

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تيموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Filière : ELECTROMECHANIQUE
Spécialité : ELECTROMECHANIQUE

Thème

Etude du Système D'excitation Statique de l'alternateur
400 MW de la Centrale SKT Terga

Présenté Par :

- 1) DJEMAI Mohammed Amine
- 2) Ait Ziane Mohamed Abdelwahid

Devant les jurys composés de :

Mr. MECIRDI	MAA	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Président
Dr. FLITTI M	MCB	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
Dr. AISSOU M	MCA	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant
Mr. ABRI M	Ingénieur SKT	SKT (Terga)	Co encadrant
Mr AOUABDI M	Ingénieur SKT	SKT (Terga)	Co encadrant

Remerciements :

A l'issue de la confection de ce mémoire, nous tenons à adresser nos remerciements à tous ceux qui de près ou de loin, par leur bonne volonté et leurs actes ont manifesté un intérêt à notre égard et particulièrement à :

Dr.M.AISSOU, pour la qualité d'encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire, nous disons que ce travail ne serait pas riche et n'aurait pas pu voir le jour sans son aide et son soutien,

Tous les personnels de l'ENTP et SKT pour l'accueil qu'il nous a témoigné durant notre stage et pour leur soutien ;

L'ensemble du corps professoral et administratif de l'CUAT

Nos familles et nos proches qui n'ont cessé de se manifester par leur présence quand nous en avons besoin. Recevez l'expression de notre profonde gratitude.

Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes frères et ma chère soeur. A ma chère et adorable femme. A la famille Djemai et Mankouri.

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

A tous mes professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues :

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

D.AMINE

Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes frères. A la famille Ait Ziane et Benallel.

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

A tous mes professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues :

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

A.Mohamed

Sommaire

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I : Présentation De L'organisme D'accueil SKT

I.1 Introduction.....	03
I.2 Centrale Electrique de Terga.....	03
1) Cycle simple.....	04
2) Cycle combiné.....	04
I.2.1 Vue de L'Ensemble	04
I.3 Définition de la Turbine à Gaz.....	04
I.3.1 Ailettes de compresseur.....	05
I.3.2 Ailettes Turbine.....	05
I.3.3 Corps	05
I.3.4 Chambre de combustion annulaire.....	05
I.4 Fonctionnement de la Turbine à Gaz.....	06
I.5 Définition Turbine à Vapeur.....	07
I.5.1 Fonctionnement de la Turbine à Vapeur.....	07
I.6 Définition de la Chaudière de Récupération.....	9
I.6.1 Vapeur Surchauffé.....	9
I.6.2 Vapeur Resurchauffe	9
I.7 Condenseur	10
I.8 Alternateur.....	10
I.9 Accouplement de la Turbine à Vapeur avec L'Alternateur.....	11
I.10 Phase de Démarrage.....	11
I.10.1 Système Electrique de la Centrale.....	11
I.10.2 Balayage.....	11
I.10.3 Préparation avant le démarrage.....	12
I.10.4 Procédure normale de démarrage.....	12

I.11 Procédure d'arrêt normal.....	13
I.12 Système de Refroidissement a Eau Principale.....	13
I.12.1 Système de Refroidissement a Eau Des Auxiliaires.....	13
I.12.2 Système D'alimentation en Gaz Combustible.....	13
I.12.3 Système D'alimentation en Gasoil.....	14
I.12.4 Système de Synchronisation.....	14
I.12.5 Système Electrique de la Centrale.....	15
I.13 Transformateur.....	15
I.13.1 Constitution du transformateur.....	16
I.13.2 Transformateur auxiliaire d'unité.....	16
I.13.3 Transformateur de démarrage normal de la TG.....	16
I.14 Alimentation de Secours.....	16
I.15 Poste–blinde.....	17
I.16 Eclairage.....	17
I.17 Conclusion.....	17

CHAPITRE 2 : Les Systèmes D'excitation Des Alternateurs Synchrones

II.1 Introduction	19
II.2 Exigences d'un Système D'excitation.....	19
II.3 Eléments D'un Système D'excitation.....	20
II.4 Différents Types de Système D'excitation.....	22
II.4.1 Système d'excitation à courant continu (DC).....	22
II.4.2 Système d'excitation à courant alternatif (AC).....	23
II.4.3 Systèmes d'excitation statique.....	24
II.5 Systèmes de Démarrage Statique.....	25
II.5.1 Méthodes de Démarrage.....	26
II.5.2 Rôle du Système Statique de Démarrage au Démarrage.....	27
II.6 Conclusion.....	28

CHAPITRE 3 : Etude Du Système D'excitation et Simulation D'alternateur Synchrone

III.1 Introduction.....	30
III.2 Principe De Fonctionnement de L'alternateur.....	30
III.3 Types Des Alternateurs.....	31
III.3.1 Alternateur à Rotor à Pôles Saillants.....	31
III.3.2 Alternateur à Rotor à Pôles non Saillants.....	31
III.4 Présentation De L'alternateur Synchrone.....	32
III.5 Principe De Fonctionnement.....	33
III.5.1 Création De Forces Électromotrices Triphasées.....	33
III.5.2 Fonctionnement à Vide.....	33
III.5.3 Fonctionnement En Charge.....	35
III.6 Système D'excitation D'alternateur Synchrone.....	36
III.7 Théorie De Base Des Systèmes D'excitation.....	36
III.8 Excitation Sans Balais.....	37
III.8.1 Construction Et Principe De Fonctionnement D'un Système D'excitation Sans Balais.....	37
III.9 Excitation Statique.....	38
III.10 Composants Electriques-Electroniques.....	39
III.10.1 Bloc Convertisseur.....	39
III.10.2 Bloc Électronique De Commande Et à Impulsions.....	40
III.10.3 Bloc Dispositif De Décharge De Champ.....	40
III.10.4 Bloc Transformateur Convertisseur.....	40
III.11 Système de Refroidissement D'alternateur Synchrone.....	42
III.11.1 Le Refroidissement à L'hydrogène.....	42
III.12 Équipements De Refroidissement.....	42
III.13 Processus De Remplissage.....	43
III.14 Processus De Décharge.....	43
III.15 Veines De Refroidissement De L'hydrogène.....	43

III.16 Inspection Du Circuit D'hydrogène.....	44
III.17 Simulation de La Machine Synchronne.....	45
III.17.1 Machine Synchronne.....	45
III.18 Redresseur statique.....	46
III.19 Pont de Graëtz Triphasé à Thyristors.....	47
III.20 Redresseur Simulink.....	47
III.21 Mise en équations des machines synchrones.....	48
III.22 Hypothèses simplificatrices.....	48
III.23 Convention de signe.....	49
III.24 Description de l'alternateur triphasé.....	49
III.25 Modèle en a, b, c d'une machine synchronne à pôles lisse.....	50
III.26 Équations électriques.....	50
III.27 La Transformation de Park.....	51
III.28 Équations électriques dans les axes d et q.....	52
III.29 L'expression de la puissance.....	53
III.30 Expression du couple.....	53
III.31 Paramètres du régime transitoire de l'alternateur.....	54
III.31.1 Expression des réactances et constantes du temps.....	54
III.32 Simulation de modèle sur Matlab/Simulink.....	55
III.33 Implantation des équations des courants.....	55
III.34 Implantation des équations des couples.....	56
III.35 Modèle des équations sur l'axe direct (Bloc d).....	56
III.36 Modèle des équations mécaniques (Bloc rotor).....	57
III.37 Modèle des équations sur l'axe quadrature (Bloc q).....	57
III.38 Résultats de simulation.....	59
III.39 Tension du Redresseur.....	61
III.40 Conclusion.....	62

Liste Des Figures

CHAPITRE I

Figure I-1 Centrale Electrique de Terga.....	3
Figure I-2 Schéma de la ligne d'arbre.....	4
Figure I-3 Turbine à Gaz	6
Figure I-4 Fonctionnement de la turbine à Gaz.....	7
Figure I-5 Cycle de Vapeur.....	8
Figure I-6 Machine Synchrone.....	11
Figure I-7 Groupe Electrogène de secours.....	14
Figure I-8 Transformateur Principal Elévateur	15

CHAPITRE II

Figure II-1 Schéma du système d'excitation d'une génératrice Synchrone.....	21
Figure II-2 Système D'excitation de Type DC	22
Figure II-3 Excitation type AC avec Redresseur non Commandé	23
Figure II-4 Excitation type AC avec redresseur commandé	24
Figure II-5 Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension	25
Figure II-6 Méthodes de Démarrage	27
Figure II-7 Schéma Unifilaire Système de Démarrage Statique	27

CHAPITRE III

Figure III-I Types des Alternateurs.....	31
Figure III-2 Alternateur Synchrone.....	32
Figure III-3 Schéma équivalent et diagramme vectoriel d'Alternateur Synchrone.....	33
Figure III-4 Champ Magnétique dans un Alternateur sans Charge.....	34
Figure III-5 Champ Magnétique dans un Alternateur avec Charge.....	35
Figure III-6 Principe Générant la Production de la Tension.....	36
Figure III-7 Schéma De Système D'excitation sans Balais.....	37

Liste Des Figures

Figure III-8 Principaux Composants D'un Système D'excitation sans Balais.....	38
Figure III-9 Schéma De Système D'excitation Statique.....	38
Figure III-10 Schéma Simplifié D'un Système D'excitation Statique avec Électronique....	39
Figure III-11 Amortissement Des Oscillations de Charge Active.....	41
Figure III-12 Électronique à Impulsions Double Canal Pour une Disponibilité Accru.....	41
Figure III-13 Différents Types Des Alternateurs.....	46
Figure III-14 Schéma De Fonctionnement De L'onduleur.....	47
Figure III-15 Schéma Bloc D'un Redresseur Triphasé.....	47
Figure III-16 machine synchrone triphasé avec amortisseur	50
Figure III-17 Interprétation de la transformation de Park pour une machine synchrone ...	52
Figure III-18 Relations entre flux et courants sur l'axe direct.....	56
Figure III-19 Relations entre flux courants et couple dans le rotor	57
Figure III-20 Relations entre flux et courants sur l'axe quadrature	57
Figure III-21 Schéma global de l'alternateur	58
Figure III-22 Les Courant i_a , i_b , i_c	59
Figure III-23 : L'angle interne.....	59
Figure III-24 : Le couple électromagnétique.....	60
Figure III-25 : La vitesse de rotation.....	60
Figure III-26 : les caractéristiques de le l'alternateur pour un fonctionnement normal....	61
Figure III-27 : La Tension D'entrée Est Composée à La Sortie De Redresseur.....	61

Liste Des Abréviations

<i>Abréviations</i>	<i>Signification</i>
SKT	Sharikat Kahraba Terga
GE	General Electric Compagnie
SSD	Système de Démarrage Statique
SES	Système d'excitation Statique
TV	Turbine à Vapeur
TG	Turbine à Gaz
TET	La température d'entrée de la turbine
OTC	one through cooler
GIS	Poste-blindé
HT	Haute Tension
MT	Moyenne Tension
BT	Base Tension
CCWS	Le système d'eau de réfrigération des auxiliaires
AVR	automatiques régulateur de tension
PSS	puissance stabilisateur de système
I	Courant
SCR	redresseurs commandés au silicium
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
E	la force électromotrice
K_b	Facteur de bobinage
N_c	Nombre des conducteurs par phase
φ	Flux magnétique
B_R	L'induction créée par l'inducteur tournant

Liste Des Abréviations

<i>Abréviations</i>	<i>Signification</i>
ω	Vitesse relative de rotation électrique de la machine synchrone
ω_0	Vitesse nominale de rotation électrique de la machine synchrone
δ	Angle de puissance (L'angle rotorique) de la machine synchrone
p_e	Puissance électrique active
Q_e	Puissance électrique réactive
p_m	Puissance mécanique entrant
D	Coefficient d'amortissement
H	Constant d'inertie
V_t	Tension mesurée à la sortie de la machine synchrone
V_q	La composante quadratique de la tension terminale
V_d	La composante directe de la tension terminale
i_q	La composante quadratique du courant du stator
i_d	La composante directe du courant du stator
ω_r	Vitesse de rotation
ω	Vitesse de synchronisme
R_a	Résistance d'une phase statorique
R_{fDQ}	Respectivement, résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et d'axe q
φ_{abc}	Les flux totaux à travers les bobines statorique
V_{abc}	Les tentions des phases statorique
C_{em}	Couple électromagnétique
k	Coefficient dépend de la machine
T_a	Constante de temps de l'AVR
i_a	Courant induit

Introduction Générale :

La machine synchrone est inventée par Nikola Tesla. Son concept figure dans un dépôt de sept brevets du 1er mai 1888 où il en décrit plusieurs variantes ainsi que le principe du courant alternatif biphasé et triphasé et leur distribution. Tesla aurait développé cette idée de machine électrique quand il était étudiant à l'École polytechnique de Graz (1875-1876).

Dès que l'on commence à comprendre le fonctionnement des machines électriques, leur évolution a été progressive à tel point que maintenant est difficile même imaginer toutes les applications où nous les utilisons. Grâce à l'apparition des énergies renouvelables l'industrie électrique se repenche sur l'amélioration des machines électriques.

Aujourd'hui, les machines électriques sont plus puissantes et demandent moins d'énergie. Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

La machine synchrone est une machine à champ tournant, elle est réversible comme la machine à courant continu ou la machine asynchrone, c'est à dire qu'elle peut être motrice ou génératrice. Notre étude se bornera ici à considérer l'aspect génératrice, on l'appelle plus particulièrement : alternateur synchrone qui est une machine électrique tournante fonctionnant en mode génératrice qui convertie l'énergie mécanique en énergie électrique alternative et qui a pour les caractéristiques suivants :

- Production de fortes puissances et de faibles puissances.
- Utilisation d'un principe simple.
- Rendements très élevés (proches de 100 % en fortes puissances).
- Electricité naturellement alternative (idéal pour transformateurs).

Comme il peut être intégré dans des systèmes embarqués et dans des installations de puissance sa taille est négligeable par rapport à la puissance délivrée comme un alternateur de centrale qui égale a plusieurs dizaines de MVA pour un diamètre de plusieurs dizaines de mètre.

L'alternateur est la base de toute la production d'énergie électrique, toutes les centrales électriques possèdent un alternateur. C'est un dispositif permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Une centrale électrique réalise une chaîne énergétique

qui commence par une énergie primaire subit une ou plusieurs conversions pour finalement devenir de l'énergie électrique.

La centrale électrique en cycle combiné de Terga dans la wilaya d'Aïn Temouchent a été mise en exploitation en juin 2012. D'une puissance de 1.200 mégawatts, la centrale en question joue un rôle important dans le cadre de l'interconnexion des réseaux nationaux d'électricité.

Dans la centrale SKT L'alternateur est entraîné par une turbine à gaz et une turbine à vapeur ; un combustible (gaz naturel, charbon, fioul) dégage de la chaleur en brûlant. La chaleur transforme l'eau liquide en vapeur d'eau. La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne l'alternateur qui produit l'électricité.

Pour une meilleure présentation de notre travail, le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une représentation générale de la centrale à cycle combiné de TERGA.

Le deuxième chapitre offre une présentation générale sur les systèmes d'excitation des alternateurs synchrones.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du système d'excitation de l'alternateur au niveau de la centrale SKT.

CHAPITRE I

Présentation De L'organisme D'accueil SKT

I.1 Introduction :

La central électrique de TERGA fait partie du programme d'urgence ALGERIEN destiné à accroître la capacité de production d'électricité du pays. Cette dernière est fortement poussée par le développement industriel, d'important investissement pour des projets d'infrastructure et pour les besoins d'une population croissante. Il a permis de sécuriser l'approvisionnement énergétique de la région tout en participant à la protection de l'environnement. De plus ce projet a des conséquences positives sur le développement économique de la région.

I.2 Centrale Electrique de Terga :

La Centrale électrique de TERGA a été réalisée par le consortium dirigé par Alstom et comprenant la société égyptienne Orascom, elle est une centrale de production d'énergie électrique avec une puissance totale active de 1200MW et avec une tension de service de 400KV et une fréquence de 50HZ. Ce type de centrale est à cycle combiné comportant 3 unités de 400 MW chaque unité est formée d'une turbine à gaz GT26, d'une turbine à vapeur ALSTOM et d'un alternateur.

La centrale peut fonctionner selon deux cycles :

- Cycle simple : La turbine à gaz GT 26 est en service
- Cycle combiné : La turbine à gaz GT 26 est combinée à la turbine à vapeur et à la chaudière de récupération.



Figure I-1 : Vu 3D de la Centrale Electrique de Terga

I.2.1 Vue de l'Ensemble :

Une extrémité de l'alternateur est connectée à l'extrémité froide de la turbine à gaz et l'autre à la turbine à vapeur. La TV est connectée à l'alternateur au moyen d'un embrayage automatique synchrone. Il s'engage automatiquement à la vitesse nominale de la TV pendant le démarrage et se désengage automatiquement pendant l'arrêt de la TV. Ceci permet un fonctionnement indépendant de la turbine à gaz pendant le démarrage de la turbine à vapeur ou lors du fonctionnement de la TV sur by-pass rendant inutile la présence d'une chaudière auxiliaire qui serait nécessaire si la TV était directement connectée à la TG.

La centrale de Terga est composée de trois Blocs à une seule ligne d'arbre. La ligne d'arbre comprend la turbine à gaz entraînant le turboalternateur via un accouplement rigide. La turbine à vapeur est accouplée via un embrayage auto commutable synchrone sur l'autre côté de l'alternateur. Cette disposition permet de démarrer et d'arrêter la turbine à vapeur indépendamment de la turbine à gaz, alors que la turbine à gaz est déjà en fonctionnement.

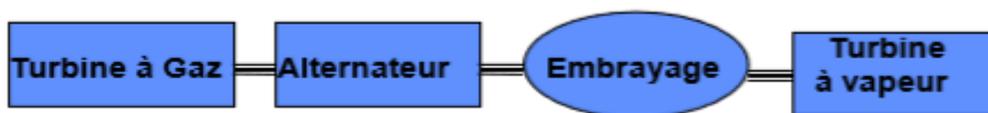


Figure I-2 : Schéma de la ligne d'arbre.

I.3 Turbine à Gaz :

La turbine à gaz de type GT26 d'Alstom comprend un rotor constitué d'un étage turbine «haute pression», de 4 étages turbine «basse pression», de 22 étages compresseur, et deux chambres de combustion annulaires (les brûleurs EV et SEV), appliquant le principe de combustion séquentielle.

-La turbine à gaz est formée de trois parties élémentaires:

I.3.1 Ailettes Compresseur :

A l'intérieur du corps du compresseur se trouvent les aubes directrices à ouvertures variables, les différents étages d'aubes du rotor et du stator et les aubes directrices en sortie. Dans le compresseur, l'air est confiné dans l'espace entre le rotor et le stator où il est comprimé par étape par une série de pales aérodynamiques alternées en rotation (rotor) et fixes (stator). Les pales du rotor donnent la force nécessaire à la compression de l'air à chaque étage et les pales du stator guident l'air pour qu'il arrive sur l'étage suivant avec le bon angle. L'air comprimé sort du compresseur par le corps d'échappement vers les chambres de combustion. L'air est aussi extrait du compresseur pour le refroidissement de la turbine et le contrôle des pulsations au démarrage.

