République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de L'**E**nseignement **S**upérieur et de la **R**echerche **S**cientifique

UNIVERSITE **M**OULOUD **M**AMMERI DE **T**IZI-**O**UZOU
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵜ ⵎⵓⵍⵓⴷ ⵎⵎⴰⵔⵉ ⴷ ⵜⵉⵣⵉ ⵡⵣⵓ

U.M.M.T.O

FACULTE DE **G**ENIE **E**LECTRIQUE ET D'**I**NFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par
Ali CHABOUNI

Thème

REGULATION DE LA TENSION DE L'ALTERNATEUR DE LA CENTRALE RAS-DJINET

Mémoire soutenu publiquement le 28 Septembre 2015 devant le jury composé de :

M S. RABAHALLAH
MACA, UMMTO, Président

M K. HADJ SAID
MACA, UMMTO, Rapporteur

M A. CHALLAL
MACA, UMMTO, Examinateur

M H. BESSAI
MACA, UMMTO, Examinateur

Remerciements

Ce travail doit beaucoup aux personnes qui ont accepté de m'encadrer, à ceux qui ont accepté de diriger ce travail, qui m'ont soutenu et encouragé.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon encadreur, Monsieur Karim HADJ-SAID, et le co-encadreur, Karim CHIRIFI, leur soutien sans faille, la confiance qu'ils m'ont témoignée, leur disponibilité et leurs encouragements ont été déterminants dans la progression de ce travail et m'ont permis de le mener à bien.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce mémoire en lui apportant de l'intérêt,

Les meilleurs sentiments sont destinés pour mes parents et ma grand-mère, qui m'ont accompagnés et aidés du début à la fin, mes sœurs Rosa et Kahina, mon frère Mohamed pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon cursus.

Je voudrais remercier tout particulièrement mes amis ainsi que tous mes camarades

Je tiens également remercier l'ensemble du personnel de la SPE Ras-Djinet, en particuliers BOUAROUR Ali et NEGROUCHE Massinissa.

Malheureusement je crains d'oublier de citer certaines personnes; j'espère qu'elles ne m'en tiendront pas grief, et je peux leur assurer qu'elles ont une place particulière dans mon cœur.

Merci à tous !

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I Généralités sur la centrale thermique de Ras-Djinet

I. Introduction **3**

II. Production de l'énergie électrique **4**

II.1. Centrales thermiques: 5

III. Transport et distribution de l'énergie électrique **5**

IV. Généralités sur la centrale électrique de Ras-Djinet 7

IV.1. Introduction 7

IV.2. Rôle de la centrale 7

IV.3. Plan de masse 9

IV.4. Implantation 11

IV.5. Etapes de réalisation 11

V. Eléments constitutifs de la centrale de Ras-Djinet 12

V.1. Introduction 12

V.2. La Chaudière (générateur de vapeur) 13

V.3. Les caractéristiques nominales de la chaudière 15

V.4. La Turbine 16

V.5. Les systèmes eau- vapeur et autres systèmes 19

V.6. Description du cycle thermique 25

VI. La partie électrique de la centrale de Ras-Djinet 28

VI.1. Le schéma unifilaire 28

VII. Conclusion 34

Chapitre II Description de l'alternateur et le Système d'excitation de la centrale de Ras Djinet

I. Introduction **35**

II. Définitions **35**

III. Principe de fonctionnement de l'alternateur **39**

IV. Paramètres de dimensionnement de l'alternateur 39

V. Caractéristiques techniques et mécaniques de l'alternateur 40

V1. Spécification 40

V.2. Caractéristique à vide 43

V.3. Caractéristique de court-circuit 43

V.4. Caractéristique en charge 43

VI. Eléments constitutifs de l'alternateur 45

VI.1. Le stator 46

VI.2. Le rotor 47

VI.3. Paliers de l'alternateur 49

VI.4. Etanchéité 49

VI.5. Réfrigérants d'hydrogène 49

VI.6. Synchronisation de l'alternateur 49

VII. Système d'excitation de la centrale de Ras-Djinet 51

VII.1. Roue à diodes 51

VII.2. Excitatrice principale 52

VII.3. Excitatrice pilote 53

VIII. Conclusion 56

CHAPITRE III Système de régulation de la centrale de Ras Djinet

I. Introduction **57**

II. Limites de fonctionnement d'un alternateur **59**

II.1. Les limites de l'alternateur 59

II.2. Protections de l'alternateur 60

II.3. Commande de la puissance débitée 61

III. Fonctionnements et constitution du système de régulation **63**

III.1. Fonction du système de régulation 63

III.2. Constitution du système de régulation 63

III.3. Principe de réglage du système de régulation 64

IV. Les différents régulateurs de la centrale de RAS-DJINET 68

IV.1. Régulateur de tension 68

IV.2. Régulateur du courant de champ 68

IV.3. Les convertisseurs statiques des régulateurs automatiques 69

IV.4. Régulateur par poursuite et commutation 72

IV.5. Régleurs en charge 72

IV.6. Alimentation en tension des régulateurs automatiques 73

IV.7. FACTS 73

IV.8. Dispositif de désexcitation 76

IV.9. Equipement de stabilisation 76

V. Système de contrôle manuel 76

V.1. Présentation du système 76

V.2. Dispositif d'excitation manuelle 76

V.3. Constituants de service à main 77

V.4. Alimentation en tension du service à main 77

V.5. La mise en service du système de contrôle manuel 77

V.6. Les inconvénients d'une commande manuelle 78

VI. Conclusion 80

CHAPITRE IV Modélisation, simulation et résultats

I. Introduction 81

II. Modélisation de la machine synchrone 81

II.1. Hypothèses simplificatrices 82

II.2. Définition des axes 82

II.3. Équations électrique et magnétique de la machine dans les axes (a.b.c) 83

II.4. Equation électrique dans les deux axes d et q 87

II.5. Modèle de la machine 88

II.6. Equation électrique et mécanique 91

II.7. Ecriture en forme d'équation d'état sans amortisseurs 94

III. Etude de la régulation de la tension d'un alternateur d'une centrale thermique **95**

III.1. Description du circuit 96

III.2. Schéma du système 96

III.3. Mode opératoire 97

III.4. Constatation 101

III.5. Interprétation 101

IV. Conclusion 102

Conclusion générale 103

Notations et symboles	
Symbole	***Définition***
e	force électromotrice.
n	nombre de conducteurs.
R_a	Résistance d'une phase de l'induit.
R_f	Résistance de l'inducteur.
R_D	Résistance de l'amortisseur d'axe d
R_Q	Résistance de l'amortisseur d'axe q.
Φ	Ecart angulaire entre deux phases, statorique et rotorique.
L_{ff}	Inductance propre de l'inducteur.
L_{DD}	Inductance propre de l'amortisseur d'axe direct.
L_{QQ}	Inductance propre de l'amortisseur d'axe quadrature.
M_{fd}	Inductance Mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur d'axe direct.
τ_d	La constante de temps de l'enroulement d.
τ_q	La constante de temps de l'enroulement q

τ_f	La constante de temps de l'enroulement inducteur f,
δ_{fd}	Le coefficient de dispersion entre les enroulements f et d.
P_e	Puissance électrique.
P_{em}	correspond à la variation de l'énergie magnétique emmagasinée par unité de temps.
P_{me}	Puissance mécanique qui résulte de la transformation de la puissance instantanée de la machine.
P_J	Pertes joule.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_m	Couple mécanique
ω_r	Vitesse instantané de rotation.
J	Moment d'inertie.
D	Coefficient d'amortissement.
δ	Angle de rotor.
f	Fréquence nominal.

ω_0	vitesse de synchronisme nominal.
$\Delta\omega_r$	Déviation de la vitesse angulaire du rotor.
$\boldsymbol{i_d, i_q}$	Courants d'induit d'axes direct et en quadrature
$\boldsymbol{i_D,\ i_Q}$	Courants d'amortisseurs d'axes direct et en quadrature
$\boldsymbol{i_f}$	Courant inducteur
$\boldsymbol{L_D,\ L_Q}$	Inductances de fuites d'amortisseurs d'axes direct et en quadrature
$\boldsymbol{L_d,\ L_q}$	Inductances synchrone longitudinale et transversale
L_f	Inductance de fuites de l'inducteur
$\boldsymbol{la}$	Inductance de fuite de l'induit
$\boldsymbol{V_d,\ V_q}$	Tensions d'induit d'axes direct et en quadrature
Φ_d, Φ_q	Flux d'induit d'axes direct et en quadrature
Φ_D, Φ_Q	Flux d'amortisseurs d'axes direct et en quadrature

Introduction générale :

Le réseau électrique se compose d'un ensemble d'ouvrages de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. Pour assurer sa stabilité, une bonne surveillance et un contrôle en temps réel de son fonctionnement est nécessaire.

La production de l'énergie électrique résulte de diverses transformations. Par exemple, la production de l'énergie électrique d'origine mécanique est basée principalement sur la transformation de l'énergie primaire sous forme potentielle pour les turbines hydrauliques et calorifique pour les turbines à vapeur en une énergie électrique.

La transformation de l'énergie primaire en énergie électrique comporte trois sous transformations fondamentales qui sont la transformation du combustible dans la chaudière en énergie calorifique, la transformation de l'énergie calorifique en énergie cinétique via la turbine et la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique dans l'alternateur. L'énergie obtenue à la sortie de l'alternateur aux pertes près est transmise aux consommateurs. Selon la demande d'énergie, la production est contrôlé moyennant le réglage de l'énergie primaire et ce en actionnant les vannes d'admission principales de la turbine.

Pour assurer le bon fonctionnement et garantir un coût optimal du kilowattheure (kWh) du système production-transport, il est nécessaire de contrôler la vitesse de rotation du groupe turbo-alternateur, la qualité de la fréquence, la qualité de la tension et évidemment la sécurité des personnes et des équipements.

Le système production-transport est un processus à deux entrées qui sont l'énergie cinétique et le courant d'excitation.

Une fois l'alternateur est convenablement excité, il produit un couple électromagnétique à partir de l'énergie cinétique qu'il reçoit de la turbine. Ce couple électromagnétique est fourni au réseau de transport sous forme de puissance active et réactive. A son tour, le réseau de transport fournit aux pertes prés, la puissance

développée par l'alternateur via les postes de transformation haute et moyenne tension (HTA/HTB) aux consommateurs conformément aux trois taches suivantes qui sont la production, le transport et la transformation.

La difficulté à effectuer des essais en pleine charge pour une centrale de production nous a conduits à recourir à la modélisation et à la simulation d'un ensemble turbo-alternateur et charge par différents régimes de fonctionnement.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres et une conclusion générale :

Le premier chapitre présente la centrale thermique de Ras-Djinet, constituée de quatre tranches identiques de production, nous nous limitons à une seule tranche, car l'étude est la même pour les autres.

Le deuxième chapitre présente la description de l'alternateur et le système d'excitation de la centrale de Ras-Djinet

Le troisième chapitre est consacré au Système de régulation de la centrale de Ras-Djinet

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation d'un alternateur, de charges et l'ensemble des dispositifs de contrôle et de commande.

L'étude par simulation est effectuée sous Matlab Simulink. Plusieurs résultats de la simulation sont présentés et analysés.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

I. Introduction : [1] [13]

Le secteur de l'énergie est l'un des plus stratégiques dans l'économie et l'industrie. En effet l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement d'un pays.

Les producteurs de l'énergie électrique s'appuient sur des calculs statistiques qui leur permettent de prévoir plusieurs années à l'avance, les investissements (Centrales, générateurs, lignes) pour faire face à la demande sans cesse croissante de l'énergie.

Les différentes formes d'énergie peuvent être classées suivant le niveau et la nature des transformations. On distingue l'énergie primaire, l'énergie intermédiaire et l'énergie utile.

1) ***L'énergie primaire*** : disponible dans l'environnement avant toute transformation à savoir énergie hydrocarbure, hydraulique, marine, éolienne, rayonnement solaire, etc.
2) ***L'énergie intermédiaire*** : qui a subi une ou plusieurs transformation et peut être transportée ou distribuée sous différents aspects (combustible fossile, carburants, électricité) vers le consommateur final, (ménager, industriels, services, etc.), d'où le terme énergie distribuée.
3) ***L'énergie utile*** : désirée par le consommateur (lumière, chaleur, travail mécanique, etc.), s'obtient en transformant l'énergie intermédiaire dans les appareils tels que les cuisinières. les lampes électriques, les chaudières, etc.).

Une chaîne énergétique est une succession d'appareils utilisés pour différentes opérations (extraction, stockage, transport, distribution, utilisation finale) permettant de faire passer de sa forme primaire à sa forme utile avec un certain rendement global.

Ainsi l'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire dépend principalement des facteurs de l'évolution démographique et des mutations économiques dans les pays industrialisés, qui se manifestent par l'utilisation de technologie moins consommatrices d'énergie.

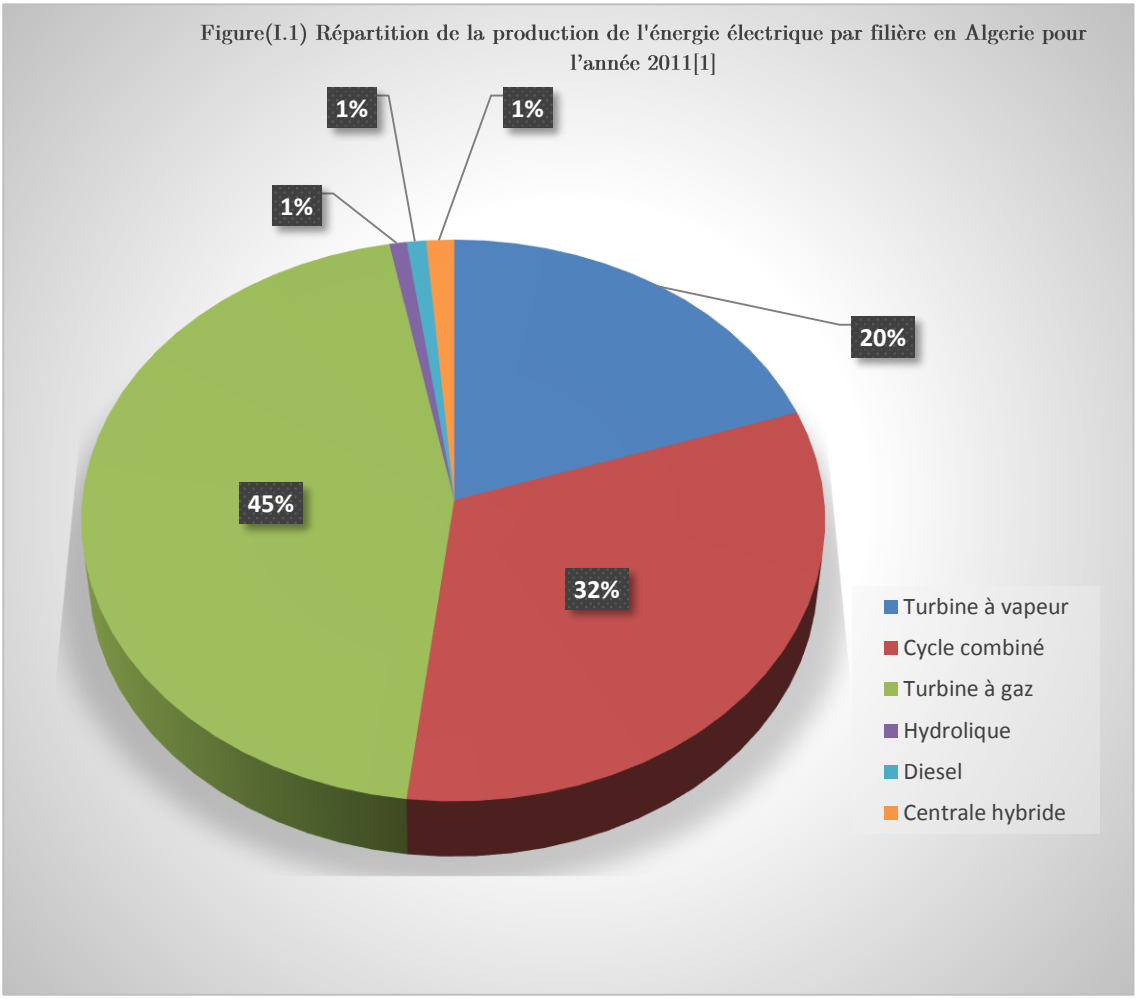
II. Production de l'énergie électrique: [1] [13]

Comme l'électricité ne se stocke pas, sa production est le résultat d'une combinaison des différents moyens de production complémentaires ayant chacun un rôle dans la courbe de consommation.

L'énergie électrique est produite dans des centrales de production d'énergie électrique, qui est un site destiné à la production d'électricité, ces dernières transforment différentes sources d'énergie naturelles (primaires) en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs.

Toutes ces centrales comportent un ou plusieurs groupes tournant constitué chacun par une machine motrice entraînant un alternateur, celui-ci produit du courant électrique triphasé sous une tension insuffisante qui sera élevée par des transformateurs situés dans un poste de départ.

Figure(I.1) Répartition de la production de l'énergie électrique par filière en Algerie pour l'année 2011[1]



II.1. Centrales thermiques:

L'énergie thermique à flamme est une source qui dépend de combustibles fossiles (charbon, gaz ou pétrole), des éléments contenus dans le sous-sol de la Terre.

Elle permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales thermiques à flamme appelées aussi centrales à flamme ou centrales thermiques classiques, grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces éléments.

Une centrale thermique à flamme est composée de 3 parties :

- La chaudière dans laquelle est brûlé le combustible ;
- La salle des machines où est produite l'électricité ;
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'électricité.

Ces centrales ont été utilisées comme moyen de production de base de l'électricité entre 1950 et 1980. Avec le développement de l'énergie nucléaire, elles sont aujourd'hui utilisées comme moyen pour répondre aux pics de consommation aux heures de pointe ou lors de périodes de froid.

L'énergie thermique à flamme est la plus utilisée dans le monde car le charbon est abondant, mais elle émet beaucoup de gaz à effet de serre.

III. Transport et distribution de l'énergie électrique: [2] [13]

L'électricité circule depuis le lieu où elle est fabriquée jusqu'à l'endroit où elle est consommée, par l'intermédiaire d'un réseau de lignes électriques aériennes ou souterraines.

Ce réseau permet de transporter et de distribuer l'énergie électrique sur l'ensemble du territoire national et même vers d'autres pays.

Il est organisé à la manière d'un réseau routier avec ses grands axes, ses axes secondaires et ses échangeurs :

Le réseau de transport joue le rôle du réseau des autoroutes et des routes nationales.

Le réseau de distribution joue celui du réseau des routes départementales.

Pour passer d'un réseau à un autre, les postes de transformation jouent le rôle d'échangeurs.

La consommation varie donc en permanence au cours de la journée et de l'année.

Comme l'électricité ne se stocke pas, sa production est le résultat d'une combinaison des différents moyens de production complémentaires ayant chacun un rôle dans la courbe de consommation.

L'énergie produite dans les centrales électriques doit être transférée des lieux de production aux lieux de consommation. Ce transfert comportera fréquemment deux stades : un transport d'un point à un autre d'une énergie donnée, par une ou plusieurs lignes ; ensuite une distribution de l'énergie aux nombreux consommateurs.
Dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, on utilise deux types de lignes :

- Les lignes aériennes
- Câbles souterrains

Quelle que soit l'importance de l'énergie à transférer, cette opération ne sera économiquement intéressante que si elle peut s'effectuer avec un rendement satisfaisant.
L'énergie électrique est actuellement produite dans les centrales, comme le transport à distance de quantités importantes d'énergie exige des tensions beaucoup plus élevées, on adjoint à la centrale un poste de transformation qui élève la tension.
En un point judicieusement choisi de chaque région à desservir, on établira un poste de transformation abaisseur, qui alimentera à partir de la très haute tension un réseau de distribution primaire, ce réseau sert à amener l'énergie aux diverses cabines, ou cette tension est encore une fois abaissée jusqu'à la valeur d'utilisation.
De ces cabines part le réseau de distribution secondaire ou le réseau à basse tension.

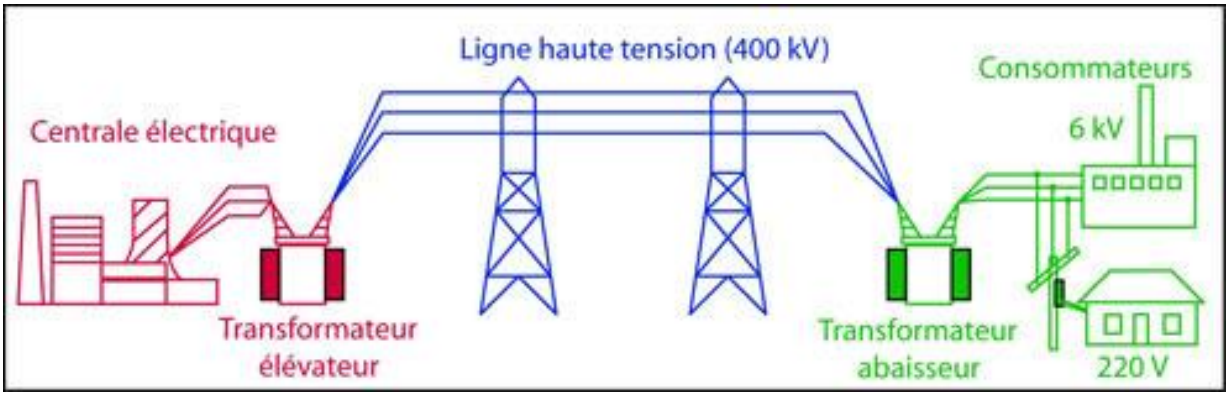
Le distributeur doit fournir à chaque instant une énergie égale à celle réclamée par le consommateur, et comme la consommation varie suivant :

- L'énergie de l'année (été ou hiver).
- L'heure de la journée (heure de pointe et heure creuses).
- Les conditions météorologiques.

Le distributeur doit faire des prévisions pour tenir en réserve des unités de production d'appoint. Pour résoudre facilement le problème de régulation, on interconnecte par les lignes à haute tension les centrales productrices d'énergie électrique, ce qui permet les échanges d'énergie d'une région à l'autre, ce réseau est également interconnecté avec celui des pays voisins.
En effet, la puissance électrique transporté est égale au produit de la tension (V) par le courant (I), [P= V.I] or le transport à longue distance de cette puissance induit des pertes par effet joule qui deviennent prohibitives, pour diminuer ces pertes, on peut diminuer la résistance du support et cela imposerait d'augmenter la section des

conducteurs, mais c'est une solution coûteuse, on est donc obligé de diminuer l'intensité du courant transporté, ce n'est possible que grâce aux tensions élevés, et ce d'autant plus que la distance est plus grande.

Grâce aux transformateurs, on élève la tension au départ et on l'abaisse à l'arrivée de façon à permettre à une utilisation commode, on arrive ainsi à transporter des puissances importantes à des centaines de kilomètres.



Figure(I.2) Schéma de transport de l'énergie électrique

IV. Généralités sur la centrale électrique de Ras-Djinet : [3] [13]

IV.1. Introduction :

La centrale thermique de Ras-Djinet est située à proximité de la ville de Ras-Djinet à l'est d'Alger (environ 80 km) dans la wilaya de Boumerdes, sa superficie est 35 hectares.

Cette centrale a été réalisée entre 1980 et 1986 en vue de renforcer l'alimentation en énergie électrique en Algérie.

La première fourniture d'énergie au réseau a été effectuée le 17 Juin 1986.

La centrale thermique de Ras-Djinet se compose principalement de quatre tranches de production identiques pouvant délivrer une puissance brute de 176 MW chacune, la puissance nette délivrée au réseau national est de 168 MW x 4 soit 672 MW et chacune des tranches soutire 8 MW pour ses propres consommations (les auxiliaires).

IV.2. Rôle de la centrale :

La centrale thermique de Ras-Djinet a pour rôle de produire de l'électricité à partir d'une énergie primaire qui se présente sous forme d'un combustible le processus de transformation s'effectue selon les étapes suivantes :

1ere étape : Transformation de l'énergie chimique (fuel, ou gaz naturel) du combustible en énergie thermique au cours d'une réaction (la combustion); cette réaction se déroule dans une chaudière

2eme étape : Transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique, par l'intermédiaire d'une machine thermique et suivant un cycle fonctionnant entre deux niveaux de température (source chaude et source froide).

3eme étape : Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans une machine électrique qui est le plus souvent avec un alternateur.



