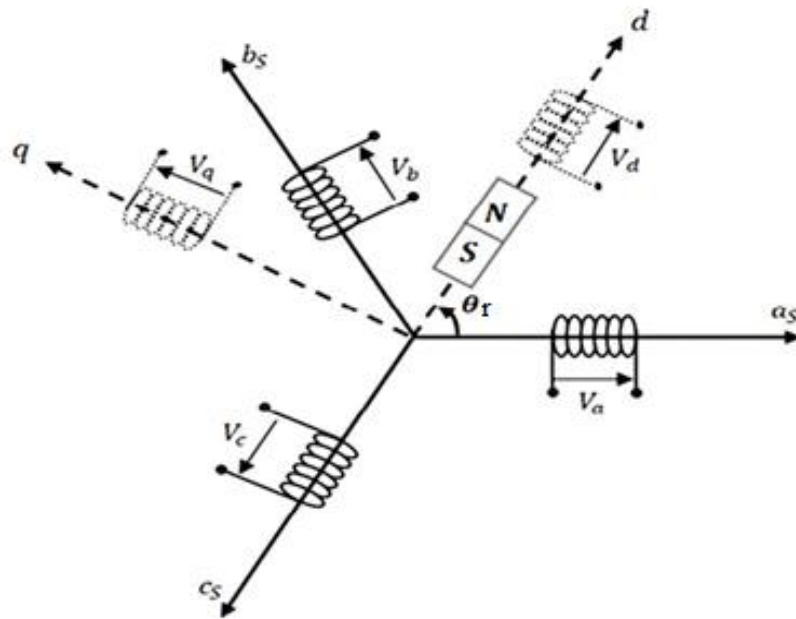


Figure.III.9 Transformation triphasée- diphasée [24].

L'éclaircissement de la transformation de Park $P(\theta_r)$ est par la matrice suivante:

$$P(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

Pour passer le système dans le repère (d, q, o) vers (a, b, c), il faut utiliser la matrice inverse de Park $P(\theta_r)^{-1}$ qui définie comme suit :

$$P(\theta_r)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

$P(\theta_r)^{-1}$: La matrice inverse de Park.

Le passage des grandeur statorique $X_{a,b,c}$ aux composante directe et en quadrature $X_{d,q}$ est défini par[27] :

$$\begin{cases} [X_{a,b,c}] = [P(\theta_r)^{-1}][X_{d,q,o}] \\ [X_{d,q,o}] = [P(\theta_r)][X_{a,b,c}] \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Où

$[P(\theta_r)]$ et $[P(\theta_r)^{-1}]$:sont les matrice de passage directe et inverse.

X :le vecteur de courant ,tension ou flux .

θ_r :la position du rotor .

III.9.7. Choix du référentiel

Différentes possibilités sont existée pour choisir la direction du repère d'axes d, q qui dépendent couramment des objectifs de l'application.

Selon la structure générale du MSAP (voir la figure III.9) et d'après l'équation III.13, l'angle électrique θ est définit comme suit :

$$\theta(t) = \int_{s_a}^t w(t) dt \quad (\text{III.23})$$

Sachant que l'angle électrique initial $\theta_0 = 0$

Tel que :

θ : Angle entre l'axe magnétique (sa) et l'axe longitudinal (d) ;

w : Vitesse de rotation du référentiel choisi.

On distingue selon le choix de w , les références suivants [25] :

III.9.7.1. Référentiel lié au stator

Le stator est fixe, alors la vitesse du repère de Park est nulle comme illustre l'équation suivante :

$$w_\theta = w_s = 0 \quad (\text{III.24})$$

w_s : Pulsation des tensions statoriques.

III.9.7.2. Référentiel lié au rotor

Dans le référentiel lié au rotor, la vitesse du repère (d, q) est égale à celle du rotor:

$$w_\theta = w_r \quad (\text{III.25})$$

III.9.7.3. Référentiel lié au champ tournant

Dans le référentiel lié au champ tournant, la vitesse du repère de Park est égale à la vitesse du champ tournant :

$$w_\theta = w \quad (\text{III.26})$$

w : Pulsation de l'alimentation

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

La figure III.9 précédente est montrée le schéma simplifié de l'alternateur dans le repère de Park, (par l'application de la transformation de Park sur le système d'équations dans un repère lié au rotor) les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques sont définies donc le modèle de l'alternateur, ces équations sont exposées ci-après:

III.10.1. Equations électriques

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

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - w_r L_q i_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + w_r L_d i_{ds} + w_r \varphi_f \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

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

L_q : Inductance statorique quadratique

w_r : Pulsation électrique rotorique

φ_f : Flux d'excitation des aimants permanents

Si la machine synchrone fonctionne générateur (alternateur), le modèle électrique est déduit à partir du modèle de la machine en mode moteur, avec l'inversement du sens des courants « id » et « iq » dans les repères de Park, alors on peut écrire le modèle de l'alternateur synchrone à aimants permanents sous la forme suivante [24] [25] [28] :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \varphi_f \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Cette convention de signe sera gardée tout le long de cette modélisation [23].

III.10.2. Equations magnétiques

Le modèle des équations magnétiques est présenté dans le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_d i_{ds} + \varphi_f \\ \varphi_{qs} = L_q i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux d'axe direct (φ_{ds}) et d'axe en quadrature (φ_{qs}) sont fonction linéaire des courants (i_{ds} et i_{qs}) d'axes direct et de en quadrature[23] .

III.10.3. Expression du couple électromagnétique

La puissance transmise est exprimée par la relation suivante [23] :

$$p(t) = (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (\text{III.30})$$

En remplaçant v_{ds} et v_{qs} par leurs expressions on aura :

$$p(t) = \left[-R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) - \left(i_{ds} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \right) + \frac{d\theta_r}{dt} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \right] \quad (\text{III.31})$$

$R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2)$: Représente la puissance dissipée par effet Joule

$\left(i_{ds} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \right)$: La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{d\theta_r}{dt} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$: La puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P = C_{em} \Omega \quad \text{et} \quad w = p\Omega \quad (\text{III.32})$$

Ω : vitesse mécanique

On déduit l'expression du couple électromagnétique et est donnée par :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (III.33)$$

Donc :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds}i_{qs} + (L_d - L_q)i_{ds}i_{qs}) \quad (III.34)$$

$p \varphi_{ds}i_{qs}$: Couple que l'on obtiendrait avec une machine à pôles lisses .

$p (L_d - L_q)i_{ds}i_{qs}$: Couple supplémentaire dû à la saillance des pôles.

III.10.4. Equations mécaniques

Le modèle mécanique de la machine synchrone est illustré comme suit :

$$J \frac{dw_r}{dt} = C_m - C_{em} - C_f \quad (III.35)$$

Où

$$C_f = f\Omega \quad (III.36)$$

Tel que :

C_m : Couple moteur avec (couple mécanique d'un micro turbine à gaz);

C_f : Couple de frottements visqueux ;

f : Coefficient des frottements visqueux ;

J : Moment d'inertie de la machine.