I.3.2 Ailettes Turbine :

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

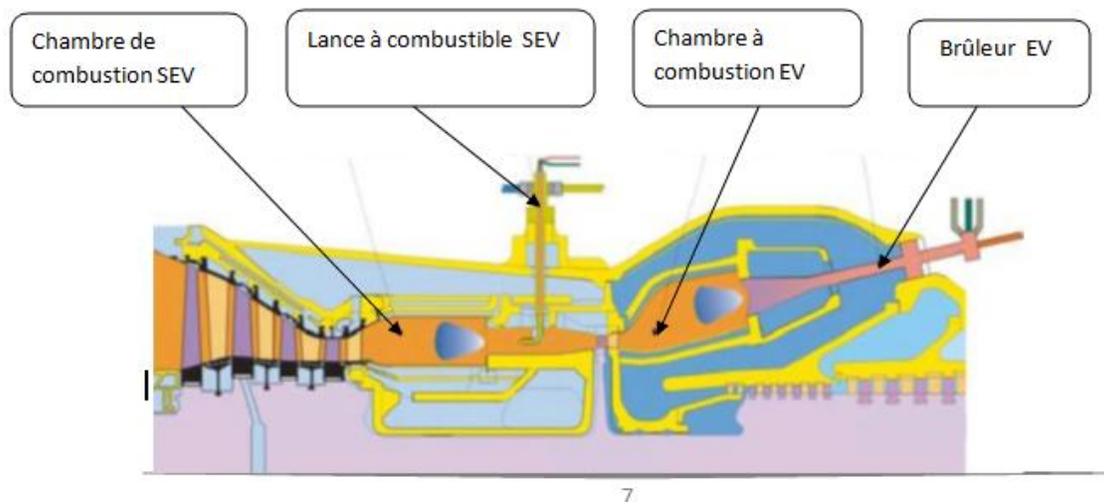
I.3.3 Corps :

La construction du corps est conventionnelle, les sections chaudes sont protégées par un refroidissement à l'air. Le corps de la chambre de combustion, de la turbine et du compresseur a un plan de joint horizontal permettant une inspection détaillée.

I.3.4 Chambre de combustion :

La chambre de combustion est équipée de dix-huit brûleurs de type flux inversé installées autour de la périphérie du corps d'échappement compresseur. Les gaz chauds, dégagés du combustible enflammé au sein des chambres de combustion, circulent en direction de la turbine à travers les pièces de transition refroidies par contact.

Dans laquelle l'énergie contenue dans le gaz pressurisé à haute température, produit par les sections compresseur et combustion est convertie en énergie mécanique.



7
Figure I-3 : Turbine à Gaz.

I.4 Fonctionnement de la Turbine à Gaz :

L'étage HP se trouve en aval des brûleurs EV et en amont des brûleurs SEV. L'air en entrée de la TG est filtré dans le bloc de prise d'air. Le rotor est couplé de façon rigide à l'arbre de l'alternateur. Le débit d'air à travers la turbine à gaz est régulé par la position angulaire de trois aubes mobile d'admission (AMA), placées devant les trois premiers rangs d'ailettes du compresseur. A charge partielle (au-dessus de 60 % de charge TG environ), le contrôleur TG garde la température du gaz d'échappement constante à son maximum afin d'obtenir un rendement maximum du cycle combiné. La température d'entrée de la turbine (TET) est ajustée par le contrôle de l'injection du combustible. Pour assurer le refroidissement et l'étanchéité de la TG, de l'air est soutiré du compresseur à différents étages. Deux de ces extractions d'air sont partiellement refroidies à l'extérieur de la TG, l'air BP sert à refroidir les brûleurs SEV, les premiers étages de la turbine BP et son rotor, l'air HP sert principalement à refroidir la turbine HP et son rotor. Les échangeurs pour refroidir l'air HP et BP sont à passe unique (OTC pour one through cooler).



Figure I-4 : Fonctionnement de la turbine à Gaz.

I.5 Turbine à Vapeur:

La Turbine à vapeur Alstom, de type DKYZ3-2N41B, possède deux corps, trois pressions, et une resurchauffe. Le premier corps est l'étage haute pression (HP) et le deuxième corps de la turbine se compose des étages moyenne pression (MP) et basse pression (BP). Le corps MP/BP est à doubles flux. Les deux rotors des corps HP et MP/BP sont liés entre eux par un accouplement rigide. Le rotor HP est également lié à l'embrayage par un accouplement rigide. La turbine à vapeur a une extraction de vapeur à basse pression.

I.5.1 Fonctionnement de Turbine a Vapeur :

D'abord La vapeur est admise dans les corps HP et MP au travers des organes d'admission incluant les vannes d'arrêt et de contrôle, ensuite l'admission HP est réalisée par un bâti dans lequel les vannes sont montées en série, et l'admission MP utilise deux bâtis où les vannes d'arrêt et les vannes de contrôle sont entièrement intégrées dans le même corps sphérique bridé au corps externe MP. La vapeur vive HP, régulée par une vanne d'arrêt et une vanne de contrôle, entre dans le corps HP et se détend jusqu'à la pression de la vapeur à resurchauffer. La vapeur à resurchauffer est mélangée avec la vapeur MP produite par la chaudière de récupération avant d'être resurchauffée dans la chaudière de récupération. La vapeur BP entre dans la turbine à travers une vanne d'arrêt

et une vanne de contrôle. La vapeur issue du corps échappement BP de la turbine est envoyée au condenseur.

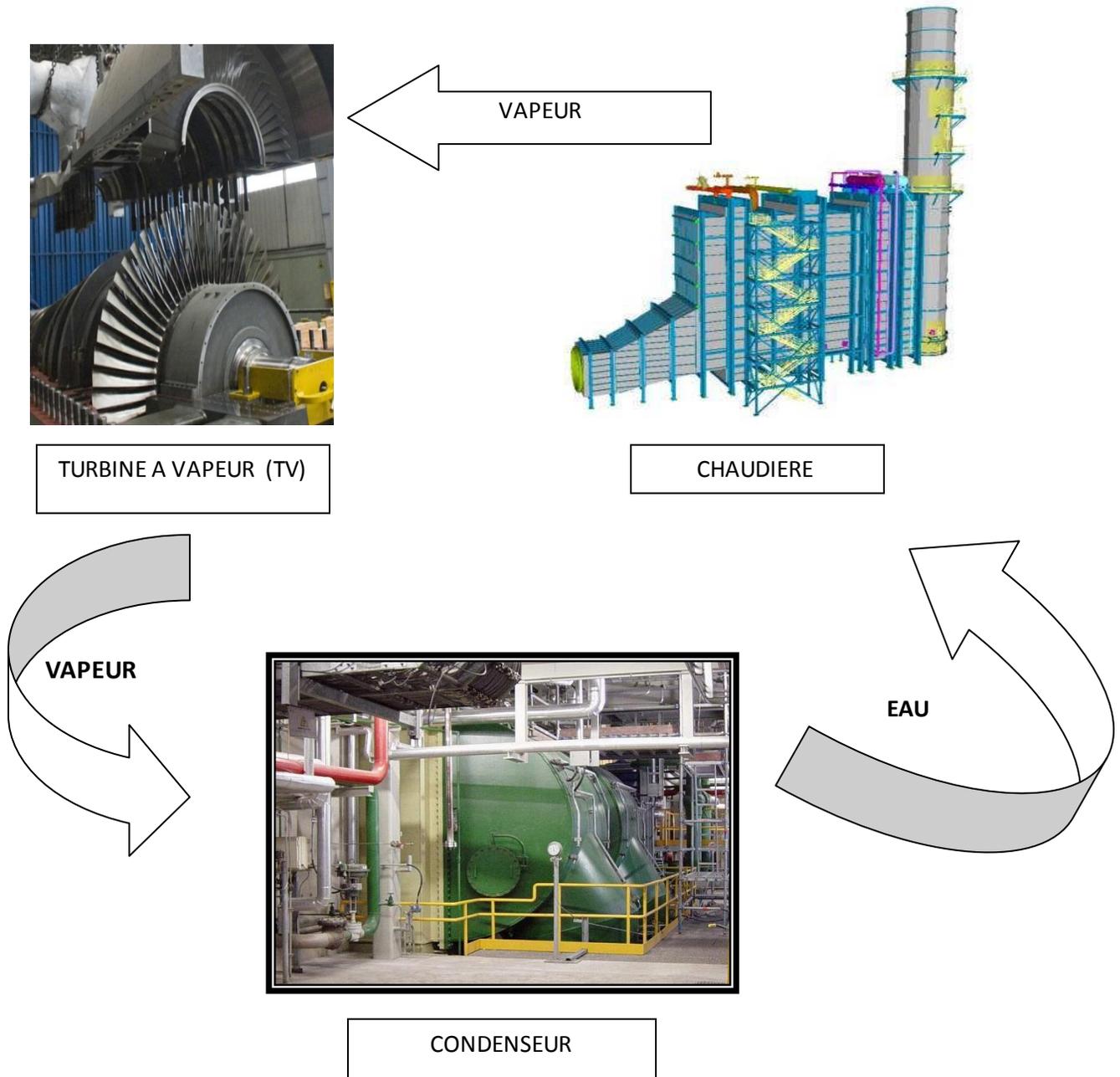


Figure I-5 : Cycle de Vapeur.

I.6 Chaudière de Récupération :

Depuis la central SKT La chaudière de récupération est de design horizontal. Elle fonctionne en mode de circulation naturelle pour les trois niveaux de pression BP, MP, et HP. La chaleur, contenue dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz, sert de source de chaleur pour produire la vapeur (vapeur réchauffée, vapeur surchauffée HP, MP, et BP). Les pompes alimentaires HP/MP alimentent la chaudière de récupération. L'eau alimentaire BP est extraite en aval du deuxième rang économiseur MP/BP. L'eau alimentaire HP, MP et BP est réchauffée dans les économiseurs et stockée dans les ballons respectifs (HP, MP et BP). Chaque niveau de ballon est régulé par une vanne de contrôle.

La vapeur saturée est produite dans les évaporateurs HP, MP, et BP. La vapeur HP provient du surchauffeur à plusieurs étages HP, la vapeur MP du resurchauffeur, via le surchauffeur MP, la vapeur BP est également surchauffée. En sortie de la chaudière de récupération, les vapeurs HP et MP sont désurchauffées avec l'eau alimentaire extraite des économiseurs HP et MP respectivement. De l'eau extraite de l'économiseur HP alimente les réfrigérants d'air TG. Il est possible de réguler la température de l'eau alimentaire en amont des réfrigérants, dans une certaine plage, grâce à une extraction en amont du premier économiseur HP si nécessaire (une vanne manuelle de contrôle ajustée durant la mise en service est prévue à cet effet).

I.6.1 La Vapeur Surchauffe :

La vapeur surchauffée et pour une pression donnée, sa température est supérieure à la température de la vapeur saturée. Pour la vapeur saturée c'est une vapeur qui est de même température que l'eau dont elle est issue.

Un cycle à resurchauffe est un cycle dans lequel on récupère une partie de la vapeur du corps haute pression de la turbine à vapeur pour la surchauffer à nouveau dans la chaudière, afin de la renvoyer une seconde fois dans la turbine.

I.6.2 La Vapeur Resurchauffée :

Un cycle à resurchauffe est un cycle dans lequel on récupère une partie de la vapeur du corps haute pression de la turbine à vapeur pour la surchauffer à nouveau dans la chaudière, afin de la renvoyer une seconde fois dans la turbine.

I.7 Condenseur :

Le condenseur est un échangeur thermique qui permet de condenser la vapeur en sortie de TV, pour réalimenter en eau la chaudière. L'installation du condenseur est de design axial refroidi à l'eau de mer. Le condenseur est constitué de deux faisceaux double passe. Afin d'opérer le condenseur avec un seul demi condenseur, les boîtes à eau sont divisées. Du fait de l'augmentation de la pression à l'échappement de la TV, la puissance produite est dans ce cas réduite. Les gaz incondensables côté vapeur sont extraits de chaque faisceau de tube à l'endroit le plus froid, la pression partielle de vapeur y est plus basse. La vapeur condensée est envoyée dans le puits du condenseur, qui sert ainsi de capacité de stockage. Le ballon d'éclatement des purges est raccordé au condenseur et recueille les purges internes de la turbine à vapeur. La phase vapeur est renvoyée au condenseur et les condensats sont renvoyés au puits du condenseur.

I.8 Alternateur :

L'alternateur Alstom (type 50WT21H-120) est entraîné à la fois par la turbine à gaz et par la turbine à vapeur. La puissance est produite à une tension de 20kV. L'alternateur, à trois phases et deux pôles synchrones, est refroidi à l'hydrogène. Le gaz chaud est ensuite refroidi dans les échangeurs thermiques se trouvant dans l'enceinte de l'alternateur. La chaleur issue de ces échangeurs est transférée à l'eau de refroidissement (Circuit fermé d'eau de refroidissement), qui est ensuite refroidi par le circuit principal d'eau de refroidissement. L'hydrogène de refroidissement est stocké dans des bouteilles. L'étanchéité de l'hydrogène vis à vis de l'atmosphère est assurée par une unité d'huile d'étanchéité. Le rotor alternateur est accouplé rigidement à l'embrayage.

L'alternateur est utilisé comme un moteur synchrone de démarrage alimenté par un convertisseur statique de fréquence. L'énergie de démarrage est fournie par le réseau Haute Tension, à travers le transformateur élévateur.



Figure I-6 : Machine Synchrone.

I.9 Accouplement de la Turbine a Vapeur avec L'Alternateur :

L'embrayage permet de connecter la TV à l'alternateur, alors que celui-ci est déjà entraîné par la TG. Lorsque le couple de la TV devient positif l'embrayage s'engage automatiquement ainsi que la vitesse de la TV dépasse celle de l'alternateur. L'embrayage se désengage automatiquement aussitôt que le couple de la TV devient négatif c'est-à-dire aussitôt que la vitesse de la TV a tendance à passer en dessous de celle de l'alternateur.

I.10 Phase de Démarrage :

Avant le démarrage de la centrale à cycle combinée ou des systèmes auxiliaires, une inspection doit être effectuée par le personnel de conduite de la centrale. Ces vérifications manuelles sont nécessaires pour un démarrage sûr et sans problème. Ensuite, la centrale peut être démarrée et opérée depuis la salle de commande centrale.

I.10.1 Alimentation électrique de la centrale :

La centrale est démarrée avec la puissance fournie depuis le réseau HT. En cas d'un défaut sur le réseau HT le démarrage de la centrale doit être exécuté avec le générateur diesel de secours.

I.10.2 Balayage :

Avant chaque allumage de la TG le système de gaz d'échappement associé et la chaudière de récupération doivent être balayés. Celui-ci s'effectue automatiquement. La

procédure de balayage est décrite dans les instructions de conduite de la TG.

I.10.3 Préparation avant le démarrage :

Tous les sous-systèmes et les composantes doivent être respectés. La procédure décrite ci-dessous est un résumé des éléments généraux qui doivent être vérifiés avant qu'un démarrage automatique est initié.

- La production électrique et la distribution depuis le réseau jusqu'aux gaines à barres MT et BT et jusqu'aux tableaux de contrôle commande moteurs doivent être conforme au concept d'opération électrique.
- Le contrôle et la surveillance du système doivent être disponibles et les perturbations traitées.
- Tous les sous-systèmes, qui sont nécessaires pour l'accélération initiale, doivent être sous tension pendant l'immobilisation.

I.10.4 Procédure normale de démarrage :

Le démarrage peut être lancé soit en choisissant la section de niveau élevé plus haute suivante soit directement en choisissant "Charge de l'unité".

Le séquenceur TG vérifie que tous les critères sont remplis pour le démarrage et confirmés par inversion du signal « TG non prête ». La TG démarre et fonctionne selon le programme de démarrage TG en incluant le balayage et la montée en charge en accord avec les paliers de charge TG suivant les critères de démarrage à froid, tiède et chaud. En parallèle à la séquence de démarrage TG, la TV, la chaudière de récupération, et le séquenceur BOP continuent de démarrer les groupes fonctionnels jusqu'à la section "Charge/Contournement de vapeur TG". Après avoir fini la séquence de démarrage de la TG, le coordinateur d'unité contrôle l'activation des paliers de charge TG, La première vapeur produite dans la chaudière de récupération et les réfrigérants d'air TG est utilisée pour l'étanchéité de la turbine vapeur et des éjecteurs de démarrage, jusqu'à ce que le condenseur soit prêt pour recevoir la vapeur, en conséquence les vannes de contournement de vapeur sont libérées pour une ouverture, Ensuite la TG monte en charge jusqu'au prochain point d'arrêt sélectionné, ensuite la TV démarre. Finalement lorsque la TV soit montée à sa charge minimale, l'unité peut être monté à la consigne de charge avec les paliers de charge TG en accord avec le mode de démarrage activé.

I.11 Procédure d'arrêt normal :

L'arrêt de la centrale est initié par l'opérateur de la centrale en accord avec les requêtes du dispatching. Ceci peut se faire en charge nominale ou à charge partielle. En général, la procédure d'arrêt est la séquence inverse de la procédure de démarrage. L'arrêt peut être initié par la prochaine section plus basse ou directement en sélectionnant "Immobilisation". Pour un arrêt plus long, Les circuits d'eau et de vapeur de la chaudière de récupération sont inertes à l'azote (procédure de conservation).

I.12 Système de Refroidissement a Eau Principale :

La chaleur rejetée par le cycle eau vapeur et par le circuit fermé d'eau de refroidissement est transféré directement à l'eau de mer. Deux pompes d'eau de refroidissement principal fournissent de l'eau de mer froide au condenseur principal et également aux réfrigérants du circuit fermé d'eau de refroidissement ensuite l'eau réchauffée par le condenseur et les auxiliaires de refroidissement est retournée à la mer via un canal de rejet.

I.12.1 Système de Refroidissement a Eau Des Auxiliaires :

Le système d'eau de réfrigération des auxiliaires (CCWS) est un circuit fermé rempli d'eau déminéralisée subvenant aux besoins en eau froide propre et non corrosive dans toute la centrale. Des pompes à eau de réfrigération sont installées pour assurer la recirculation. L'eau réchauffée est refroidie à nouveau au moyen de réfrigérants eau / eau alimentés par le système d'eau de réfrigération principale. L'eau du CCWS est traitée avec un inhibiteur pour protéger les composants du système contre la corrosion. Le débit d'eau de réfrigération vers chaque besoin est ajusté au moyen d'orifices afin de respecter les exigences spécifiques de température. Un réservoir en hauteur garantit le volume tampon nécessaire afin de s'adapter à la dilatation causée par les variations de température de l'eau dans le CCWS. Ce réservoir maintient également une pression suffisante dans tout le système et sert de réserve en cas de pertes d'eau.