IV.3. Plan de masse : [3]

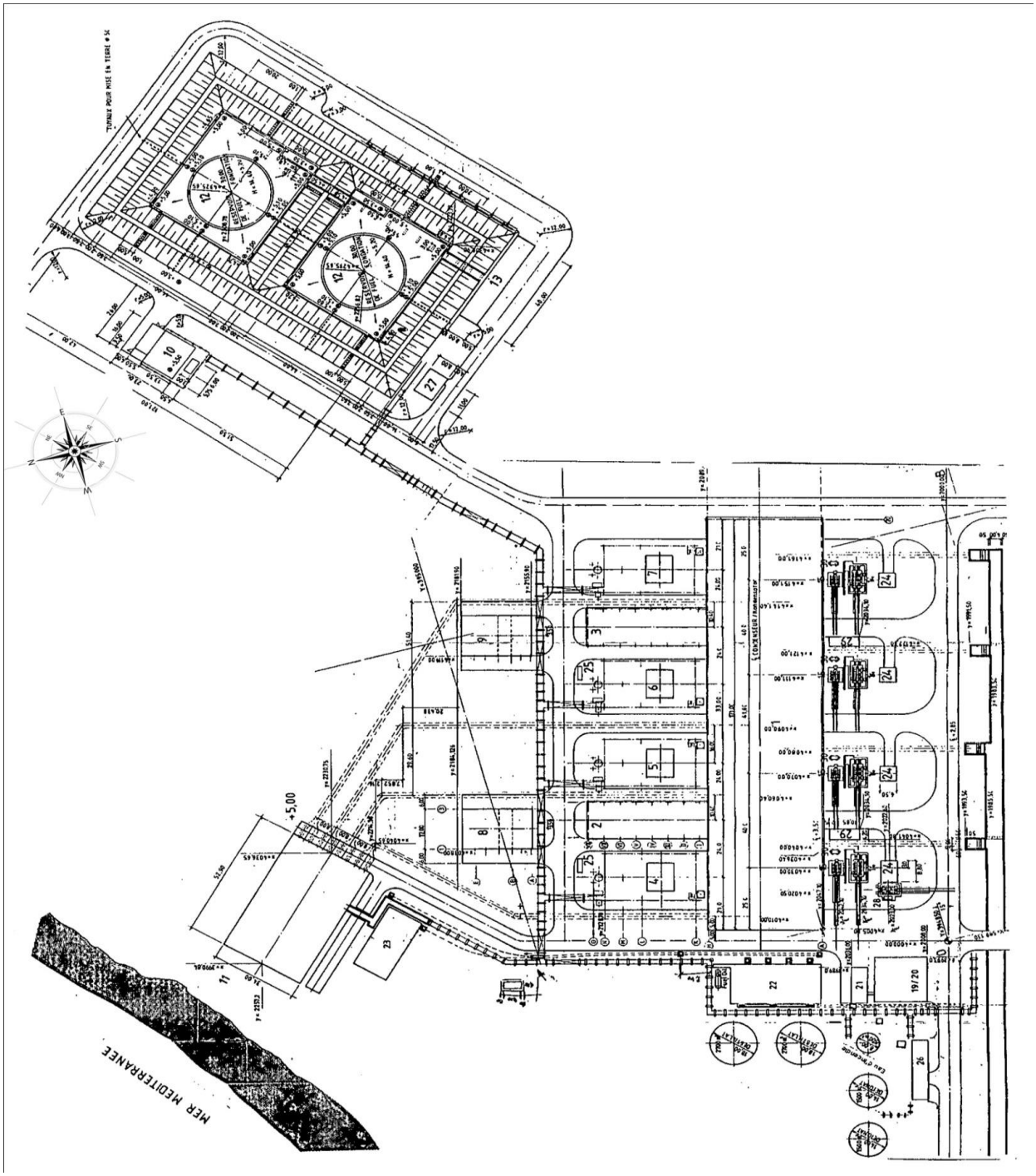


Figure (I.3) Plan de masse de la centrale de Ras-Djinet

Les principaux constituants de la centrale sont:

1) Salle des machines	2) Salle des machines
3) Bâtiment des auxiliaires électriques 1 et 2	4) Bâtiment des auxiliaires électriques 1 et 2
5) Bâtiment des auxiliaires électriques 3 et 4	6) Bâtiment des auxiliaires électriques 3 et 4
7) Chaudière tranche 1	8) Chaudière tranche 1
9) Chaudière tranche 2	10) Chaudière tranche 2
11) Chaudière tranche 3	12) Chaudière tranche 3
13) Chaudière tranche 4	14) Chaudière tranche 4
15) Bâtiment des auxiliaires mécaniques 1 et 2	16) Bâtiment des auxiliaires mécaniques 1 et 2
17) Bâtiment des auxiliaires mécaniques 3 et 4	18) Bâtiment des auxiliaires mécaniques 3 et 4
19) Station détente de gaz	20) Station détente de gaz
21) Station de filtrage et pompage	22) Station de filtrage et pompage
23) Réservoir de fuel	24) Réservoir de fuel
25) Station de pompage de fuel	26) Station de pompage de fuel
27) Transformateur principal	28) Transformateur principal
29) Transformateur de soutirage	30) Transformateur de soutirage

IV.4. Implantation :

Il s'est fait sur la base des critères suivants:

- ❖ Proximité de mer.
- ❖ Proximité des consommateurs importants situés dans la zone industrielle de Rouïba. Reghaia.
- ❖ Possibilité d'extension future.
- ❖ Condition du sous-sol favorable, ne nécessitant pas de fondations profondes.
- ❖ Possibilité d'extension future.
- ❖ Située sur la route nationale Dellys-Alger, cela favorise son alimentation, par voie routière en fuel-oil domestique en cas d'indisponibilité de gaz naturel.

IV.5. Etapes de réalisation :

Les principaux contacts ont commencé en 1980. Les travaux de terrassement ont démarré en Mars 1981. Le début du montage de la centrale s'est effectué en Mars 1984.

1ere tranche	**Décembre 1985**
2eme tranche	**Avril 1986**
3eme tranche	**Septembre 1986**
4eme tranche	**Décembre 1986**

La SONELGAZ a confié certains travaux de réalisation du projet aux opérateurs nationaux suivants : ENCC, ETTERKIB, BATI METAL, GENISIDER, INERGA, PRASIDER, ENATUB, SNIC et autres intervenants, chacun dans son domaine d'activité.

-SOGEP, SAPIBAD et SID.

-GTP, ALEIP, CEN et SONATRAM.

En ce qui concerne la participation étrangère plusieurs intervenants ont contribué à la réalisation du projet, il s'agit de :

-CONSORSIUM AUSTRO-ALLEMAND.

-SIEMENS D'AUTRICHE.

-DRAGADOS. Enterprise ESPAGNOLE.

V. Eléments constitutifs de la centrale de Ras-Djinet: [3] [13]

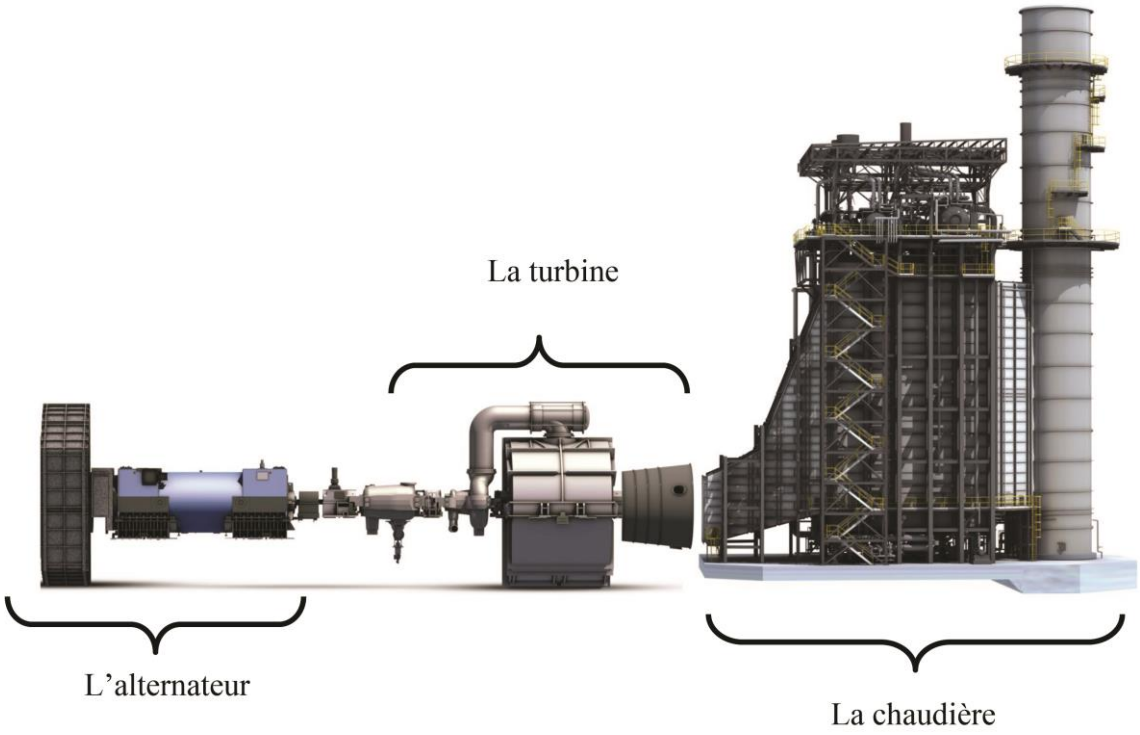
V.1. Introduction :

La centrale thermoélectrique de Ras-Djinet se compose de 4 tranches identiques, de puissance unitaire 176 MW aux bornes de l'alternateur, totalisant une capacité installée de 704 MW.

La consommation totale des auxiliaires communs est environ 32 MW, alors que la puissance fournie au réseau est de 672 MW, à la borne usine (BU).

Les principaux composants d'une tranche de production sont :

1. **-La Chaudière**
2. **-La turbine**
3. **-L'alternateur**



Figure(I.4) Vue d'ensemble d'une tranche de production

V.2. La Chaudière (générateur de vapeur):

Le combustible principal utilisé dans les chaudières est le gaz naturel de Hassi-R'mel, avec débit de 160000 m3/ h de gaz est nécessaire pour assurer la pleine charge des quatre groupes, en cas d'indisponibilité, le secours est assuré par du fuel-oil domestique à l'aide d'un dispositif d'alimentation à partir de deux réservoirs de 10000 m3 chacun.

Elle a pour rôle de transformer l'eau d'alimentation en vapeur à haute et moyenne pression pour alimenter le groupe turbo-alternateur.

Capacité de vaporisation maximale:	**53Ot/h**
Pression à la sortie des surchauffeurs	**154 bars**
Température de la vapeur surchauffée	**540°C**
Pression la sortie du resurchauffeur	**34 à 37bar**
Température de la vapeur resurchauffé	**540°C**
Température maximale de l'eau d'alimentation	**246°C**

Le générateur de vapeur est de type à circulation naturelle avec chambre de combustion et avec resurchauffe.

La chaudière est constituée principalement de :

1) La chambre de combustion formée des tubes écrans ou vaporisateurs.
2) Ballon.
3) Surchauffeurs et resurchauffeurs.
4) Économiseur.
5) Colonnes de descente.
6) Brûleurs.

V.2.1. Economiseur :

L'économiseur est un échangeur (eau fumée), il a pour fonction principale la réception, le réchauffement et le guidage de l'eau d'alimentation vers le ballon chaudière.

V.2.2. Ballon Chaudière :

Le ballon chaudière sert à recevoir l'eau d'alimentation et la vapeur remontant à partir des tubes écrans, il est rempli à 50 % de vapeur et 50 % d'eau.

V.2.3. Colonnes descente et tube écrans :

Les colonnes de descentes sont raccordées à la partie inférieure du ballon et conduisent l'eau à la partie inférieure de l'écran vaporisateur, ou elle est chauffé grâce aux brûleurs, le mélange eau-vapeur résultant au niveau des tubes écrans ayant un poids spécifique plus faible va remonter au niveau du ballon chaudière (convection naturelle).

V.2.4. Surchauffeurs et resurchauffeurs :

- Surchauffeurs : Les surchauffeurs en nombre de trois en série servent à surchauffer la vapeur venant du ballon chaudière pour lui extraire l'humidité et faire monter sa température avant d'être admise à la turbine (corps HP).
- Resurchauffeurs : Une fois la vapeur vive (RA) aura subit une détente au niveau du corps HP, sa pression et sa température diminuent (RC : vapeur à resurchauffer), on la renvoie à la chaudière pour la resurchauffée à travers deux resurchauffeurs en série (RB : vapeur resurchauffée).

V.2.5. Préchauffeur d'air à vapeur :

Ils servent à augmenter la température d'air de combustion (échangeur air-vapeur).

V.2.6. Réchauffeur rotatif :

Il sert à réchauffer l'air de combustion par récupération de chaleur des fumées (échangeur air-fumée), entraîné par moteur triphasé

V.2.7. Ventilateur de soufflage :

Les ventilateurs de soufflage en nombre de deux ont pour rôle de fournir l'air de combustion au générateur de vapeur

V.2.8. Ventilateurs de recyclage :

Ils ont pour rôle de recycler une partie de la fumée, ils l'envoient à la partie inférieure de la chaudière pour régler la température à la sortie des resurchauffeurs.

V.2.9. Les brûleurs :

Le générateur est équipé de huit brûleurs au gaz naturel et au fuel, les brûleurs sont disposés sur quatre étages de la face avant de la chaudière, le gaz naturel arrive à partir du post gaz, par contre le fuel est transféré par des pompes à partir de la station fuel, ce dernier est stocké dans deux bâches (réservoirs) ayant chacune une capacité de 10 000 m

V.2.10. La chambre de combustion :

La chambre de combustion est la partie principale du générateur de vapeur, c'est dans cette enceinte qu'ont lieu les principaux échanges de chaleur.

V.3. Les caractéristiques nominales de la chaudière sont :

Pression de service	**160 bars**
Température de la vapeur	**540 C°**
Débit de la vapeur	**523 tonnes / h**

V.4. La Turbine:

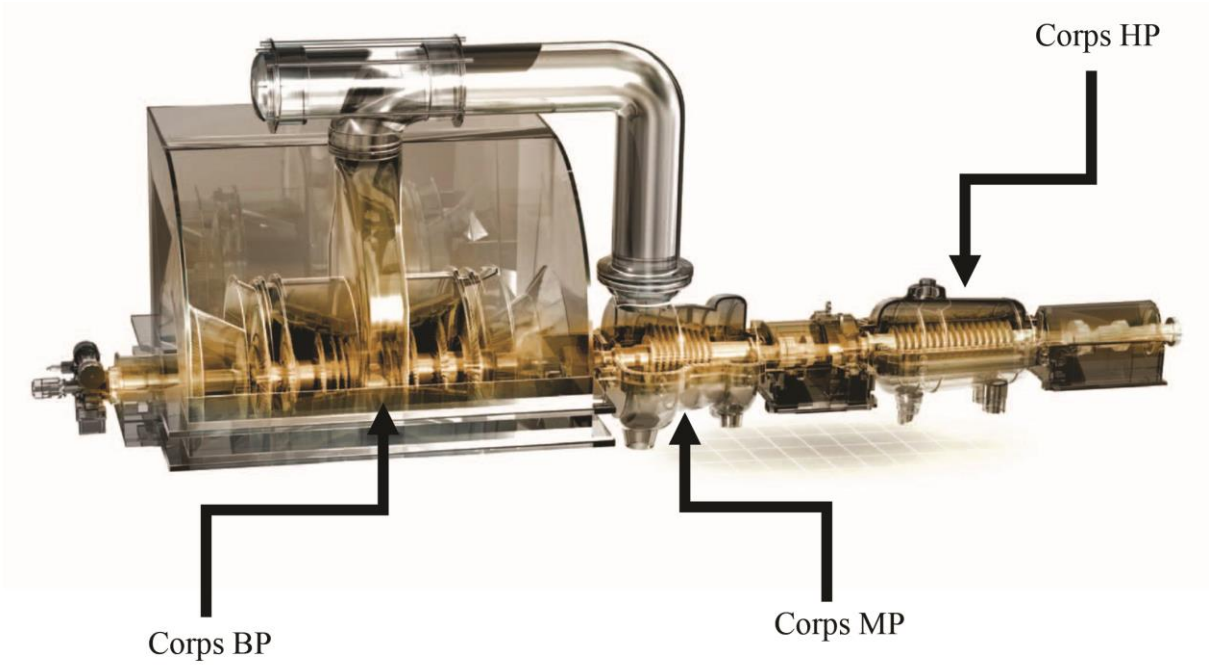
Elle transforme l'énergie thermique de la vapeur provenant de la chaudière en un mouvement de rotation de l'arbre.

Le travail mécanique obtenu sert à entraîner l'alternateur. La turbine est de type à condensation,

Les caractéristiques de la turbine sont:

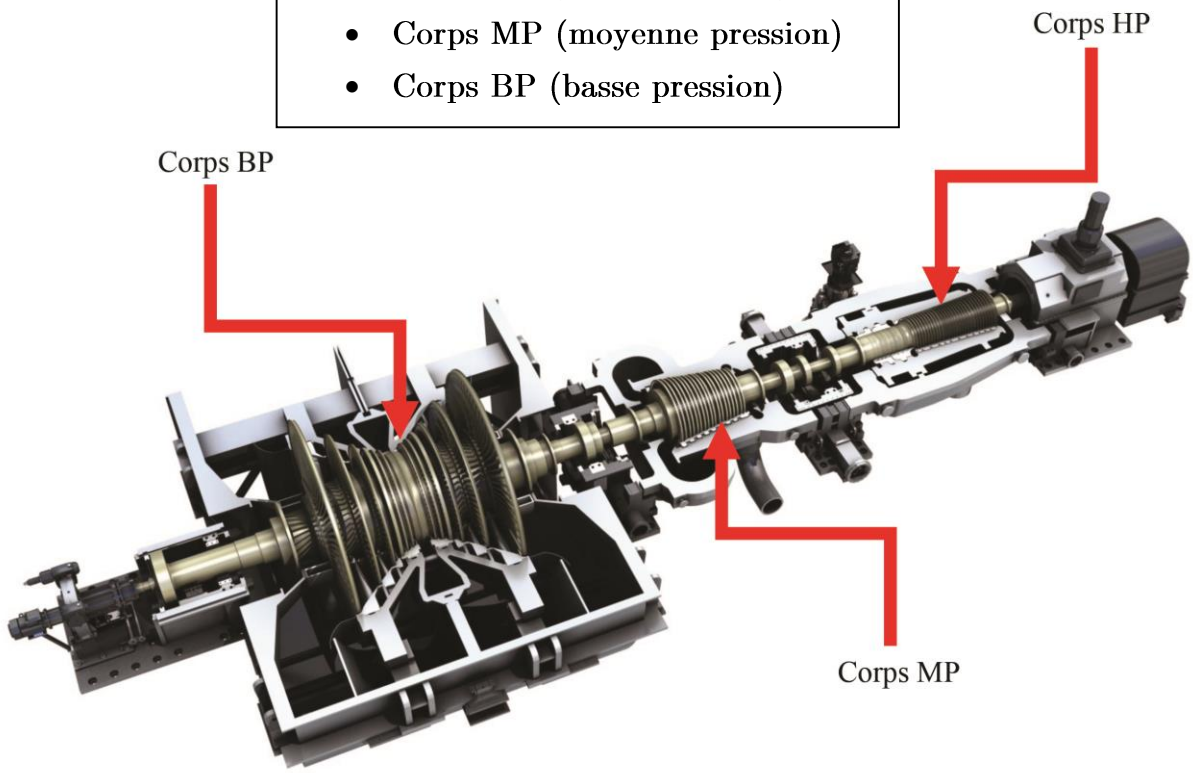
Longueur	**16,125 m**
Largeur	**13 m**
Poids	**499,910 * 10^3 Kg**
Puissance	**176 MW**
Pression	**138,2 bars**
Température vapeur :	**535° C**
Vitesse	**3000 tr/min**

Elle est à une seule ligne d'arbre composée de trois corps (HP, MP. BP) séparés.



Légende :

- Corps HP (haute pression)
- Corps MP (moyenne pression)
- Corps BP (basse pression)



Figure(I.5) Vue d'ensemble d'une turbine à vapeur

V.4.1. Corps HP :

Le corps HP (haute pression) est à simple flux, il reçoit la vapeur vive (RA) venant de la chaudière.

V.4.2. Corps MP :

Le corps MP (moyenne pression) est à double flux, il reçoit la vapeur resurchauffée (RB).

V.4.3. Corps BP :

Le corps BP (basse pression) est à doubles flux, il reçoit la vapeur sortante du corps MP, puis il la dirige vers le condenseur après avoir subi une détente à son niveau.

V.4.4. Soutirages :

Les soutirages au nombre de six, ils ont pour rôle principal de réchauffer Peau à travers les différents réchauffeurs.

V.4.5. Circuit d'huile :

Le circuit d'huile remplit les fonctions suivantes :

-Graissage et refroidissement des paliers.

-Actionnement des organes de réglage et des dispositifs desécurhydrolique (huile de commande).

V.4.6. Pompes plein débit de premier secours (pompes auxiliaires) :

En période de virage, de démarrage ou de mise à l'arrêt, une des deux pompes plein débit de premier secours (pompes auxiliaires) entraînées par un moteur alternatif triphasé alimente le circuit d'huile.

V.4.7. Pompes de deuxième secours :

L'une entraîné par un moteur à courant continu, l'autre par un moteur à courant alternatif, assure l'alimentation du circuit de graissage si les pompes de premier secours sont défaillantes.

V.4.8. Pompes de soulèvement :

Les pompes de soulèvement au nombre de deux à courant alternatif triphasé, assurent un film d'huile entre le rotor et les coussinets des paliers lors de démarrage et de la mise à l'arrêt du groupe turbo-alternateur.

V.4.9. Vireur hydraulique :

II a pour fonction de taire tourner la ligne d'arbre à une vitesse suffisante avant le démarrage et après l'arrêt du groupe turbo-alternateur.

V.5. Les systèmes eau- vapeur et autres systèmes:

V.5.1. Système eau-vapeur:

L'exploitation d'une centrale thermique nécessite d'importantes quantités d'eau que ce soit pour les besoins du cycle eau-vapeur ou pour le système de refroidissement.

Dans le cas de la centrale de Ras-Djinet tous les besoins en eau proviennent de l'eau de mer récupérée au niveau de la station de pompage.

Cette eau est prélevée à 7m de profondeur, la prise d'eau se trouve à 900 m de la côte, elle arrive à la station de pompage dans trois conduites en béton de 2,7 m de diamètre.

V.5.2. Eau de refroidissement:

V.5.2.1. Circuit eau de circulation :

Le circuit de circulation (VC) sert principalement au refroidissement de la vapeur dans le condenseur.

Le procédé de refroidissement est en circuit ouvert. L'eau de mer est pompée à la station de pompage par l'intermédiaire de deux pompes de circulation, elle est ensuite refoulée dans des réfrigérants et le condenseur pour enfin retourner à la mer par le canal de rejet.

V.5.2.2. Circuit de refroidissement « NORIA » VG :

Le circuit de refroidissement « NORIA » (utilisant l'eau déminéralisée) est utilisé pour le refroidissement des :

- Réfrigérants.
- Huile turbine.
- Huile d'étanchéité.
- L'excitatrice.
- Les pompes alimentaires.
- Palier réchauffeur rotatif.
- Ventilateur de recyclage.
- Ballon des purges continues.
- Compresseurs d'air de travail.

L'eau de refroidissement arrive par gravitation au niveau des trois pompes
« NORIA » à partir de la bâche surélevée.
L'eau utilisée dans ce circuit fermé est de l'eau déminéralisée.

V.5.3. Circuit d'incendie UJ :

Le circuit incendie de la centrale de Ras-Djinet est composé de :

- L'alimentation en eau.
- La tuyauterie d'alimentation principale.
- Bouche d'incendie.
- L'installation de mousse.
- L'installation d'arrosage des bâches fuel.
- Systèmes d'arrosages en douche.

Pour l'alimentation en eau, on dispose :

1) D'une alimentation en eau douce par réservoir surélevé.

2) D'une alimentation en eau douce par réservoir de 500 m3 et une autre en eau dessalée par réservoir (2700 m3).

3) D'une alimentation en eau de mer.

V.5.4. Systèmes d'eau déminéralisée UD :

La production d'eau pour le système eau-vapeur est réalisée à partir d'eau de mer.

Pour cela, on utilise quatre unités de dessalement utilisant chacune une pompe d'alimentation en eau de mer au niveau de la station de pompage.

Chaque unité à une capacité de production quotidienne de 500 m\ L'eau de mer dessalée est stockés dans deux réservoirs de 2700 m3 chacun : puis elle est amenée à l'installation de déminéralisation. L'eau dessalée est conduite jusqu'aux filtres à résines, elle est ensuite stockée dans deux réservoirs, d'une capacité de 1500 m3 chacun. L'eau déminée est refoulée vers des bâches surélevées (deux bâches de 40 m3 chacune), chaque bâche dessert deux groupes.

V.5.5. Circuit du condensât principal :

Le circuit commence à la sortie du condenseur pour aboutir au niveau du dégazeur de la bâche alimentaire. Il passe par les pompes d'extraction, le condenseur des buées, les éjecteurs de vapeur de service et les réchauffeurs basse pression.

L'eau à la sortie du condenseur est transférée dans le circuit par l'intermédiaire d'une des pompes d'extraction à une pression de 16.8 bars (deux pompes une en service et l'autre en réserve).

V.5.6. Système d'eau d'alimentation :

L'aspiration de l'eau d'alimentation commence à partir des conduites d'aspiration de la bâche alimentaire jusqu'à l'entrée de la chaudière. Elle passe à travers les pompes alimentaires et les réchauffeurs hauts pression.

L'eau d'alimentation est prise de la bâche alimentaire par gravitation jusqu'à la pompe nourricière, cette dernière augmente la pression de l'eau d'alimentation de 5 bars à 11bars, elle passe ensuite par la pompe principale (pompe centrifuge six étages) pour être refoulée à une pression de 170 bars et un débit de : 263 tonnes/heure (trois pompes, deux en service et une en réserve).

L'eau alimentaire traverse les réchauffeurs haute pression (HP5. HP6) et l'économiseur pour aboutir au ballon chaudière.

V.5.7. Circuit de vapeur vive RA

La vapeur surchauffée sort de la chaudière à une température de 540 C° et à une pression de 160 bars. Elle va être acheminée à travers le circuit de vapeur vive RA jusqu'aux vannes d'arrêt du corps HP de la turbine.

Sur le circuit de la vapeur vive est installé un contournement (bypass HP) qui permet au démarrage, le conditionnement de la vapeur et le refroidissement des resurchauffeurs.

Ce bypass entre en service aussi au moment de l'ilotage et à une charge inférieur à celle du minimum technique (charge 44 MW).

V.5.8. Conduite de vapeur à resurchauffer RC

La vapeur d'échappement en partie détendue est refroidie (40 bars et 357 C°) dans la partie HP de la turbine (SA11) est renvoyée à la chaudière par la conduite de vapeur à resurchauffer. Cette conduite va de la sortie de partie haute pression de la turbine jusqu'au niveau de l'entrée du resurchauffeur.

V.5.9. Circuit de vapeur resurchauffée :

La vapeur resurchauffée sort du resurchauffeur (37 bars et 540 C°) à travers deux conduites RB1 let RB12.

La vapeur va être acheminée jusqu'aux vannes d'arrêt MP (moyenne pression de la turbine). Sur cette conduite est pris un piquage pour l'alimentation du barillet (collecteur) de vapeur auxiliaire (principalement pour les éjecteurs).

V.5.10. Circuit de vapeur (auxiliaire) :

Le circuit de vapeur auxiliaire RQ prend sa source au collecteur RQ10

- En marche normale par le soutirage turbine (RF58).