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

Dans cette partie, la simulation de l'alternateur est en deux cas distincts :

- ❖ A vide : on suppose que le couple mécanique fournie par la micro-turbine à gaz est de valeur égale 7.85 N.m à l'instant 0.08 s qui alimente l'alternateur puis on laisse tourner librement.
- ❖ L'alternateur alimente une charge (Rch , Lch) monté en étoile, le couple moteur initial est de 7.85N.m mais à l'instant 0.5 s, il sera diminué à 5.38 N.m.

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

Dans le cas, l'alternateur est fonctionne à vide, les courants sont nuls comme montré ci-après [23][25][28]:

$$\begin{cases} i_{ds} = 0 \\ i_{qs} = 0 \end{cases} \quad (III.37)$$

Ainsi :

$$Cem = 0 \tag{III.38}$$

Les tensions sont données par les expressions suivantes:

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = w\varphi_f \end{cases} \tag{III.39}$$

III.11.2. Schéma Bloc de simulation

La figure suivante montre le schéma bloc de simulation de l'alternateur à aimant permanent à vide :

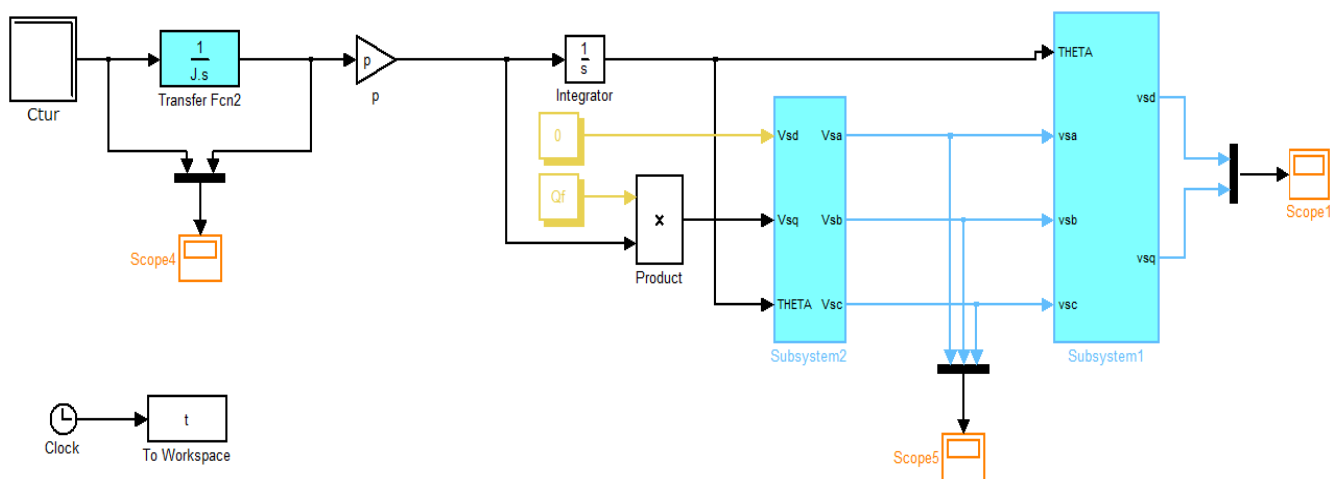
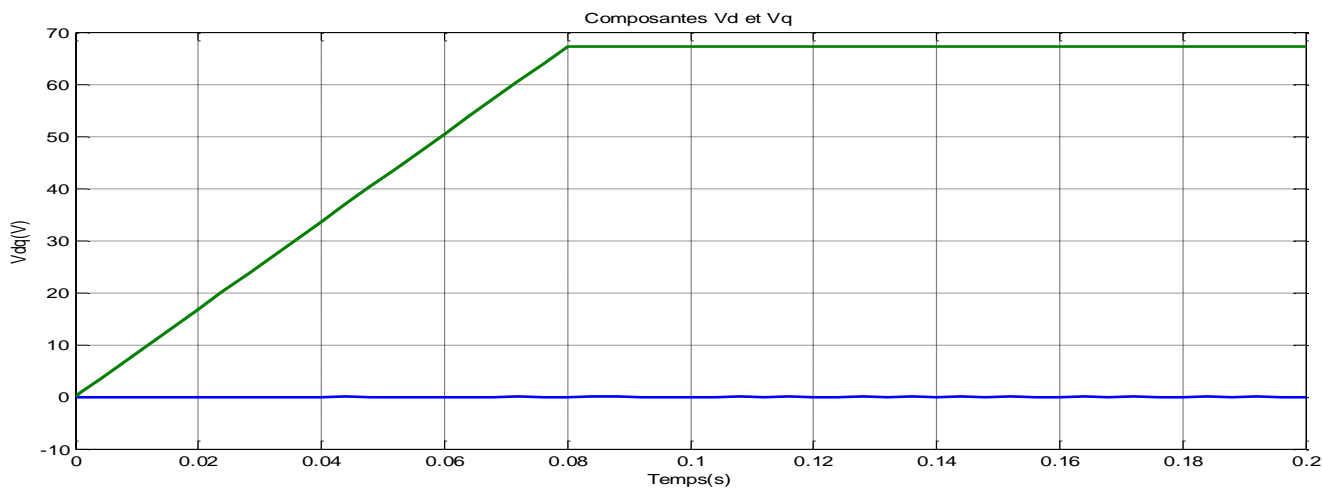


Figure III.10 Schéma bloc de simulation de l'alternateur à vide

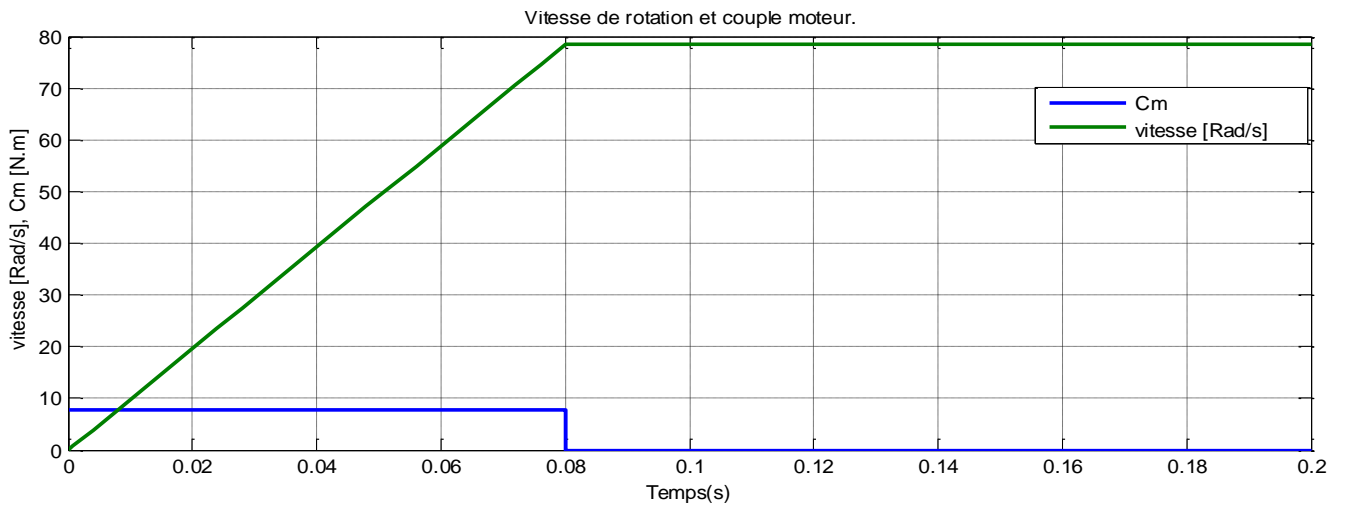
III.11.1.1. Résultats de simulation de l'alternateur à vide