I.12.2 Système D'alimentation En Gaz Combustible :

Le gaz est amené en limite de site par la tuyauterie de gaz du client, commune aux trois unités de la centrale. Le gaz combustible est en suite purifié de toute humidité et poussière dans le poste de traitement. Par la suite en fonction de la pression du gaz, celui-

ci est soit détendu dans la station de réduction de pression soit comprimé par les compresseurs de gaz. La pression du gaz combustible est ajustée à la pression requise par le système de combustion de la turbine à gaz. Un filtre fin et un système de préchauffage de combustible sont installés en amont de chaque turbine à gaz. La turbine à gaz est ensuite alimentée en gaz. De plus, un analyseur de gaz naturel et un débitmètre sont également installés en amont de chaque turbine à gaz.

I.12.3 Système D'alimentation En Gasoil :

Le poste de dépotage du gasoil permet le remplissage des réservoirs de stockage à partir des camions citernes. Ce post de dépotage est équipé d'un système de comptage du débit transféré depuis les camions vers le réservoir, Depuis les réservoirs de stockage, les pompes de transfert assurent l'alimentation de la turbine à gaz, un circuit secondaire permet également le remplissage du réservoir journalier du groupe électrogène et des chaudières du système de dessalement.



Figure I-7 : Groupe Electrogène de secours.

I.12.4 Système de Synchronisation :

Deux synchro-coupleur redondant assurent la synchronisation automatique de l'alternateur sur le réseau .En procédure normale, les deux synchro coupleur travaillent conjointement et compare leur état. L'ordre de fermeture sur GCB est envoyé uniquement si les deux synchro-coupleur le décident conjointement.

I.12.5 Système Électrique de la Centrale :

Les équipements électriques sont conçus conformément aux normes de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI). L'alternateur commun à la turbine à gaz et à la turbine à vapeur est connecté au transformateur principal par des barres sous gaine à phases isolées.

Le circuit est équipé d'un disjoncteur alternateur, ce qui garantit un système électrique renforcé, une meilleure protection et une flexibilité de fonctionnement accrue.

L'alimentation électrique auxiliaire nécessaire à la centrale à cycle combiné est dérivée des barres de l'alternateur par un transformateur auxiliaire à trois enroulements dont un est dédié au système de Distribution moyenne tension l'autre à l'alimentation du Convertisseur Statique de Fréquence de démarrage.

I.13 Transformateur :

Le transformateur principal de l'alternateur est utilisé pour élever la tension générée (20KV) jusqu'au niveau de tension du réseau du client (400KV). Le transformateur est installé en extérieur à proximité immédiate du transformateur de soutirage. Le transformateur est équipé d'un système de refroidissement à l'huile et à l'air forcé.



Figure I-8 : Transformateur Principal Elévateur.

I.13.1 Constitution du transformateur :

Le circuit magnétique du transformateur est constitué de tôles en acier laminé à froid et à grains orientés, des enroulements constitués de conducteurs de cuivre à haute conductivité et sont conçus pour la tension de tenue aux chocs de foudre et la résistance aux courts-circuits adéquate.

I.13.2 Transformateur auxiliaire d'unité :

Il existe trois transformateurs auxiliaires d'unité (soutirage), ils sont dimensionné pour alimenter les consommateurs des auxiliaires de tranche, celles des auxiliaires généraux et éventuellement assurer l'alimentation des auxiliaires d'une autre tranche pour effectuer sa mise à l'arrêt en sécurité et les auxiliaires généraux sont alimentés par une seule tranche à la fois.

I.13.3 Transformateur de démarrage normal de la TG :

La centrale SKT se compose de deux transformateurs de démarrage normale de la TG leurs caractéristiques principales sont :

- ✚ Transformateur de puissance immergé dans l'huile, triphasé, à deux enroulements ;
- ✚ Refroidissement;
- ✚ Huile de transformateur;
- ✚ Régleur Hors Charge;
- ✚ Neutre côté BT isolé.

I.14 Alimentation de Secours :

Le système de secours sera composé d'un ensemble de plusieurs groupes électrogènes diesel de « **Black Start** », ces groupes seront connectés sur un tableau MT «distribution secours et black Start» 6,6 kV situé à proximité des groupes. Ce tableau comporte une liaison avec le tableau des auxiliaires généraux 6,6 kV qui assure la distribution vers les tableaux de tranches 6,6KV au travers des inter liaisons vers ces tableaux, ce groupe électrogène diesel de secours est prévu pour assurer en continu une alimentation fiable des systèmes auxiliaires essentiels y compris les chargeurs de batteries, lorsque le réseau du service public et de la turbine à gaz ne sont pas disponible.

I.15 Poste blindé :

Est un assemblage de bloc modulaire appelé compartiment, dont l'isolation est réalisée par un gaz isolant typiquement le (SF₆).

Le poste blindé comporte : Des Jeu de barre, disjoncteurs, sectionneur, sectionneur de mise à la terre, transformateur de courant et de tension. Systems électriques sensible

I.16 Éclairage :

La central sera équipé d'un system d'éclairage normal, de secours, et de sécurité afin d'assurer un éclairage des bâtiments et des zones pour le personnel d'exploitation et de maintenance. Le tableau d'éclairage de secours est alimenté depuis le tableau des auxiliaires essentiels communs secourus par le diesel. L'éclairage de sécurité prévu pour les issues de secours et est assuré au moyen de bloc autonome de sécurité.

I.17 Conclusion :

Premièrement dans ce chapitre on a présenté la centrale SKT ainsi que tous ces systèmes électriques principaux et leur fonctionnement et nous avons vu la différence entre un cycle simple et un cycle combiné en citons les avantages de ce dernier et de quoi il est composé toute en expliquons le fonctionnement de la turbine à gaz (TG) et la turbine à vapeur (TV) ainsi que tout le cycle de vaporisation d'eau et sa condensation, et le plus important comment tout ces éléments fonctionne ensemble pour produire une force mécanique indispensable au générateur afin de produire de l'énergie électrique.

CHAPITRE II

*Les Systèmes D'excitation Des Alternateurs
Synchrones*

II.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude du système d'excitation des alternateurs synchrones. Avant d'aborder les éléments essentiels qui constituent un système d'excitation, nous allons discuter les exigences et nécessités pour le fonctionnement des systèmes d'excitations. Les différents types de systèmes d'excitations seront par la suite présentés suivant leurs utilisations. Le rôle et l'importance du système d'excitation est en principe la possibilité d'effectuer des opérations de commande. Les différents circuits de commande et de protection seront alors détaillés dans cette partie montrant alors l'utilité et la nécessité et le fonctionnement de chaque élément d'un système d'excitation, exciteuse, régulateur stabilisateur, compensateur, ...etc. Le système d'excitation est largement utilisé pour fournir des courants au bobinage synchrone du champ de la machine, ça aussi aide à contrôler la tension, le courant et la puissance réactive du flux du système, ce dernier améliore la stabilité pendant le démarrage des machines synchrones. En outre, dans un système d'alimentation, les fonctions de protection du système d'excitation permet d'améliorer les limites de capacité nominale de la machine synchrone [1]. Les composants principaux d'un système d'excitation sont : (Automatique régulateur de tension) (AVR) exciteuse, éléments de mesure, puissance stabilisateur de système (PSS) et unité de protection. [2]

Les grandes machines synchrones utilisent un système d'excitation sans brosses ou bien une exciteuse sans balais qui est un petit générateur alternatif à couplage direct avec son circuit d'excitation sur le stator et le circuit d'induit sur le rotor. La sortie triphasée du générateur à exciteuse AC est redressée par des redresseurs statiques et la sortie redressée est connectée directement à l'enroulement de champ, éliminant ainsi l'utilisation de brosses et de bagues collectrices, ce système d'excitation nécessite moins d'entretien en raison de l'absence de balais et de bagues collectrices ainsi la perte de puissance est également réduite.

II.2 Exigences d'un Système D'excitation :

Les exigences de performances d'un système d'excitation sont principalement déterminées par la génératrice synchrone et aussi le circuit d'alimentation. La condition de base est que le système d'excitation doit ajuster le courant de champ afin d'exciter la génératrice synchrone et maintenir la tension de sortie selon la consigne.

La fonction de base de l'excitation est alors de fournir un courant continu à l'enroulement de champ synchrone, ce qui aide à contrôler la tension, le courant électrique et la puissance réactive du flux du système. Il améliore aussi la stabilité pendant le démarrage des machines

synchrones. L'art des systèmes d'excitation pour machines synchrones est une ancienne discipline d'ingénierie. Son premier changement dramatique s'est produite dans les années 50 à la suite des progrès des dispositifs à semi-conducteurs de haute puissance. Cela a déclenché le remplacement de régulateurs électromécaniques rudimentaires, basés sur des commutateurs à courant continu, par des redresseurs commandés au silicium (SCR) et contrôleurs analogiques [3], [4]. Un autre changement de paradigme est arrivé dans les années 1980, lorsque les contrôleurs ont migré de technologie analogique-numérique [5][6]. Au cours des 20 dernières années, les évolutions de l'électronique de puissance et de la technologie sans fil ont apporté d'autres innovations et possibilités dans la région.

Pour remplir son rôle de manière satisfaisante, le système d'excitation doit répondre aux exigences suivantes [7] [8] :

- Respecter les critères souhaités du cahier de charge ;
- Fournir les limitations nécessaires afin d'assurer la protection de l'excitatrice elle même, de la génératrice, et des autres équipements (turbine, réseau, ...etc.) ;
- Respecter les exigences tout en assurant une flexibilité d'opération (régulation, stabilisation, ...etc.) ;
- Assurer la fiabilité et la validité des équipements.

Les machines synchrones bobinées sont préférées pour applications à haute puissance, en raison de :

- moins de refroidissement et un rendement élevé (généralement $\eta \geq 98\%$) ;
- haute fiabilité et robustesse ;
- régulation flexible du flux et capacité d'affaiblissement ;
- capacité à produire et à consommer du pouvoir réactif.

II.3 Eléments D'un Système D'excitation :

Le schéma suivant figure (II-1) représente les différentes parties et les éléments d'un système d'excitation appliqué pour les génératrices synchrones :

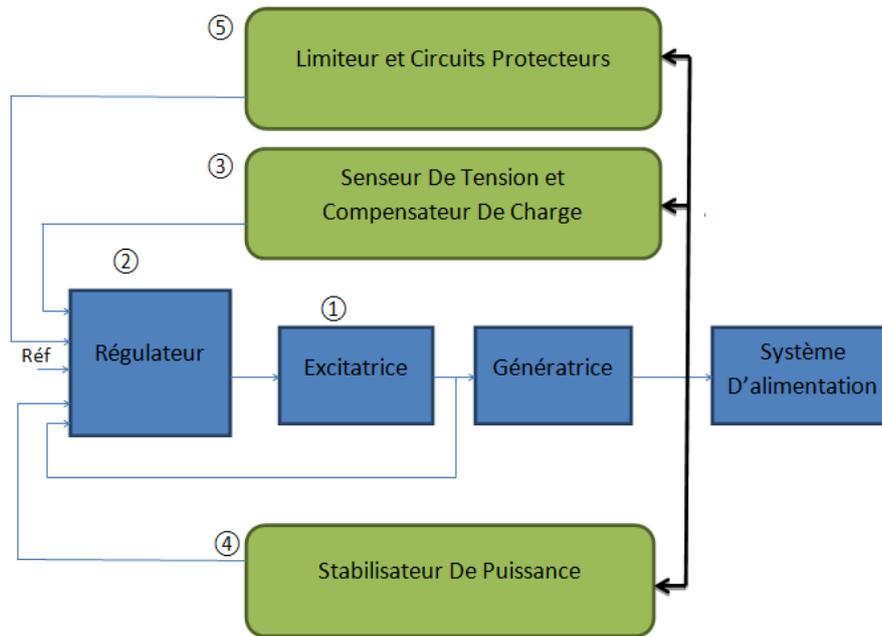


Figure II-1 : Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone [1].

- ✚ **L'excitatrice:** alimente le bobinage du générateur en courant continu ;
- ✚ **Le régulateur:** traite et amplifie les signaux de contrôle d'entrée à un niveau et à une forme appropriés pour le contrôle de l'excitateur ;
- ✚ **Le senseur de tension:** détecte la tension aux bornes du générateur, la redresse et la filtre en quantité continue et la compare à une référence; la charge peut être fournie si vous le souhaitez pour maintenir la tension à un point distant ;
- ✚ **Le compensateur de charge :** est un élément additionnel facultatif qui permet de conserver une tension constante en un point particulier distant des bornes de la machine ;
- ✚ **Stabilisateur de puissance:** fournit un signal d'entrée supplémentaire au régulateur pour atténuer les oscillations du système d'alimentation ;
- ✚ **Limiteurs et circuits de protection:** s'assurer que les limites de capacité de l'excitatrice et du générateur ne sont pas dépassées.

II.4 Différents Types de Système D'excitation :

Les systèmes d'excitation sont classés en trois grandes catégories en fonction de la source d'excitation:

- Systèmes d'excitation à courant continu (DC) ;
- Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC) ;
- Systèmes d'excitation statique.

Ces différents types d'excitation seront décrits, suivant leur forme et leur structure générale.

II.4.1 Système d'excitation à courant continu (DC) :

Ce système d'excitation utilise les générateurs à courant continu comme source de puissance d'excitation, comme il fournit également du courant au rotor de la machine synchrone par bague collectrice. L'excitateur peut être entraîné par un moteur ou par l'arbre d'un générateur. Il peut être soit auto-excité, soit excité séparément. Lorsqu'il est excité séparément, le courant d'excitation est fourni par un excitateur pilote comprenant un générateur à aimant permanent. Ils représentent les premiers systèmes des années 1920 aux années 1960; il a perdu sa faveur au milieu des années 1960 à cause de sa grande taille; a été remplacé par excitateurs (AC), ou l'excitatrice statique (ST).

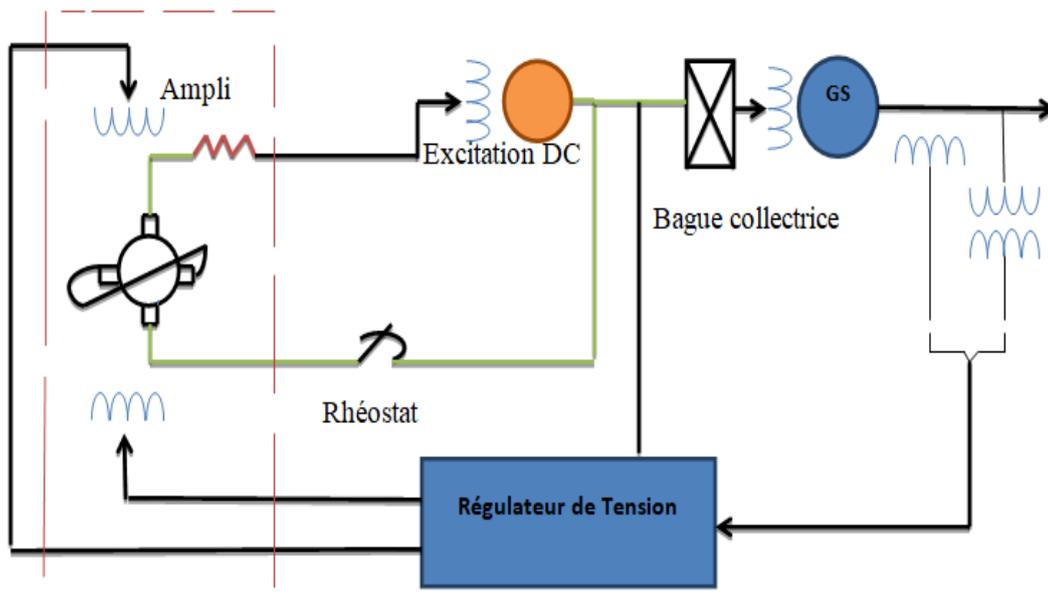


Figure II-2 :Système d'excitation de type DC.

II.4.2 Système d'excitation à courant alternatif (AC) :

Ces systèmes d'excitation utilisent les alternateurs comme source de puissance d'excitation du générateur. Habituellement, l'excitatrice est maintenue sur le même arbre que le générateur à

turbine. La sortie (AC) de l'excitateur est corrigée soit par contrôle, soit par redresseurs à diodes pour produire le courant continu nécessaire pour le champ générateur. Les redresseurs peuvent être fixes ou tournant.

Les systèmes d'excitation (AC) peuvent prendre plusieurs formes selon le redresseur, la méthode de contrôle de la sortie de l'excitateur, et source d'excitation pour l'excitateur. Actuellement, les redresseurs stationnaires alternatifs et rotatifs sont largement utilisés dans les systèmes d'excitation (AC). Dans les redresseurs fixes, la sortie (DC) est alimentée vers le site d'enroulement du générateur à travers les bagues collectrices. D'autre part, dans les redresseurs en rotation, il n'est pas nécessaire de bagues et pinceaux (brushes).

L'alimentation en courant continu alimente directement le champ générateur en tant qu'armature de l'excitatrice et des redresseurs pivotent avec le champ générateur. Ces systèmes sont connus sous le nom des systèmes sans brosse et ont été développés pour éviter les problèmes avec des brosses lorsque des courants de champ extrêmement élevés sont appliqués aux grands générateurs [9].

Les figures (II-3) et (II-4) montrent l'excitatrice de type (AC) muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement.

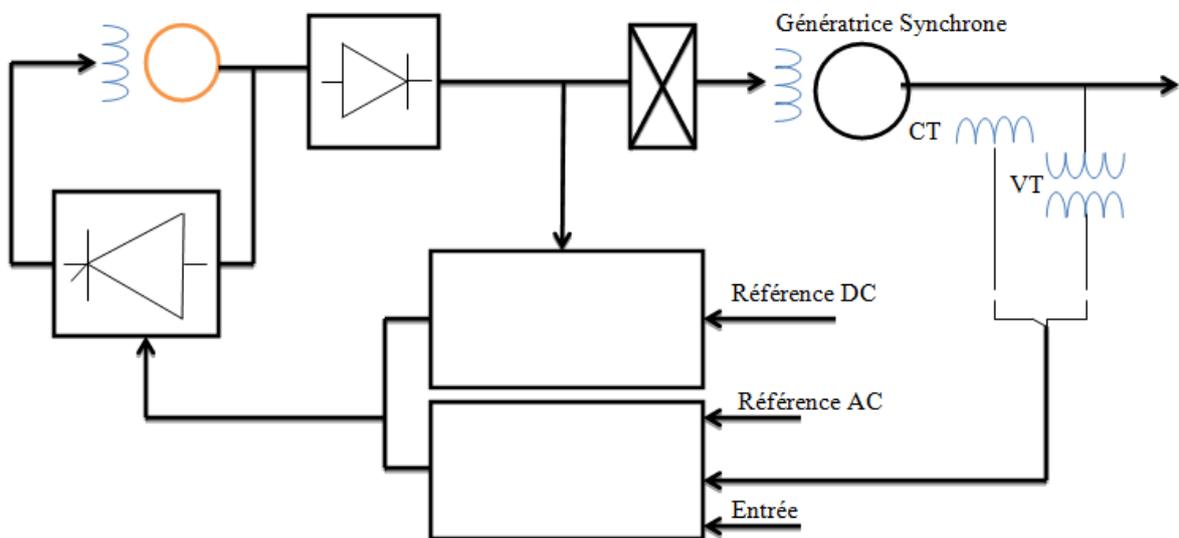


Figure II-3 : Excitations type AC avec redresseur non commandé.