- Pendant le démarrage, il est alimenté par de la vapeur resurchauffée RB21. Cette vapeur sert principalement à alimenter les éjecteurs de services et de démarrage (fluide moteur pour les éjecteurs qui servent à vider le condenseur)

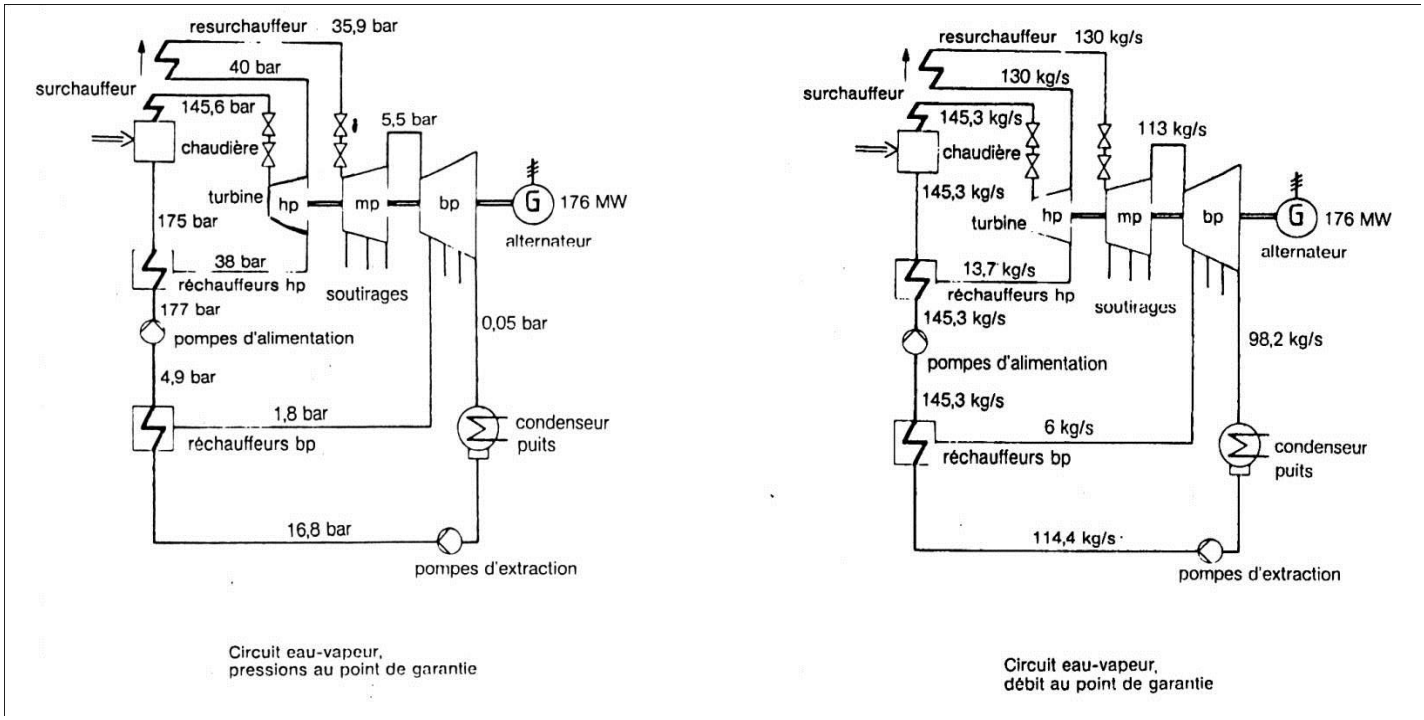


Figure (I.6) Schémas des Circuits eau-vapeur

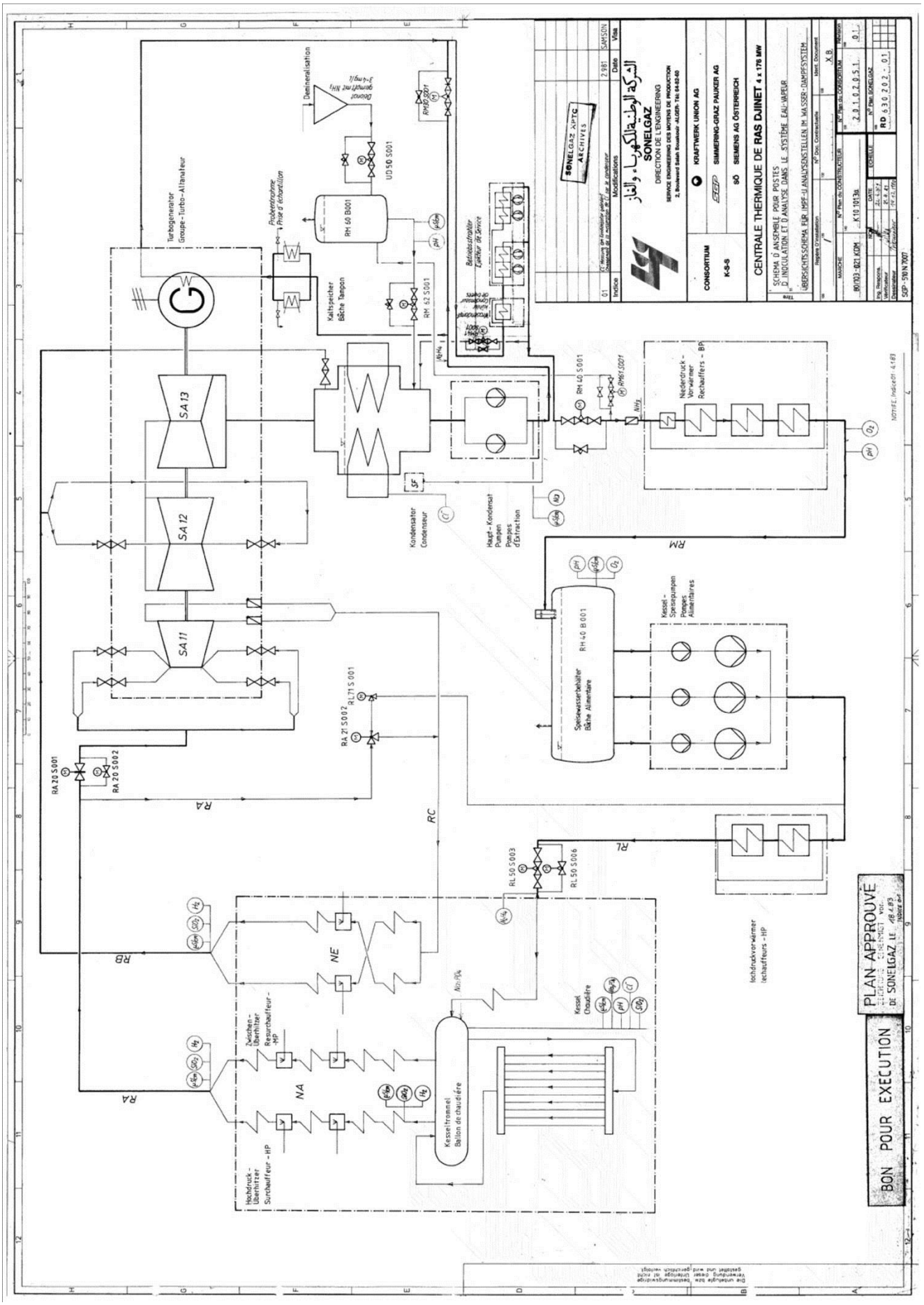


Figure (I.7) Schéma de circuit eau-vapeur de la centrale de Ras-Djinet

V.6. Description du cycle thermique:

(NB : les différentes évolutions du cycle sont représentées sur le schéma synoptique d'une tranche).

Suivant (1'-1), la vapeur subit des pertes de charge dans la tuyauterie, elle est ensuite détendue dans le corps HP de la turbine, suivant (1-2) à entropie croissante (perte dans la turbine).

Au cours de l'évolution (2-3) qui suit, la plus grande partie de la vapeur est resurchauffée dans le resurchauffeur à pression décroissante.

Cette dernière se rend dans le corps MP de la turbine ; pour qu'elle soit détendue en partie, suivant (3-5). La vapeur quittant le corps MP et la vapeur de fuite récupérée dans le corps HP subissent, dans le corps BP, une détente représentée par le parcours (5-9), et de là, elles se rendent en partie au condenseur et l'autre partie aux réchauffeurs (BP1, BP2 et BP3).

La vapeur se condense en se transformant en eau (9-10) et cette dernière est récupérée dans le puits du condenseur.

L'eau est comprimée dans la pompe d'extraction, cette évolution entraîne simultanément une diminution de son volume massique et une élévation de sa température de 0,1 degré, nous savons que, pour l'eau, fort peut compressible, ces variations sont extrêmement faibles, et que pour cette raison les points 10, 11, 12, 13, 14 et 15 sont pratiquement confondus

Du (point 15) au (point 18), le réchauffage du condensat principal est assuré par la chaleur qui lui est cédées par des prélèvements de vapeur (soutirages S1, S2 et S3) effectués en différentes étages du corps BP.

Le condensat se rend à la bâche alimentaire, dans cette dernière s'effectue le mélange de la vapeur surchauffée prélevée du corps MP (soutirage S4), le condensat auxiliaire des réchauffeurs HP et le condensat principal.

Le débit d'eau d'alimentation se trouve donc reconstituée.

L'eau d'alimentation est comprimée dans la pompe alimentaire (19-20).

Du (point 20) au (point 22), l'eau d'alimentation est chauffée par deux réchauffeurs HP5 et HP6 qui sont alimentés respectivement, par le soutirage S5 du corps MP et le soutirage S6 du corps HP.

Le cycle s'achève par le passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur dans la chaudière (22-1') Figure (I.7)

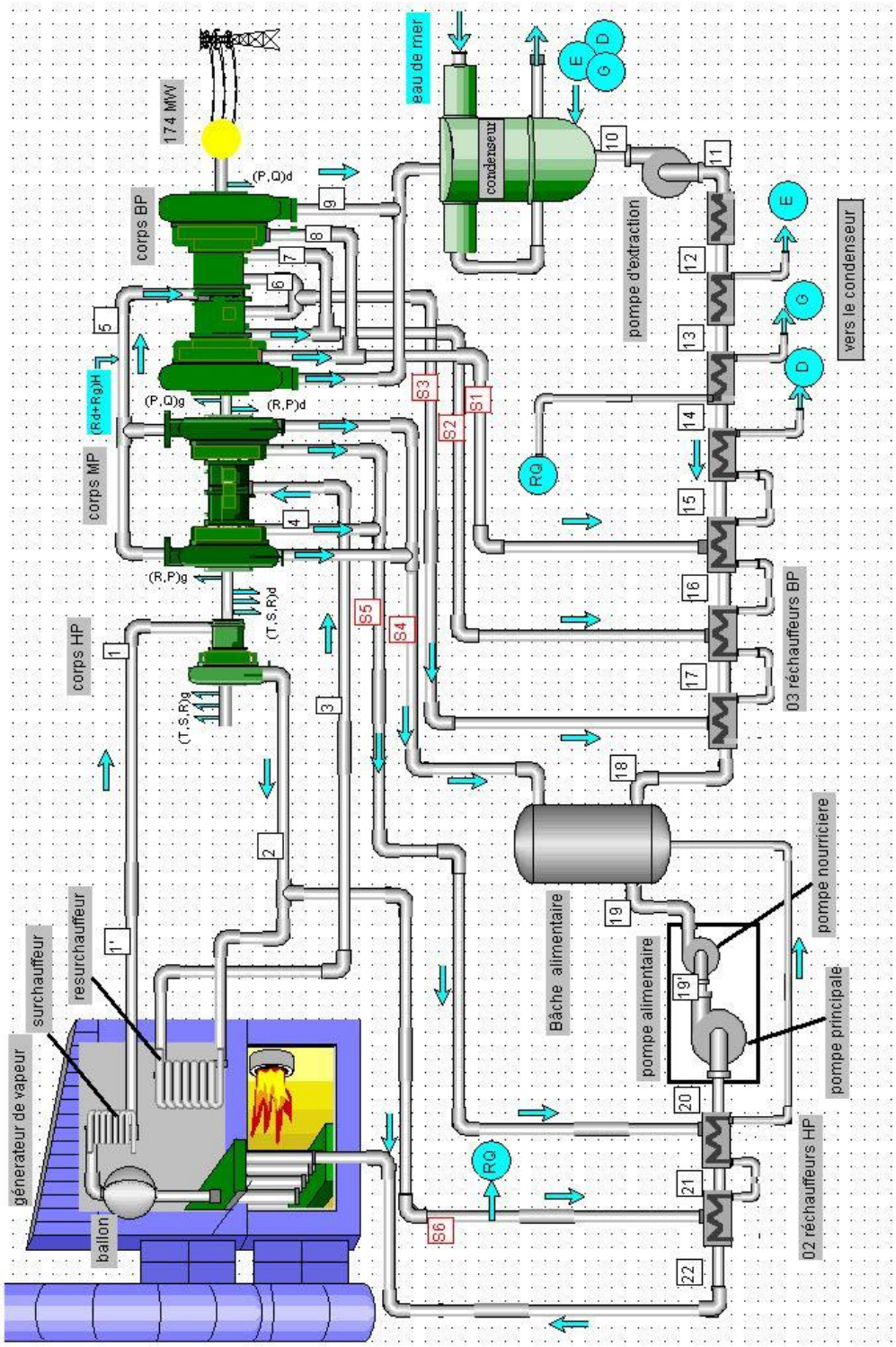


Schéma synoptique d'une tranche thermique

Figure (I.8) Schéma synoptique d'une tranche thermique

VI. La partie électrique de la centrale de Ras-Djinet : [3] [4] [13]

VI.1. Le schéma unifilaire:

Le schéma unifilaire présentant les différents équipements électriques est le suivant :

VI.1.1. Les transformateurs:

Chaque tranche dispose de 4 types de transformateurs qui remplissent des fonctions différentes :

1) **Transformateur principal**

Il alimente un réseau de 225 kV d'Alger-est ; il a une puissance apparente de 225MVA et un rapport de transformation de **225 /15.5 kV**.

La tension de l'enroulement primaire est adaptée de l'alternateur .des prises de réglage permettant de faire varier le nombre de spires, sont prévues sur l'enroulement haute tension, elles sont manœuvrables hors tension.

Son refroidissement est à huile, refroidie à son tour par air, dans des radiateurs.

2) **Transformateur de réseau 63 kV/ 6,3 kV**

Il est alimenté par un réseau 63 venant de si- Mustapha, muni d'un régleur coté HT ; la tension de l'enroulement secondaire est adaptée à celle des moteurs Mt. Il est aussi appelé transformateur de secours.

3) **. Transformateur de soutirage 15,5 kV/6,3 kV**

Sa puissance nominale est de 20MVA et son rapport de transformation est de 15,5 kV / 6,3 kV.

Sa tension et son rapport de transformation moyen ont été choisis de façon à ce que le transformateur de soutirage, alimenté par l'alternateur, soit dimensionné.

.

4) **Transformateur MT/ BT**

Les transformateurs alimentant les auxiliaires BT sont du type sec connecté sur le jeu de barre MT; leur transformation est réglée manuellement hors-tension.

VI.1.2. Les moteurs de moyenne tension:

Les moteurs utilisés pour entrainer les pompes et les ventilateurs sont de moyenne tension, leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Le moteur entrainant la pompe alimentaire, Pn = 3 MW, Un = 6,3 kV, In = 33A,
- Le moteur entrainant le ventilateur de recyclage, Pn = 1200 kW Un = 6,3 kV, In = 139 A
- Le moteur entrainant le ventilateur de soufflage, Pn = 300 KW Un = 6,3 kV, In = 139A
- Le moteur entrainant la pompe d'extraction, Pn = 300 kW Un = 6,3 kV, In = 34A
- Le moteur entrainant la pompe de circulation d'eau de mer, Pn = 700 kW, Un = 6,3 KV, In = 90A

Tous ces moteurs sont protégés par des protections électriques identiques qui sont :

- La protection directionnelle de mise à la terre(F90),
- La protection contre les surintensités(F10),
- La protection contre l'interruption du conducteur(F08).
- La protection à minimum de tension(F40),
- La protection contre le manque de phase(F42).

Toutes ces protections déclenchent le moteur et donne une alarme en salle de commande.

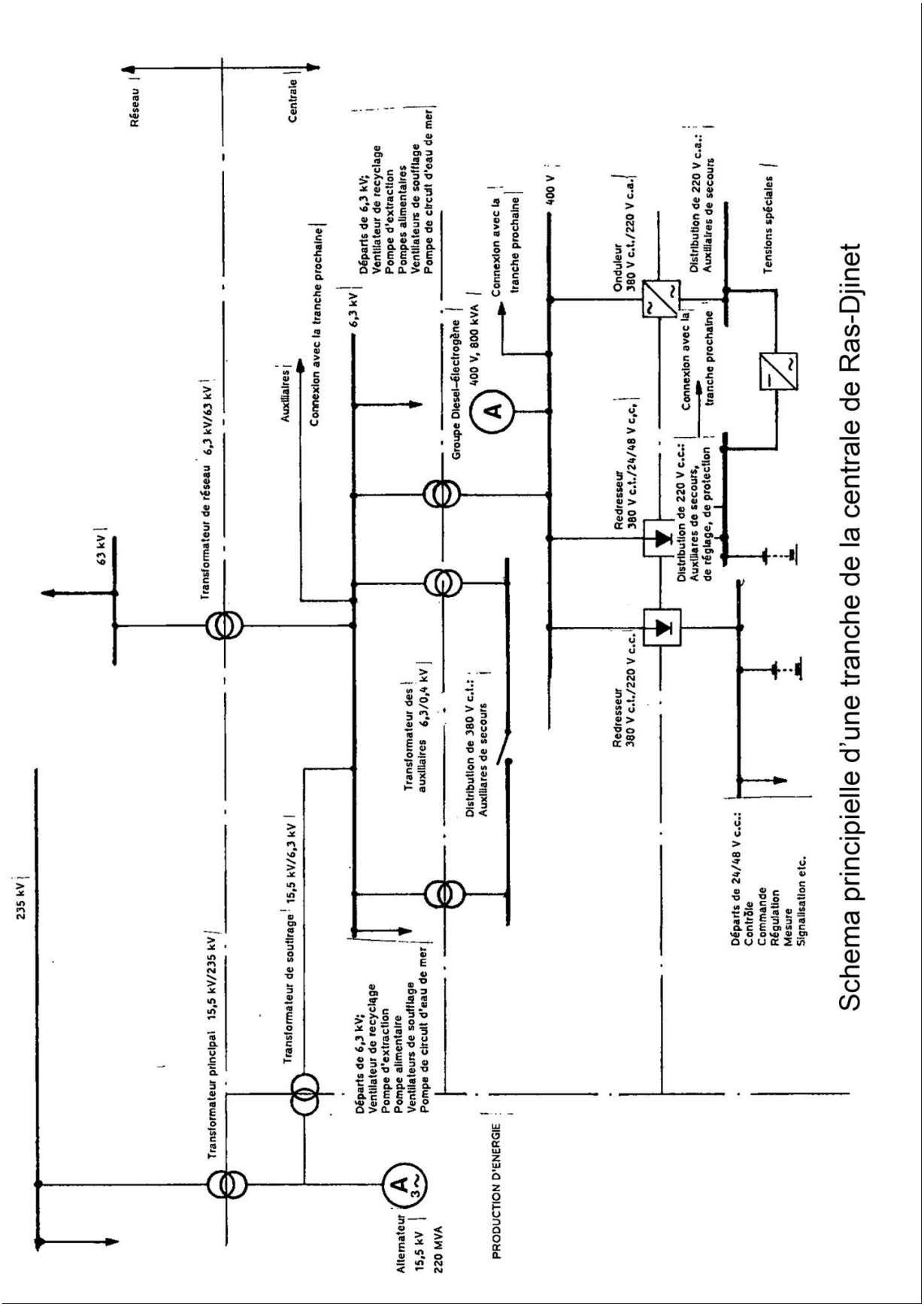


Figure (I.9) Schéma principal d'une tranche de production de la centrale de Ras-Djinet

VI.1.3. Les Auxiliaires:

VI.1.3.1. Eau de réfrigération:

L'exploitation d'une centrale thermique de grande puissance demande pour réduire la chaleur résiduelle, d'importantes quantités d'eau de refroidissement. Les besoins de la centrale de Ras-Djinet s'élèvent à 30 m^3 /s.

Cette eau est prélevée de la mer à 7m de profondeur. La prise d'eau se trouve à 900m de la côte. L'arrivée de l'eau à la station de pompages se fait par 3 conduites en béton d'un diamètre intérieur de 2,70m et extérieur de 3,00m.

Après le nettoyage mécanique dans la station de pompage, l'eau passe dans le circuit principale, les condenseurs, les réfrigérants etc...., pour dissiper la chaleur qui représente l'énergie perdue. L'eau rejoint par la suite le canal de rejet.

VI.1.3.2. Une station de production d'hydrogène :

Sert à produire l'hydrogène nécessaire au refroidissement des 4 alternateurs de la centrale.

VI.1.3.3. Un poste de détente gaz :

Composé de deux (02) lignes de filtration gaz, et trois (03) lignes de régulation pour la détente gaz de 60 à 6 bars.
Un débit de 160000m^3/h de gaz naturel est nécessaire pour assurer la pleine charge des quatre groupes.
En cas d'indisponibilité du gaz naturel, le combustible de secours est assuré par les deux (02) bâches de stockage de capacité : 2x10000 m3 de fuel.

VI.1.3.4. Une station de pompage :

Les principaux éléments de la station de pompage sont :

- Une grille à grappin
- Un tambour filtrant
- Deux pompes de circulation d'eau de mer vers le condenseur
- Des pompes d'alimentation en de mer de service auxiliaire

La prise d'eau se fait en mer à 900 m de la station de pompage.

L'eau arrivant par trois conduites passe par la grille à grappin pour la première élimination des gros déchets ensuite par le tambour filtrant éliminant les petits déchets puis l'eau est refoulée par les pompes de circulation vers le condenseur pour le refroidissement de la vapeur du cycle et enfin elle sera rejetée vers le canal de rejet pour retourner dans la mer.

VI.1.3.5. Une station de dessalement de l'eau de mer :

Les besoins d'eau dessalée de la centrale de Ras-Djinet sont de l'ordre de 1100 m^3/ jour.

L'installation comprend quatre (04) unités fonctionnant selon le principe de la distillation par détentes successives à 18 étages. Chaque unité produit 500 m^3 d'eau dessalée qui est stockée dans des réservoirs d'une capacité de 2 x 2700 m^3. Chaque unité fonctionne indépendamment des autres.

VI.1.3.6. Une station de déminéralisation :

Deux chaines de déminéralisation de 40m3/h chacune parachèvent le traitement de l'eau avant son utilisation dans le cycle eau vapeur
L'installation de déminéralisation sert au traitement de l'eau d'appoint d'alimentation pour les quatre (4) chaudières.

Comme eau brute on utilise le distillat des unités de dessalement d'eau de mer qui a une teneur en sels maximum de 20mg/L et une température maximale de 40°C.

L'eau déminéralisée doit correspondre dans sa qualité aux exigences de l'eau d'appoint des chaudières à vapeur à haute pression.

La conductivité électrique doit être inférieur à 0,1 micro-Siemens/cm à 25°C et la teneur en silice inférieur à 0,02mg/L (SIO2). Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux (02) réservoirs de 1500 m^3 chacune.

VI.1.3.7. Une station d'électro chloration:

La chloration de l'eau de mer permet de préserver les équipements traversés par l'eau de mer contre la prolifération d'organes marins.

L'installation est prévue pour produire 2x150Kg/h de chlore actif avec deux (02) unités.

En condition de chloration continue, 104000 m^3/h d'eau de circulation sont continuellement chloré.

VI.1.3.8. Système de surveillance, d'alarme et d'analyse :

- Pour permettre une bonne conduite du groupe de production des paramètres d'exploitation (température, pression, niveau d'eau, vibrations..), des différents équipements du groupe, sont indiqués, enregistrés en permanence en salle de commande et signalés en cas de dépassement de seuil.
- Pour une meilleure analyse en cas d'incident un consignateur d'état est installé, il permet d'enregistrer les alarmes dans un ordre chronologique.

VI.1.3.9. Salle de commande centralisée:

Chaque paire de tranches est contrôlée et réglée depuis la salle de commande. La salle de commande comprend pour chaque tranche :

- Deux (02) pupitres de conduites.
- Deux (02) tableaux verticaux où sont ressemblés les organes de commande
- Un (01) tableau synoptique schématisant les auxiliaires électriques.

VI.1.3.10. Salles Iskamatic:

C'est les salles d'électronique ou se trouvent toutes les armoires de cartes électroniques, c'est là ou se fait la régulation des différents systèmes. L'Iskamatic est considérée comme l'intermédiaire entre la salle de commande et le site.

VII. Conclusion :

Au terme de la description de la centrale électrique de Ras-Djinet, il est à retenir qu'elle présente différentes caractéristiques ; elle est constituée de quatre (04) tranches de production identiques produisant 176 kW nous avons aussi mis en évidence le fonctionnement, ses différentes caractéristiques et la construction d'un alternateur triphasé de grande puissance.

I. Introduction: [5] [3] [7]

Les alternateurs sont la source primaire de l'énergie électrique que nous consommons, plus 95% de la production mondiale est produite par des alternateurs.

L'alternateur est une machine synchrone conçue pour convertir une énergie mécanique en énergie électrique avec de très grandes puissances, il fonctionne selon la loi de l'induction électromagnétique.

Dans les centrales thermiques l'énergie provient de la transformation de l'énergie mécanique disponible à l'arbre de la turbine à l'alternateur qui la transforme en énergie électrique

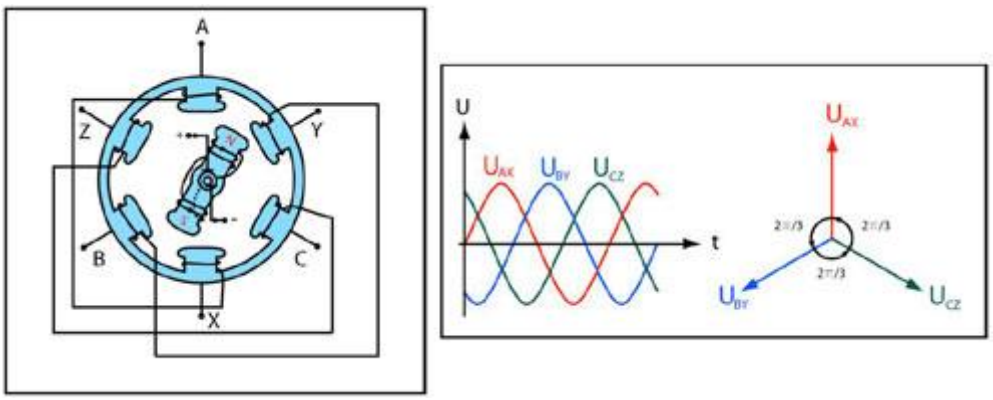
L'alternateur de la centrale de Ras-Djinet, est une machine synchrone triphasée qui transforme l'énergie mécanique fournie par la turbine en énergie électrique.

C'est un alternateur bipolaire, sa vitesse de rotation est de (3000tours/min, 50HZ), il est à pôles lisses. Pour minimiser les pertes pas effet joules, l'alternateur est refroidit à l'aide d'un système de circulation d'hydrogène (H_2) à basse pression.

Chaque tranche de production de la centrale de Ras-Djinet est équipée d'un alternateur SIEMENS qui produit l'énergie électrique sous une tension de 15.5 kV

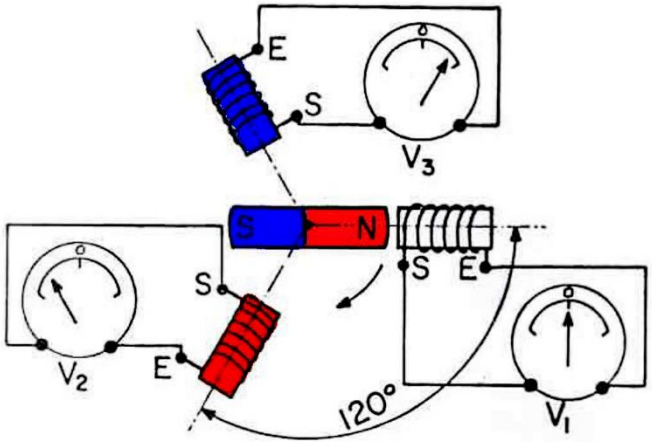
II. Définitions: [5] [7] [8]

Les alternateurs alimentent des réseaux triphasés, dans lesquels l'énergie est distribuée avec 3 ou 4 fils. L'induit du stator se compose donc de 3 bobines décalées de 120°, dont les extrémités sont réunies sur un fil commun (montage en étoile).