Les résultats de simulation de l'alternateur à vide sont présentés dans les courbes de la figure ci-dessous :

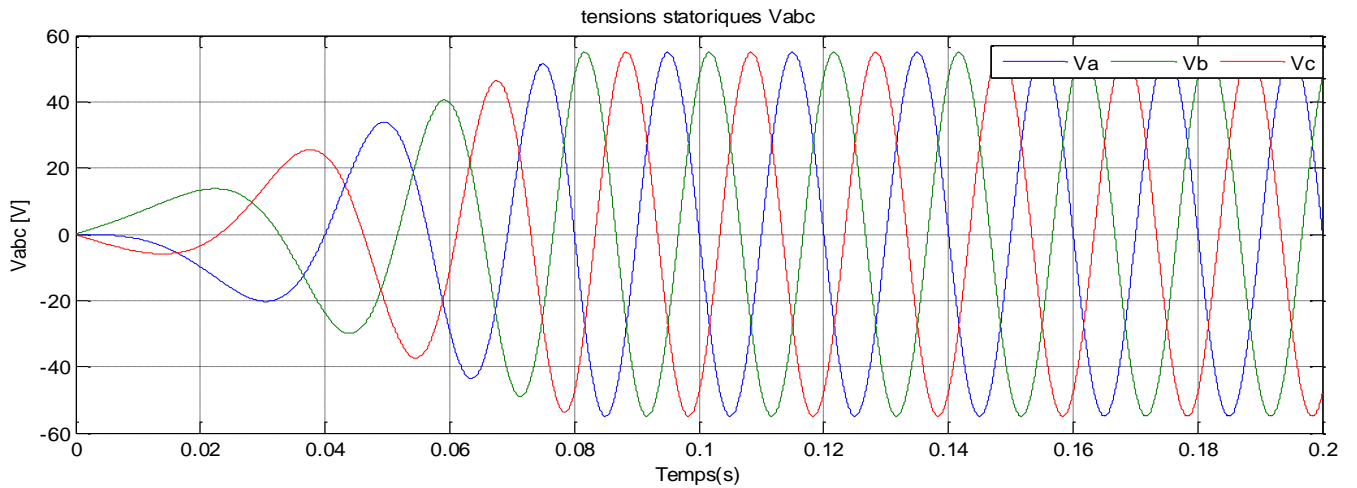
a) Evolution de la tension :



b) Evolution la vitesse de rotation et le couple moteur



c) Evolution des tensions statoriques



d) Les tensions statoriques zoomées

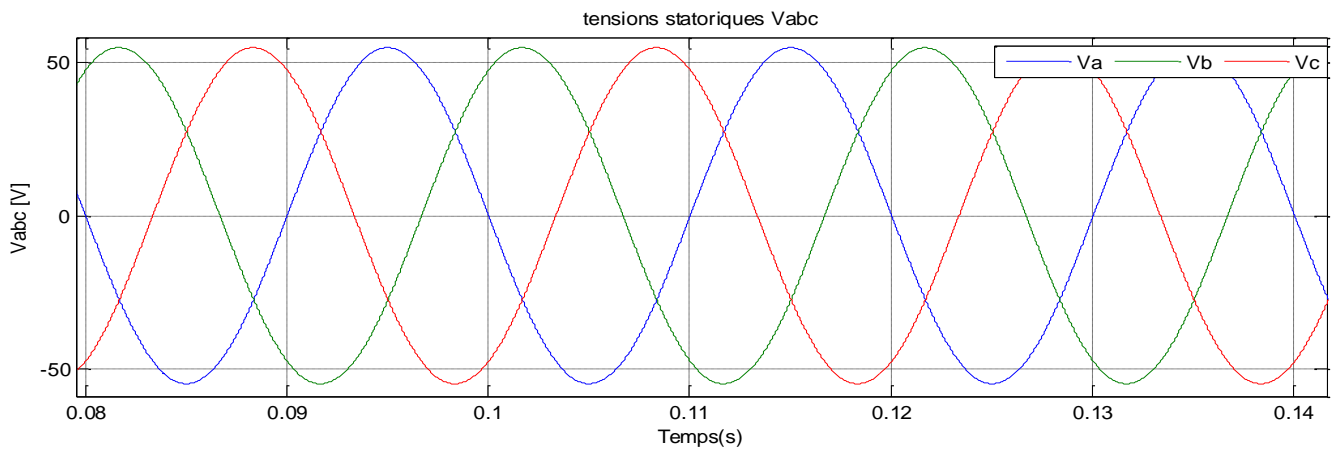


Figure.III.11 : Résultats de simulation de l'alternateur à vide.

III.11.1.2. Interprétation des résultats

L'alternateur est entraîné par un couple moteur égale à 7.85 N.m pendant une durée égale à 0.08 s, ensuite, on annule ce couple pour laisser l'alternateur tourne librement, c'est-à-dire fonctionnement à vide, dans ce cas, le frottement est nul. D'après la figure (II.11.b), on remarque que la vitesse est stabilisée à une valeur de 78.5 rad/s, et dans le régime permanent, les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales de valeur crête de 55V et de fréquence de 50 HZ comme le montre la figure (II.11.c).

III.11.2. L'alternateur alimente une charge

Dans ce cas, une charge électrique (R_{ch}, L_{ch}) est alimentée par l'alternateur. Les tensions et les courants résultants d'après l'application de cette charge sur l'alternateur sont donnés par les systèmes d'équations III.40 et III.41, et par l'utilisation des équations données par le système (III.28) [23][25][28].