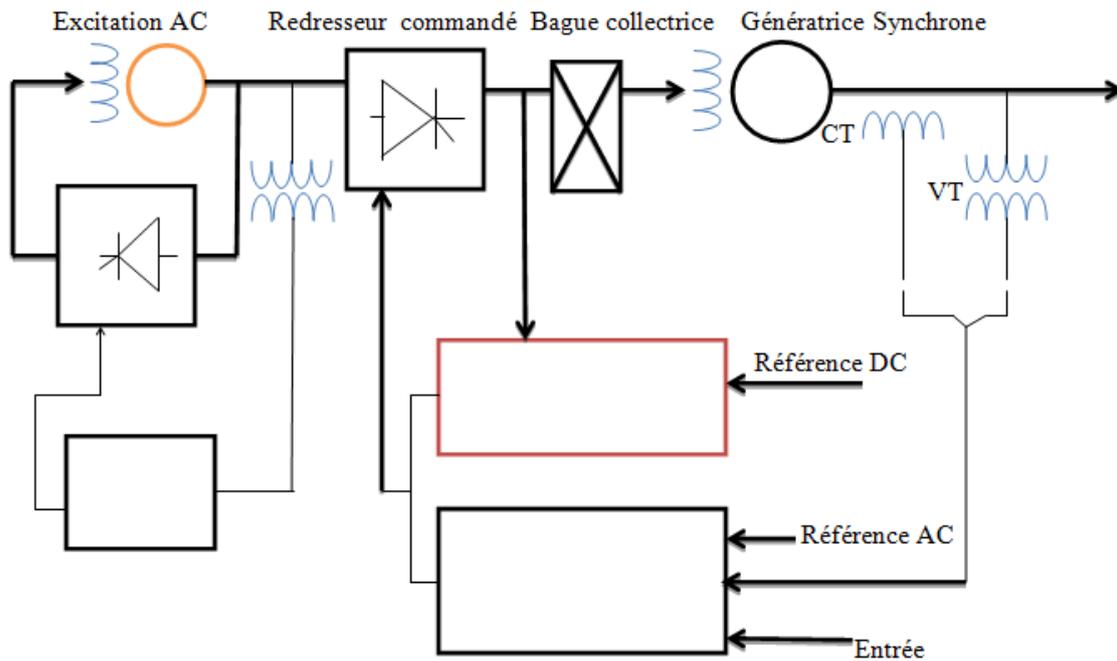


Figure II-4 : Excitations type AC avec redresseur commandé.

II.4.3d'excitation statique :

Tous les composants de ces systèmes sont statiques ou stationnaires. Ces systèmes fournissent directement un enroulement de champ de générateur synchrone avec un courant d'excitation au moyen de bagues collectrices, les redresseurs aux systèmes d'excitation statique (ST) gagnent la puissance du générateur par le biais d'auxiliaire d'enroulements ou d'un transformateur abaisseur. Dans de tels systèmes, un générateur est une source s'il est auto-excité. Comme le générateur ne peut produire aucune tension et sans tension d'excitation, le générateur doit avoir une source d'alimentation auxiliaire pour fournir un courant de champ et alimenter le générateur [10]. Du point de vue de la puissance d'excitation, les systèmes d'excitation peuvent être divisés en indépendants et dépendants systèmes d'excitation.

L'excitateur indépendant n'est pas connecté à la grille. Ainsi, ses paramètres d'excitation n'ont pas d'effet direct avec les paramètres de la grille [10]. L'excitateur dépendant utilise soit une partie de la puissance du générateur, soit elle est connectée à la grille. Ses paramètres d'excitation dépendent de l'adhérence des paramètres. Cependant il existe trois types d'excitation statique :

- avec redresseur commandé à source de tension ;
- avec redresseur non commandé à source combinée ;
- avec redresseur commandé à source combinée.

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension est la plus utilisée des trois, voici énumérés quelques-unes de ses caractéristiques :

- Pas de partie tournante à part la machine ;
- Utilisation d'un générateur de tension aux bornes, d'un autotransformateur d'excitation et d'un pont de thyristor pour le redressement de la tension AC d'entrée ;
- Moins coûteuse et facile à entretenir

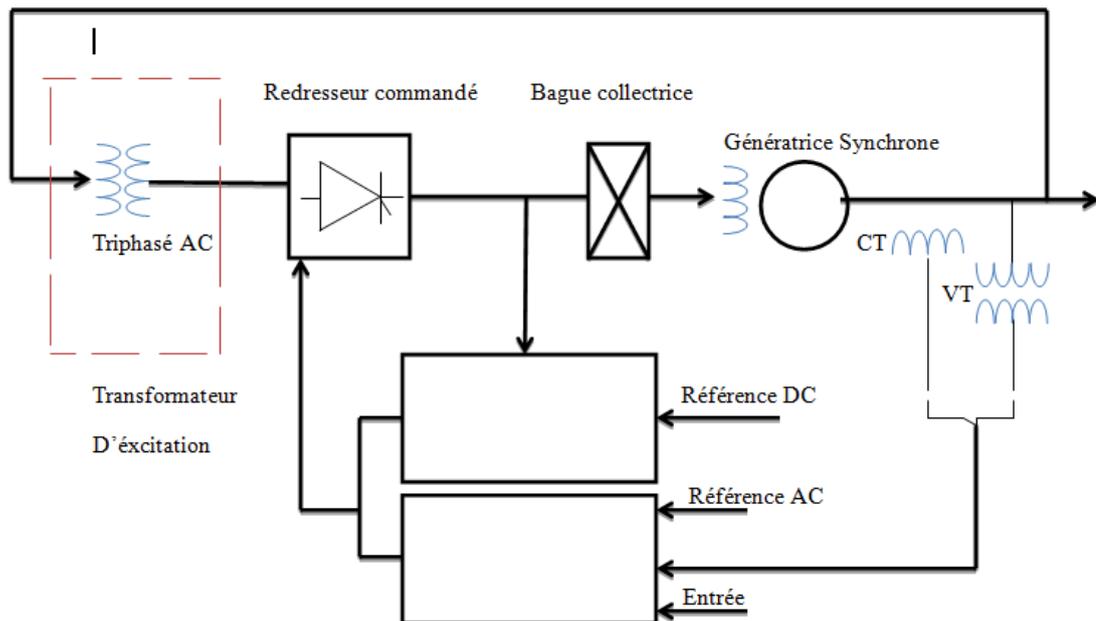


Figure II-5 : Excitatrices statique par redresseur commandé à source de tension.

II.5 Systèmes de Démarrage Statique :

Pour démarrer les moteurs électriques et contrôler leur vitesse, les démarreurs rhéostatiques les variateurs mécaniques et les groupes tournants (Ward Leonard en particulier) ont été les premières solutions, puis les démarreurs et variateurs statiques se sont imposés dans l'industrie comme la solution moderne, économique, fiable et sans entretien. [11]

Le Système statique de démarrage (SSD) est utilisé uniquement pour démarrer et lancer la turbine gaz qui sera allumée après avoir atteint environ sa vitesse nominale, lors du démarrage de la TG, le disjoncteur de l'alternateur est ouvert. [12]

Pour lancer la TG, l'alternateur est utilisé en moteur synchrone et alimenté via le SSD par le transformateur lui-même alimenté par le réseau HT à travers le transformateur principal. Pendant la phase de démarrage en moteur synchrone, la tension fournie au stator de l'alternateur est d'abord redressée et ensuite transformée en tension triphasée à fréquence variable par le démarreur statique. Le système de démarrage de l'excitation fournit le courant

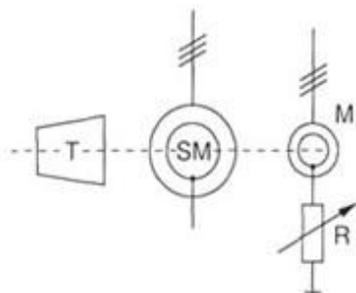
continu aux enroulements d'excitation du rotor, produisant ainsi le champ magnétique, qui permet au rotor de l'alternateur de tourner. [12]

II.5.1 Méthodes de Démarrage :

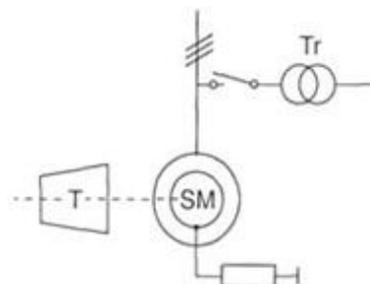
Pendant le démarrage, la commande de turbine transmet à la commande d'exécution et les signaux de point de consigne de la vitesse. Le démarreur statique actionne le convertisseur d'alimentation en mode de boucle fermée afin de fournir l'intensité à fréquence variable au stator de l'alternateur. En contrôlant la tension d'excitation de l'alternateur et l'intensité du stator, le démarreur statique peut ajuster le couple produit par l'alternateur et contrôler l'accélération et la vitesse de l'ensemble turbine-alternateur. Au cours du démarrage, le point de consigne de la tension d'excitation est fourni par la commande afin de réguler la tension aux bornes du stator de l'alternateur.

La figure(II-6)donne une vue d'ensemble des différentes méthodes de démarrage. Pour le démarrage d'un turbogénérateur à gaz, la solution (e) (démarrage avec un système de démarrage statique) est la plus appropriée du point de vue de l'efficacité et de la consommation électrique. Ce type de dispositif est communément utilisé dans les grands alternateurs de turbine à gaz. [12]

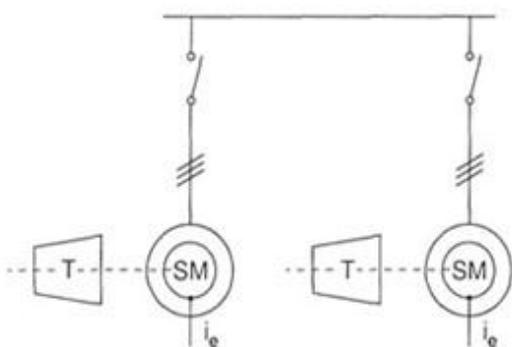
a: Démarrage avec moteur à démarrage



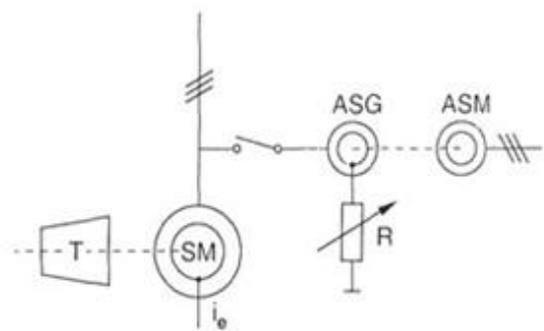
b: Démarrage avec transformateur ou direct



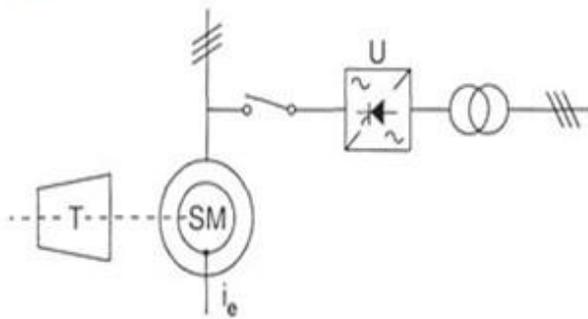
c: Démarrage à fréquence avec machine auxiliaire synchrone



d: démarrage à fréquence avec générateur asynchrone disposition à (UNGER)



g: Démarrage à fréquence avec convertisseur de fréquence statique (convertisseur statique de démarrage)



- ASG= Générateur Asynchrone
- ASM = Moteur Asynchrone
- M= Moteur à démarreur
- R= Résistance variable
- SM= Machine synchrone
- T= Turbine
- Tr= Transformateur de démarrage
- U= Convertisseur de fréquence
- I_e = courant d'excitation

Figure II-6 :Méthodes de Démarrage.

II.5.2 Rôle du Système Statique de Démarrage au Démarrage :

Son rôle est de fournir de l'électricité soit grâce au réseau à haute tension (HT) ou bien grâce à un alternateur à moteur diesel raccordé au bus auxiliaire, il convertit la tension et la fréquence d'alimentation constantes en une tension et une fréquence variables (en fonction de la vitesse de l'accélération du turbogénérateur) fournies à l'enroulement du stator de l'alternateur, fournit aussi un courant d'excitation de démarrage continu à l'enroulement du rotor de l'alternateur ;Finalement il utilise donc l'alternateur comme un moteur synchrone pendant la période de démarrage.

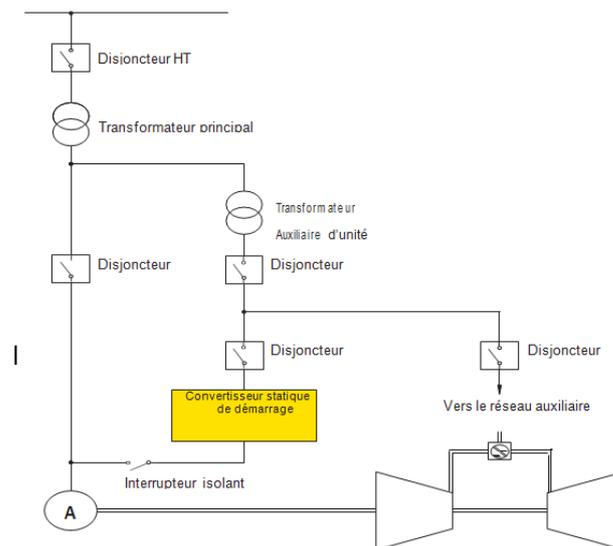


Figure II-7Schéma UnifilaireSystème de Démarrage Statique.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présentés les différents systèmes d'excitation, avec un aperçu de ses configurations largement utilisées. Comme montré, il y a beaucoup d'options disponibles et la sélection de l'architecture du système dépend fortement de l'application. Les excitateurs statiques classiques sont toujours préférés pour les grands générateurs MVA, mais de nouveaux excitateurs sans balais sont maintenant introduits dans cette concurrence. Les excitateurs sans balais conventionnels sont dominants pour les petites machines synchrones, mais l'harmonique intégré d'excitateurs favorisent des solutions plus compactes.

CHAPITRE III

*Etude Du Système D'excitation et Simulation
D'alternateur Synchrone*

III.1 Introduction :

Un alternateur est un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant alternatif pour des raisons de coût et de simplicité, la plupart des alternateurs utilisent un champ magnétique rotatif avec un induit fixe, parfois un alternateur linéaire ou un induit rotatif avec un champ magnétique fixe. En principe, tout générateur électrique à courant alternatif peut être appelé alternateur, mais le terme désigne généralement de petites machines tournantes entraînées par des moteurs automobiles et autres moteurs à combustion interne. Un alternateur qui utilise un aimant permanent pour son champ magnétique est appelé magnéto. Les alternateurs dans les centrales électriques entraînées par des turbines à vapeur sont appelés turbo-alternateurs.

Les grands alternateurs triphasés 50 ou 60 Hz des centrales électriques produisent la majeure partie de l'énergie électrique mondiale, qui est distribuée par les réseaux électriques.

III.2 Principe De Fonctionnement :

Le rotor est un aimant qui crée un champ magnétique rotatif dans la machine grâce à l'excitation de l'enroulement de champ, ce dernier étant souvent appelé l'enroulement du rotor pour faciliter la compréhension. Il est nécessaire d'ajuster l'intensité du champ magnétique en fonction de la charge électrique du l'alternateur pour maintenir la synchronisation entre l'alternateur et le réseau et pour que la tension de l'alternateur et la puissance réactive fournie au réseau soient comprises dans des limites définies. Pour cela, un courant direct (appelé courant d'excitation) doit passer dans l'enroulement de champ du rotor. Le courant d'excitation est à son tour contrôlé par l'équipement de régulation automatique de tension (automatique voltage régulation, AVR) qui commande la tension aux bornes d'alternateur et le flux de puissance réactive vers le réseau. [13]

III.3 Types Des Alternateurs :

III.3.1 Alternateur à Rotor à Pôles Saillants :

A des pièces polaires en saillie. Chaque pôle est équipé d'un enroulement de champ concentré. La partie avant de l'arbre on a deux bagues de prise de courant. Ce rotor est employé dans les machines à vitesse réduite de l'ordre de 1000 à 1500 tr/mn.

- Ce type d'alternateur est en général utilisé dans les centrales hydroélectriques.

III.3.2 Alternateur à Rotor à Pôles non Saillants (Lisses) :

En général appelé turbo-alternateur, est équipé d'un rotor cylindrique régulier. L'enroulement de champ est placé dans des fentes réparties sur une zone spécifique de la circonférence du rotor. Il est employé dans les machines à grande vitesse de l'ordre de 1500 à 3000 tr/min.

- Ce type d'alternateur est surtout utilisé dans les centrales électriques thermiques.