Figure(II.1) *Générateur triphasé. Le stator est constitué de trois paires de bobines connectées en série deux par deux A-X, B-Y, C-Z. Le rotor (au centre) induit des tensions électromotrices dans les bobines, appelées tensions de phase, qui sont décalées de 120° (ou 2π/3 radians). Leur variation dans le temps ainsi que leur diagramme de phase sont représentés à droite*

Les 3 tensions produites sont décalées d'un tiers de période dans les cas où le rotor ne porte qu'un électro-aimant (une paire de pôles). (Figure II.1)



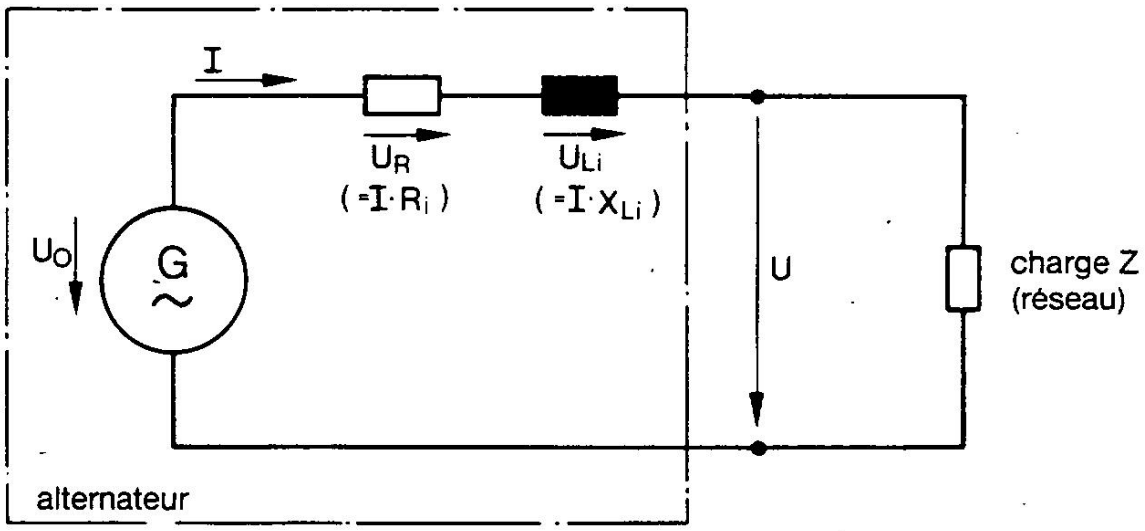
Figure(II.2) Schéma équivalent d'un alternateur triphasé

Le circuit équivalent d'un alternateur peut être représenté par la tension induite U_0, en série avec les tensions sur la résistance R_i. et la réactance X_{Li} de l'induit, et sur la charge **Z**.

La réactance est due à la self- induction des enroulements du stator et constitue une impédance interne.

U est la tension aux bornes.

La charge **Z** représente le réseau. (Figure II.2)



Figure(II.3) Circuit équivalent d'un alternateur

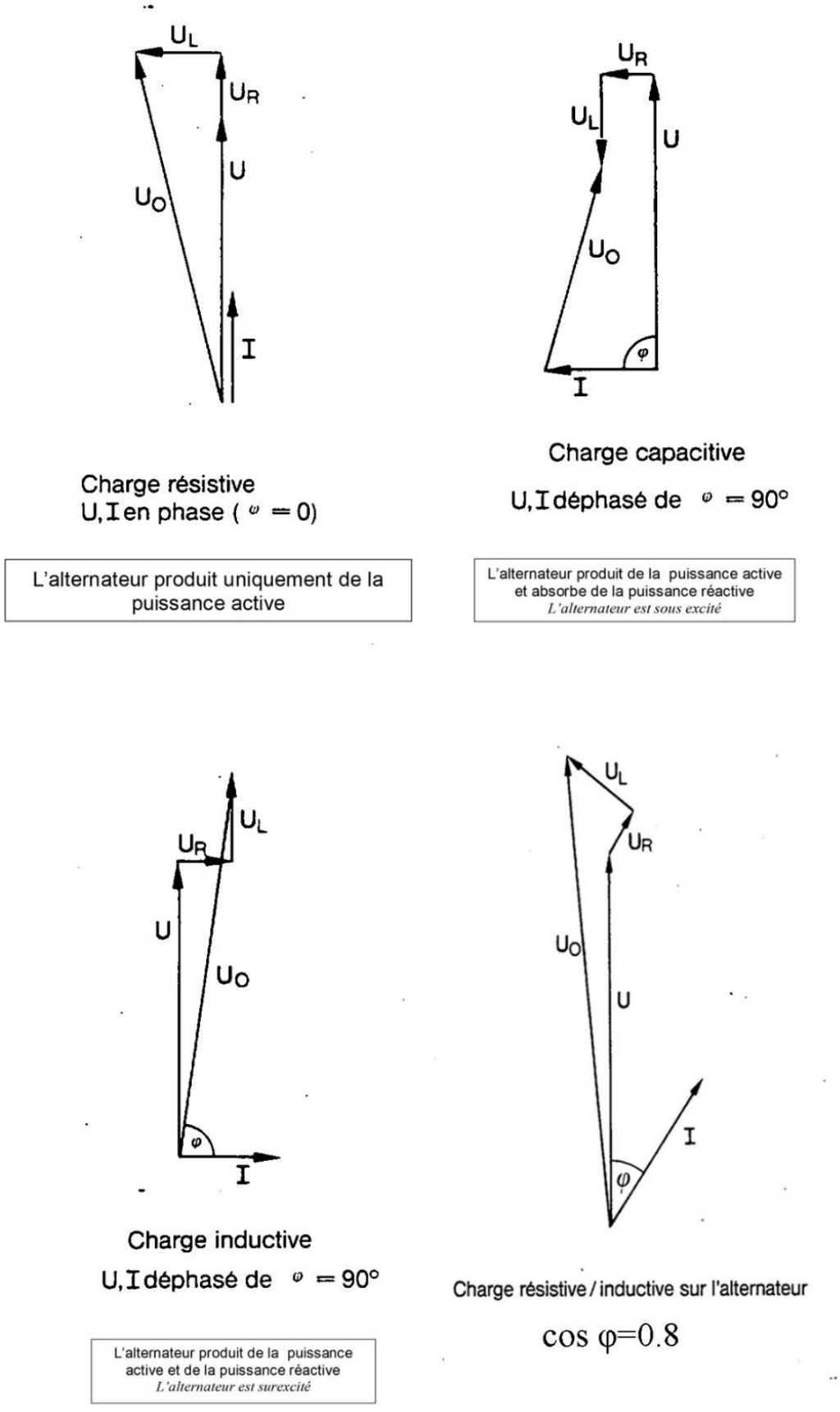
Le comportement de l'alternateur dépend de la nature de la charge **Z** qu'il alimente, normalement il débite au réseau une puissance active et réactive, selon le facteur de puissance du réseau. Mais la puissance débitée peut également être purement active ou purement réactive.

La puissance débitée est purement active si la charge de l'alternateur est une charge résistive.

Le courant **I** est en phase avec la tension **U**. La tension induite dans l'alternateur doit correspondre à la somme vectorielle U_0 des tensions **U**, U_R et U_L.

La puissance débitée est purement réactive si la charge de l'alternateur est une charge inductive ou capacitive. Une charge inductive provoque un déphasage du courant **I** de **90°**en retard, et une charge capacitive provoque par contre un déphasage du courant **I** de **90°** en avance sur la tension **U**.

Des charges simples sont relativement rares. Le plus souvent le réseau peut être décrit par une charges mixte résistive/inductive ayant un facteur de puissance **cos φ**=0.8.le courant **I** est alors déphasé en retard sur la tension **U**. La puissance débitée au réseau est active et réactive. (FigureII.3)



. Figure(II.4) Diagrammes des différentes charges (Z) sur l'alternateur

III. Principe de fonctionnement de l'alternateur:[6] [8]

Tout d'abord, les courants circulant dans le rotor créent un champ tournant. Ce champ tourne à la même vitesse et dans le même sens que les pôles du rotor. Les champs du rotor et du stator sont donc stationnaires l'un par rapport à l'autre. Lorsque l'alternateur flotte sur la ligne, le courant circulant induit une tension $\mathbf{V_1}$qui est en phase avec la tension du réseau.

Si l'on applique à l'alternateur un couple tendant à le faire accélérer, le rotor avance d'un **angle mécanique (α)** par rapport à sa position originale.

Ce décalage provoque la circulation d'un courant dans le stator.

Il se développe alors des forces d'attraction et de répulsion entre les pôles **N, S** du stator et les pôles **N, S** du rotor.

Ces forces produisent un couple qui tend à ramener le rotor à sa position originale. C'est précisément ce couple que la turbine doit vaincre pour maintenir l'angle de décalage. **Figure(II.1)**

IV. Paramètres de dimensionnement de l'alternateur: [3]

Les paramètres conditionnant le dimensionnement d'un alternateur sont principalement

La puissance, la vitesse, le facteur de puissance, la tension et le rapport de court-circuit.

- La puissance active est généralement choisie au niveau de la tranche complète de la centrale, souvent normalisée.
- La vitesse est fixée par la fréquence du réseau, soit 3000 tr/mn à 50Hz et 3600 tr/mn à 60Hz.
- Le facteur de puissance cosφ est généralement fixé de manière conventionnelle, adaptée à l'économie de la répartition de puissance réactive sur le réseau à une époque donnée. En Algérie, le facteur de puissance nominal des alternateurs est actuellement de 0,8.
- La tension est quelquefois standardisée (20kV assez fréquemment pour les grandes puissances) ou bien laisser le choix au constructeur. Dans notre alternateur la tension est de15, 5 kV

V. Caractéristiques techniques et mécaniques de l'alternateur : [3]

V1. Spécification:

Spécification	
Nom de la centrale	Centrale thermique de RAS-DJINET
Type de l'alternateur	HD TGO 215/2-470
Année de construction	1984/1984/1984/1985
Numéro de fabrication	1.635 202 /205 /208 /211
numéro d'ordre	20.8080100/1-BE-N/43084-95
Excitatrice à redresseurs tournants	ELR 70 / 62-30 / 6-10 N° 1.635 203 / 6 / 9 / 12
Excitatrice pilote	ELP 50 / 29-30 / 16 N° 1.635 204 / 7 / 10 / 13

Grandeurs nominales et puissances	
Puissance apparente	220 MVA
Puissance active	176 MW
Intensité	8,195 kA
Tension	15.5 kV ± 10%
Vitesse de rotation	50 s^{-1} / 3000 tr/min
Fréquence	50 Hz
Facteur de puissance	0,8 (cosφ)
Montage	Y
Déséquilibre de charge permanent admissible	12%
Courant d'excitation nominal requis pour la puissance nominale	2450 A

Caractéristiques mécaniques	
Volume de l'alternateur	62 m^3
Poids du stator	198000 kg
Poids du rotor	35000 kg

Il faut savoir que :

- l'intensité indiquée par la caractéristique technique est le courant nominal par phase : c'est le courant le plus intense que peut supporter la machine sans échauffement.
- La tension indiquée est la tension entre fils de ligne (entre bornes)
- L'alternateur triphasé est toujours branché en (Y) étoile

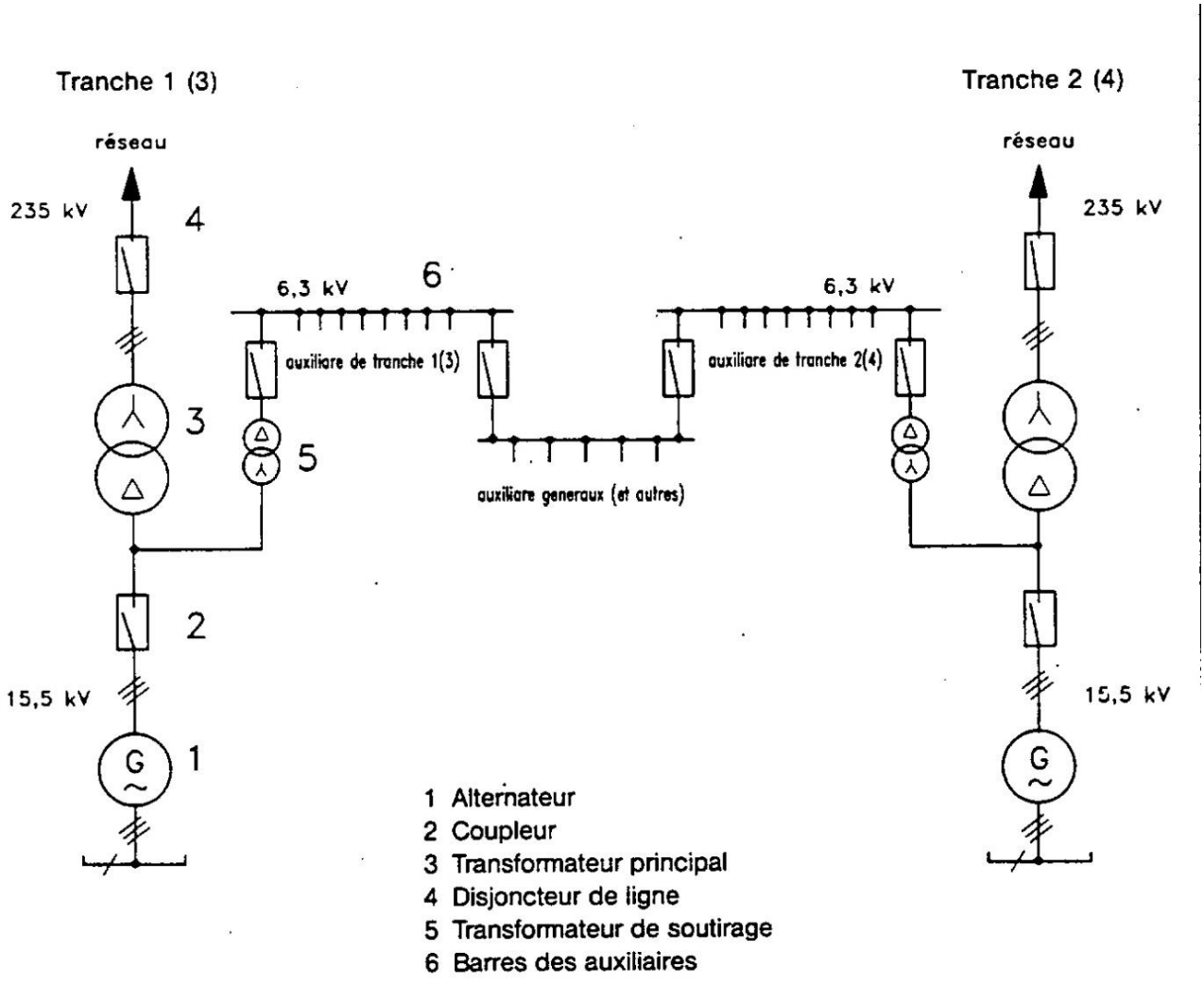
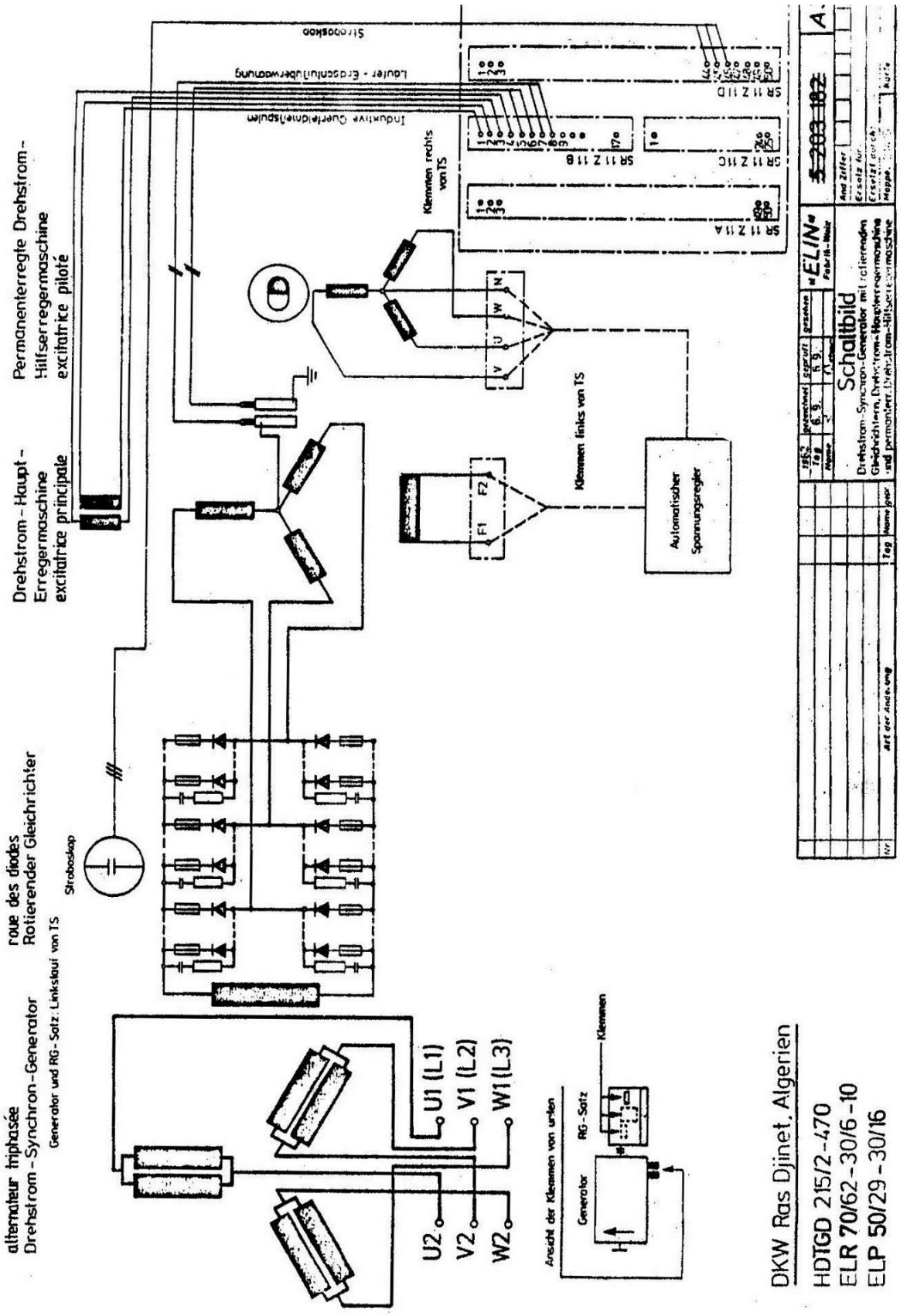


Figure (II.5) schéma de branchement d'alternateurs sur le poste électrique à la centrale de Ras-Djinet



Figure(II.6) Schéma électrique simplifie de l'alternateur branché en étoile

V.2. Caractéristique à vide :

On appelle caractéristique à vide d'un alternateur la courbe représentant la f.é.m. efficace à vide aux bornes d'un enroulement en fonction du courant d'excitation, l'alternateur étant entrainé à sa vitesse normale (voir Diagramme calculé de marche à vide et à charge)

On remarque que la tension U_1 augmente proportionnellement avec I_2 (courant d'excitation). Cependant, au fur et à mesure que le flux augmente, l'acier se sature, et la tension croit de moins en moins pour une même augmentation de courant d'excitation.

La tension augmente proportionnellement avec le courant d'excitation jusqu'à 95%, puis l'acier commence à se saturer. On atteint une tension de 100% lorsque le courant d'excitation I_2=850 A, mais si l'on double le courant, la tension ne monte qu'à 125%.

V.3. Caractéristique de court-circuit:

C'est une droite qui passe par l'origine, l'alternateur n'ayant pratiquement pas de flux pendant l'essai en court-circuit, la F.m.m tournante résultante est négligeable devant les F.m.m de la roue polaire et d'induit ceci permet de conclure que (I_1=I_2)

Cette caractéristique est indépendante de la vitesse de rotation sauf pour les très faibles vitesses.

V.4. Caractéristique en charge :

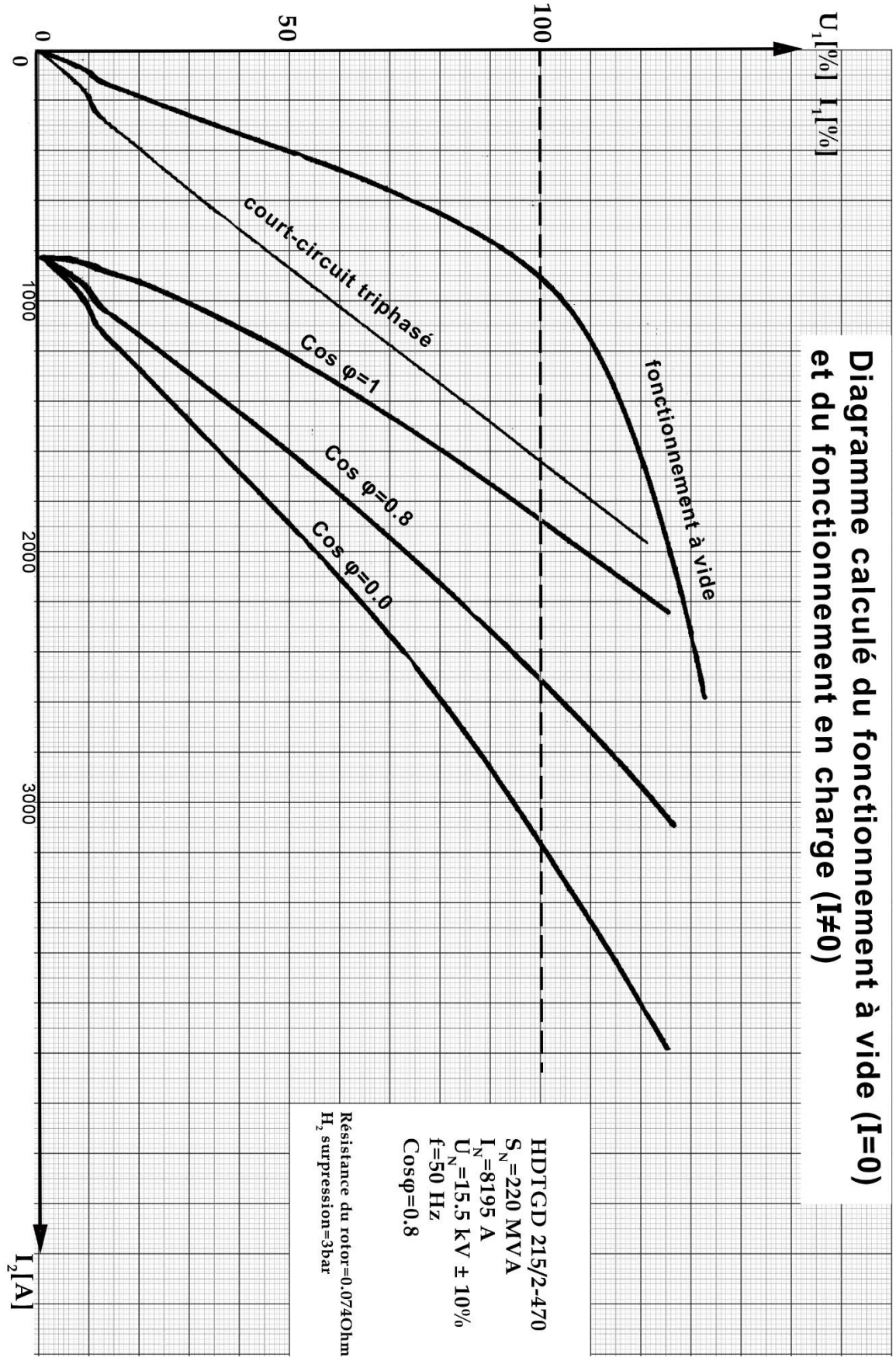
Le comportement de l'alternateur dépend de la nature de la charge qu'il alimente. On distingue quatre (04) sortes de charges :

1- Charge résistive.

2- Charge inductive.

3- Charge capacitive.

4- Réseau infini.

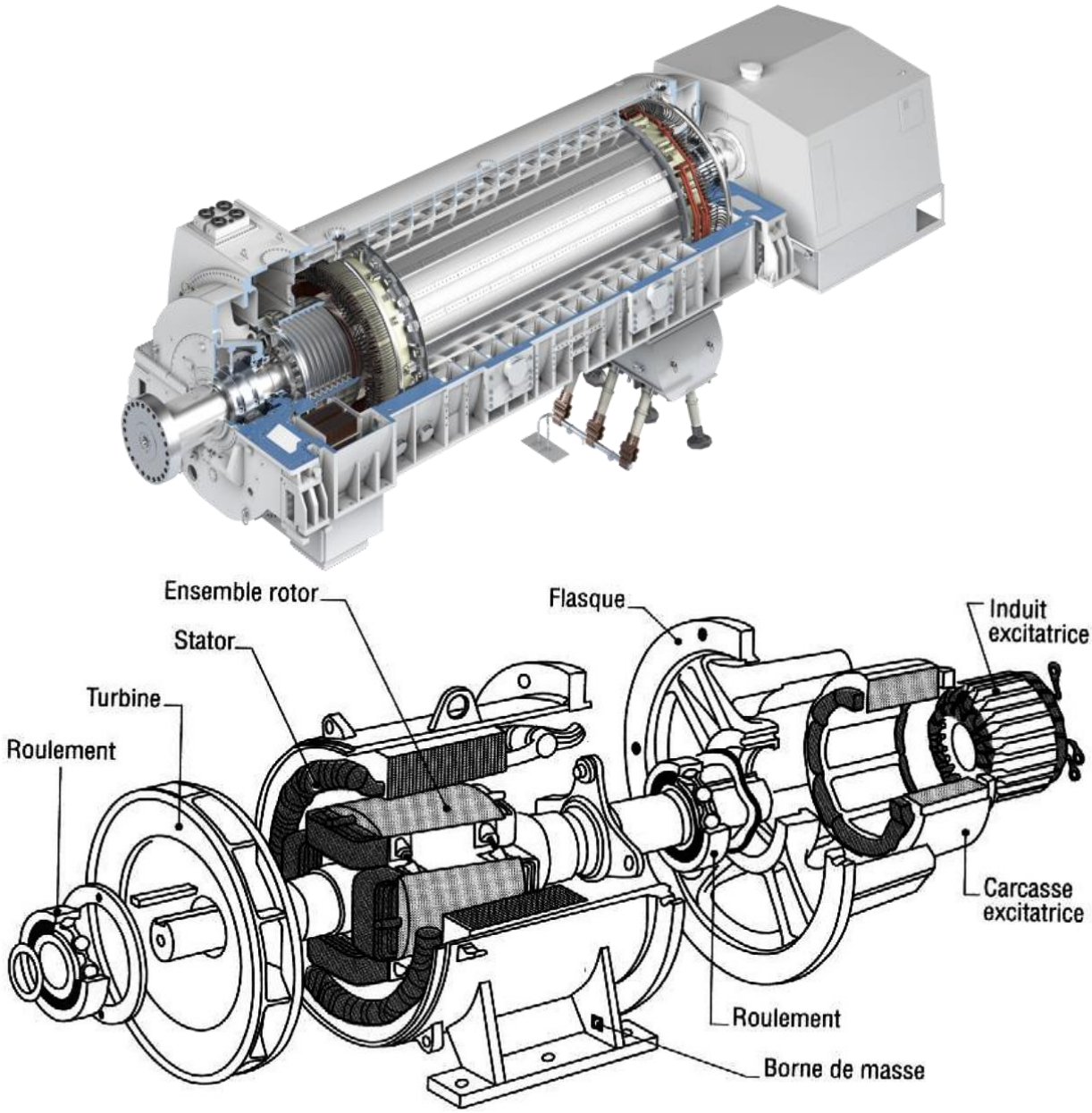


Figure(II.7) Diagramme calculé du fonctionnement de l'alternateur de la centrale de Ras-Djinet

VI. Eléments constitutifs de l'alternateur : [3] [13]

L'alternateur comprend les principaux éléments suivants:

1) Stator
2) Rotor
3) Palier
4) Etanchéité
5) Réfrigérant



Figure(II.8) les principaux éléments d'un alternateur

VI.1. Le stator :

Le stator est l'induit de l'alternateur (la partie fixe).