On applique des tensions v_{ds} et v_{qs} sur la charge, on obtient le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_{ch}i_{ds} + L_{ch} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_{ch} i_{qs} \\ v_{qs} = R_{ch}i_{qs} + L_{ch} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_{ch} i_{ds} \end{cases} \quad (III.40)$$

Par le remplacement les expressions de v_{ds} et v_{qs} de l'équation (III.28) dans l'équation (III.40), on obtient sur le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch})i_{ds} - (L_d + L_{ch}) \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r (L_q + L_{ch})i_{qs} \\ 0 = -(R_s + R_{ch})i_{qs} - (L_q + L_{ch}) \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r (L_d + L_{ch})i_{ds} + \omega_r \varphi_f \end{cases} \quad (III.41)$$

Par l'utilisation de la transformée de Laplace dans les équations ci-dessus (système d'équations III.41), on peut écrire:

$$\begin{cases} Si_{ds} = \frac{1}{(L_q + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch})i_{ds} + \omega_r (L_q + L_{ch})i_{qs}] \\ Si_{qs} = \frac{1}{(L_q + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch})i_{qs} - \omega_r (L_d + L_{ch})i_{ds} + \omega_r \varphi_f] \end{cases} \quad (III.42)$$

Considérons le flux d'excitation φ_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:

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][v] \tag{III.43}$$

Où

$$[x] = [i_{ds} \ i_{qs}]^t, [v] = [0 \ \varphi_f]^t \tag{III.44}$$

Le système d'équations (III.42), peut être écrit sous la forme matricielle suivante.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & w_r \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -w_r \frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & \frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{w_r \varphi_f}{L_q L_{ch}} \end{bmatrix} \tag{III.45}$$

On peut simplifier le système d'équations (III.45) par la supposition de deux matrices [A] et [B] sous la forme :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & \frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} + w_r \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \tag{III.46}$$

$$[B][v] = w_r \frac{1}{L_q+L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \tag{III.47}$$

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

Pour réaliser le schéma bloc de simulation de l'alternateur en charge, on utilise les systèmes d'équations (III.40), (III.46) et (III.47). La figure III.12 montre notre modèle mathématique de l'alternateur en charge développé sous Matlab Simulink.

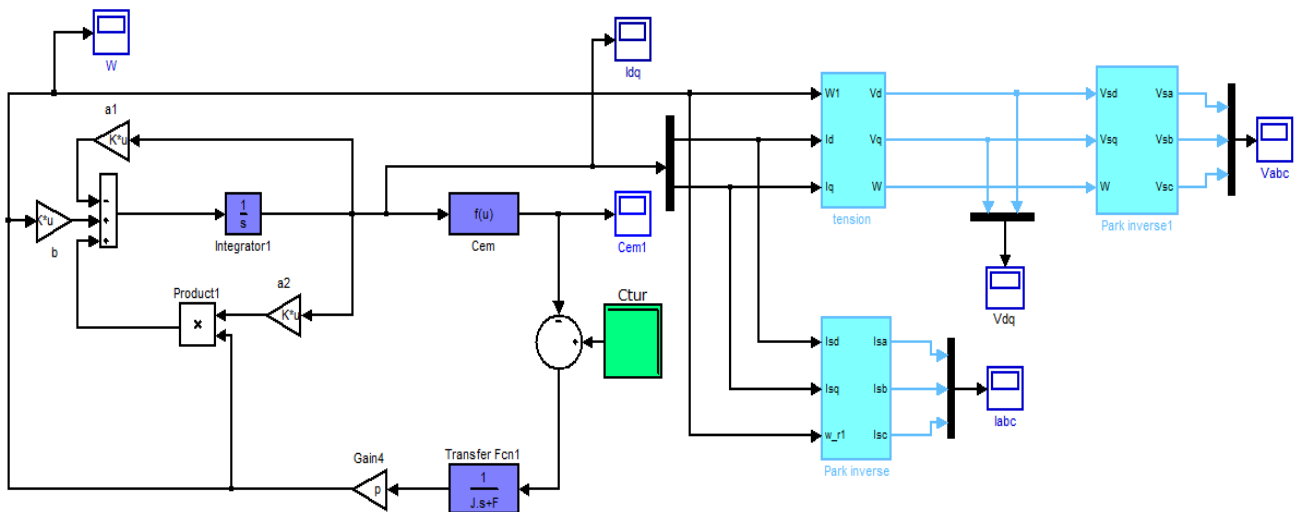
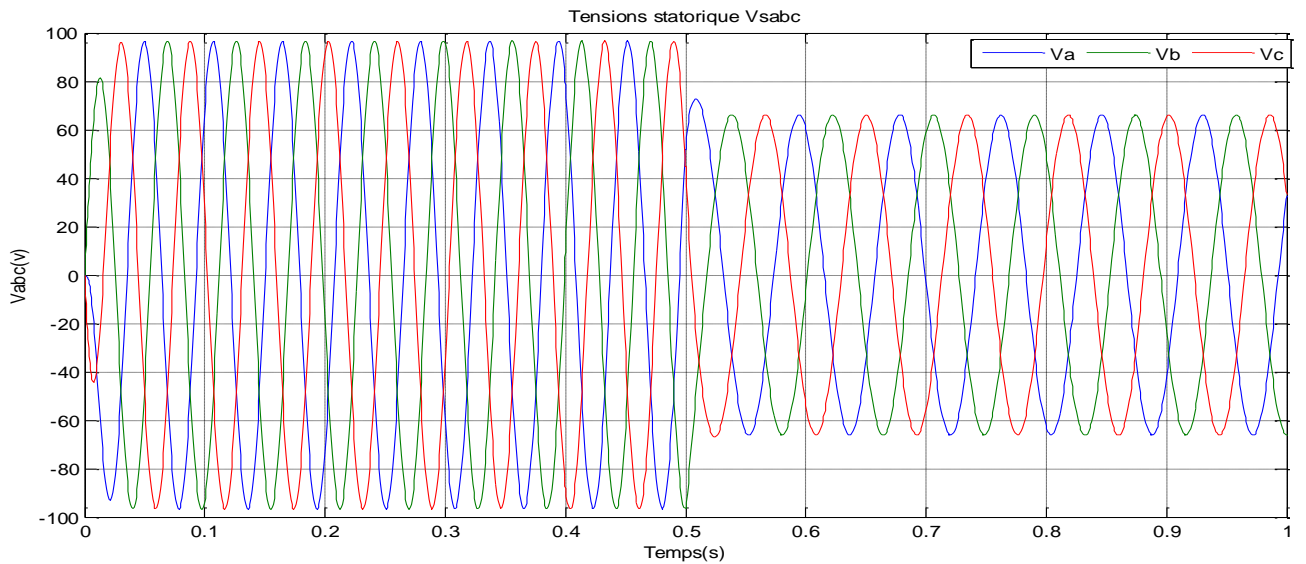