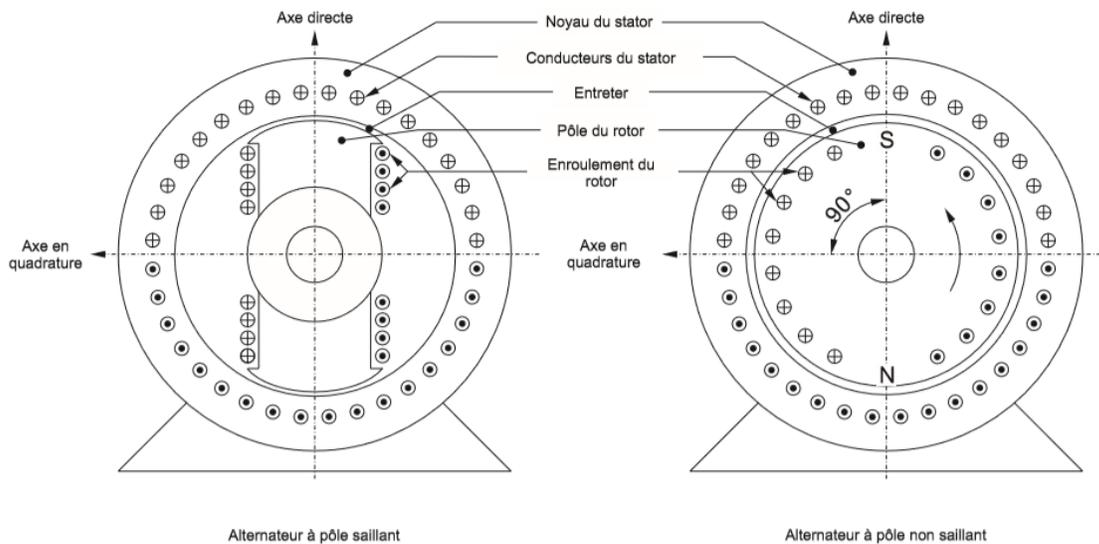


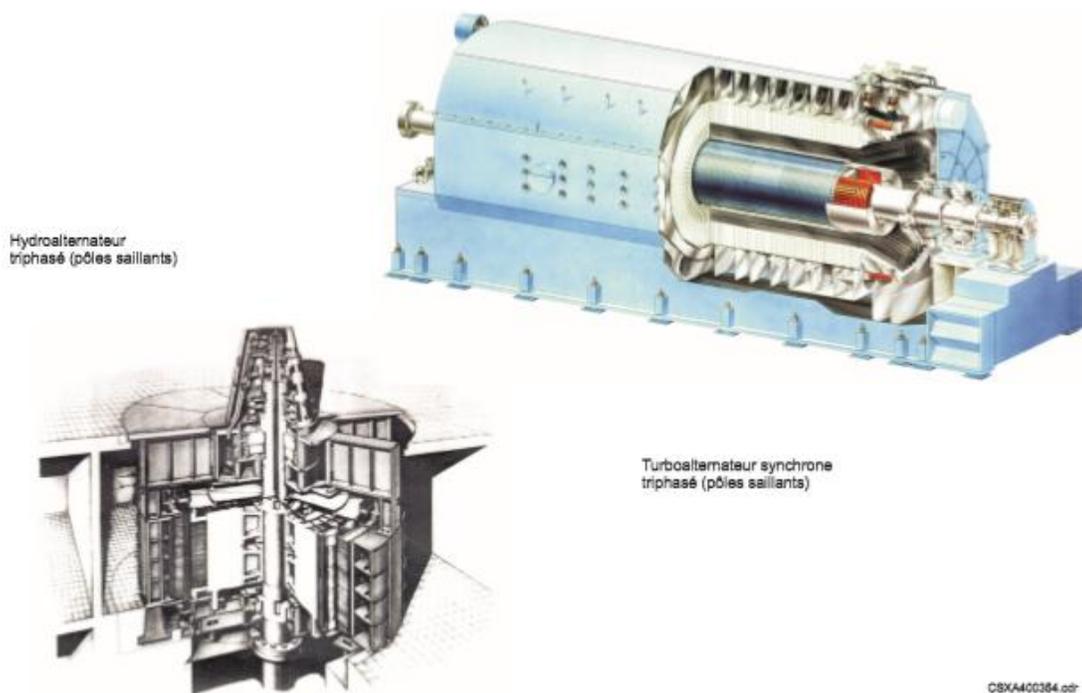
Figure III-I : Types Des Alternateurs.

❖ Dans la centrale « SKT » l'alternateur utilise est L'Alternateur synchrone.

III.4 Présentation De L'alternateur Synchrone :

L'alternateur synchrone est la principale machine utilisée pour produire de l'énergie électrique, et cela pour les raisons suivantes:

- La tension de sortie ou la puissance réactive peuvent être contrôlées par un courant CC variable appliqué à la machine par une unité de commande, le régulateur automatique de tension;
- Lors du fonctionnement parallèle avec le réseau, les puissances active et réactive peuvent être réglées indépendamment l'une de l'autre sur une large plage.



FigureIII-2 : Alternateur Synchrone.

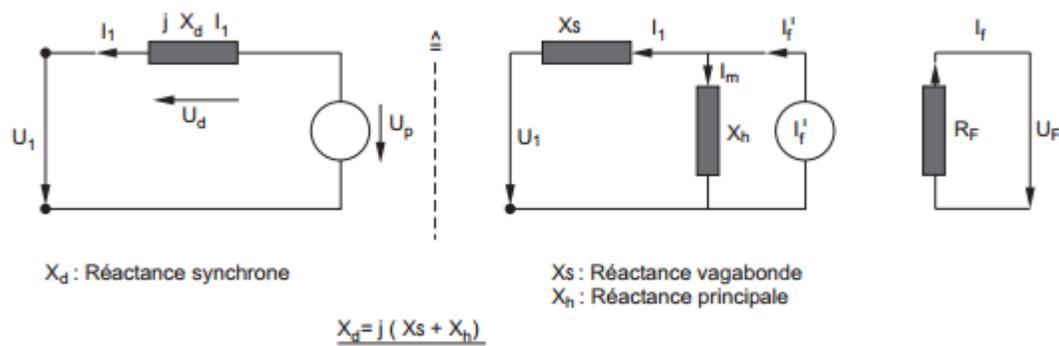


Figure III-3 : Schéma Équivalent et Diagramme Vectoriel D' Alternateur Synchrone.

III.5 Principe De Fonctionnement :

III.5.1 Création De Forces Électromotrices Triphasées :

La conversion électromécanique s'opère par interaction entre un champ magnétique inducteur et des conducteurs, aux bornes desquels apparaît une force électromotrice induite. En effet, si l'on place une bobine de N spires dans un flux variable, elle est le siège d'une force électromotrice $e(t) = -N \cdot d\varphi(t)/dt$. Si le bobinage du stator est triphasé, on obtient trois forces électromotrices induites déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle $2\pi/3$, si le flux magnétique est sinusoïdal, la force électromotrice l'est aussi. Elle a comme valeur efficace : [14]

$$E = K_b \cdot N_c \cdot f \cdot \varphi$$

K_b : Facteur de bobinage

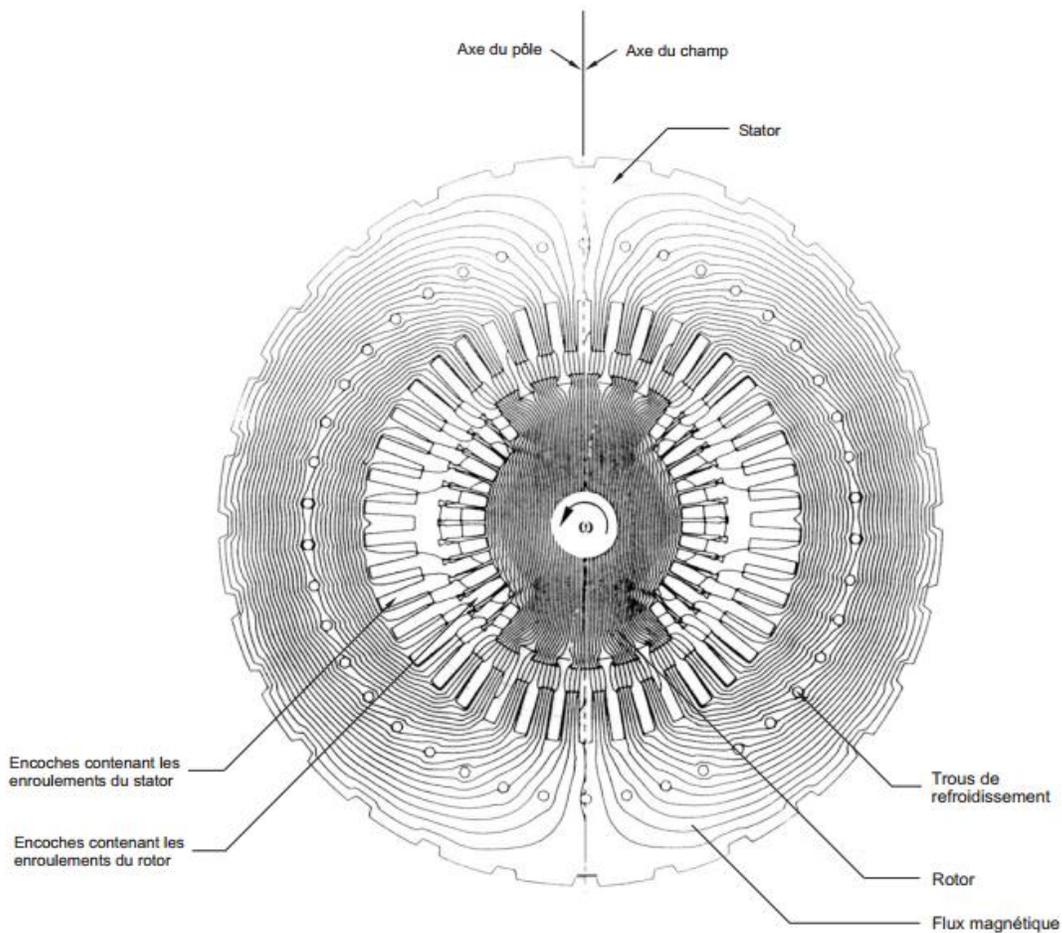
N_c : Nombre des conducteurs par phase

III.5.2 Fonctionnement à Vide :

En marche à vide, le courant statorique d'un alternateur est nul. L'arbre de la machine représenté en traits interrompus est accouplé à un moteur qui l'entraîne en rotation avec une vitesse constante n . L'intensité du courant d'excitation I alimentant le circuit de rotor depuis une source extérieure à courant continu peut être réglée dans les limites de zéro à

une certaine valeur maximale. Cela permet de faire varier le flux magnétique inducteur dans la large limite, c'est-à-dire d'obtenir les valeurs différentes de la F.E.M du stator, parce que cette F.E.M est proportionnelle au flux magnétique du rotor, cherchons la variation de la F.E.M en fonction du courant d'excitation en marche à vide lorsque le circuit du stator est ouvert

On donne aux épanouissements polaires du rotor une forme telle que la répartition du flux magnétique suit la circonférence du stator de la machine soit aussi voisine que possible d'une répartition sinusoïdale. [14]



FigureIII-4 : Champ Magnétique Dans un Alternateur sans Charge.

III.5.3 Fonctionnement En Charge :

Lorsque des courants triphasés équilibrés parcourent l'induit, ils engendrent (théorème de Ferrarais) une induction tournante à p paires de pôles, dont la vitesse N est égale à celle du rotor

On aura donc simultanément dans une machine synchrone deux inductions Tournantes, à la vitesse N :

- L'induction B_R créée par l'inducteur tournant;
- L'induction B_s engendrée par le stator. Le décalage angulaire entre ces deux inductions dépend du déphasage entre la F.é.m. induite E et le courant d'induit I dans une phase. Si E et I sont déphasés de Ψ , le décalage, en angle électrique, de B_R et B_s est $(2\pi + \Psi)$.

En effet, nous avons vu que l'induction B était dans l'axe d'une bobine quand le courant y était maximum alors que la f.é.m. était maximale quand l'induction B était normale à l'axe. [14;15]

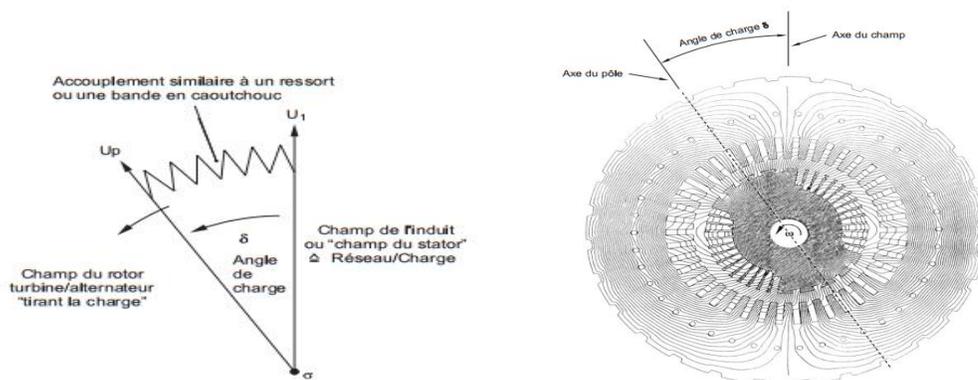


Figure III-5 : Champ Magnétique Dans un Alternateur avec Charge.

III.6 Système D'excitation D'alternateur Synchrone :

L'excitation de l'alternateur synchrone est faite au niveau du rotor pour cela il existe deux façons de transporter le courant dans les enroulements du rotor :

- système d'excitation sans balais;
- système d'excitation statique.

III.7 Théorie De Base Des Systèmes D'excitation :

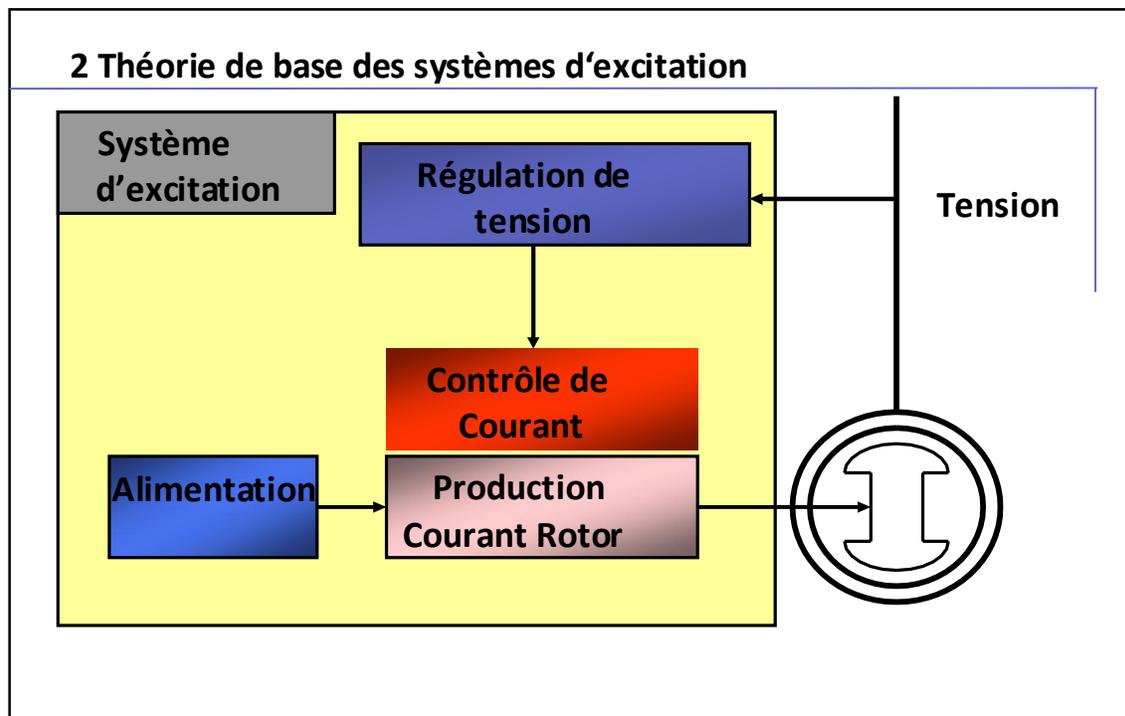


Figure III-6 : Principe Générant la Production de la Tension.

III.8 Excitation Sans Balais :

III.8.1 Construction Et Principe De Fonctionnement D'un Système D'excitation Sans Balais :

Lorsqu'un système d'excitation est utilisé, le courant de champ réel est produit par une excitatrice:

- Une machine à induit couplée à l'arbre de l'alternateur (induit: partie de la machine dans laquelle la tension est induite);
- L'excitatrice à un enroulement triphasé dans le rotor et un enroulement à champ CC dans le stator;
- La tension induite et le courant dans le rotor sont rectifiés par des diodes rotatives (également sur le rotor) et le courant CC obtenu est conduit dans l'enroulement de champ de l'alternateur principal.

Le système d'excitation (régulateur automatique de tension) alimente l'enroulement de champ stationnaire de l'excitatrice. Le régulateur peut être alimenté : soit par les bornes de l'alternateur (via un transformateur d'excitation); soit par une excitatrice pilote (alternateur permanent) située à l'extrémité de l'arbre de l'alternateur, la tension de la borne est donc indirectement régulée.

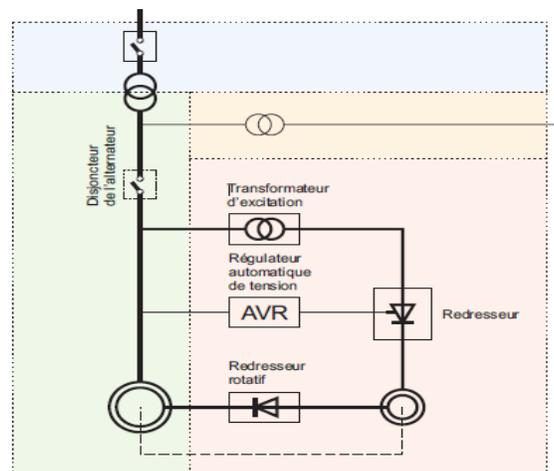


Figure III-7 : Schéma de Système D'excitation sans Balais.

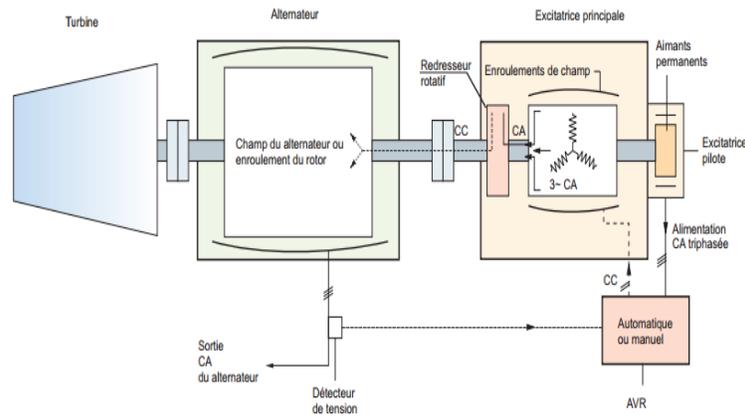


Figure III-8 : Principaux Composants D'un Système D'excitation sans Balais.

III.9 Excitation Statique :

➤ Principe De Fonctionnement :

Dans ce cas, le courant de champ est fourni à l'enroulement du rotor par un système d'excitation statique par l'intermédiaire de dispositifs à balais et bagues collectrices; l'excitation est en général „fournie par shunt“, c'est-à-dire par le transformateur d'excitation à partir de ses propres bornes d'alternateur; le redresseur est composé d'un ou plusieurs ponts à thyristor (en parallèle). D'où son nom: statique, sans pièces mobiles; Le système d'excitation statique dispose d'une caractéristique de réponse dynamique plus performante que le système d'excitation sans balais et la tension plafond requise pour le rotor de l'alternateur est déterminée par le rapport du transformateur d'excitation qui a une influence sur le temps de réponse du système d'excitation.

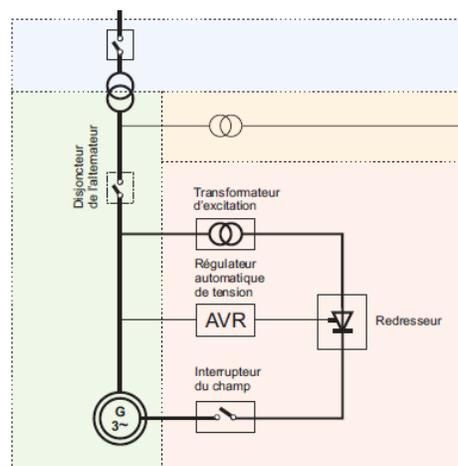


Figure III-9 : Schéma De Système D'excitation Statique.

III.10 Composants Electriques-Electroniques :

Le système d'excitation statique comprend principalement les blocs fonctionnels suivants, chacun de ces blocs faisant l'objet d'une brève description.