Du point de vue électrique le stator de l'alternateur est identique à celui d'un moteur asynchrone triphasé.

Pour des raisons de fabrication, de montage et de transport, le stator se compose des principales parties suivantes :

1) ***Enveloppe du stator***: est une construction soudée qui se compose d'une partie cylindrique (virole), de deux brides et de nervures radiales et axiales. Elle est l'unité de transport la plus lourde de tout l'alternateur, portant le circuit magnétique et l'enroulement du stator.

   L'enveloppe du stator résiste à une pression relative d'environ 10 barres dans les alternateurs refroidie par hydrogène.

   Le stator repose sur la table- support par l'intermédiaire de pattes soudées à l'enveloppe.

2) ***Paliers flasques*** : L'enveloppe du stator est fermé coté turbine et coté excitatrice par des flasques résistant à la pression. Les flasques contiennent les paliers de l'alternateur et les étanchéités d'arbre, et chaque flasque est constitué de caissons creux. Toutes les tuyauteries d'alimentation et de récupération de l'huile de graissage et de l'huile d'étanchéité sont fixées aux flasques des paliers. Des balais de mise à la terre sont fixés sur le palier flasque coté turbine. Les deux porte-balais sont décalés les uns des autres de 90" pour qu'au moins un balai appuis en permanence sur la fusée de l'arbre de rotor pendant la rotation de ce dernier.

3) ***Circuit magnétique***: Le circuit magnétique est parcouru par un champ tournant. Afin de réduire les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dans cette partie active de l'alternateur, il faut que le circuit magnétique soit constitué d'un empilage de segment de tôles dynamo de

   5 mm d'épaisseur au silicium à haute résistivité, isolées par des vernis isolante. Les tôles sont découpées en segments dans une matrice combinée

4) ***.Enroulement du stator***: L'enroulement du stator est un enroulement à têtes de bobines coniques en deux couches composé de barres.

Il est logé dans des couches rectangulaires régulièrement réparties sur le bord intérieur du circuit magnétique

Chaque barre d'enroulement est composée d'un grand nombre de conducteurs élémentaires isolés les uns par rapport aux autres et tressés ensemble avec une torsion de360°

5) ***Isolation des barres*** :Les barres sont enrubannées sur toute leur longueur au moyen d'un ruban micacé appliqué en plusieurs couches à demi-recouvrement Le ruban micacé se compose d'un support mince, résistant à la déchirure et de clivage de micas encollées au support au moyen de liant utilisé en petite quantité.

Les barres isolées sont recouvertes d'une couche de vernis conducteur sur la partie située dans le fer pour éviter les effluves entre l'isolation et la paroi des encoches.

L'enroulement du stator est relié à 1'intérieur de la machine par des connexions à six bornes disposées dans une boite en acier amagnétique soudée au-dessous de l'alternateur du côté de l'excitatrice. Les bornes peuvent recevoir des transformateurs d'intensités destinés aux mesures et aux protections d'alternateur.

VI.2. Le rotor:

Le rotor est l'inducteur de l'alternateur (c'est la partie tournante). Il porte une paire de pôle alterné Nord et Sud entraîné par la source d'énergie mécanique (turbine).

Ce rotor a des pôles lisses, car la turbine à vapeur tourne à une grande vitesse (3 000 tr/min sur le réseau de 50 Hz).Il a une forme cylindrique, car les pôles sont formés en plaçant des bobines dans des encoches taillées dans la masse même du rotor.

Il se compose des principales parties suivantes :

1) ***Arbre du rotor :*** c'est un élément massif monobloc forgé à partir d'un lingot coulé sous vide .Il se compose d'une partie active appelée« table» et deux fusées. Les extrémités libres des deux fusées sont usinées en

forme de brides et constituent les plateaux d'accouplement qui servent à relier le rotor de l'alternateur à la turbine et à1'excitatrice. La table de rotor est fraisée par des encoches radiales qui reçoivent l'enroulement inducteur. Il a des caractéristiques mécaniques élevées nécessaires pour résister à la force centrifuge et aux efforts dus au court-circuit imposent l'utilisation d'un acier traité de haute qualité.

2) ***Enroulement de rotor*** :il se compose de plusieurs bobines logées dans les encoches longitudinales de la table du rotor. Les bobines sont enroulées de façon à constituer deux pôles. Chaque bobine comprend plusieurs enroulements montés en série qui sont constitués chacun par deux demi-enroulements réunis par brasage dans les têtes de bobines. L'enroulement de rotor se compose de conducteurs creux présentant chacun deux canaux de refroidissement latéraux. Les conducteurs utilisés sont en cuivre à 1'argent pauvre en oxygène (environ 0,1% d'argent). Le cuivre à l'argent conserve ses bonnes caractéristiques mécaniques même en présence de températures élevées, ce qui évite les déformations des bobines sous l'effet des sollicitations thermiques.
3) ***Frettes du rotor :*** Les frettes monoblocs soustraient les têtes de bobines à l'effet de la force centrifuge. Elles sont en métal amagnétique à haute résistance afin de diminuer les pertes supplémentaires. Les frettes, dont lesquelles sont callées des bagues d'extrémités, sont montées à chaud en porte-à-faux sur la table du rotor. Un jonc d'arrêt maintient chaque frette dans sa position axiale.
4) ***Amenée du courant d'excitation:*** La connexion de courant d'excitation assure la liaison électrique entre l'enroulement du rotor et l'excitatrice. Le courant d'excitation parvient à l'enroulement inducteur par deux conducteurs de section demi-circulaire à faible intensité de courant qui sont logés dans l'alésage central des arbres de l'excitatrice et du rotor, puis par des connecteurs radiaux. Au niveau de l'accouplement entre l'arbre du rotor et l'arbre de l'excitatrice, la liaison électrique est assurée par des broches de type « MULTICONTACT ». Ces broches autorisent une dilatation nom entravée des connections.
5) ***Ventilateur du rotor:*** Le rotor possède deux ventilateurs axiaux disposés sur les deux fusées de l'arbre de rotor. Leurs rôles est de mise en circulation du gaz de refroidissement de l'alternateur. Les deux

ventilateurs portent des pales. Les pales ont une base filetée qui est vissée dans l'arbre du rotor. Ce sont des pièces en alliage d'aluminium formées par estampage. Cet estampage par vissage permet de modifier l'angle d'incidence des pales. Le pied de chaque pale est bloqué au moyen d'une goupille filetée.

VI.3. Paliers de l'alternateur:

L'arbre du rotor est logé dans des paliers lisses. Ces derniers sont montés dans des flasques.

Tous les paliers sont isolés électriquement de l'enveloppe du stator et du massif support du groupe pour empêcher la circulation des courants d'arbre.

VI.4. Etanchéité:

Etanchéité de l'enveloppe de l'alternateur aux sorties d'arbre est assurée par un anneau radial. L'anneau d'étanchéité est logé dans une boite étanche boulonnée à un flasque et isolée pour éviter les courants d'arbre.

Pour assurer une bonne étanchéité, la pression de 1'huile dans le jeu doit être supérieure à la pression d'hydrogène dans la machine.

VI.5. Réfrigérants d'hydrogène :

Les premiers alternateurs étaient refroidis par l'air en circuit ouvert puis, dans une période plus récente, ils étaient refroidis par l'air, qui circulait en circuit fermé.

Actuellement les alternateurs sont refroidis par des réfrigérants d'hydrogène.

Les réfrigérants d'hydrogène sont des échangeurs par surface qui refroidissent l'hydrogène chaud L'échange de chaleurs entre l'hydrogène et l'eau de refroidissement s'effectue par l'intermédiaire de tube à ailettes parcourus par l'eau.

VI.6. Synchronisation de l'alternateur:

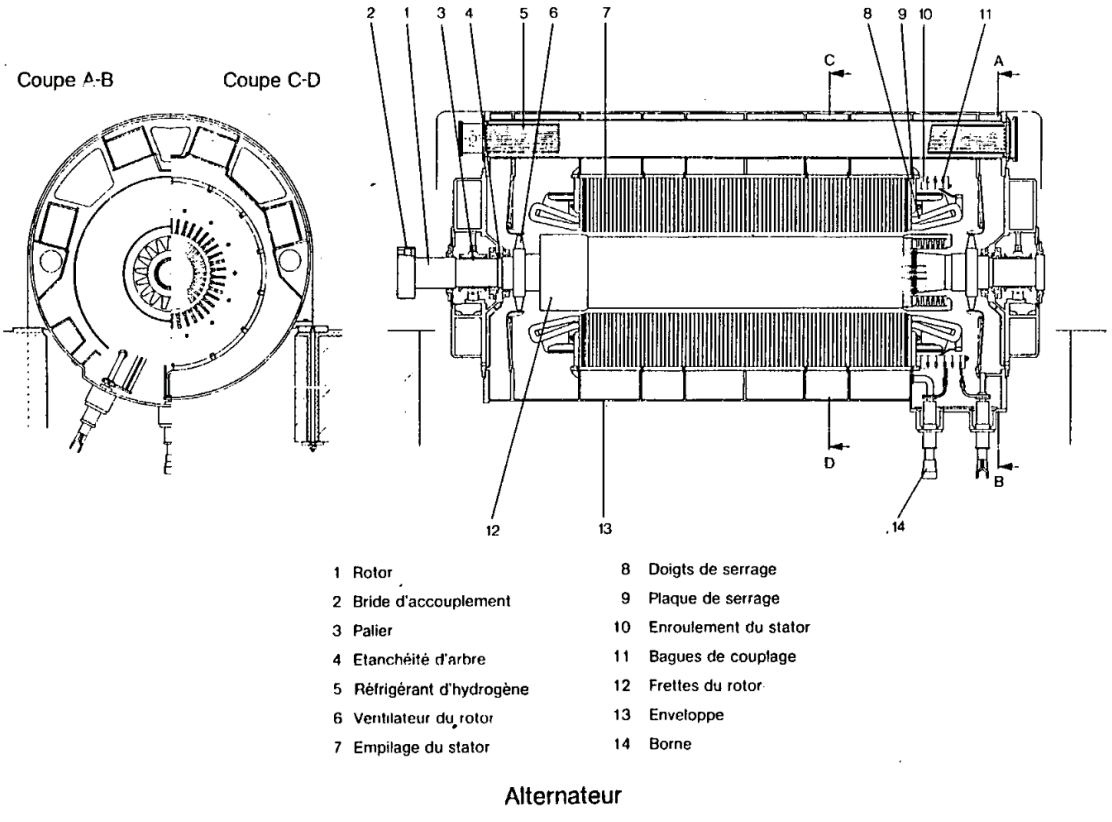
Pour brancher un alternateur sur le réseau, il faut respecter les conditions suivantes :

1- la tension de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.
2- La fréquence de 1'alternateur doit être la même que celle du réseau.
3- La séquence des phases de 1'alternateur doit être la même que celle du réseau.

➢ ***Procédure de synchronisation*** :En agissant sur le régulateur de vitesse de la turbine, on amène tout d'abord 1'alternateur à une vitesse voisine de la vitesse synchrone, afin que sa fréquence soit proche de celle du réseau. On règle ensuite l'excitation de façon que la tension induite soit égale à celle du réseau. On observe que les tensions ont une même fréquence et même phase au moyen d'un synchroscope. Suivant le sens de l'aiguille de cet instrument, on ralentit ou on accélère la machine jusqu'à ce que l'aiguille tourne très lentement

Enfin, au moment où l'aiguille passe devant le point neutre du synchroscope, les tensions sont en phase; on ferme alors l'interrupteur qui réalise le couplage de l'alternateur avec le réseau.

Dans les centrales modernes, la synchronisation se fait automatiquement au moment précis où les conditions énumérées précédemment sont respectées.

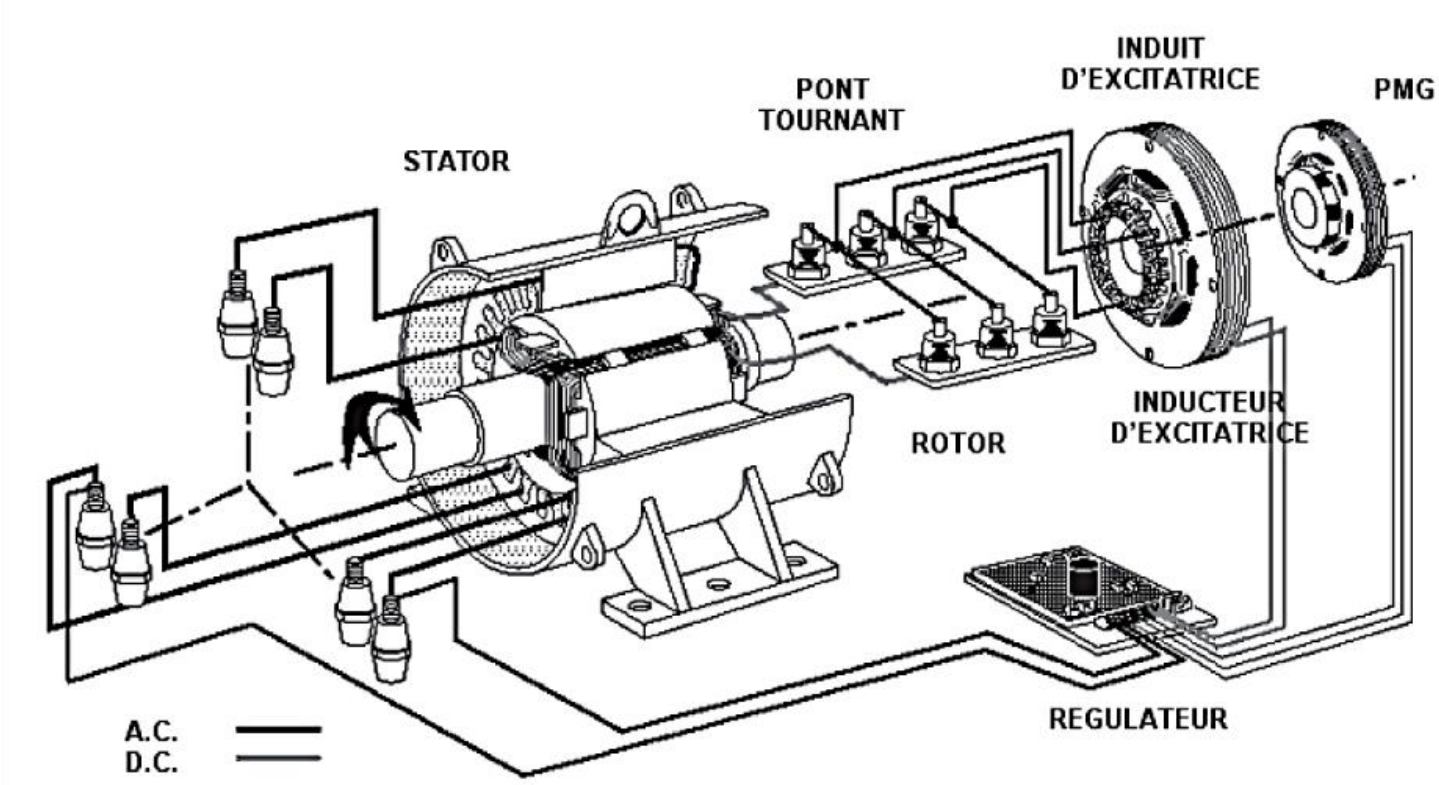


Figure(II.9) les principaux éléments d'un alternateur de la centrale de Ras-Djinet

VII. Système d'excitation de la centrale de Ras-Djinet: [3] [12] [13]

Le système d'excitation de la centrale de Ras-Djinet est un groupe à redresseur tournant composé de :

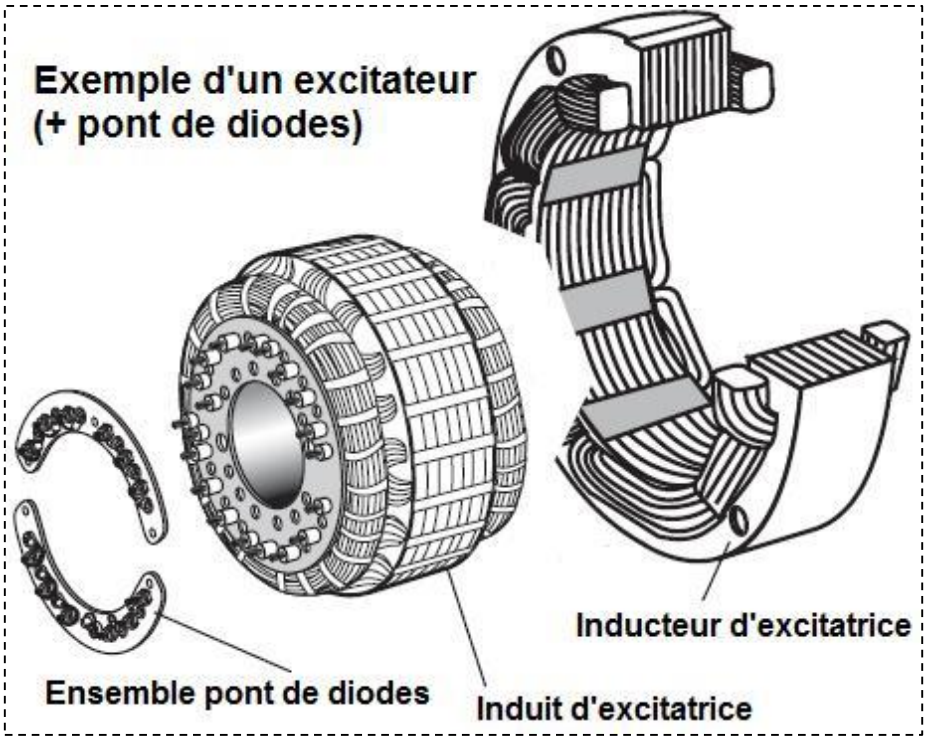
- Une excitatrice pilote
- Une excitatrice principale
- Un pont de diodes tournantes
- Une armoire de régulation de tension



Figure(II.10) les principaux éléments d'un système d'excitation

VII.1. Roue à diodes :

Qui est composé de 60 diodes en silicium qui constituent un pont triphasé, et derrière chaque diode est montée en série avec un fusible qui sert comme protection contre les brefs points de tension de commutateur, il élimine la voie défaillante en cas de claquage d'une diode, les roues sont équipées de 06 circuits RC regroupant chacun un condensateur et une résistance d'amortissement coulés dans un bloc de résine, qui transmettent le courant continu à l'arbre par des prises radiales



Figure(II.11) les principaux éléments d'une excitatrice

VII.2. Excitatrice principale :

L'excitatrice principale est un alternateur triphasé à 6 pôles externes sans balais brushless dont l'enroulement inducteur est logé au stator et l'enroulement induit au rotor. Cette machine est excitée par l'excitatrice pilote, son rôle est d'exciter à son tour le turboalternateur par l'intermédiaire d'un pont à diodes tournant

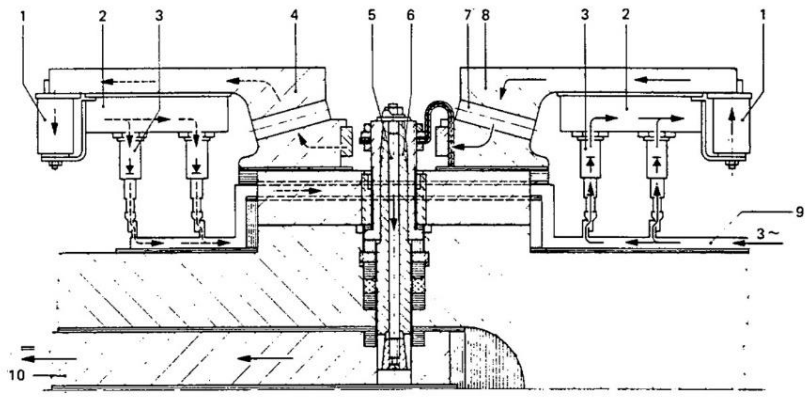
Les caractéristiques de l'excitatrice principale sont :

Puissance active	588kW
Tension nominale	240V
Courant nominale débité	2450A
Fréquence des courants débités	50Hz
Type de fixation	IM 7017
Degré de protection	IP 44
Vitesse de rotation	3000 tr min

VII.3. Excitatrice pilote :

L'excitatrice pilote est un alternateur à 16 pôles saillants internes en aimant permanent et produit à son stator l'énergie nécessaire à l'alimentation de l'excitatrice principale. La roue du rotor est calée à chaud sur l'extrémité libre de l'arbre, Elle est prévue pour rendre la fonction d'excitation entièrement indépendante des autres circuits électriques de la centrale. Celle-ci est entraînée par l'arbre principal, Sa tension est redressée par un pont de thyristors, ce qui permet le réglage de l'excitation de l'alternateur. Ses les caractéristiques sont :

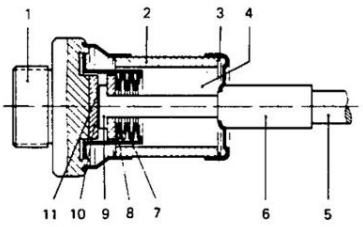
Type	ELP 50/29-30/16
Couplage de phases	Y
Puissance apparente/ nominale	15kVA/35kVA
Tension nominale	220V ± 10%
Courant nominale	41A
Facteur de puissance	**cos φ**=1-0
Fréquence	400Hz
Vitesse de rotation	3000tr/min



1 Fusible
2 Radiateur
3 Diode
4 Roue à diodes (polarité négative)
5 Boulon de tension
6 Prise de courant
7 Sortie air chaud
8 Roue à diodes (polarité positive)
9 Connexion triphasée
10 Connexion à courant continu
11 Circuit RC

cheminement du courant

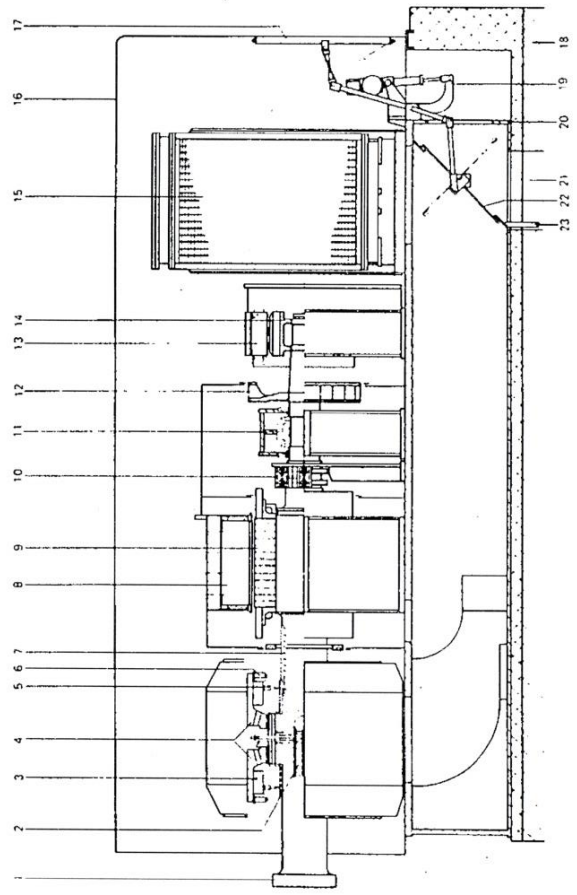
Roues à diodes



1 Pièce de contact
2 Corps de céramique
3 Couvercle de membrane
4 Atmosphère protectrice
5 Toron de raccordement
6 Connexion sertie
7 Barillet à ressorts
8 Ressorts à disques
9 Poinçon
10 Tablette de silicium
11 Couche de silicium

Diode au silicium

Figure(II.12) les principaux éléments d'une roue à diode et d'une diode au silicium



groupe d'excitation

1. Accouplement à broche multi contact
2. Connexion du courant continu
3. Radiateur
4. Roue à diode
5. Diode
6. Fusible
7. Connexion triphasée
8. Stator de l'excitatrice principale
9. Rotor de l'excitatrice principale
10. Détection de masse rotor
11. Palier
12. Ventilateur radial
13. Stator de l'excitatrice pilote
14. Rotor de l'excitatrice pilote
15. Réfrigérant
16. Capot de groupe d'excitation
17. Entrée d'air de ventilation de secours
18. Table de groupe
19. Actionneur
20. Bâti du groupe d'excitation
21 Sortie d'air de la ventilation de secours
22. Clapet de ventilation de secours
23. Sortie d'air de fuite

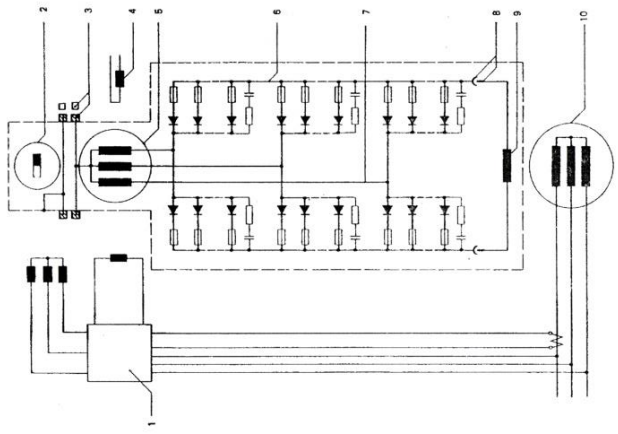


Schéma de principe de système d'excitation

1. Régulateur.
2. Excitatrice pilote à aimant permanent.
3. Bagues de mesure et balais associes pour le contrôle de l'isolement.
4. Mesure inductive du courant d'excitation.
5. Excitatrice triphasée.
6. Pont redresseur a diodes au silicium.
7. Connecteur courant triphasée.
8. Connexion multi contact.
9. Enroulement rotor.
10. Enroulement stator.