Figure III.12 Bloc de simulation de l'alternateur en charge

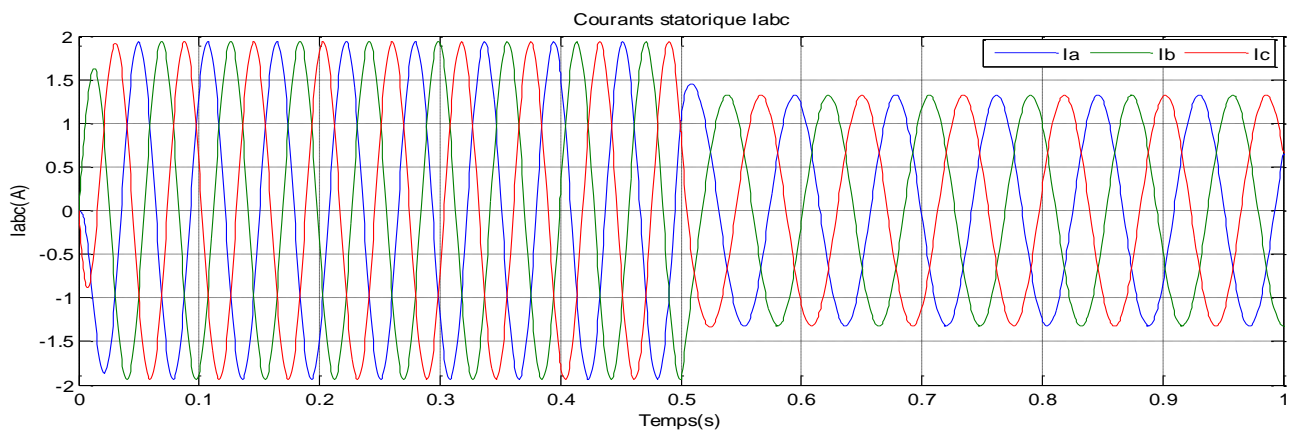
III.11.2.3. Résultats de simulation

La figure III.13 présente les résultats de simulation d'après l'exécution du modèle de simulation de l'alternateur en charge.