- Convertisseur;
- Puce électronique à impulsion et de régulation;
- Dispositif de décharge de champ;
- Transformateur convertisseur.

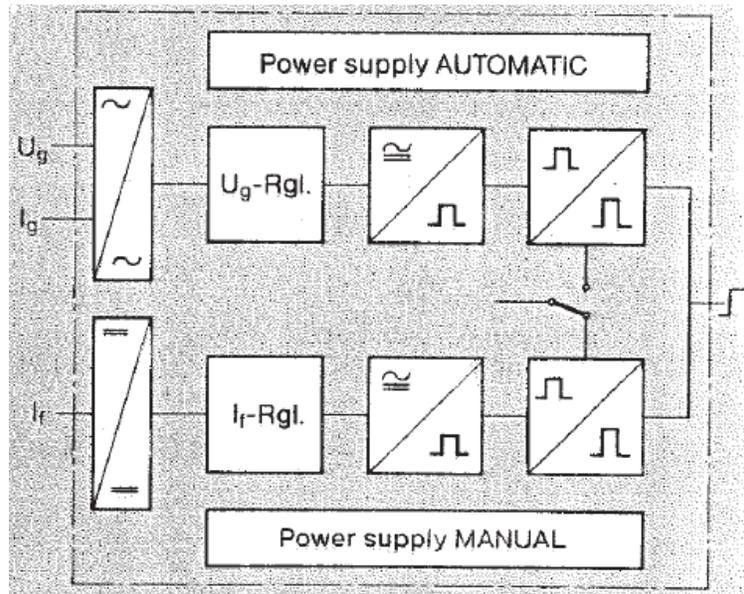


Figure III-10 : Schéma Simplifié D'un Système D'excitation Statique avec Électronique.

III.10.1 Bloc Convertisseur :

Le bloc convertisseur convertit la tension CA prélevée au niveau des bornes de l'alternateur en une tension CC pouvant être contrôlée. Une baisse rapide du flux de la machine est obtenue grâce à l'inversion de la tension de champ avec les convertisseurs contrôlés (6 thyristors). Dans le cas très improbable d'une panne du thyristor, le fonctionnement est garanti par l'utilisation de convertisseurs redondants.

Dans les conditions de charge nominale, des réserves de fonctionnement suffisantes sont disponibles, car les causes de défaillances sont prises en compte lors de la détermination du nombre et du type de thyristors à utiliser.

III.10.2 Bloc Électronique De Commande Et à Impulsions :

Ce bloc génère les impulsions nécessaires pour faire fonctionner les thyristors et les déplacer en fonction du signal de sortie du régulateur.

La caractéristique de commande du régulateur de tension empêche l'établissement d'oscillations de grande ampleur.

En cas de défauts ou d'interférences incorrectes, les régulateurs de limitation augmentent la disponibilité de l'alternateur en ramenant sa condition de charge dans la plage de fonctionnement autorisée avant que les relais de protection ne puissent être activés.

III.10.3 Bloc Dispositif De Décharge De Champ :

Ce bloc déconnecte l'enroulement de champ de la source du courant et convertit rapidement l'énergie de champ en chaleur en cas de perturbation. Un disjoncteur de champ avec un contact de décharge connecte la résistance de suppression du champ. Dans les dispositifs les plus récents, la résistance de suppression est raccordée au circuit de l'enroulement de champ par un thyristor.

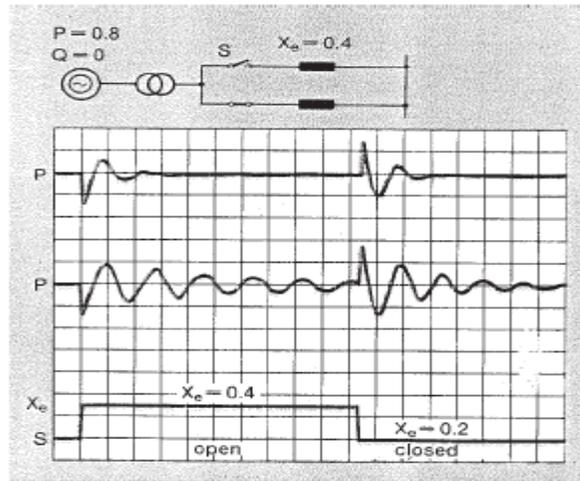
III.10.4 Bloc Transformateur Convertisseur :

Ce bloc transforme la tension d'alimentation existante au niveau déterminé par l'alternateur. La réactance de fuite du transformateur, soigneusement sélectionnée, prévient les risques d'augmentation excessive du courant qui pourrait endommager les thyristors. Un enroulement écran mis à la terre entre les bobines de haute et basse tension ou des condensateurs côté basse tension réduisent significativement la transmission capacitive des surtensions.

Chaque bloc fonctionnel est complété par un équipement de surveillance et de protection ainsi que par un système de commande binaire qui détecte et transmet les informations internes et externes ainsi que des commandes. Le système d'excitation statique est ainsi protégé de manière interne et peut être commandé manuellement en toute sécurité.

Le stabilisateur du système de puissance atténue avec efficacité les oscillations de la puissance et élargit la plage de fonctionnement sous-excité. L'influence du courant réactif sur la mesure de la tension permet un fonctionnement parallèle stable avec le réseau. Des impulsions haute puissance avec bords d'attaque courts garantissent l'allumage simultané des thyristors parallèles.

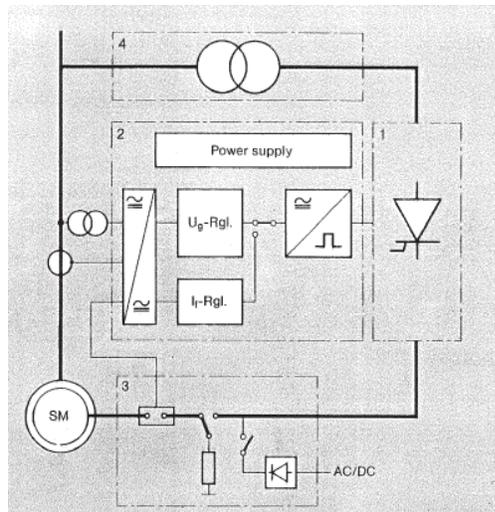
Courbe du haut: avec stabilisateur
 Courbe du bas: sans stabilisateur



FigureIII-11 : Amortissement des oscillations de charge active grâce à la stabilisation de l'alimentation électrique.

La commande manuelle permet le fonctionnement en veille et est utile pour les essais et les travaux de service.

Une construction à double canal (extension de la commande manuelle avec un deuxième niveau à impulsions et packs de puissance séparés) augmente la disponibilité du système.



FigureIII-12 : Électronique à Impulsions Double Canal Pour Une Disponibilité Accrue.

III.11 Système de Refroidissement D'alternateur Synchrone :

- ❖ Dans la central «SKT » le gaz hydrogène est un média très efficace pour l'évacuation de la chaleur et est donc fréquemment utilisé pour refroidir des alternateurs de grande taille. Une unité de gaz standard est utilisée sur tous les alternateurs Alstom refroidis à l'hydrogène.

III.11.1 Le Refroidissement à L'hydrogène :

Le rôle de l'hydrogène est d'assurer le refroidissement du rotor ; du circuit magnétique du stator et des organes frontaux de serrages de l'alternateur.

L'hydrogène a été choisi pour ses propriétés physiques supérieures à l'air.

- Sa densité est quatorze fois inférieure;
- Sa conductivité thermique est sept fois supérieure;
- L'hydrogène limite le vieillissement des isolants car il empêche la formation d'ozone.

III.12 Équipements De Refroidissement :

Lors du refroidissement normal, le corps de l'alternateur est rempli d'hydrogène à une pression spécifique. L'H₂ gazeux circule dans le corps de l'alternateur et les composants grâce à des ventilateurs axiaux et radiaux.

Le ventilateur fournit alternativement le gaz de refroidissement pour l'enroulement du rotor et du noyau du stator, et pour les enroulements du stator (refroidis indirectement).

La chaleur absorbée par l'H₂ est évacuée et le gaz chaud traverse les refroidisseurs H₂. Le gaz chaud sortant du noyau passe par les conduits du carter dans le corps, qui le conduit vers les refroidisseurs H₂ d'où il est ensuite retourné vers les ventilateurs axiaux. Le flux d'eau de refroidissement vers les refroidisseurs est régulé pour maintenir une température des gaz froide constante, normalement comprise entre 40 et 46 °C (104 - 115 °F), indépendamment de la charge ou des conditions extérieures.

III.13 Processus De Remplissage :

Lorsque le système d'huile d'étanchéité de l'alternateur fonctionne et que les extrémités de l'arbre sont étanchées, le processus de remplissage de l'alternateur avec le gaz de refroidissement peut démarrer. Pour éviter la formation de mélanges gazeux explosifs, le remplissage est réalisé en trois étapes:

- L'air (dans l'alternateur) est purgé avec du CO₂;
- Le CO₂ est ensuite purgé avec H₂;
- La pression H₂ est augmentée jusqu'à la pression de fonctionnement nominale.

III.14 Processus De Décharge :

Pour décharger (évacuer) l'alternateur - par exemple pour des opérations de maintenance dans l'alternateur ou sur les joints d'arbre - les étapes du processus de remplissage doivent être effectuées dans l'ordre inverse:

- L'alternateur est dépressurisé, H₂ est rejeté dans l'atmosphère;
- H₂ est purgé avec du CO₂ (le CO₂ entre par le bas, H₂ sort par le haut de l'alternateur);
- Le CO₂ est également purgé (CO₂ déplacé par l'air, en commençant par le haut);
- le CO₂ doit être entièrement déplacé avant que des personnes n'entrent dans l'alternateur car le CO₂ reste en bas et déplace l'air respirable.

III.15 Veines De Refroidissement De L'hydrogène :

Le ventilateur fournit du gaz H₂ aux 3 veines séparées de refroidissement principales, chacune d'elle étant décrite par la suite.

Noyau du stator et enroulement: Le gaz traverse les conduits dans le noyau et rassemble la chaleur générée directement par le noyau et indirectement par l'enroulement du stator;

- Enroulements d'extrémité du stator: Les enroulements d'extrémité et les composants associés dans la zone sont refroidis pour prélever la chaleur générée lors des distorsions dans le champ de flux magnétique de cette zone;
- Rotor de l'alternateur: Cette veine possède deux circuits de refroidissement. L'un refroidit directement les enroulements du rotor creux et les cales. Le gaz s'écoule via les enroulements le long du rotor et est évacué uniformément près des portions centrales du rotor.
- Le gaz chaud se mélange avec le gaz plus froid qui circule le long de l'entrefer et est dirigé via le noyau du stator pour un refroidissement accru avant de revenir vers les refroidisseurs. Le deuxième circuit refroidit la bague de retenue et les enroulements d'extrémité situés au niveau de chaque extrémité du rotor.

III.16 Inspection Du Circuit D'hydrogène :

- **Moyens De Contrôle :**

Pour le contrôle étanchéité des circuits d'hydrogène des alternateurs on utilise le plus souvent des détecteurs de fuites sélectifs à l'hydrogène. De plus pour des raisons de sécurité il est préférable d'utiliser des équipements certifiés, approuvés pour une utilisation en zone 0.

- **Les Éléments à Contrôler :**

Si la carcasse et les paliers sont conçus pour être étanches au gaz d'autres éléments peuvent présenter des défauts d'étanchéité. Pour cela en vérifie :

- **Le Circuit D'alimentation En Hydrogène De L'alternateur :**

L'alternateur est alimenté avec de l'hydrogène pur à 99% sous une pression de 3.5 bars en moyenne avec un débit de $45m^3/sec$.Dans ces conditions la moindre fuite peut engendrer des pertes importantes en hydrogène, il est donc important de vérifier l'ensemble des vannes. L'étanchéité des brides est également à vérifier avec soin au niveau de la station de remplissage de l'alternateur.

➤ **L'étanchéité De L'arbre :**

L'étanchéité au niveau de l'arbre est assurée par un système d'anneau comportant une gorge dans laquelle sont logées deux bagues composées chacune de quatre segments. L'huile arrive sous pression, traverse les jeux entre les bagues et l'arbre et s'échappe en deux flux de part et d'autre du joint, séparant la partie H₂ et la partie en air. Le débit d'huile côté H₂ est récupéré et dégazé par pulvérisation sous vide. L'étanchéité des brides à cet endroit de l'alternateur doit être vérifiée avec grand soin afin d'éviter les rejets d'hydrogène à l'extérieur de la machine. Pour ce faire chaque raccord et chaque boulon doit être soigneusement contrôlé.

➤ **Les Zones De Réfrigération Du Gaz :**

La réfrigération de l'hydrogène est assurée par quatre réfrigérants internes à la machine, alimentés en eau. Dans cette zone c'est le serrage de l'interface H₂/eau qui doit être soigneusement contrôlé.

III.17 Simulation de La Machine Synchrone :

III.17.1 Machine Synchrone :

La machine synchrone est une machine réversible de conversion électromécanique. On la rencontre dans de nombreux dispositifs de conversion d'énergie aussi bien en :

- Production d'énergie électrique à partir d'énergie mécanique où elle porte le nom de génératrice synchrone lorsque la vitesse est variable (exemple éolien) ou d'alternateur lorsque sa vitesse est fixe (exemple centrale thermique),
- Production d'énergie mécanique à partir d'énergie électrique où elle porte le nom de moteur synchrone.

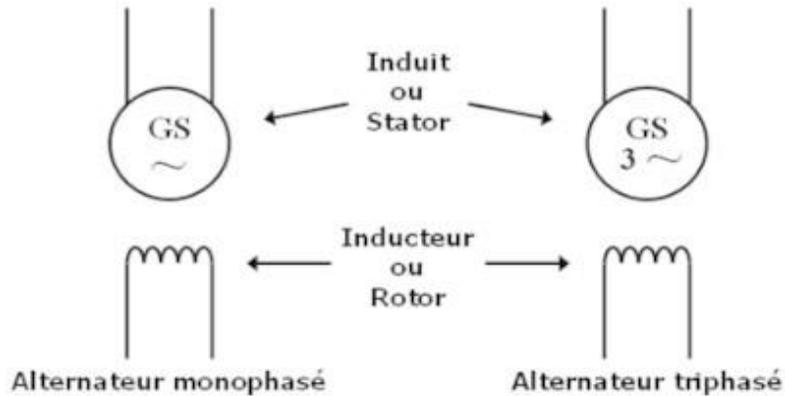


Figure III-13 : Différents Types Des Alternateurs.

Le système d'excitation avec la machine à courant alternatif utilise une deuxième (parfois aussi une troisième) machine synchrone plus petite que la machine principale. Comme il génère un courant alternatif, il faut un redresseur entre l'excitatrice et la machine principale. Selon que le redresseur est statique ou tournant il y a deux systèmes différents, mais le contrôle de la tension est toujours fait par le redresseur principal.

III.18 Redresseur statique :

L'excitatrice génère un système d'excitation triphasé dans le stator qui est rectifié et fourni au rotor à travers un système de balais. Le rotor de la machine auxiliaire peut être fourni grâce à un transformateur et un redresseur qui prennent le courant de la sortie de la machine principale. Ce système est une solution au problème de court-circuit du système statique où les protections peuvent agir parce que l'excitation est isolée.

Il y a deux types de redresseurs :

- Les redresseurs non commandés, essentiellement réalisés à partir de diodes, sont utilisés lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée.
- Les redresseurs commandés dont la tension de sortie peut être variable comportent des thyristors ou des ensembles de diodes et de thyristors. Du fait de leur importante puissance massique ces redresseurs sont toujours utilisés en forte puissance et lorsqu'il est nécessaire de réguler ou de faire varier les grandeurs électriques en sortie.

III.19 Pont de Graëtz Triphasé à Thyristors :

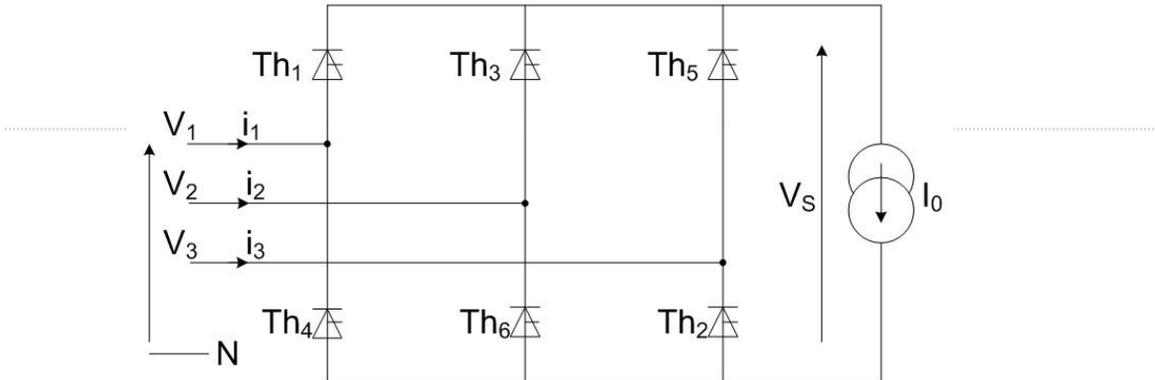


Figure III-14 : Schéma De Fonctionnement Du Redresseur.

III.20 Redresseur Simulink :

La figure III-15 montre la simulation d'un redresseur représenté par thyristor.

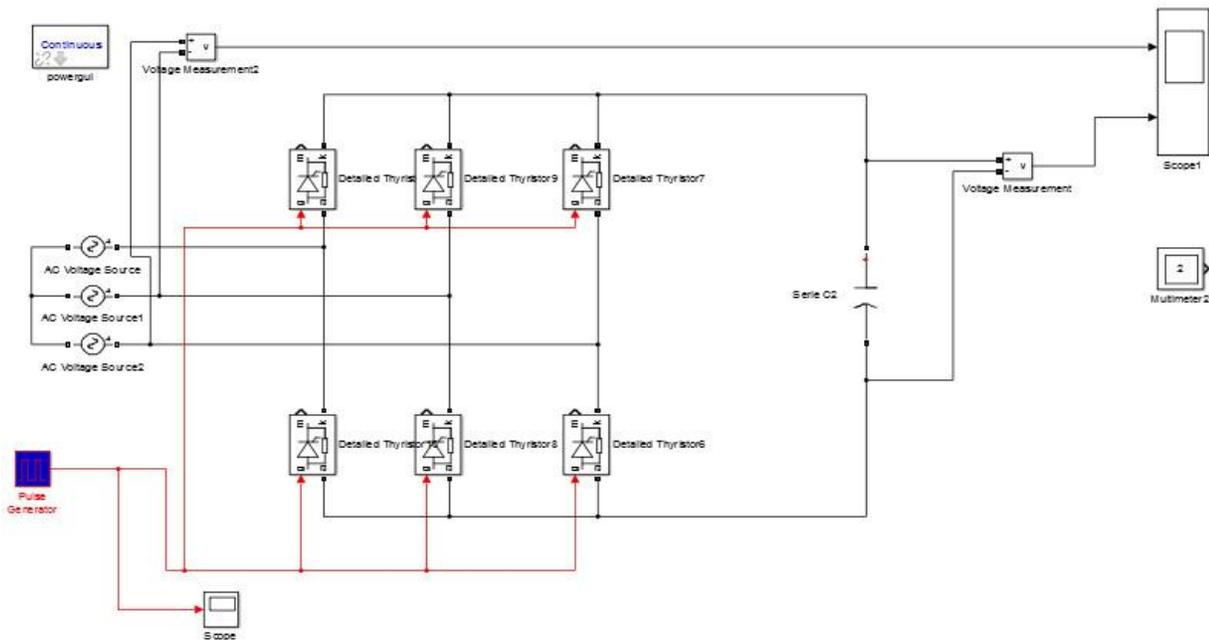


Figure III-15 : Schéma Bloc D'un Redresseur Triphasé.