Figure(II.13) les principaux éléments du système et du groupe d'excitation

VIII. Conclusion :

En conclusion lors du fonctionnement de l'alternateur il faudrait veiller à ne pas dépasser les valeurs limites des courants du stator et du rotor.

La puissance d'un alternateur est limitée par la puissance du moteur d'entraînement

Le courant dans le rotor (courant d'excitation) ne doit jamais dépasser la valeur nominale indiquée par le constructeur, sinon risque de destruction des enroulements du rotor par échauffement.

Le courant dans le stator (courant de charge) ne doit jamais dépasser la valeur nominale indiquée par le constructeur, sinon risque de destruction des enroulements du stator par échauffement.

Autrement dit, le constructeur donne la puissance apparente nominale Sn = $\sqrt{(P^2 + Q^2)}$ car un alternateur produit en même temps des puissances réactive et active, fonction des besoins de la charge à alimenter.

Produire trop de puissance réactive revient à surexciter l'alternateur : risque de détériorer le bobinage du rotor. Produire trop de puissance active revient à augmenter le courant dans le bobinage du stator : risque de détériorer le bobinage.

I. Introduction : [9]

La tension est un paramètre local du réseau électrique dont la valeur fluctue par nature. Elle est d'abord affectée par des variations lentes et générales liées aux cycles d'évolution saisonnière, hebdomadaire et quotidienne de la consommation. Elle subit aussi des variations rapides liées à de multiples aléas : fluctuations aléatoires des charges, changements de topologie du réseau, déclenchements d'ouvrages de transport ou de groupes de production.

Le réglage de la tension aux différents endroits du réseau s'avère donc être une nécessité pour :

- exploiter au mieux le réseau en assurant sa sûreté. Le réglage de la tension permet d'éviter les phénomènes d'écroulement de tension qui peuvent entraîner des black-out ;
- maintenir la tension d'alimentation des clients dans les plages contractuelles. Pour les clients et les distributeurs, chaque contrat de fourniture définit la tension nominale de raccordement ainsi que la plage de variation acceptée autour de cette valeur ;
- respecter les contraintes de fonctionnement des matériels. Le matériel raccordé au réseau est défini pour un point de fonctionnement nominal, et des variations trop importantes de tension à ses bornes peuvent dégrader ou générer un vieillissement prématuré du matériel. Des tensions trop hautes entraînent le vieillissement ou la destruction des matériels raccordés, des tensions trop basses provoquent des surcharges dans les lignes, perturbent le bon fonctionnement de certaines protections et des régleurs en charge des transformateurs ;
- le producteur. La tension doit aussi être maintenue dans une plage qui soit acceptable pour les installations auxiliaires et afin de garantir la stabilité de l'alternateur principal, faute de quoi, les groupes peuvent être contraints à se déconnecter, ce qui affaiblit la sûreté du système électrique ;
- minimiser les pertes. Un bon réglage de la tension permet de minimiser les pertes réseau;
- utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport. Régler la tension sur le réseau électrique permet d'optimiser les flux de puissance qui transitent dans les lignes et de contrôler au mieux ces transits

La tension est l'un des principaux facteurs déterminant la qualité de l'énergie électrique distribuée aux consommateurs.

Des perturbations de grandes amplitudes entraînent des variations de cette grandeur qui doit être maintenue dans les limites correspondant aux besoins des consommateurs et au bon fonctionnement des réseaux. Il est donc nécessaire de prendre en compte les moyens de réglage automatique qui assurent à chaque instant la tenue de la tension.

Parmi les exigences que l'électricité livrée aux consommateurs doit satisfaire, nous pouvons citer:

- Une onde de tension sinusoïdale
- Constance de la valeur efficace de la tension
- Constance de la fréquence de la tension
- Pour la force motrice, un système de tensions triphasées équilibrées.

Pour garder la stabilité du réseau électrique et pour ne pas causer de nuisances aux consommateurs. Il faut une régulation tout en maintenant la continuité de service.

Le réglage de la tension est indispensable pour une exploitation sûre du système électrique, pour minimiser les pertes et exploiter les matériels dans leur domaine de fonctionnement normal. Sur le réseau de transport le réglage de la tension est effectué en contrôlant la puissance réactive car sur ce type de réseau, en raison des caractéristiques des lignes, ce sont essentiellement les transits de puissance réactive qui créent des chutes de tension.

Pour assurer une tension constante, plusieurs systèmes de régulation de l'excitation des turboalternateurs sont prévus à cet effet.

Dans la centrale de CAP DJINET on trouve deux systèmes de régulations, l'un pour la régulation du courant et l'autre pour la régulation de la tension, et ils sont à commutation automatique.

L'objectif du réglage de la tension, est donc, en premier lieu, de limiter l'impact de ces perturbations en agissant rapidement et localement sur les groupes de production ; c'est l'objet du réglage primaire de tension.

En second lieu, il convient de veiller à ce que l'action des différents moyens de réglage n'aboutit pas à des phénomènes d'instabilité ou à des incohérences (fourniture et absorption simultanées de puissance réactive) ; il faut également que l'on dispose toujours de réserves d'énergie réactive suffisantes pour faire face aux incidents. Cela nécessite de coordonner dans l'espace l'action des moyens de réglage ; c'est le rôle du réglage secondaire.

Cependant, le système de secours, prévu en cas de défaillance des deux modes, est à contrôle manuel, il consiste à soutirer de la tension du turboalternateur via un réseau des auxiliaires, cette tension est adaptée par un autotransformateur actionné par un moteur à courant continu, la tension de sortie de l'excitatrice principale va être redressée à l'aide d'un pont à diodes pour alimenter l'inducteur du turboalternateur.

Cela impose la mobilisation d'un agent qui va intervenir pour la mise en marche de ce système, par commutation manuel à partir d'une armoire de commande, ensuite maintenir la tension aux bornes du turboalternateur à un niveau sensiblement constant

en agissant sur la tension de sortie de l'autotransformateur, par l'intermédiaire du moteur à courant continu. Les performances du système de secours dépendent des réflexes de l'agent, donc aléatoires.

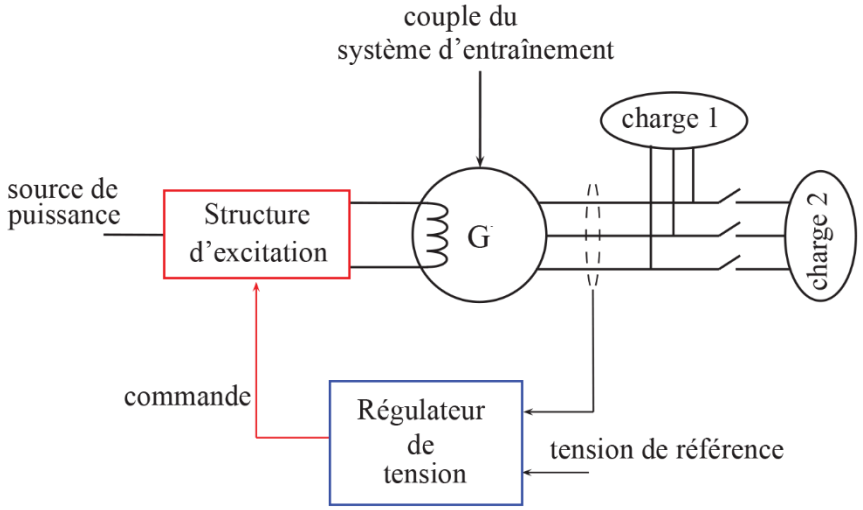


Figure (III.1) Système d'excitation d'un générateur synchrone.

II. Limites de fonctionnement d'un alternateur [5] [9] [3]

II.1. Les limites de l'alternateur :

La puissance d'un alternateur est limitée par la puissance du moteur d'entraînement, le courant dans le rotor (courant d'excitation) ne doit jamais dépasser la valeur nominale indiquée par le constructeur, sinon risque de destruction des enroulements du rotor par échauffement, aussi le courant dans le stator (courant de charge) ne doit jamais dépasser la valeur nominale indiquée par le constructeur, sinon risque de destruction des enroulements du stator par échauffement.

En conclusion lors du fonctionnement de l'alternateur il faudrait veiller à ne pas dépasser les valeurs limites des courants du stator et du rotor. Autrement dit, le constructeur donne la puissance apparente nominale $\mathbf{Sn} = \sqrt{(\mathbf{P^2 + Q^2})}$ car un alternateur produit en même temps des puissances réactives et actives, en fonction des besoins de la charge à alimenter.

Produire trop de puissance réactive revient à surexciter l'alternateur : risque de détériorer le bobinage du rotor.

Produire trop de puissance active revient à augmenter le courant dans le bobinage du stator : risque de détériorer le bobinage.

Donc les grandeurs électriques I_R, U_A, I_A,$\boldsymbol{\phi}$, S, P et Q ne doivent pas dépasser des valeurs maximales admissibles et ce pour ne pas mettre l'alternateur dans de mauvaises conditions pour lui-même et pour le réseau.

Les limitations usuelles:

- $I_{R\,max}$: limite d'échauffement du bobinage rotorique.
- $(U_A,I_A)_{max}$: limite d'échauffement du bobinage statorique.
- U_{max} : limite d'isolement des diélectriques.
- δ_{max} : limite de stabilités
- P_{max} : puissance maximale de l'installation.

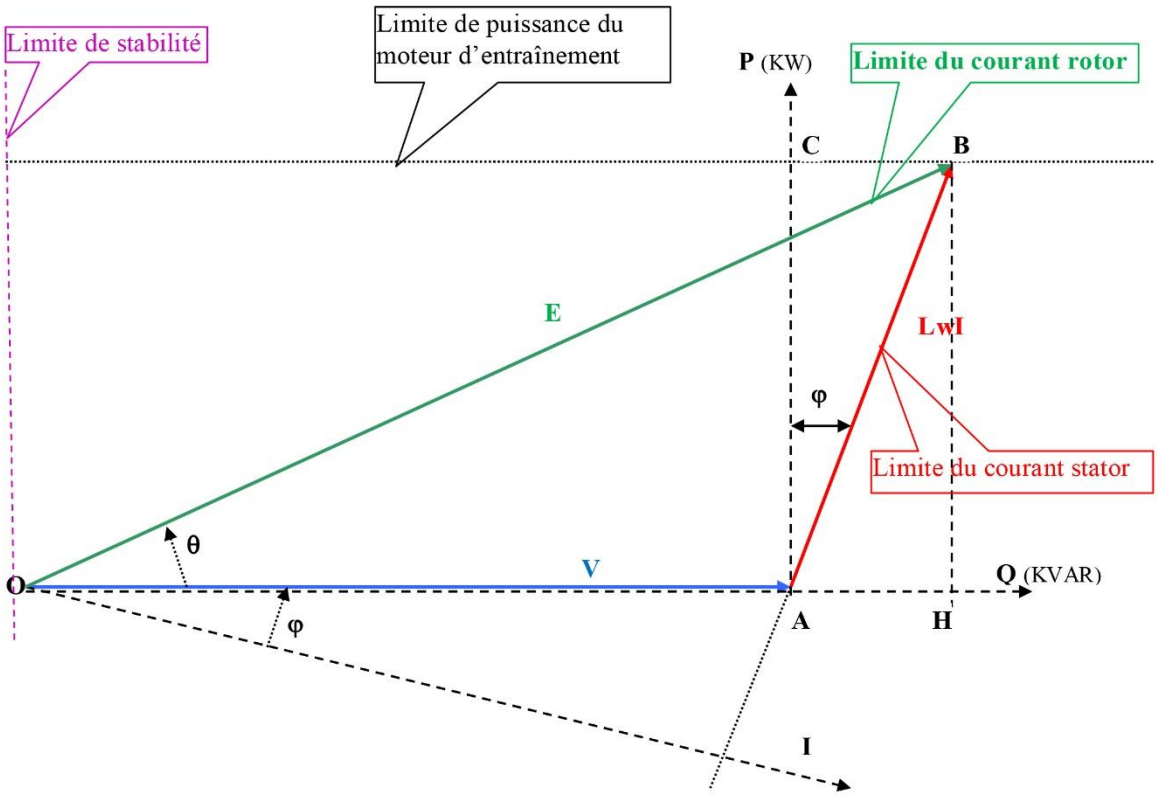


Figure (III.2) Schéma représentatifs des limites de l'alternateur

II.2. Protections de l'alternateur

Afin que les grandeurs électriques sous mentionnées ne dépassent pas les limites préétablies, des limitations ont été incorporées au régulateur de tension. Elles interviennent directement sur le circuit d'impulsions des gâchettes des thyristors pour réajuster l'excitation tout pour respecter les limitations.

Ces limitations sont en nombre de cinq et se divisent en deux classes :

a) **Limitations instantanées :**

1) Courant de champ :**(Ip à 40A) :**

Son rôle est d'empêcher le dépassement d'une valeur limite du courant de champ. Cette limitation réagit après 0.25s.

2) Angle interne :

Diminuer le déphasage interne lorsque l'angle de charge dépasse 70° pour éviter de rendre l'alternateur instable. La limitation agit en faisant accroître l'excitation.

b) **Limitations temporisées :**

Elles empêchent le dépassement des valeurs de service thermiquement admissibles avec une temporisation de 10s, leurs actions est de déclencher le système d'excitation.

1) Limitation de courant de champ : **(I_F=28A).**
2) Limitation de courant rotorique : **(I_R=2900A).**
3) Limitation du courant d'alternateur : (courant statorique **I_A =8600A**)

II.3. Commande de la puissance débitée

Lorsqu'un seul alternateur alimente un réseau, sa vitesse est maintenue constante par l'action d'un régulateur extrêmement sensible. Celui-ci peut détecter des changements de vitesse de l'ordre de 0,01 % de sorte que tout changement dans la puissance active débitée par l'alternateur modifie immédiatement l'ouverture des vannes de la turbine. La fréquence demeure donc très constante.

Dans le cas d'un grand réseau, la puissance débitée par chaque alternateur dépend d'un programme de commande établi d'avance entre les diverses centrales de génération.

Les opérateurs communiquent entre eux pour modifier le débit de chaque centrale afin que la génération et le transport de l'énergie soient aussi efficaces que possible.

Dans des systèmes plus élaborés, la gestion de l'énergie est appuyée par des programmes d'ordinateur.

Toutefois, les régulateurs sont toujours prêts à répondre à un changement de vitesse d'une turbine, en particulier si celle-ci, pour une raison ou pour une autre, se détache du réseau. Il se peut, dans des conditions anormales, qu'un alternateur en charge soit débranché subitement du réseau. Les vannes de la turbine étant ouvertes, il s'ensuit une accélération rapide de la machine qui peut atteindre une vitesse de 50% supérieure à sa vitesse normale en 4 ou 5 secondes.

Comme les forces centrifuges à la vitesse synchrone sont déjà près de la limite que les matériaux peuvent supporter, cet excès de vitesse constitue une situation extrêmement

dangereuse. Il faut donc prévoir un dispositif de fermeture rapide des vannes, tant pour les centrales thermiques que pour les centrales hydrauliques.
Dans le cas des turbines à vapeur il faut en même temps fermer les brûleurs.
Le problème des survitesses se pose également lorsqu'un court-circuit se produit près de la centrale. Bien que le courant soit alors une ou deux fois plus élevé que la normale, la puissance active débitée par l'alternateur tombe subitement à zéro, car la réactance de l'alternateur ne consomme que des kilos-vars. Un court-circuit inattendu est donc tout aussi dangereux qu'un circuit ouvert en ce qui concerne les survitesses.

Le diagramme PQ, couramment appelé UQ. intégrant les limitations du régulateur de tension permet de connaître les possibilités réelles de réglage de l'alternateur. Toutefois, ce diagramme n'est valide que pour une tension stator donnée. De plus, dans la majorité des cas, l'alternateur débite sur le réseau de transport via un transformateur élévateur dit transformateur de groupe. De ce fait, pour l'exploitant du réseau, il n'est pas immédiat de connaître avec un diagramme PQ, la tension et le réactif produit par le groupe côté HT derrière le transformateur de groupe ; nous appellerons dans ce qui suit Ur et Qr ces deux dernières grandeurs. (Figure III.2)

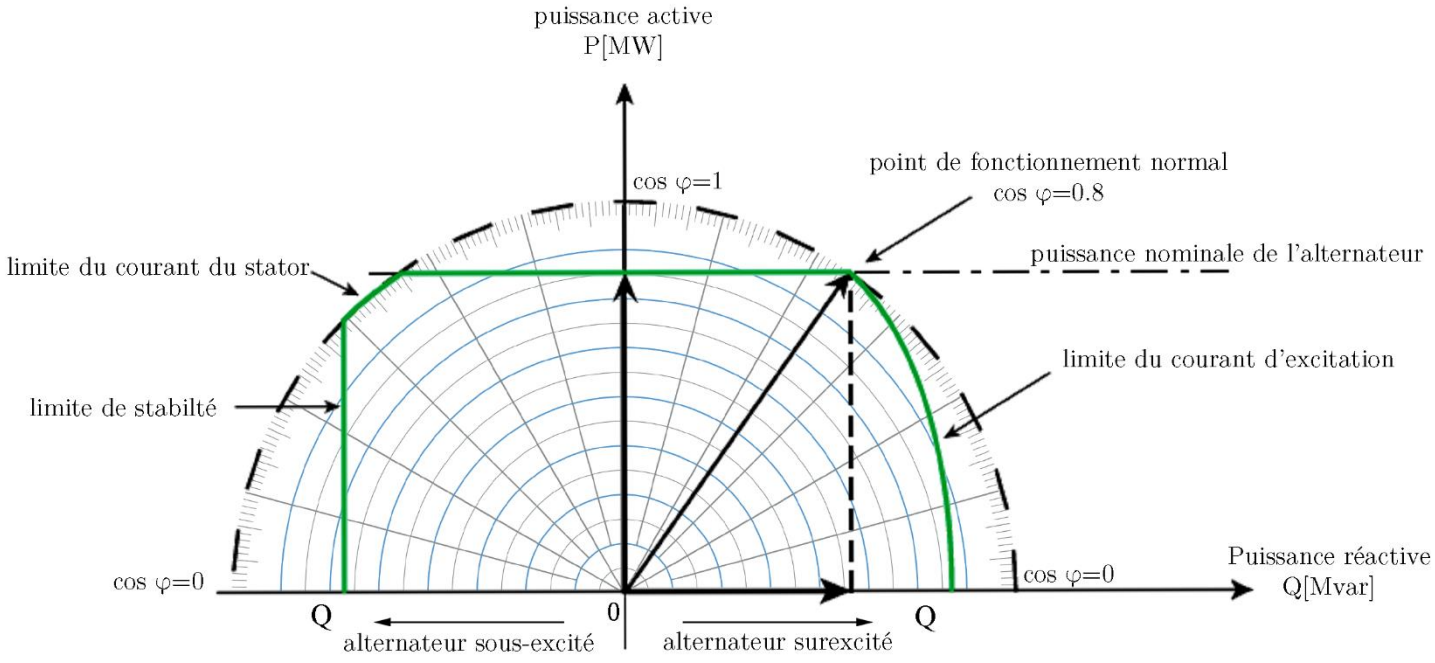


Figure (III. 3) diagramme P/Q

III. Fonctionnements et constitution du système de régulation [9] [3]

III.1. Fonction du système de régulation:

La fonction fondamentale de la régulation est d'adapter la production d'énergie électrique à la consommation. L'énergie doit être délivrée avec une certaine qualité, définie par la tension et la fréquence du courant électrique.

La tension est réglée au moyen de la régulation de tension de l'alternateur, la fréquence par la régulation de vitesse de la turbine, qui est comprise dans la régulation de la turbine.

La régulation remplit les fonctions suivantes:

- Réglage de la vitesse du groupe et de la puissance de l'alternateur pendant les divers modes de fonctionnement, comme le : démarrage, marche normale, mise à l'arrêt, et décharge (délestage) brusque ;
- Contrôle sûr de la décharge brusque par intervention rapide de la régulation en cas de coupure du réseau ;
- Ménagement du groupe par l'intermédiaire de l'appareil ***WT***. Les variations de vitesse ou de puissance sont effectuées de façon optimale en tenant compte des sollicitations maximales admissibles pour les matériaux du groupe;
- Soutien de la fréquence du réseau par une caractéristique fréquence - puissance précise, une sensibilité élevée et un réglage exact du statisme pendant le fonctionnement.

III.2. Constitution du système de régulation :

Une régulation simple de la vitesse est assurée par un régulateur à masses.

L'arbre de la turbine entraîne un arbre secondaire par l'intermédiaire d'un jeu d'engrenages. Deux masses, qui peuvent se déplacer dans un plan vertical sous l'effet de la force centrifuge, sont montées diamétralement sur l'arbre secondaire.

Toute variation de vitesse entraîne une variation de la force centrifuge Il s'ensuit un déplacement des masses vers une autre position. Les masses actionnent par l'intermédiaire d'un tiroir de manœuvre et d'un servomoteur les organes d'admission qui s'ouvrent ou se ferment plus ou moins jusqu'à ce que la consigne de vitesse soit atteinte.

La régulation du groupe à la centrale est plus complexe. Elle comprend une régulation électrohydraulique et une régulation hydraulique.

La régulation électrohydraulique allie les avantages de la mesure et de l'élaboration des signaux électriques (adaptabilité, qualité du réglage dynamique) avec ceux des circuits hydrauliques (transmission de forces de commande importantes)

La régulation hydraulique est une régulation de réserve. Elle est en service en cas d'une panne sur la régulation électrohydraulique .Les deux systèmes de régulation agissent par l'intermédiaire d'un sélecteur sur le circuit hydraulique de commande. Le signal de réglage le plus petit commande les organes de régalage.

Les organes de réglage sont les soupapes de réglage (corps HP) et les soupapes modératrices (corps MP). Tandis que les soupapes de réglage s'ouvrent successivement en fonction de la charge, les soupapes modératrices travaillent en parallèle.

La partie électrique comprend:

- La régulation de vitesse
- La régulation de puissance
- La régulation de pression
- Le circuit de sélection
- La régulation de position

III.3.Principe de réglage du système de régulation :

La régulation de la tension à la sortie de l'induit d'un turbo alternateur consiste à agir sur l'excitation de la machine, on asservit le courant de champ rotorique de sorte à contrôler la puissance réactive produite dans le but de ramener la tension et d'une façon permanente à une valeur de consigne bien déterminée.

Le réglage de tension est organisé selon une structure hiérarchique à trois niveaux de réglage permettent d'atteindre les objectifs cités :

- Le réglage primaire qui maintient la tension au stator des alternateurs à une valeur de consigne ;
- Le réglage secondaire qui coordonne au niveau régional l'action des alternateurs et règle la tension en des points stratégiques du réseau appelés points pilotes ;
- Le réglage tertiaire qui harmonise les réglages entre les régions et permet de reconstituer les marges en puissance réactive des groupes en réglage.

Ces fonctions sont réalisées par les alternateurs synchrones de grande puissance qui constituent les principales sources de tension sur le réseau.

a) Réglage primaire :

Les seules sources de tension du réseau de transport sont constituées par les alternateurs, qui sont équipés d'un régulateur de tension. Le régulateur primaire de tension (Automatic Voltage Regulator, ou AVR) maintient automatiquement la

tension aux bornes du stator de l'alternateur constante et égale à une valeur de consigne, par action sur la tension d'excitation qui commande le courant rotor de la machine. La constante de temps de ce réglage est de l'ordre de plusieurs- dixièmes de seconde.

L'alternateur munis d'un régulateur réagit ainsi, en modifiant sa production de puissance réactive, aux variations de la tension consécutives à de faibles variations de puissance réactive appelées par les consommateurs ou dues à des défauts éloignés ou des manœuvres sur le réseau.

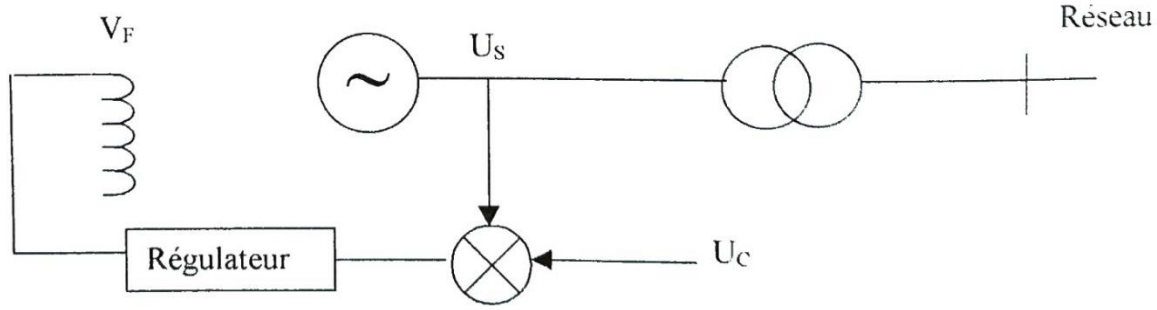
Cette action est disponible tant que l'alternateur n'a pas atteint ses limites de fonctionnement.

Pour cela, la centrale de CAP-DJINET est munie d'un régulateur multi canal, ayant une sécurité de fonctionnement particulière pour les grands alternateurs avec excitatrice à courant triphasée. Le dispositif de réglage possède trois circuits complètement séparés, chacun d'eux possède son propre convertisseur pour assurer

1) Réglage de la tension.
2) Réglage du courant de champ.
3) Régime de secours avec transformateur de réglage (Autotransformateur)

Les deux premières opérations sont automatiques par contre la troisième a un fonctionnement manuel.

NB : C'est ces systèmes qui constituent les organes de réglage et qui se trouvent dans l'armoire de commande



U_S : tension du stator.

U_C : tension de consigne.

V_F : tension de commande du système d'excitation.