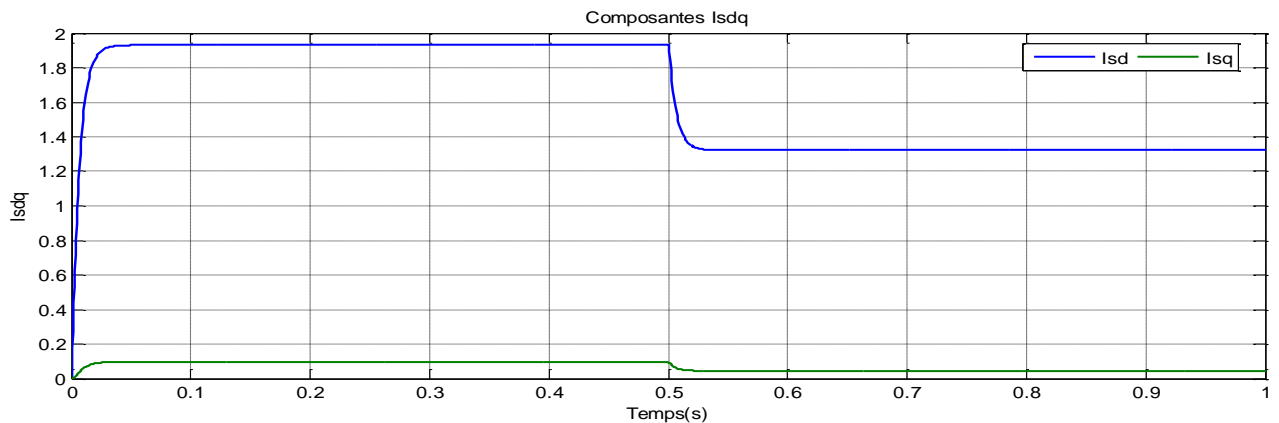
a) Tensions statoriques



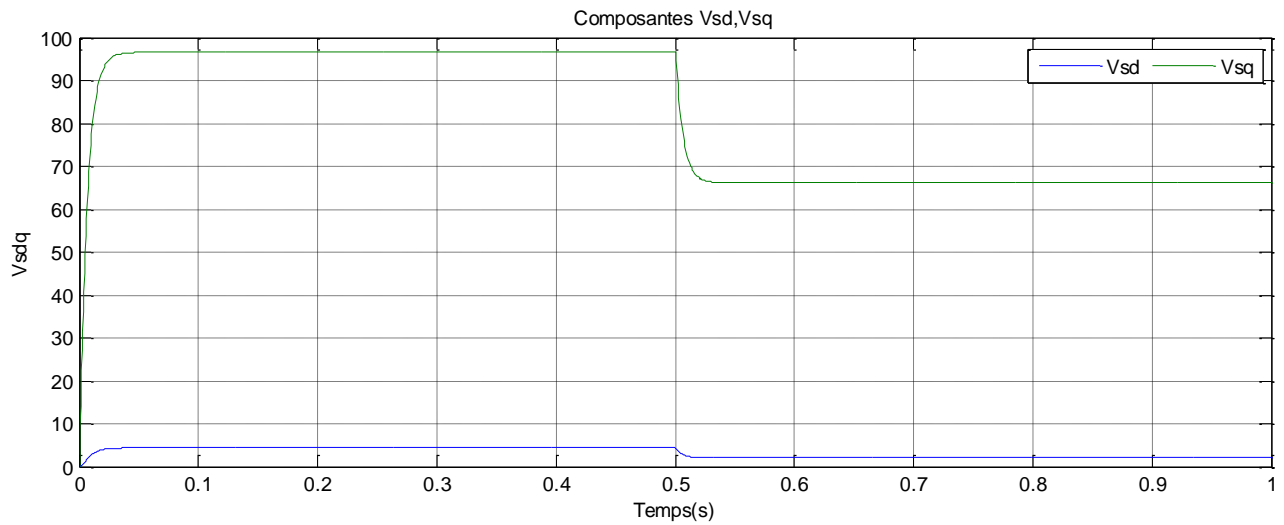
b) Courants statoriques



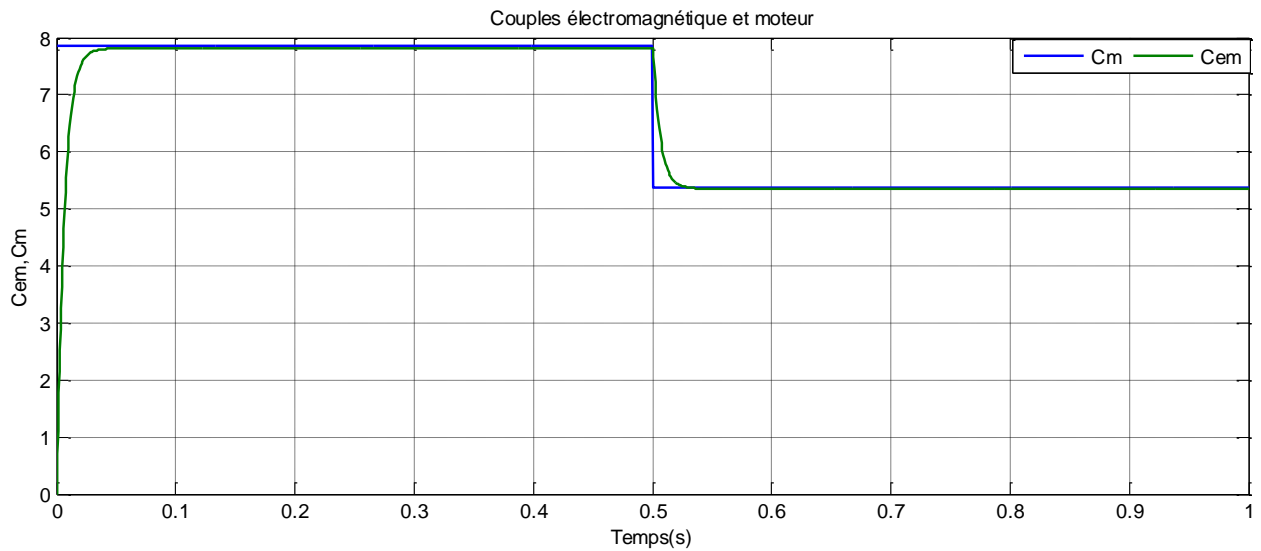
c) Composantes des courants



d) Composantes V_{sd} , V_{sq}



e) Couples électromagnétique et moteur



f) vitesse de rotation

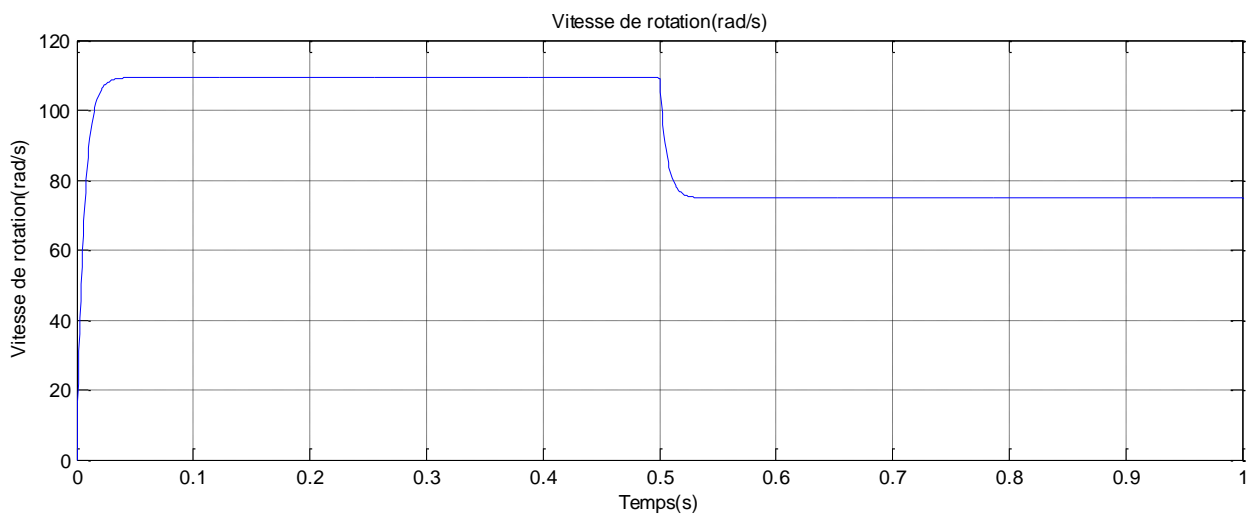


Figure III.13 Résultats de simulation de l'alternateur en charge

III.11.2.4. Interprétation des résultats

La figure (III.13-e) a montré que 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.

On remarque aussi que 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. D'après les courbes de la figure(III.13), on voit que la tension et le courant sont réduits de 96.7 V à 66.2 V et de 1.93A à 1.32 A successivement. Alors on constate qu'il y a une relation directe entre la puissance mécanique fournie par la turbine et la puissance électrique de la charge.

La figure (II.13-f) a illustré que la vitesse de l'alternateur est faible et loin de la vitesse de synchronisme, ce qui est traduit par des faibles fréquences de tension et courant représentés dans la figure (II.13-a), c'est-à-dire que le couple moteur fournie par la turbine et appliqué sur l'alternateur est insuffisant.

III.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons extrait le modèle mathématique adéquat au turbo-alternateur, c'est-à-dire la représentation de l'objet physique coûteux ou bien du principe de fonctionnement par des équations mathématiques. Le modèle extrait est un système triphasé, pour transformer ce dernier à un système biphasé, nous avons utilisé la matrice de Park, cette transformation est pour le but de simplifier ce modèle. Il a été validé par des tests de simulation pour étudier le comportement du turboalternateur. Les résultats obtenus de simulation de l'alternateur à vide montrent que la vitesse est stabilisée à une valeur constante mais les résultats de simulation de l'alternateur en charge illustrent que la puissance électrique de la charge est liée directement à la puissance mécanique fournie par la turbine.

Conclusion générale

D'après ce mémoire, nous avons conclu que :

Le turboalternateur est un système électromécanique qui est composé par deux sous systèmes, le premier est la turbine et son principe de fonctionnement est de convertir l'énergie thermique fournie par la chambre de combustion en énergie mécanique et le deuxième est l'alternateur qui transforme cette énergie mécanique en énergie électrique c'est pour sa, ce système est considéré comme un élément très important dans le domaine de génération de l'électricité.

La modélisation du turboalternateur permet de remplacer l'objet physique coûteux et peut être utilisé comme un outil de simulation comme le montré dans notre travail, le modèle extrait est un système triphasé et pour simplifier ce dernier, nous avons utilisé la transformation de Park pour le convertir vers un système biphasé. Ce modèle est validé par des testes de simulation à vide et en charge par l'utilisation du logiciel Matlab Simulink.

Les résultats de simulation de turboalternateur à vide montrent que la vitesse est stabilisée à une valeur constante et les tensions sont parfaitement sinusoïdales dans le régime permanent mais les résultats de simulation de turboalternateur en charge illustrent que la vitesse mécanique est réduite avec la réduction du couple moteur et la même chose pour les tensions et les courants, c'est-à-dire, la puissance électrique est de fonction directe avec la puissance mécanique.

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

Annexes

Annexe 1

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 :

$R_s=0.895\Omega$; $L_d=0.012H$; $L_q=0.0211H$; $J=0.00141 Kg.m^2$; $f=0.001Nm/rd/s$; $p=3$;

$\varphi=0.9Wb$; $R_{ch}=50\Omega$; $L_{ch}=0.002H$; $P=1 KW$.