III.21 Mise en équations des machines synchrones :

La mise en équations à l'aide de la décomposition selon deux axes est présentée de façon assez détaillée afin d'une part de bien montrer que le modèle mathématique obtenu n'est valable en toute rigueur que dans le cadre des hypothèses simplificatrices adoptées et d'autre part de bien faire saisir l'interprétation physique du changement de variables associé à cette décomposition. On peut modéliser la machine selon différentes méthodes :

- Les modèles en abc, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine. Ils sont utilisés essentiellement pour l'étude des régimes permanents.
- Les modèles de la transformation de PARK, utilisés couramment pour l'étude des régimes transitoires et pour la commande vectorielle des moteurs.

III.22 Hypothèses simplificatrices :

Le modèle retenu repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonction linéaire des courants.
- On suppose le circuit magnétique parfaitement feuilleté, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteur, induit amortisseurs) sont parcourus par des courants et en outre on suppose que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaire.
- L'hypothèse dite « sinusoïdale » demande à être un peu plus détaillée que dans le cas des machines à courant continu, des synchrones sont destinées à fonctionner en courant alternatif, cette hypothèse peut s'exprimer ici de façon simple suivant : on ne considère que le premier harmonique d'espace de la distribution de force magnétomotrice créée par chaque phase de l'induit.

➤ En fin on admettra que l'ensemble des amortisseurs peut être représenté par deux enroulements fermés en court-circuit sur eux-mêmes, l'un dit « amortisseur d'axe direct », selon 'Od' (indice D), l'autre dit « amortisseur d'axe en quadrature » selon 'Oq' (indice Q).

III.23 Convention de signe :

Les conventions associées aux équations électriques et magnétiques sont les mêmes que pour la machine à courant continu :

- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.
- L'inducteur est considéré comme récepteur, l'induit comme générateur.

III.24 Description de l'alternateur triphasé :

La machine synchrone à pôles lisses et à inducteur bobiné possède trois enroulements statorique fixes, repérés a, b et c; un enroulement inducteur tournant, repéré f; et deux enroulements amortisseurs tournants, repéré D et Q. ces enroulements sont en court-circuit.

L'axe 'Od' est l'axe de bobinage inducteur ; et l'axe 'Oq' est situé entre deux pôles, ces deux axes sont en quadrature. Ces axes sont également porte les enroulements amortisseurs D et Q. ils sont liés au rotor et tournent avec lui-même. Les axes Oa, Ob et Oc, sont les axes respectifs des trois enroulements a, b et c du stator. La figure III-16 représente les enroulements fixes et tournants de la machine synchrone triphasée avec amortisseur.

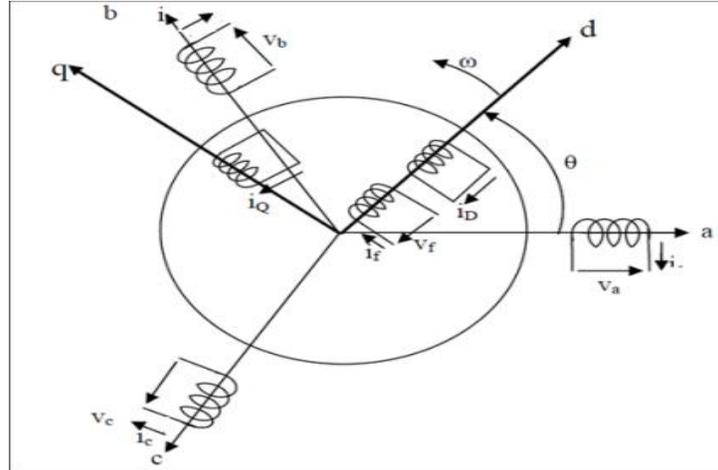


Figure III-16 : Machine synchrone triphasé avec amortisseur.

III.25 Modèle en a, b, c d'une machine synchrone à pôles lisse :

Le modèle en a, b, c découle directement des équations différentielles à coefficients périodique régissant le fonctionnement de la machine synchrone. La machine à pôles lisses peut être établie par simplification du model d'une machine à pôles saillants.

III.26 Équations électriques :

$$\text{Induit (stator)} \left\{ \begin{array}{l} v_a = -R_a i_a - \frac{d\phi_a}{dt} \\ v_b = -R_a i_b - \frac{d\phi_b}{dt} \\ v_c = -R_a i_c - \frac{d\phi_c}{dt} \end{array} \right\} \text{III.1}$$

$$\text{Inducteur (rotor)} \left\{ \begin{array}{l} v_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 = R_d i_d + \frac{d\phi_d}{dt} \\ 0 = R_q i_q + \frac{d\phi_q}{dt} \end{array} \right\} \text{III.2}$$

En appelant :

R_a : Résistance d'une phase de l'induit.

R_f, R_d, R_q : Résistance de l'inducteur, et l'amortisseur d'axe 'd', de l'amortisseur d'axe 'q'

ϕ_k ($k = a, b, c, f, d, q$) : flux d'enroulement traversant l'enroulement k.

III.27 La Transformation de Park :

La transformation de Park implique la transformation des enroulements des phases a,b,c, de la machine originelle en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon les axes d et q. Cette transformation a pour effet de rendre, les inductances mutuelles du modèle de la machine, indépendantes de la rotation. Dans la transformation de Park on définit une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux.

$$p(\theta) = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \text{ III.3}$$

Le coefficient (3/2) correspond à un changement naturel de base dans des repères esorthonormés. Changement qui, lorsqu'il est appliqué au vecteur courant et au vecteur tension, conserve la valeur de la puissance.

Ce type de changement de base présente également l'avantage d'obtenir une matrice de transformation inverse qui est transposée de la matrice de transformation directe :

$$p(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

Avec la transformation de Park, la représentation schématique de la figure III-16 devient :

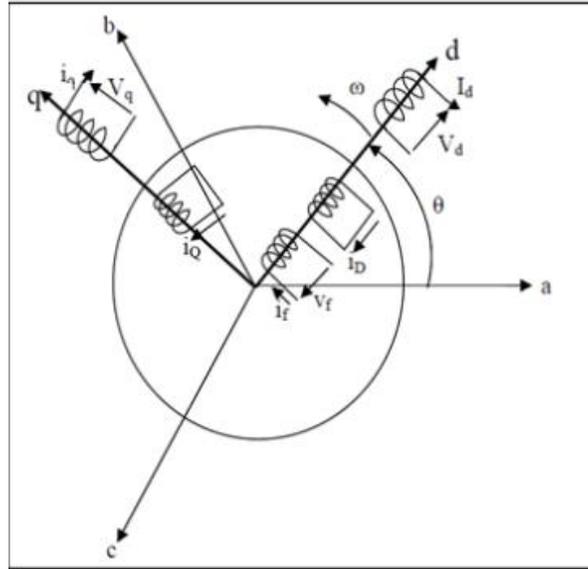


Figure III-17 : Interprétation de la transformation de Park pour une machine synchrone.

III.28 Équations électriques dans les axes d et q :

Nous appliquons les changements de variables définis par la matrice $p(\theta)$ (équation III.3) aux équations (III.1 et III.2) on obtient :

$$v_s = -\frac{d\phi_s}{dt} - R_s i_s$$

$$p(\theta)^{-1} (vdq0) = -\frac{dp(\theta)^{-1} (\phi dq0)}{dt} - R_s p(\theta)^{-1} (idq0)$$

$$p(\theta)^{-1} (vdq0) = -\frac{p(\theta)^{-1} d\phi dq0}{dt} - dp(\theta)^{-1} (\phi dq0) - R_s p(\theta)^{-1} (idq0)$$

En multipliant à gauche par $p(\theta)$:

$$(vdq0) = -p(\theta) \frac{p(\theta)^{-1} d\phi dq0}{dt} - p(\theta) \frac{dp(\theta)^{-1}}{dt} (\phi dq0) - R_s p(\theta) p(\theta)^{-1} (idq0)$$

$$(vdq0) = -\frac{d\phi dq0}{dt} - \frac{p(\theta) dp(\theta)^{-1}}{dt} \frac{d\theta}{ds} (\phi dq0) - R_s (idq0)$$

$$(vdq0) = -\frac{d\phi dq0}{dt} - p(\theta) \frac{dp(\theta)^{-1}}{d\theta} \omega r (\phi dq0) - R_s (idq0)$$

On a :

$$p(\theta) \frac{dp(\theta)^{-1}}{d\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

En fin :

$$\begin{cases} v_d = -\frac{d\varphi_d}{dt} - \varphi_q \omega_r - R_s i_d \\ v_q = -\frac{d\varphi_q}{dt} + \varphi_d \omega_r - R_s i_q \\ v_0 = -\frac{d\varphi_0}{dt} - R_s i_0 \end{cases}$$

III.29 L'expression de la puissance :

La puissance électrique instantanée aux bornes de la machine synchrone est :

$$P_e = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = (i_a \ i_b \ i_c)^t \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = (i_s)^t (v_s)$$

III.30 Expression du couple :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{\omega_r (\varphi_{qid} - \varphi_{diq})}{\omega_r} = \frac{3}{2} (\varphi_{diq} - \varphi_{qid})$$

L'équation mécanique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} + f_v \omega_r + C_r$$

Où (J) représente l'inertie des parties tournantes, (fv) un coefficient de frottement visqueux et (Cr) le couple résistant.

III.31 Paramètres du régime transitoire de l'alternateur :

III.31.1 Expression des réactances et constantes du temps :

En utilisant la transformée de Laplace, les équations de la machine deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} vd(p) = -Rsid(p) - p\varphi d(p) - \omega r\varphi q(p) \\ vq(p) = -Rsiq(p) - p\varphi q(p) + \omega r\varphi d(p) \\ \\ vf(p) = Rfif(p) + p\varphi f(p) \\ \\ 0 = Rdid(p) + p\varphi d(p) \\ \\ 0 = Rqiq(p) + p\varphi q(p) \end{array} \right.$$

On éliminant les grandeurs rotorique sur l'axe d (φf , $i f$, φd , $i d$, φq , $i q$), on obtient les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} vd(p) = -Rs(p) - p\varphi d(p) - \omega r\varphi q(p) \\ vq(p) = -Rsiq(p) - p\varphi q(p) + \omega r\varphi d(p) \\ \\ \varphi d(p) = Xd(p)id(p) + G(p)Vf(p) \\ \\ \varphi q(p) = Xq(p)iq(p) \end{array} \right.$$

Avec :

$$Xd(p) = Xd \frac{(1 + pT'd)(1 + pT''d)}{(1 + pT'd0)(1 + pT''d0)}$$

$$Xq(p) = Xq \frac{(1 + pT'q)(1 + pT''q)}{(1 + pT'q0)(1 + pT''q0)}$$

$$G(p) = Xmd(1 + pTd1/\omega0Rf(1 + pT'd0)(1 + pT''d0)$$

$X_d(p)$: Inductance opérationnelle d'axe direct.

$X_q(p)$: Inductance opérationnelle d'axe en quadrature.

$G(p)$: Fonction de transfert de l'excitation.

$T'd, T'q$: Constantes de temps transitoire longitudinal et transversal en court-circuit.

$T''d, T''q$: Constantes de temps sub-transitoire longitudinal et transversal en court-circuit.

$T'd0, T'q0$: Constantes de temps transitoire longitudinal et transversal en circuit ouvert.

$T''d0, T''q0$: Constantes de temps sub-transitoire longitudinal et transversal en circuit ouvert.

III.32 Simulation de modèle sur Matlab/Simulink :

La simulation du modèle mathématique développé dans cette section est repose sur l'implémentation de différentes équations dans un enivrement de simulation. Pour notre cas nous avons choisi Matlab pour le faire. On procède à la reformulation suivante des équations :

III.33 Implantation des équations des courants :

$$i_q = \varphi_q - \frac{\varphi_m q}{X_s}$$

$$i_d = \varphi_d - \frac{\varphi_m d}{X_s}$$

$$i_f = \varphi_f - \frac{\varphi_m d}{X_f}$$

$$i_q = \varphi_q - \frac{\varphi_m q}{X_q}$$

$$i_D = \varphi_D - \frac{\varphi_m d}{X_s}$$

III.34 Implantation des équations des couples :

$$T_{em} = \frac{P_{em} R_f}{\omega r m} = \frac{3p}{4} \frac{p}{2} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) N.m$$

$$T_{em} = \frac{3}{8} p / \omega_b (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$$

$$\delta(t) = \theta_r(t) - \theta_e(t) = \frac{1}{s} (\omega_r(t) - \omega_e(t)) + \theta_r(0) - \theta_e(0)$$

$$\omega_r(t) - \omega_e(t) = \frac{1}{s} \frac{p}{4J} (T_{em} + T_{meca} - T_{damp})$$

$$T_{em}(pu) + T_{meca}(pu) - T_{damp}(pu) = 2H \frac{d(\omega_r - \omega_e) / \omega_b}{\omega_b}$$

Avec :

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega^2 m b}{s_b}$$

III.35 Modèle des équations sur l'axe direct (Bloc d) :

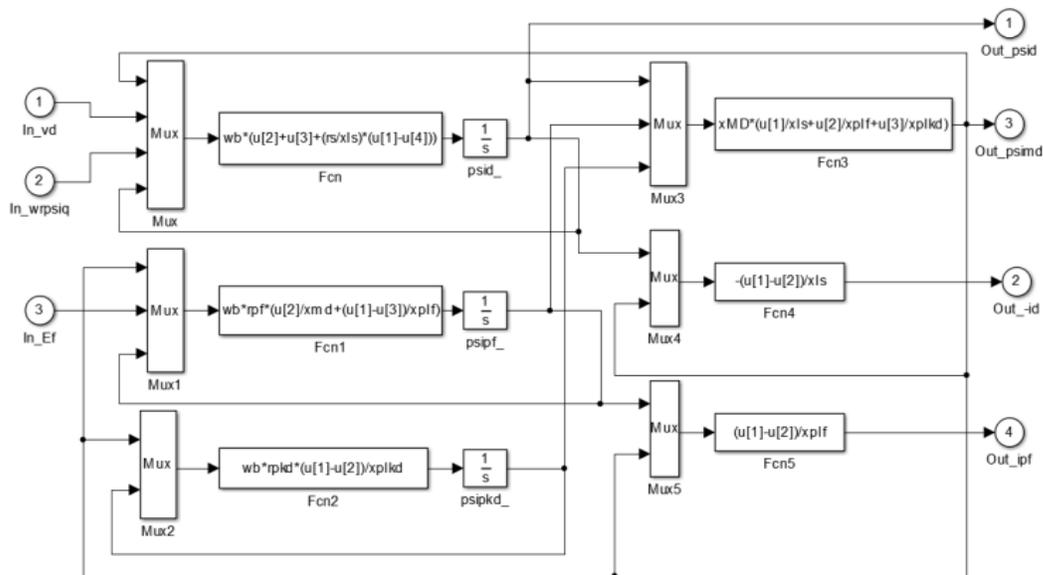


Figure III-18 : Relations entre flux et courants sur l'axe direct.

III.36 Modèle des équations mécaniques (Bloc rotor) :

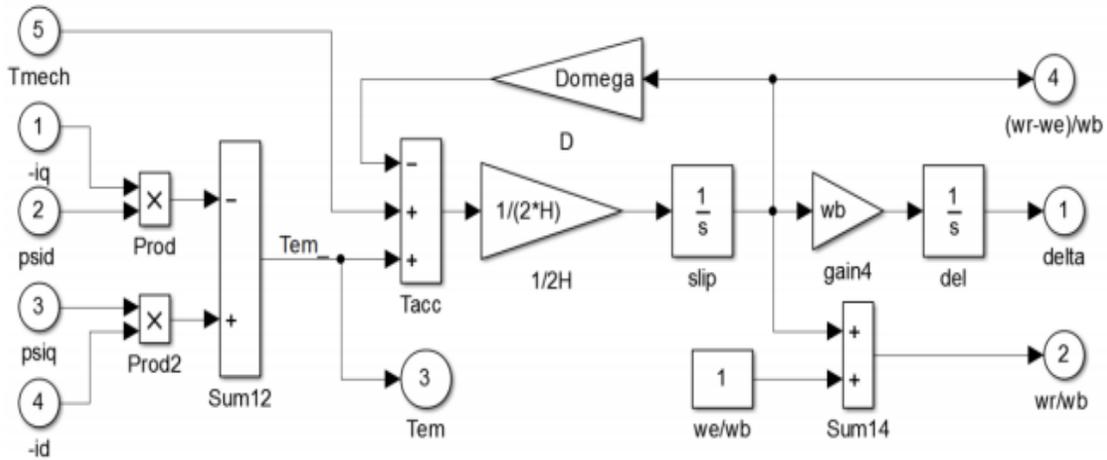


Figure III-19 : Relations entre flux courants et couple dans le rotor.

III.37 Modèle des équations sur l'axe quadrature (Bloc q) :

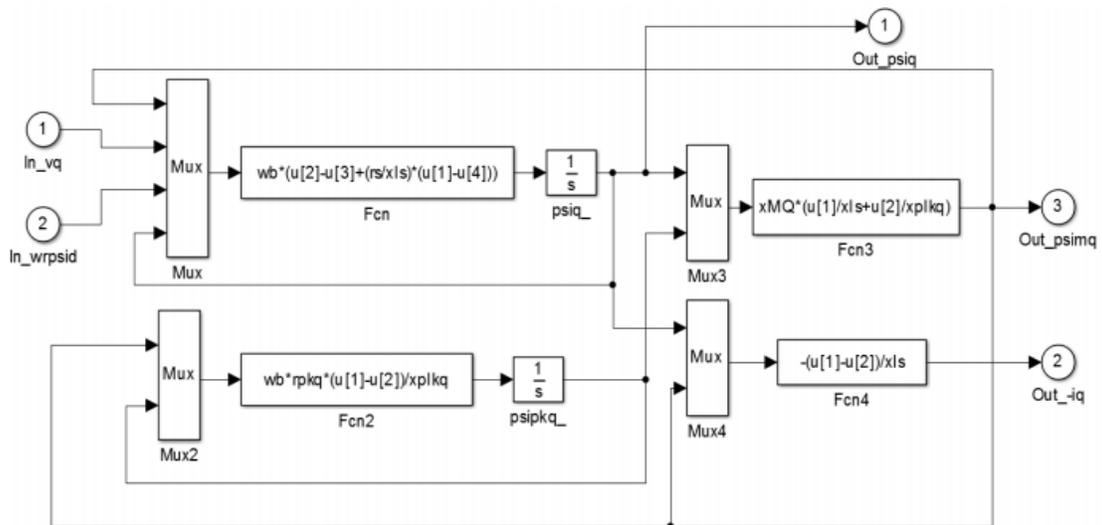


Figure III-20 : Relations entre flux et courants sur l'axe quadrature.