Figure (III.4) Schéma de réglage primaire de la tension

b) Le réglage secondaire :

L'objectif du réglage secondaire de tension est de coordonner automatiquement les actions des régulateurs primaires de tension des groupes de façon à assurer au mieux l'équilibre global production-consommation d'énergie réactive. Il permet ainsi de reconstituer des réserves de réactif lorsque, sous l'action du réglage primaire, un groupe est arrivé en butée de réactif, ou de suivre les fluctuations de grande amplitude mais généralement lente de la tension (dues par exemple aux variations de la charge dans la journée), tout en conservant à tout instant une bonne répartition de la production réactive **Figure (III.5)**

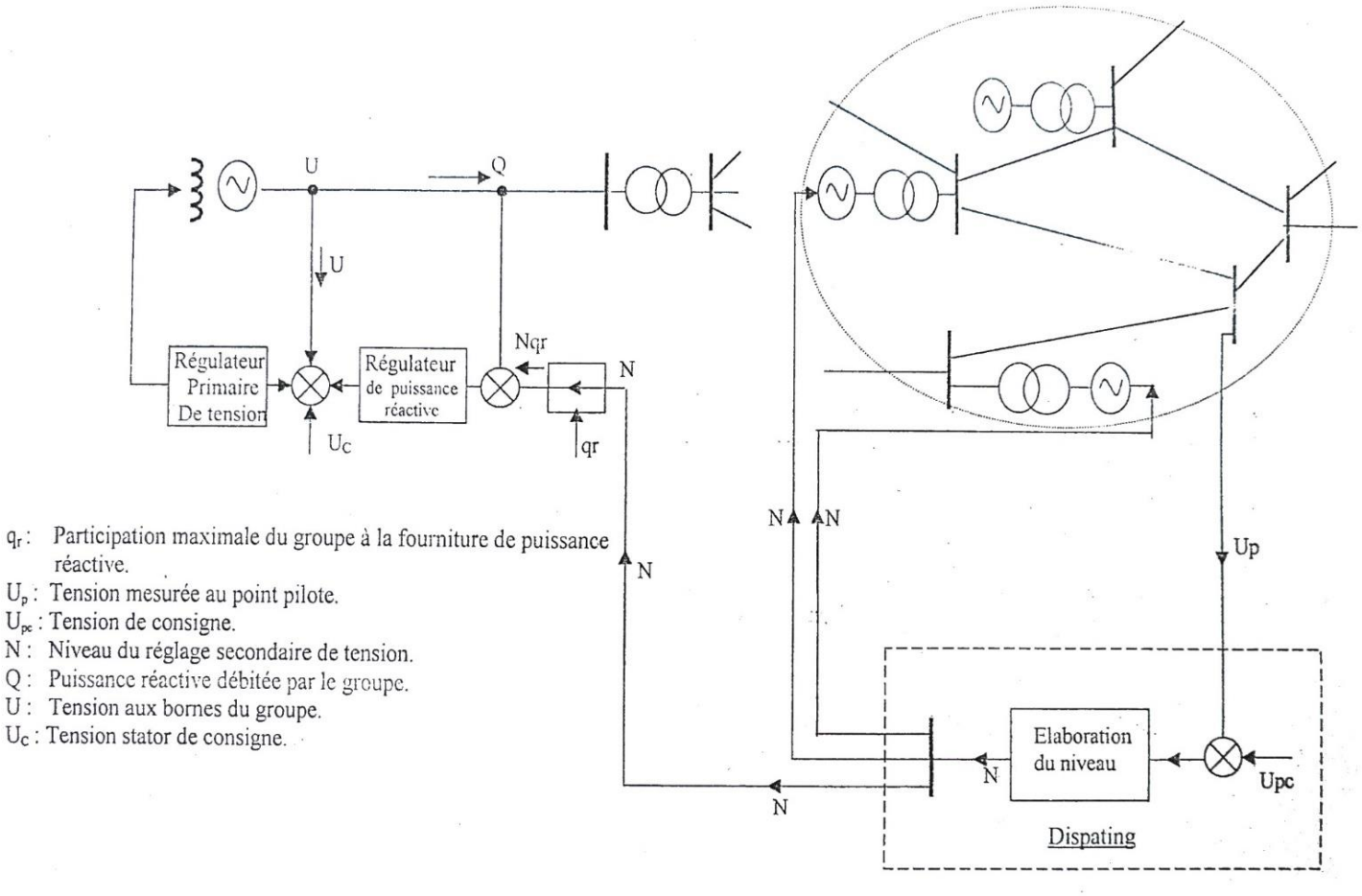


Figure (III.4) Schéma de réglage secondaire de la tension

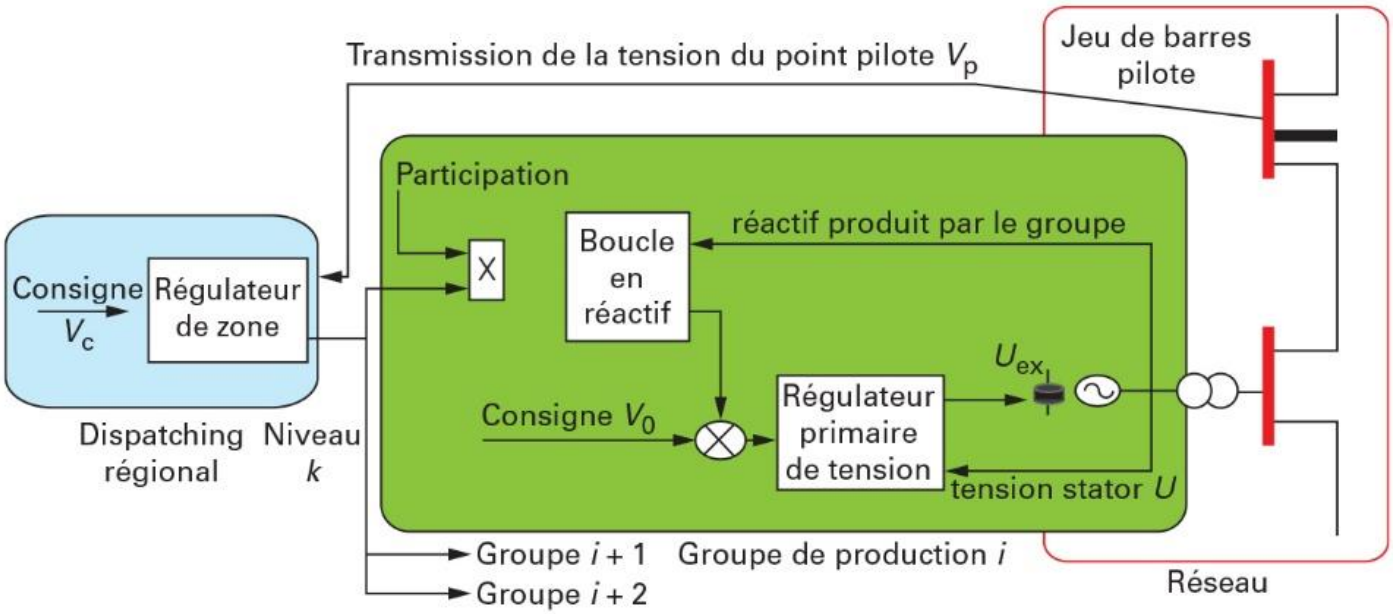


Figure (III.5) Synoptique du réglage primaire et secondaire

c) **Le réglage tertiaire:**

Le réglage tertiaire de tension est manuel, Il s'agit de l'ensemble des actions commandées par les opérateurs de dispatching régional pour coordonner le plan de tension entre les différentes zones de réglage secondaire, et comprend le calcul des tensions aux points pilotes.

Les actions peuvent consister par exemple à imposer des groupes de production pour assurer la maîtrise du plan de tension de certaines zones et harmoniser les tensions de consignes de ces différents points pilotes.

Ces réglages hiérarchisés permettent de réguler la tension sur les réseaux HTB (transport et répartition). Pour le réseau de distribution le contrôle se fait localement à l'aide de systèmes gérant l'apport en puissance réactive nécessaire afin de limiter le transit de cette puissance sur les réseaux amont via les postes HTB\HTA qui occasionnent des pertes supplémentaires.

(1) Le RST Son principe consiste à organiser le réseau en « zones » de réglage, et à réguler la tension d'un point particulier de chaque zone, appelé « point pilote ». Celui-ci est choisi de façon à ce que sa tension soit représentative de celle de l'ensemble de la zone.

IV. Les différents régulateurs de la centrale de RAS-DJINET [3] [9] [14]

Pour les alternateurs de production d'énergie, les régulateurs peuvent être plus ou moins élaborés, selon la fonction de base que constitue la régulation de tension stator. Le choix du régulateur est indépendant de la puissance de l'alternateur à piloter et dépend de :

- du système d'excitation retenu
- de l'importance de l'alternateur par rapport au réseau sur lequel il débite.

La centrale de RAS-DJINET est dotée de deux régulateurs automatiques

- Régulateur de tension.
- Régulateur de courant de champ.

Bien que ces appellations soient différentes, les deux systèmes assurent la même fonction, qui consiste à maintenir la tension aux bornes de l'alternateur à un niveau constant avec une bonne tolérance, quels que soit la variation de charge sur le réseau.

IV.1. Régulateur de tension

Le régulateur de tension intervient dans le fonctionnement normal de la machine (turboalternateur). Il possède une caractéristique **PI** (proportionnelle et intégrale), avec deux boucles de régulation.

- boucle de régulation du courant rotorique I_R de l'excitatrice principale (caractéristique P).
- boucle de régulation du courant de champs I_F de l'excitatrice pilote (caractéristique PI).

Sa base de fonctionnement est de comparer la tension aux bornes de l'alternateur U_A avec une tension dite de consigne U_C et agir pour annuler l'écart (U_C -U_A)
Ce système de réglage se distingue par une grande stabilité et vitesse de réglage dans tous les cas de charge. Il commande un convertisseur statique qui est un pont triphasé à thyristors, comme il est présenté dans la figure son rôle est de :

1. Redresser les courants d'induit de la génératrice principale.
2. Ajuster la tension d'excitation en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors.

IV.2. Régulateur du courant de champ

Le régulateur du courant de champ se compose dans une large mesure des mêmes composants que le régulateur de tension (figure.III.3). Il prend en charge le réglage de la machine en cas de défaillance du régulateur de tension. Il possède une caractéristique

PI et permet de réguler le courant de champs de l'excitatrice principale dans la plage de 0 à 1.3 $I_{F\ nominale}$

Dans ce régime de réglage la consigne du courant de champs I_{FC} est comparée avec la valeur réelle du courants de champ $I_{F\ eff}$, l'écart (I_{Fc}-I_{Feff}) attaque le régulateur **PI**, la tension de commande générée par ce régulateur commande le générateur d'impulsion qui contrôle les thyristors du deuxième pont redresseur.

Le courant de champ est limité à une valeur maximale admissible comme pour le régulateur de tension.

IV.3. Les convertisseurs statiques des régulateurs automatiques

Appelés ainsi parce qu'ils ne comportent aucun élément tournant, ils ont de bonnes performances (temps de réponse de quelque dixièmes de secondes) et peuvent être utilisés pour réglage de la tension en particulier dans les zones éloignées des centrales de production ils sont constitués de deux ponts triphasés à thyristors sont prévus respectivement pour le régulateur de tension et le régulateur du courant de champ. Ils sont disposés dans la partie supérieure de l'armoire de commande, le pont qui ne se trouve pas en service est complètement hors tension après l'ouverture d'un sectionneur.

Ils sont constitués d'un ensemble de condensateurs et d'inductance commandés par thyristors (FigureIII.5)

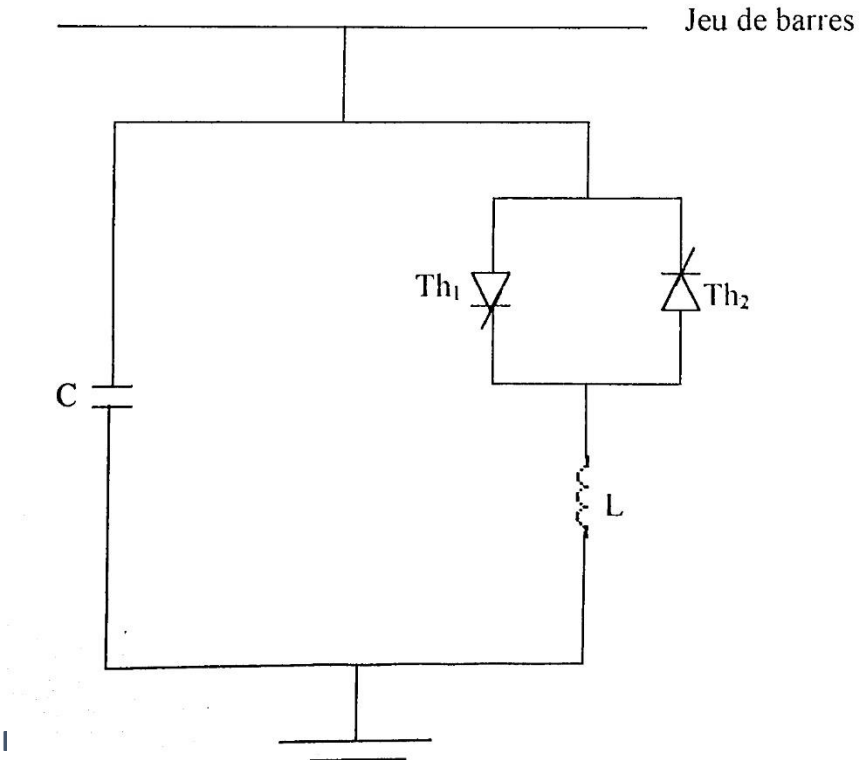


Figure (III.6) schéma d'un convertisseur statique

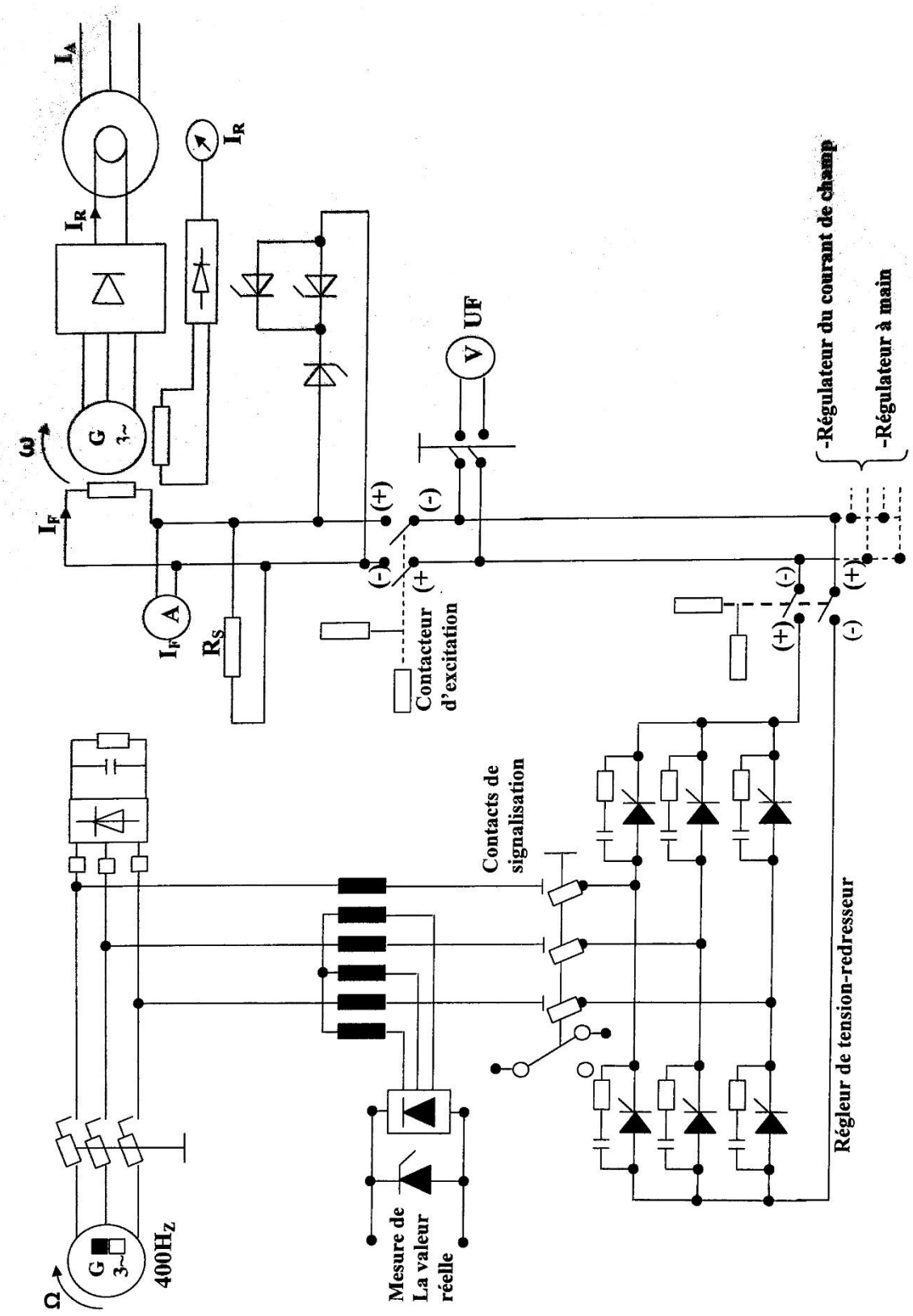


Figure (III.7) Schéma de régulateur de tension

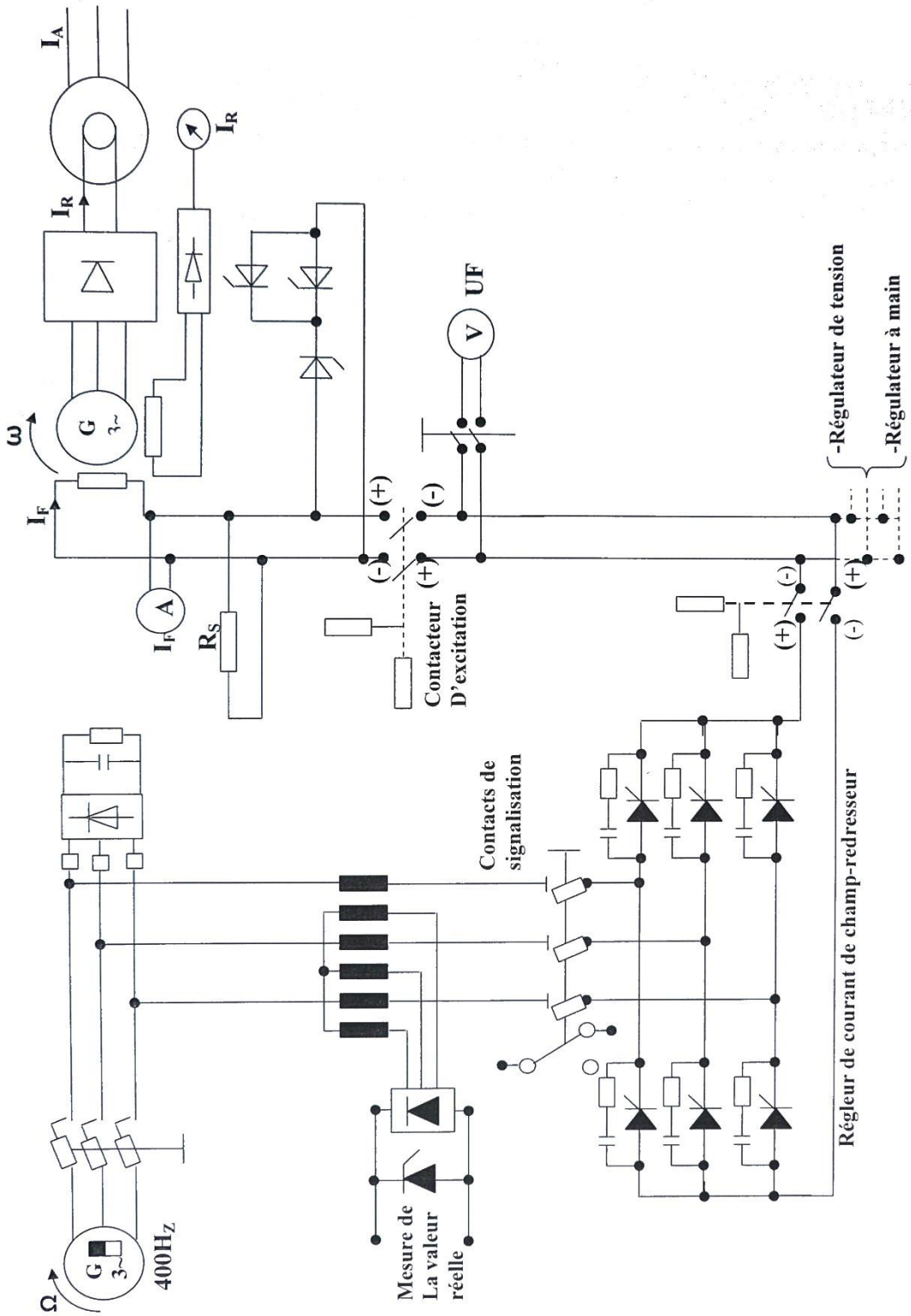


Figure (III.8) Schéma de régulateur de courant de champ

IV.4. Régulateur par poursuite et commutation

Une commutation de régulation de tension à régulation de courant de champ peut se faire de façon manuelle ou automatique, lors d'une avarie de la régulation de la tension. L'installation commute automatiquement sur le régulateur du courant de champ. Un réglage supplémentaire par poursuite et d'équilibrage ainsi qu'un appareil de contrôle d'avaries des régulateurs sont prévus pour réaliser cette exigence.

Le régulateur par poursuite permet une commutation sans à-coup, de la régulation de tension à la régulation de courant de champ, à condition que les deux valeurs de consigne soient égales. La différence entre les deux valeurs de consigne est signalée sur un instrument d'équilibrage (figure.III.8)

IV.5. Régleurs en charge

La tension sur les réseaux HT est réglée principalement par l'intermédiaire des régleurs en charge des transformateurs THT/HT. Ces régleurs ont en général une plage de réglage de ±15%. Ils sont télécommandables ou actionnés par des régulateurs de tension qui visent à tenir une tension de consigne donnée, soit au secondaire du transformateur, soit en un point du réseau HT ou THT.

Un régleur en charge se compose de trois parties essentielles :

- Un sélecteur de prises qui sert à choisir au préalable la prise désirée ;
- Un commutateur qui a pour fonction de commuter l'intensité traversant la prise en service sur la prise à vide du bobinage de réglage présélectionnée par le sélecteur ;
- Un mécanisme de commande qui ne provoque qu'un seul changement de position et éventuellement un inverseur permettant l'utilisation de spires de réglage, soit en addition, soit en soustraction.

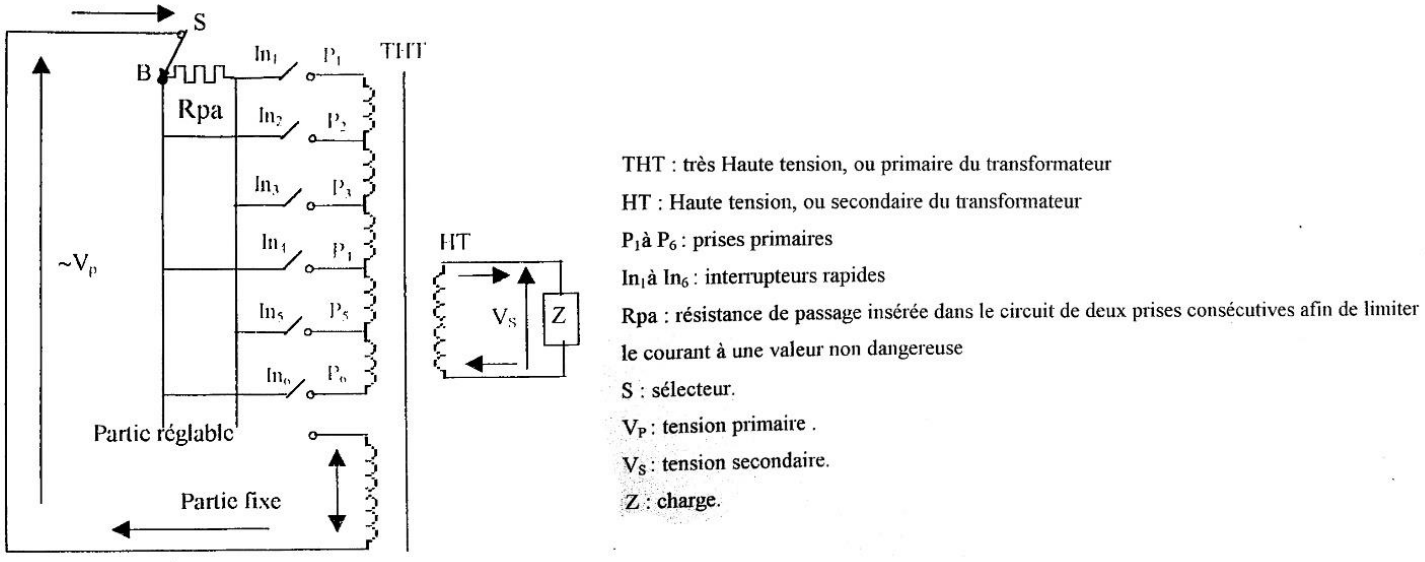


Figure (III.9) Schéma de principe d'un régleur de charge

IV.6. Alimentation en tension des régulateurs automatiques

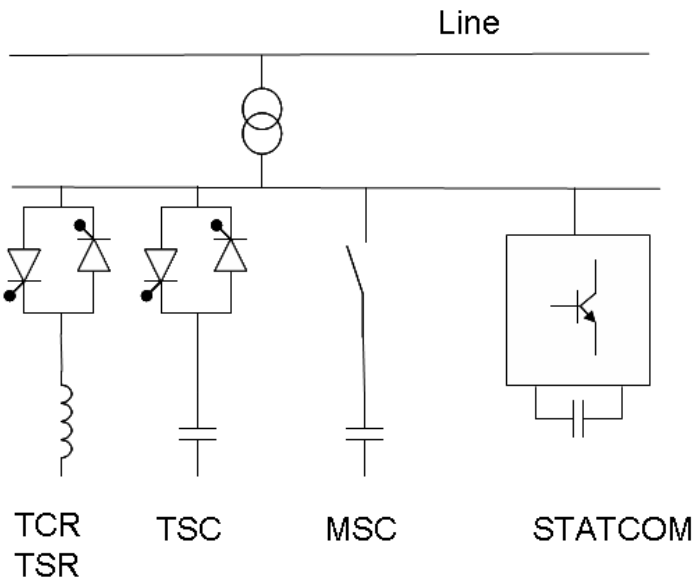
L'alimentation en tension alternative se fait en service normal directement à partir de l'excitatrice pilote à pôles permanents, vue la fréquence du courant qu'elle génère (**f=400Hz**), et pour certains cas à partir du réseau auxiliaire en passant par un transformateur de réglage approprié. Le transformateur de réglage fournit une tension réglable qui alimente le redresseur à service manuel en passant par un transformateur d'adaptation et on obtiendra un meilleur redressement et lissage du courant d'excitation.

Le courant débité par l'excitatrice est de **41 A**, d'où le réglage de l'excitation s'effectue sur une petite plage de courant, cela rend le réglage plus rapide, le temps de réponse de système sera plus réduit.

IV.7. FACTS

Un système de transmission flexible en courant alternatif, plus connu sous l'acronyme anglais de FACTS pour (Flexible Alternating Current Transmission System) est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la répartition des charges dans le réseau en améliorant ainsi la capacité de transit et en réduisant les pertes, pour contrôler la tension en un point ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité et des groupes de productions qui y sont connectés. Il peut également filtrer certaines harmoniques et donc améliorer la qualité de l'électricité.