Annexe 2

Présentation du formalisme GIC

A2.1. Les processus de conversion

Les processus de conversion électronique de l'énergie électrique appartiennent à une classe de systèmes constitués généralement d'objets clairement localisés : interrupteurs statiques, bobines, condensateurs, résistances. Ces objets simples suffisent à la modélisation de la plupart des constituants complexes des systèmes électriques (convertisseurs, machines, transformateurs), mais leur association doit respecter la continuité énergétique, caractéristique de toute transformation de puissance.

La construction du modèle obéit ainsi à des règles strictes pouvant être formalisées au moyen d'un outil adapté : le Graphe Informationnel Causal (GIC).

Cet outil trouve son intérêt pour l'organisation du modèle et son originalité dans la définition de son inverse. Ce dernier, alors obtenu de manière systématique, donne la structure de commande et oriente précisément le concepteur sur les fonctions élémentaires de commande nécessaires à la conduite du processus.

A2.2. Définitions

Le GIC est une représentation graphique du traitement de l'information au sein d'un système. Il est la transcription logique de la pensée lors de la phase d'analyse, grâce à une description précise des interdépendances entre les différentes grandeurs caractérisant les objets constitutifs du système étudié. Le concept fondamental du graphe informationnel s'appuie sur la causalité naturelle, encore qualifiée de causalité intégrale. Cette propriété est incontournable et doit être respectée dans la phase de modélisation de tout processus de transformation de puissance ; elle

Annexes

découle du simple fait que l'énergie propre à chacun des objets est une fonction naturellement continue du temps. Dans ces conditions, ce principe doit aussi être respecté dans la phase de matérialisation des algorithmes de commande qui repose, à l'évidence, sur la création d'une interconnexion d'objets, alors régie par le même principe universel de continuité en fonction du temps.

A2.3. Processeur

Le processeur est le graphe élémentaire attaché à un objet ou à un groupe d'objets physiques établissant une relation de transformation (notée R) entre un vecteur d'entrée influent et un vecteur de sortie influencé. La Figure A2-1 montre le symbole retenu : le repérage des deux vecteurs constitue alors la phase de qualification du processeur.



Figure A2-1. Symbole du processeur

Le concept fondamental impose au processeur d'agir suivant la procédure cause-effet.

Dans ces conditions, l'évolution du vecteur de sortie ne dépend alors que des valeurs présentes et passées des composantes du vecteur d'entrée : c'est la définition même de la causalité naturelle.

Dans le cas général, la relation de transformation est explicitée par des équations d'état linéaires de forme classique :

$$R \Rightarrow \quad [\dot{X}] = [A][X] + [B][U], [Y] = [C][X] + [D][U]$$

$[X]$: le vecteur d'état,

$[Y]$: le vecteur de sortie,

$[U]$: le vecteur d'entrée.

Où des équations d'état non linéaires (voir paragraphe "Modèle d'état").

L'établissement de ces équations correspond à la phase de quantification du processeur.

Le groupement d'objets est alors considéré comme un opérateur orienté prenant alors le nom de modèle mathématique.

A2.4. Opérateur

Les opérateurs sont les constituants mathématiques des modèles de représentation des objets physiques formant le processus.

Par définition, l'intégration pure est la transformation fondamentale régissant la causalité naturelle. L'opérateur correspondant détermine alors un processeur pouvant être qualifié de générateur causal; l'orientation entrée-sortie est prédéterminée et indépendante. Les objets bobine, condensateur, masse, ressort sont, sous leur forme idéalisée (absence de pertes) modélisés par une intégration pure; le temps est donc une entrée influente, implicite pour ce type de processeur.

Annexes

Si un opérateur réalise une transformation sans intégration, alors il n'y a pas de causalité préétablie de manière intrinsèque. C'est le contexte extérieur qui détermine le choix de l'orientation du processeur ; dans la suite, nous montrons que certains éléments physiques idéalisés n'ont pas de causalité intrinsèque : résistance, amortisseur, coupleur de puissance.

Enfin, de manière générale, le produit et la somme sont des opérations neutres au sens énergétique, donc sans causalité préétablie.

A2.5. La causalité

Le symbolisme proposé pour les graphes est assez uniforme ; une distinction d'orientation est simplement à respecter en fonction des caractéristiques de la représentation d'état définies comme suit :

- Si la matrice D est identiquement nulle, la relation globale est strictement causale. En d'autres termes, l'ordre de dérivation des équations différentielles est plus élevé sur le vecteur de sortie choisi que sur celui d'entrée : la causalité est interne en raison de l'énergie accumulée dans le système considéré.

- Si les matrices A et B sont identiquement nulles et la matrice D non nulle, toutes les relations sont instantanées, la relation globale est définie comme rigide : la causalité est externe au système alors dénué de toute réserve d'énergie.

- Si la matrice D présente des termes non nuls, il existe des relations instantanées entre des grandeurs d'entrée et de sortie : la relation globale, formée d'un assemblage des deux précédentes, est alors dite semi-causale (ou semi-rigide). Pour certaines composantes, l'équation différentielle associée a le même degré de dérivation tant sur la sortie que sur l'entrée : toutefois, la causalité reste interne au système dans lequel il y a nécessairement de l'énergie accumulée.

La Figure A2-2 montre les processeurs correspondants qui se distinguent par la nature des flèches intérieures, retenue selon le caractère de la relation associée : causal (a : simple orientation), instantané (b : double orientation) ou semi-causal (c : orientation barrée). Dans ces représentations, les conditions initiales sont implicites ; pour traiter des cas particuliers, rien ne s'oppose à les faire apparaître en tant qu'entrées supplémentaires.