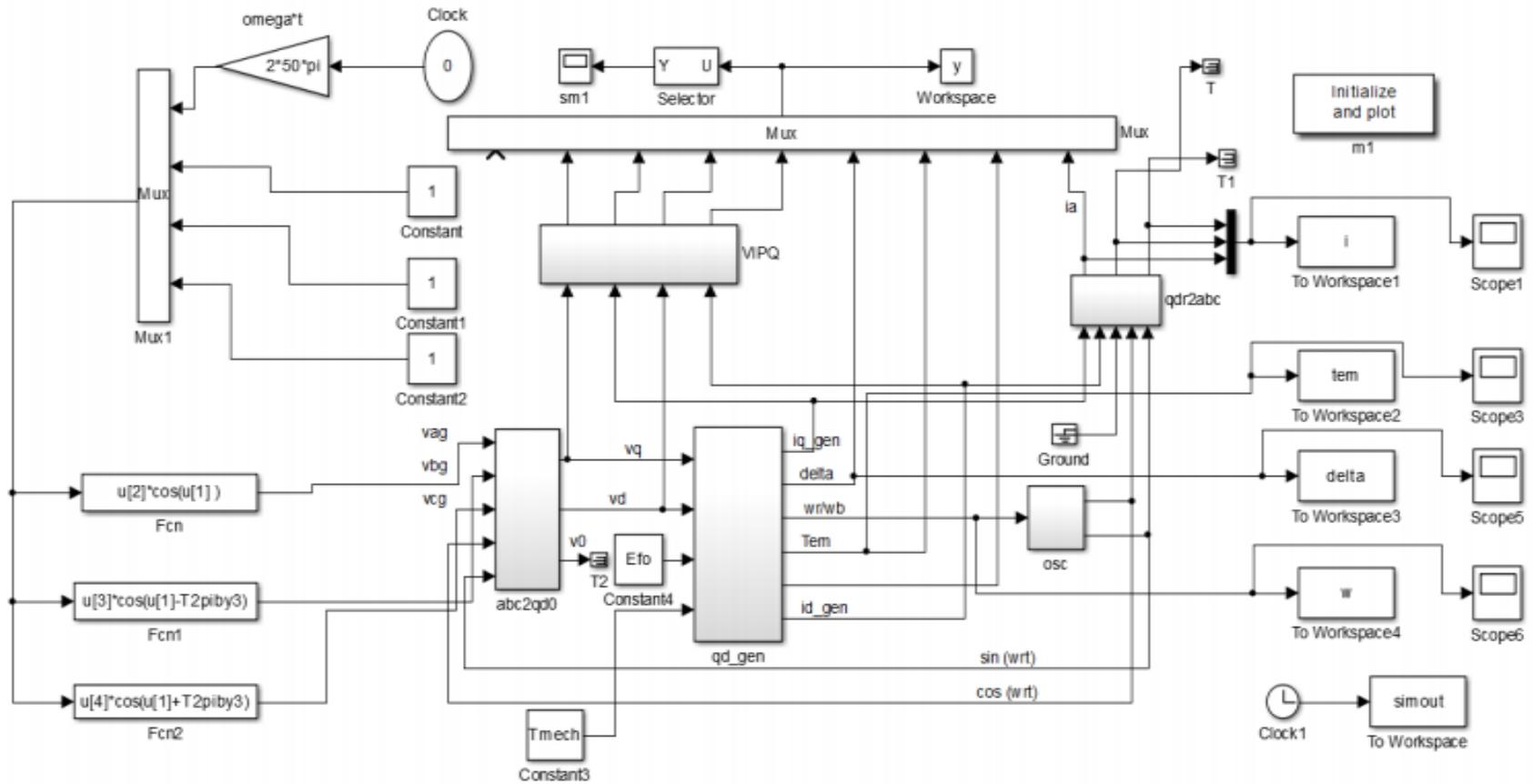


Figure III-21 : Schéma global de l'alternateur.

III.38 Résultats de simulation :

Nous procédons dans la suite à l'exploitation des différents résultats de simulation pour certains régimes de fonctionnements afin de tester les caractéristiques dynamiques de l'alternateur.

Les résultats de simulation de l'alternateur connecté à un réseau infini sont présentés dans cette partie sous le mode de fonctionnement normal. Dans cette simulation, nous avons simulé l'alternateur pour un fonctionnement avec les conditions normales pour voir les grandeurs normales.

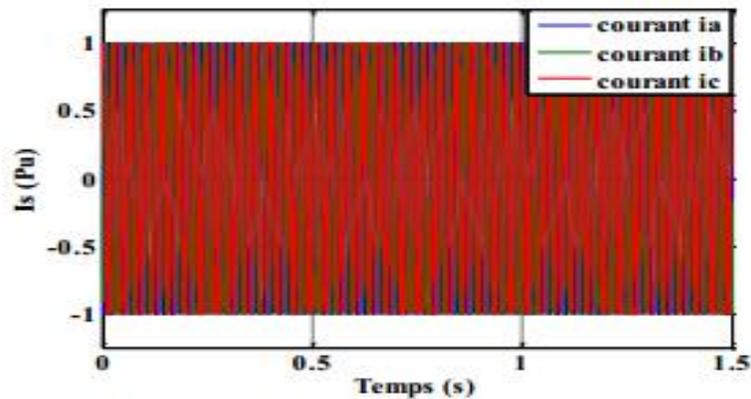


Figure III-22 : Les Courant i_a , i_b , i_c .

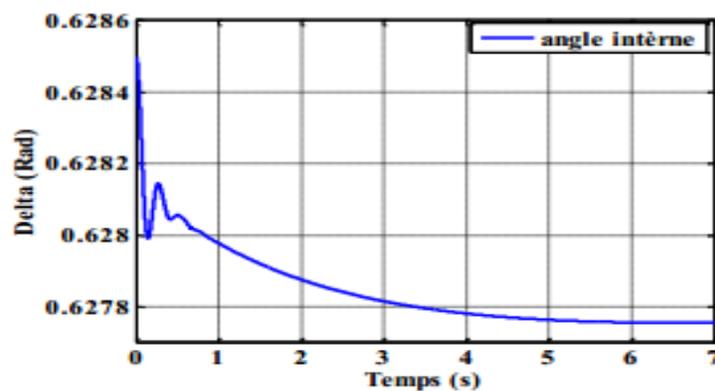


Figure III-23 : L'angle interne.

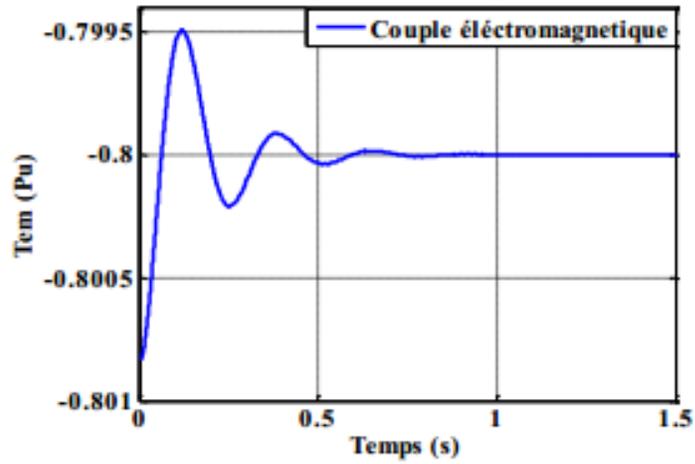


Figure III-24 : Le couple électromagnétique.

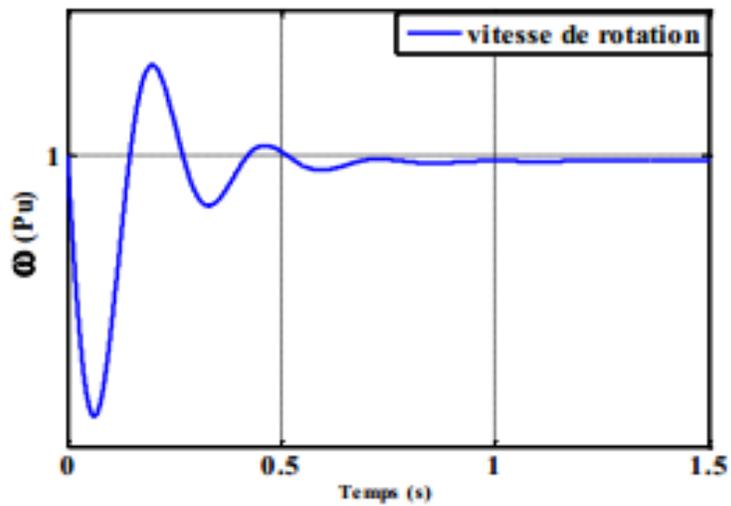


Figure III-25 : La vitesse de rotation.

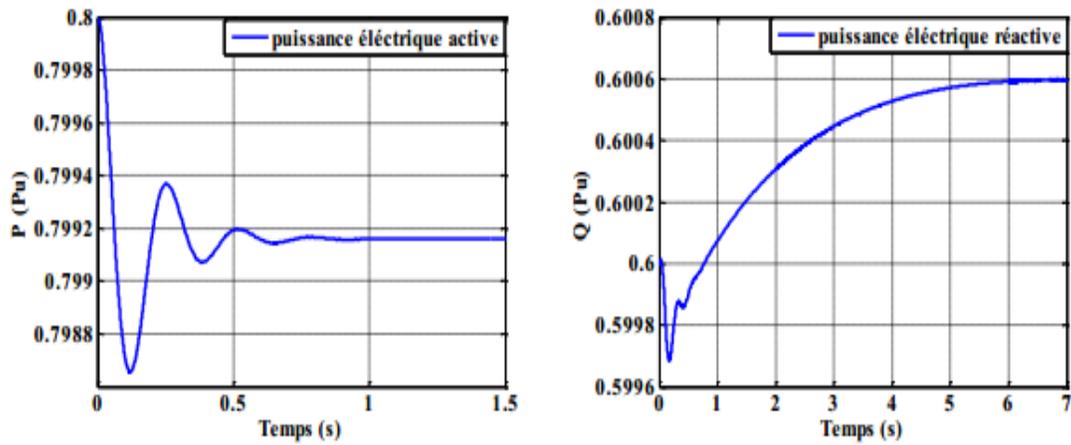


Figure III-26 : les caractéristiques de le l'alternateur pour un fonctionnement normal.

III.39 Tension du Redresseur :

La tension d'entrée triphasée alternative appliquée sur le redresseur va être transformée en tension continue. La figure III-27 montre la tension d'entrée et de sortie.

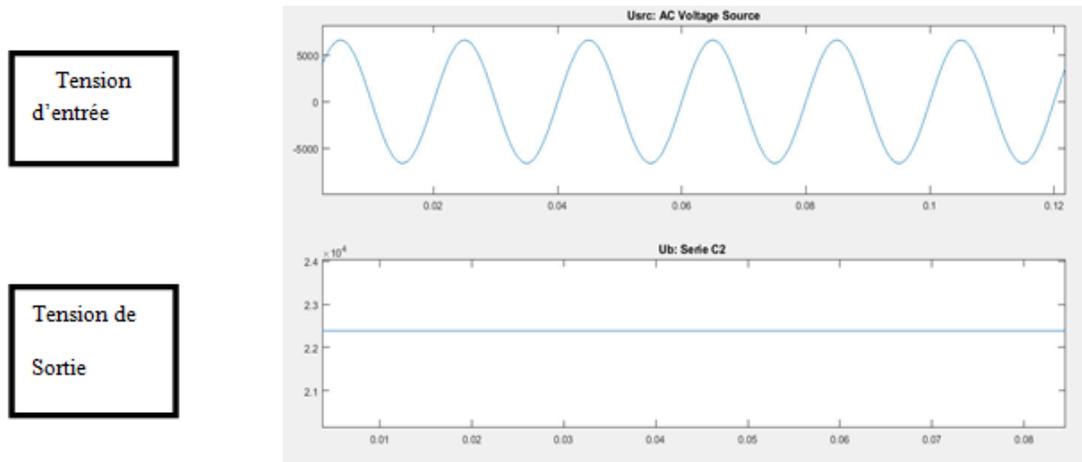


Figure III-27 : La Tension D'entrée Est Composée à La Sortie De Redresseur.

III.40 Conclusion :

Pour générer le champ magnétique nécessaire dans la machine synchrone on peut utiliser des aimants permanents ou électroaimants. Les électroaimants ont besoin d'un courant continu pour générer un champ qui ne varie pas dans le temps. Ce courant peut être fourni par différents systèmes qui peuvent être partagés en deux grands groupes : les systèmes statiques et les systèmes dynamiques.

Dans ce chapitre nous avons vu que dans les systèmes statiques le courant est pris à la sortie de la machine (ou directement du réseau), rectifié par un pont de diodes de courant alternatif en un courant continu et transféré à travers un système de balais qui relie la source au circuit du rotor ; contrairement au système dynamique qui utilise une deuxième machine plus petite pour générer le courant nécessaire. Après nous avons présenté un modèle d'alternateur à inducteur bobiné, à pôles lisses avec amortisseurs puis nous avons simplifié le modèle passant par des hypothèses simplificatrices ainsi que la transformation du Park en obtenant un système simple, facile à élaborer sur l'interface Simulink de MATLAB qui nous a permis d'étudier les caractéristiques dynamiques de l'alternateur tels que : le courant statorique, couple électromagnétique, vitesse, puissances et angle interne en régime établi.

Conclusion Générale :

Ce travail vise particulièrement un élément primordial dans le bon fonctionnement du système d'excitation du groupe turbine-alternateur, mais aussi un élément crucial dans une centrale électrique en général. Le système d'excitation opère un rôle très important dans un groupe-turbine-alternateur, entre assurance de la protection des éléments du groupe et amélioration des performances dynamiques de l'ensemble.

En premier lieu, nous avons abordé les motivations de ce travail en présentons la centrale électrique à cycle combiné Targa ainsi que toutes ses unités.

Au second chapitre, l'état de l'art sur les systèmes d'excitations et de démarrage des alternateurs synchrones est présenté, introduisant alors les différents éléments constitutifs d'un système d'excitation, ainsi que le système de démarrage et son rôle au démarrage dans un groupe turbine-alternateur.

Le chapitre 3, nous avons basé notre étude sur le système d'excitation statique et sa théorie de base. Ensuite le système de refroidissement de l'alternateur synchrone avec tous ces différents éléments. Après nous avons présenté une modélisation détaillée de l'alternateur dont laquelle nous avons utilisé pour déterminer son comportement pendant son fonctionnement normale. En absence d'un système de régulation qui peut aider l'alternateur à retrouver son état stable, une instabilité peut avoir lieu et même la perte de synchronisme pour un défaut sévère.

Le travail sur les systèmes d'excitations en général, implique encore plus de recherche dans le domaine de la production d'énergie électrique, vue son immense importance dans l'ensemble des composantes des centrales hydroélectriques et thermique. Notre travail en particulier, effectué sur les systèmes d'excitation de l'alternateur synchrone dans la centrale SKT a Targa. Présente une sérieuse perspective et un grand acquis en vue de la conception expérimentale de cet élément. L'importance de l'excitation dans la machine est très grande quand la machine fonctionne comme générateur parce que le système peut régler la quantité de puissance réactive cédée ou absorbée par le générateur. Dans le cas où la machine fonctionne comme moteur, le champ magnétique doit être constant et son réglage n'est pas nécessaire.

Références Bibliographiques :

- [1] S. Schmuelling, C. Kreischer, and M. Gołbiowski, "Comparison of different methods for excitation of synchronous machines," *KOMEL*, vol. 107, pp. 89–93, 2015.
- [2] M. Catrinoiu, "Matlab/simulink model of a system for determining the angle of internal synchronous generators."
- [3] D. Fenwick and W. Wright, "Review of trends in excitation systems and possible future developments," in *Proc. of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 123, no. 5. IET, 1976, pp. 413–420.
- [4] W. F. Wright, R. Hawley, and J. L. Dinely, "Brushless thyristor excitation systems." *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, vol. PAS-91, no. 5, pp. 1848–1854, Sept 1972.
- [5] R. C. Schaefer and K. Kim, "Excitation control of the synchronous generator," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 37–43, Mar 2001.
- [6] K. Kim and R. C. Schaefer, "Tuning a PID controller for a digital excitation control system," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 2, pp. 485–492, March 2005.
- [7] P.Kundur. "*Power System Stability and Control*», New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [8] Q.Zhao.J.Jiang,"*Robust Controller Design for Generator Excitation Systems*", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.10, N°2, June 1995, pp.201-207.
- [9] R. Jamil, I. Jamil, Z. Jinquan, L. Ming, W. Y. Dong, and R. Jamil, "Control and configuration of generator excitation system as current mainstream technology of power system," *Tc*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2013.

[10] “Ieee guide for synchronous generator modeling practices in stability analyses,” *IEEE Std 1110-1991*, pp. 1–, 1991

[11] D. Clenet, « document technique, démarreurs et variateurs de vitesse électroniques » Schneider Electric, 2013.

[12] Alstom document (Fonctionnement de la turbine à gaz/ Dispositif de Maintenance électrique).

[13] D.Jolevski, Excitation System of Synchronous Generator, Université of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, plit, 2009.

[14] Mikhail Kostenko et Ludvik Piotrovski, Machines électriques, t. II, Machines à courant alternatif, Éditions de Moscou (MIR), 1969 ; 3^e édition, 1979, 766 p.

[15] Ilarion Pavel, « L'invention du moteur synchrone par Nikola Tesla » [archive] [PDF], sur bibnum.education.fr [archive], [bibnum](http://bibnum.org) [archive], janvier 2013.

Résumé :

L'objectif de notre travail porte sur la description de la centrale thermique à cycle combiné SKT avec toutes ces unités. Puis on a basé notre étude sur l'alternateur synchrone son fonctionnement et ces différents types et son rôle dans une centrale électrique ; finalement nous avons fait la modélisation et la simulation de l'alternateur afin d'analyser ces caractéristiques pendant son fonctionnement normale.

Abstract :

The purpose of our work is to describe the SKT combined cycle power plant with all its units. Then we based our study on synchronous alternator its operation and its different types and its role in electric power station; finally we did the modeling and simulation of the alternator to analyze its characteristics during normal operation.

ملخص:

الغرض من عملنا هو وصف محطة توليد الكهرباء تارقة ذات الدورة المركبة بكل وحداتها . ثم قمنا في دراستنا على المولد المتزامن تشغيله و أنواعه المختلفة و دورها في محطة توليد الطاقة الكهربائية ؛ أخيراً قمنا بنمذجة و محاكاة المولد لتحليل هذه الخصائص أثناء التشغيل العادي.