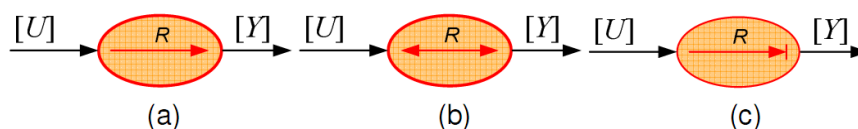


Figure A2-2. Représentations de la causalité

A2.6. Les constituants élémentaires

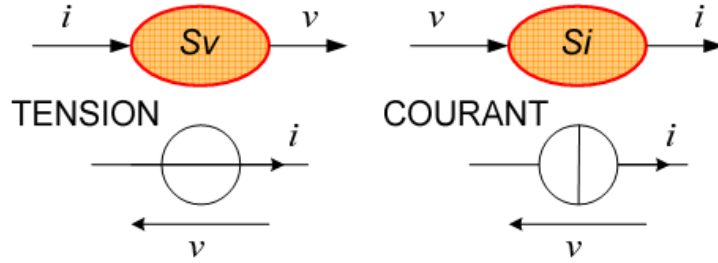


Figure A2-3. Source électrique

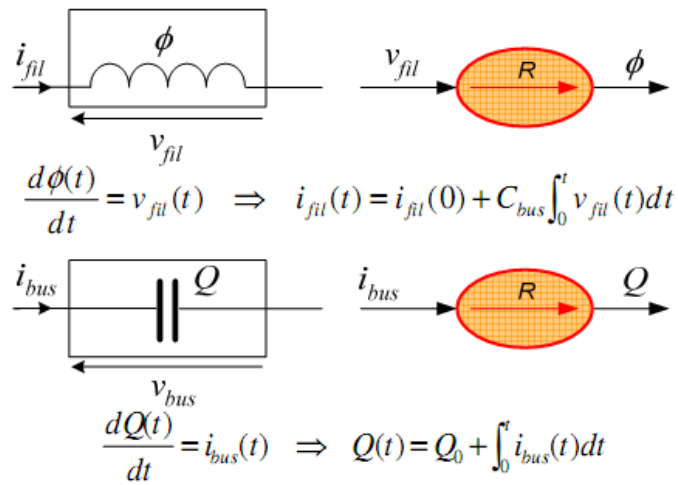


Figure A2-4. Objets accumulateurs électriques simples.

Annexe 3

Présentation du formalisme REM

A3.1. Principe

La représentation Energétique Macroscopique (REM) est un outil graphique basé sur le principe d'action-réaction. Les éléments de base de la REM, au nombre de 4, sont :

- les sources d'énergie,
- les éléments de conversion,
- les éléments d'accumulations,
- les connecteurs

Références bibliographiques

[1] <http://www.wikipedia.org/>

[2] <http://secmotor.fr/8-turbo-generator.html>

[3] <http://www.techniques-ingenieur.fr>

[4] Brahim saleha et Zareb Abd Alhakim Elbahri « étude de la commande robuste de système turbo alternateur » mémoire d'ingénieur, université d'Oran, Algérie, 1998.

[5] Saada Adil et Roubache Toufik « étude de la protection des alternateurs » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005.

[6] Herzallah Athmane « étude thermodynamique, maintenance et fiabilité d'une turbine a gaz MS 5002 » mémoire d'ingénieur, université de Boumerdes, 2007.

[7] Ould Mohamed Brahim et all « étude d'un turboalternateur, modélisation et simulation de l'alternateur » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2010.

[8] Gérald Claeys « Modélisation de la production indépendante dans les réseaux de distribution » thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble , France, 2001.

[9] Bouam Abdallah « amélioration des performances des turbines à gaz utilisées dans l'industrie des hydrocarbures par l'injection de vapeur d'eau à l'amont de la chambre de combustion » thèse de doctorat ,université de M'hamed Bougara-Boumerdes, Algérie, 2001.

[10] Eric Goncalves et Jean-Paul Thibault « cycles thermodynamiques des machines thermiques » cours de l'institut polytechnique de Grenoble, France, 2008.

[11] T. Wildi et G. Sybille : « Électrotechnique », livre, 4^{ème} édition, Canada 2005.

[12] Jérémie Foulon « Modélisation électromagnétique des développantes et du circuit magnétique de turbo-alternateurs » Stage de fin de deuxième année de Master, université Strasbourg, EDF R&D Clamart, France, Mars-Septembre 2009.

[13] Bendahmane Rabia Et Bouderballa Amina « la commande prédictive généralisée appliqué sur un turbo-alternateur simulation par matlab » » mémoire d'ingénieur, université d'Oran, Algérie, 1998.

Références bibliographiques

- [14] Moufok Houari Taki Et Boucekara Khaled « contrôle et stabilisation d'un groupe turbo-alternateur par la commande LQG » mémoire d'ingénieur, université d'Oran, Algérie, 1997.
- [15] Luc Lasne « exercices et problèmes d'électrotechnique » livre, édition Dunod, Paris, France, 2005.
- [16] Fabrice Locment « Conception et modélisation d'une machine synchrone à 7 phases à aimants permanents et flux axial : commande vectorielle en modes normal et dégradé » thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille, France, 2006.
- [17] Djaalab Zaidi Et All « étude et analyse les court-circuit d'un turbo-alternateur » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, Algérie, 2010.
- [18] Omar Fethi « modélisation et simulation d'une micro turbine raccordée au réseau » mémoire d'ingénieur, école de technologie supérieure université du Québec, Canada, 2003.
- [19] Peng Li « Formalisme pour la Supervision des Systèmes Hybrides Multi-Sources de Générateurs d'Energie Répartie : Application à la Gestion d'un Micro Réseau » thèse de doctorat, école centrale de Lille, France, 2009.
- [20] Peng Li et Bruno François « Conception de la commande d'une micro turbine à gaz dans un micro réseau isolé en utilisant la Représentation Multi-Niveaux » European Journal of Electrical Engineering, Vol. 12, No 5-6, pp. 639-668, september 2009.
- [21] Chemmouri Boudjemaa et Gafer Boubekour « Commande non-linéaire d'une machine synchrone à aimants permanents » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, Algérie, 2006.
- [22] Ferroudj Abdelmalek « Commande Non-Linéaire de la MSAP Sans Capteur de Vitesse. Apport des Méthodes de L'intelligence Artificielle » Mémoire de Magister, université de Batna, Algérie, 2011.
- [23] Benkhaled Bilal « Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Éolienne » mémoire de master, université de M'sila, Algérie, 2013.
- [24] Latreche Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » Mémoire de Magister, université de Ferhat Abbas Setif, Algérie, 2012.
- [25] 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.

Références bibliographiques

- [26] Benna Abd Elmalek et all « diagnostic des défaillances par la technique de réseau de neurone artificiel appliqué sur la machine synchrone a aimants permanents » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, Algérie,2005
- [27] Aoufi Saliha et Hamdi Pacha Fatima « commande par logique floue d'une machine synchrone a aimants permanents » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, Algérie, 2010.
- [28] Rachid Abdessemed «Modélisation et simulation des machines électriques» Livre en électrotechnique, Edition Ellipses, Paris, France 2011.
- [29] <https://www.iso.org>
- [30] Guy Chateigner et all « manuel de génie électrique» livre, édition Dunod, Paris, France, 2006.
- [31] Emanuel Florin Mogos « Production décentralisée dans les réseaux se distribution étude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources » thèse de doctorat, école centrale de Lille, France, 2005.
- [32] S. Banetta, F. Paganucci, R. Giglioli, A. Possenti « Modeling and Simulation of a Micro-Turbine Generation Set » EVS 18 Berlin, 2001.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES

Proposé et dirigé par : Dr.GHEMARI Zine

Présenté par : ELKALI laid

Thème :

Etude et modélisation d'un turbo-alternateur

Résumé :

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

Mots clés :

Alternateur, modélisation, simulation, turbine.

N° d'ordre : 054