Les FACTS sont très nombreux. Ils font toujours partie de la famille des compensations électriques actives, mais cette compensation est série, parallèle (shunt) ou hybride, c'est-à-dire série et parallèle à la fois. Ils sont principalement constitués de capacités et d'inductances pour générer la puissance réactive, ainsi que d'électronique de puissance ou de disjoncteurs pour interrompre et rétablir le courant au travers des premiers éléments. Un transformateur est parfois utilisé pour diminuer la tension à laquelle sont soumis les autres composants. Les types de FACTS les plus répandus sont les bancs de capacités séries (commutées mécaniquement ou par thyristors), les SVC (Static VAR Compensator/compensateur statique de puissance réactive), qui combinent capacité et inductance en parallèle à la ligne, les transformateurs déphaseurs, les STATCOM (Static Compensator/compensateur statique) et SSSC (Static Synchronous Series Compensator/Compensateur Synchrone Statique Série) qui sont des sources de tension placées respectivement en parallèle et en série à la ligne.



MSC (*Mecanically Switched Capacitor*) : condensateur commuté mécaniquement, parfois arrangé sous forme de filtre anti-harmonique. Permet de stabiliser la tension en cas de forte charge

MSR (*Mecanically Controlled Reactor*) : inductance commutée mécaniquement. Permet de stabiliser la tension en cas de faible charge.

TSC (*Thyristor-Switched Capacitor*) : condensateur commuté par thyristors. L'inductance d'atténuation présente en série, sert à limiter le courant en cas de

TSR (*Thyristor-Switched Reactor*) : inductance commutée par thyristors

TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*) : inductance contrôlée par thyristors

STATCOM (Static Compensator) ou **SVG** (Static VAR generator) : il sert à compenser l'énergie réactive dans la ligne

Figure (III.10) Schéma FACTS shunt.

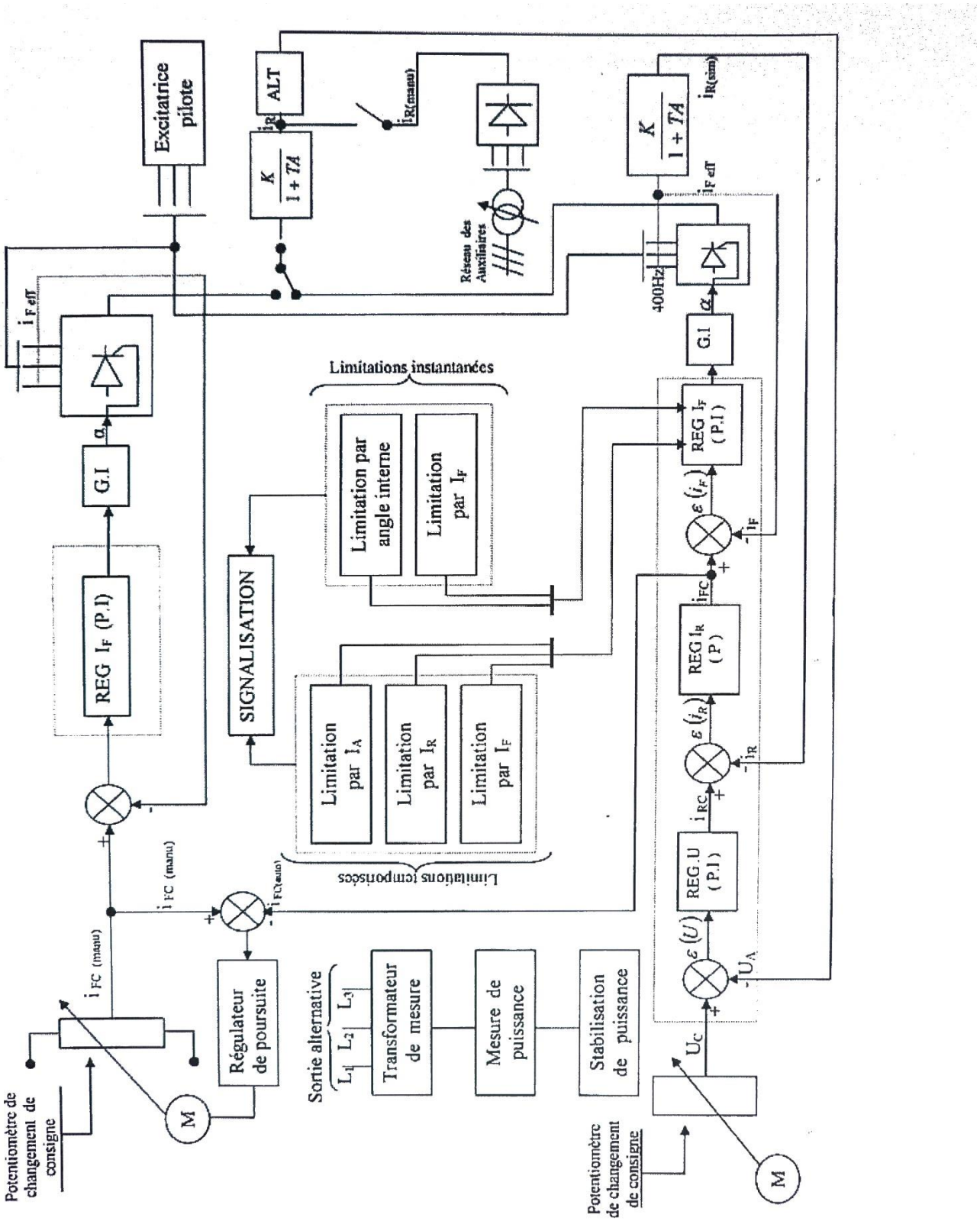


Figure (III.11) Schéma synoptique de la régulation automatique

IV.8. Dispositif de désexcitation

Lors de la désexcitation, une intervention directe sur le circuit de la roue polaire n'est pas possible, c'est la raison pour laquelle on doit intervenir sur la commande des convertisseurs.

Le dispositif de désexcitation consiste en un contacteur interrupteur et un appareil limiteur de tension qui sert aussi de résistance de désexcitation non linéaire.

- Le régulateur de commande des gâchettes force le redresseur à fonctionner en onduleur.
- L'excitation est séparée du champ par un contacteur interrupteur.

IV.9. Equipement de stabilisation

Afin d'atténuer certaines oscillations de puissance active lors de fonctionnements perturbés, un stabilisateur de puissance active est raccordé au régulateur de tension. Ce stabilisateur est un dispositif électronique qui envoie des signaux additionnels au régulateur de tension afin que celui-ci tienne compte des variations de puissance dues aux variations de tension d'excitation.

V. Système de contrôle manuel [3] :

V.1. Présentation du système :

Le service à main sert à assurer un régime de secours manuel lors de défaillance des régulateurs automatiques ou de l'alternateur à aimants permanents, excitatrice pilote.

La tension dans ce cas est prise du réseau des auxiliaires et mise à niveau par le moyen d'un autotransformateur de réglage et un redresseur de courant triphasé non commandable monté en aval (figureIII.12).

V.2. Dispositif d'excitation manuelle :

Le système de contrôle manuel consiste en un transformateur de réglage télécommandé avec contacts d'extrémités, ce transformateur n'est autre qu'un autotransformateur triphasé. Il est actionné par un moteur à courant continu qui fait déplacer une roue conductrice cette dernière est à son tour en contact permanent avec les spires qui constituent l'enroulement de l'autotransformateur. On actionnant le moteur on agit directement sur le rapport de transformation, ce qui modifie la tension d'excitation, cette tension sera transmise à la génératrice principale via un transformateur d'adaptation et un circuit redresseur placé en aval.

V.3. Constituants de service à main :

Les organes qui constituent le service manuel de tension sont :

a) Un transformateur de réglage

C'est un autotransformateur triphasé placé en amont dont les caractéristiques sont :

Type:	YRN 380V / 6.3A.
Primaire :	3x3 80V, 50Hz.
Secondaire :	3x (0 : 380) V, 6.3A.

Il est utilisé pour son bon rendement et son faible coût devant un transformateur ordinaire, et la facilitée de son utilisation en mode de réglage.

b) Un transformateur d'adaptation :

C'est un transformateur intermédiaire placé en aval et il sert à adapter la tension d'excitation les caractéristiques sont comme suit :

Type	ODT4.
Primaire	3x380 V, 50 Hz.
Secondaire	3x60 V, 26A.

c) Pont triphasé à diodes :

C'est un pont à diodes triphasé constitué de six diodes, il fournit un courant continu pour l'excitation de l'excitatrice principale.

V.4. Alimentation en tension du service à main

L'alimentation du système de contrôle manuel s'effectue à partir du réseau des auxiliaires, ce réseau est obtenu à partir d'un soutirage aux bornes de turboalternateur et en passant par plusieurs jeux de barres et plusieurs transformateurs comme il est présenté dans la fig. (II.5).

V.5. La mise en service du système de contrôle manuel

Le système de contrôle manuel n'est mis sous tension que dans la position appropriée du commutateur sélectif de service, une commutation entre le système de contrôle manuel et le régulateur à thyristors pendant le service n'est pas possible.

Le commutateur sélectif de service permet la commutation de la tension d'alimentation et il contient les positions suivantes.

- **Position 1:** position zéro, l'installation est hors service.
- **Position 2:** position de marche, le dispositif de réglage est alimenté par

l'excitatrice pilote.

- **Position 3** : service à main, la machine peut être excitée par l'intermédiaire d'un transformateur réglable alimenté par le réseau des auxiliaires.
- **Position 4 :** position d'essai, le dispositif de réglage est alimenté par le réseau des auxiliaires et peut être entièrement contrôlé alors que le groupe de machine est arrêté, cette opération s'effectue grâce à un transformateur de commutation pour les essais.

V.6. Les inconvénients d'une commande manuelle

La commande manuelle du système d'excitation est confrontée à de nombreux inconvénients parmi lesquels on cite :

- La mobilisation permanente d'un opérateur

L'utilisation d'un système de contrôle manuel en régime de secours oblige à mobiliser un ou plusieurs opérateurs et surtout dans le cas d'un fonctionnement durable et continu dans le temps, car c'est l'opérateur qui doit actionner le système manuel à chaque fois qu'il observe une variation de tension sur l'afficheur de mesure.

- Mauvaises performances (rapidité, précision)

Les performances de ce système dépendent uniquement des réflexes et des estimations de l'opérateur, qui ne sera capable de piloter le système tout en assurant une grande précision et rapidité à chaque variation ou perturbation de tension qui est due à une variation de charge sur le réseau électrique. D'où une mauvaise régulation de tension donc une mauvaise qualité d'énergie produite.

- Basculement et commutation automatique non possible

On ne peut pas commander le système manuel à partir de la salle de commande contrairement aux systèmes automatiques, car il se trouve ailleurs dans une armoire de commande, ce qui fait qu'on n'est pas sûr d'avoir un opérateur tout près pour le faire fonctionner immédiatement en cas de défaillance des régulateurs automatiques, le système manuel dépend toujours de la présence d'un agent pour sa mise en marche ce qui rend un basculement automatique en service impossible.

- Le coût de l'indisponibilité

En cas de défaillance des régulateurs automatiques ou de l'excitatrice pilote on est obligé de désexciter l'alternateur et de le découpler du réseau électrique. Cela conduit à arrêter la production de P énergie électrique pendant tout le temps que prendra le système de secours pour sa mise en service, ensuite on couple à nouveau l'alternateur au réseau électrique. Tout le temps perdu est compté en dinars/KWh.

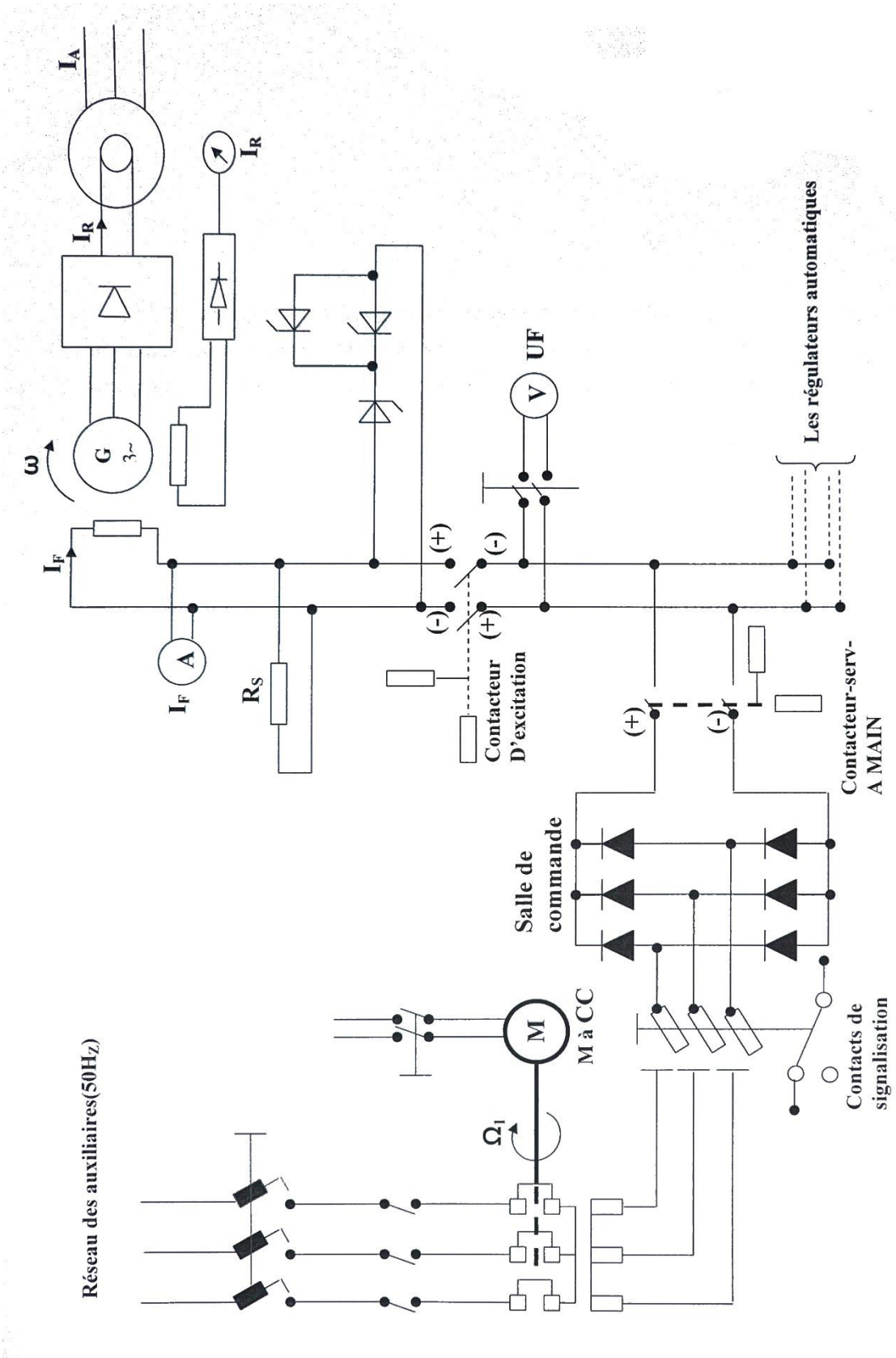


Figure (III.112) Schéma de régulation manuelle

VI. Conclusion :

Ce chapitre expose les différents types de réglage de tension dans la centrale électrique ainsi on peut dire que le contrôle et le réglage de la tension est une fonction indispensable à la sûreté de fonctionnement des centrales, du système électrique et au bon fonctionnement des appareils des utilisateurs du système, son objectif est de maintenir un profil adéquat dans le réseau de transport d'énergie électrique. En plus, il doit maintenir des réserves de puissance réactive dans les différentes zones du système pour faire face aux incidents de tension.

Le réglage de la tension est effectué essentiellement sur les alternateurs synchrones des centrales raccordées au réseau de transport.

Le réglage de la tension sollicite les alternateurs er pour cette raison que l'alternateur est équipé d'une régulation de tension avec des fonctions de limitation qui le protègent des contraintes thermiques, magnétiques et mécaniques et permettent de maintenir les installations de production à l'intérieur du domaine normal de fonctionnement pour lequel le matériel a été conçu.

I. Introduction

La modélisation du comportement dynamique des machines tournantes est une pratique courante depuis de nombreuses années.

Habituellement, l'objectif d'une telle modélisation consiste à prévoir par simulation et de prédire leurs comportements suite à une perturbation.

Ce présent chapitre est consacré à la modélisation et la simulation d'un système constitué d'une turbine, d'un alternateur, disjoncteurs, charges et l'ensemble des dispositifs de contrôle et de commande.

Une description détaillée des principaux éléments est faite, par le développement des équations et de modèle mathématique, dont nous avons commencé par la machine synchrone, fonctionnant en générateur, qui est connue souvent sous le nom de (l'alternateur).

Cette machine synchrone à pôles lisses, entrainée par une turbine à vapeur, et qui est aussi un point important dans notre travail.

Un aperçu général est porté, ainsi qu'une modélisation et une simulation sous MATLAB Simulink fera l'objet de notre travail en se basant sur la centrale de CAP-DJINET.

II. Modélisation de la machine synchrone [10] [11] [12]

Les machines synchrones peuvent être modélisées selon différentes méthodes, et en fonction des objectifs recherchés.

- Le modèle en (a, b, c) découlant des équations différentielles à coefficient périodiques régissant le fonctionnement de la machine. Ils sont utilisés essentiellement pour l'étude des régimes permanents.
- Le modèle issu de la transformation de Park, et utilisé couramment pour l'étude des régimes transitoires et pour la commande vectorielle des moteurs.

Dans de ce chapitre, on présentera le modèle d'une machine synchrone à inducteur bobiné à pôles lisses en se basant sur quelque hypothèses simplificatrices à fin de faciliter la résolution des systèmes d'équations différentielles.

II.1. Hypothèses simplificatrices

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

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

- La densité de courant est considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.

- La force magnétomotrice crée par chaque phase de l'induit est parfaitement sinusoïdale du fait que les machines synchrone sont destinées à fonctionner en courant alternatif

- Enfin on admettra que l'ensemble des amortisseurs peut être représenté par deux enroulements, l'un dit amortisseur d'axe direct (indice D), d'axe magnétique dirigé selon (Od), l'autre dit amortisseur d'axe en quadrature (indice Q), d'axe magnétique dirigé selon (Oq) voir (Figure 1).

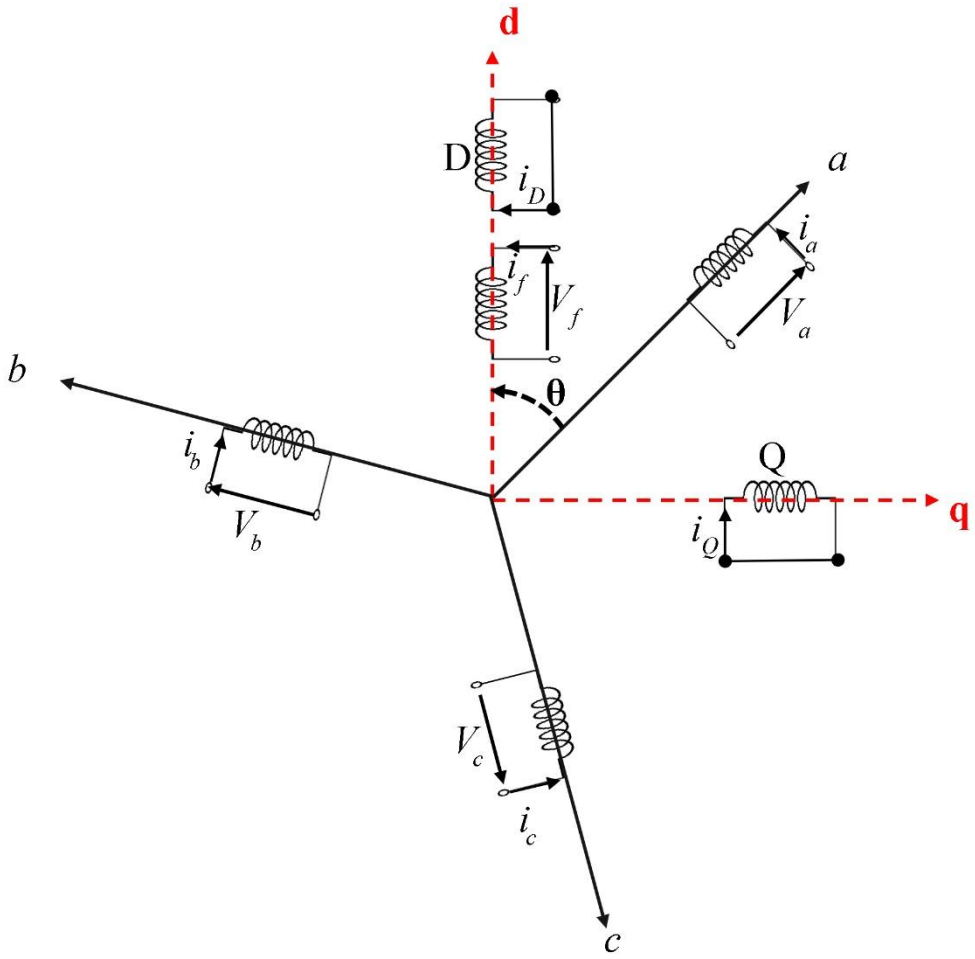
II.2. Définition des axes

L'axe (Od) est l'axe de bobinage inducteur ; et l'axe (Oq) est situé entre deux pôles,

Ces deux axes sont en quadrature, en effet, les angles mécaniques et électriques sont liés par le nombre de paires de pôles ($\omega_r = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}$ soit $\theta_{mec} = \frac{\theta elec}{p}$)

Ces axes sont également ceux des enroulements D et Q. ils sont liés au rotor et tournent avec lui. Ils ne sont pas bobinés, mais ils représentent les effets des amortisseurs dus à la structure massive du rotor, l'ensemble est représenté par la (Figure IV.1)

Les axes (Oa,Ob et Oc) sont les axes respectifs des trois enroulements (a,b et c) du stator



Figure(IV.1) Schéma d'un alternateur triphasé avec amortisseurs

II.3. Équations électrique et magnétique de la machine dans les axes (a.b.c) :

Le modèle en (a, b, c) découle directement des équations différentielles régissant le fonctionnement de la machines synchrone.

On peut écrire les équations de la machine en convention de signe comme expliqué ci-dessus :

II.3.1. Équations électriques :

Les matrices suivantes désignent respectivement :

$[V_S]=\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$ et $[V_r]=\begin{bmatrix} Vf \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ Matrices des tensions au stator et au rotor de la machine.

($V_D=0$, $V_Q=0$)

$[i_s]=\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$ et $[i_r]=\begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$ Matrices des courants au stator et au rotor de la machine.

$[\Phi_s]\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix}=$ et $[\Phi_r]=\begin{bmatrix} \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix}$ Matrices des flux au stator et au rotor de la machine

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}$ Matrice des résistances statorique de la machine

$[R_r] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix}$ Matrice des résistances rotorique de la machine.

Le système d'équations sous forme matricielle est donné comme suit :

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

$$\begin{bmatrix} Vf \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Par arrangement, le système d'équation peut être écrit de la forme suivant :

$$[V_S]= -[R_S][i_s] - \frac{d}{dt}[\Phi_s] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

$$[V_r]= [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Avec :

R_a : Résistance d'une phase de l'induit

R_f : Résistance de l'inducteur

R_D : Résistance de l'amortisseur d'axe d

R_Q : Résistance de l'amortisseur d'axe q.

II.3.2. Équations magnétiques

$$\Phi_a = l_a.i_a + M_{ab}.i_b + M_{ac}.i_c + M_{af}.i_f + M_{aD}.i_D + M_{aQ}.i_Q \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Un même calcul a été effectué pour toutes les autres phases, on obtient ainsi le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \\ \Phi_f \\ \Phi_D \\ \Phi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ab} & l_b & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ac} & M_{bc} & l_c & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & l_f & M_{fD} & 0 \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} & M_{fD} & l_D & 0 \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} & 0 & 0 & l_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Les équations magnétique se résume sous la forme matricielle suivante avec :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & l_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & l_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

L'équation du flux au rotor de la machine est donnée par l'équation :

$$\begin{bmatrix}\Phi_f\\ \Phi_D\\ \Phi_Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}M_{af} & M_{bf} & M_{cf}\\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD}\\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}l_f & M_{fD} & 0\\ M_{fD} & l_D & 0\\ 0 & 0 & l_Q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_f\\ i_D\\ i_Q\end{bmatrix}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (8)$$

L'écriture sous forme condensés :

$$[\Phi_s]=\ [L_{SS}][i_s]+[M_{sr}][i_r]\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (9)$$

$$[\Phi_r]=\ [M_{rs}][i_s]+[L_{rr}][i_r]\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (10)$$

II.3.3. Matrice inductance statorique :

L'expression mathématique de la matrice d'inductance statorique en fonction de (θ) :

$$[L_{ss}]=\begin{bmatrix}L_{a0}+L_{a2}\cos(2\theta) & M_{ab0}+L_{a2}\cos(2\theta-\frac{2\pi}{3}) & M_{ab0}+L_{a2}\cos(2\theta-\frac{4\pi}{3})\\ M_{ab0}+L_{a2}\cos(2\theta-\frac{2\pi}{3}) & L_{a0}+L_{a2}\cos(2\theta-\frac{4\pi}{3}) & M_{ab0}+L_{a2}\cos(2\theta)\\ M_{ab0}+L_{a2}\cos(2\theta-\frac{4\pi}{3}) & M_{ab0}+L_{a2}\cos(2\theta) & L_{a0}+L_{a2}\cos(2\theta-\frac{2\pi}{3})\end{bmatrix}\ldots.\ (11)$$

Chaque inductance propre, ou mutuelle comporte un terme constant (L_{S0}) et un terme variable (L_{SV}). Dont les machines à pôles lisses, le terme (L_{SV}) est négligeable.

L'équation des inductances propre et mutuelle peut être écrite sous la forme suivante :

$$[L_{ss}]=\begin{bmatrix}L_{a0} & M_{ab0} & M_{ab0}\\ M_{ab0} & L_{a0} & M_{ab0}\\ M_{ab0} & M_{ab0} & L_{a0}\end{bmatrix}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (12)$$

II.3.4. Matrice de couplage entre le stator et le rotor :

L'expression de la matrice de couplage entre le stator et le rotor en fonction de **θ**

$$[M_{sr}]=\begin{bmatrix}M_{af}\cos(\theta) & M_{aD}\cos(\theta) & -M_{aQ}sin(\theta)\\ M_{af}\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & M_{aD}\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -M_{aQ}sin(\theta-\frac{2\pi}{3})\\ M_{af}\cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & M_{aD}\cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & -M_{aQ}sin(\theta-\frac{4\pi}{3})\end{bmatrix}\ldots\ldots\ldots\ (13)$$

θ: Ecart angulaire entre deux phases, statorique et rotorique correspondant

II.3.5. Matrice inductance rotorique :

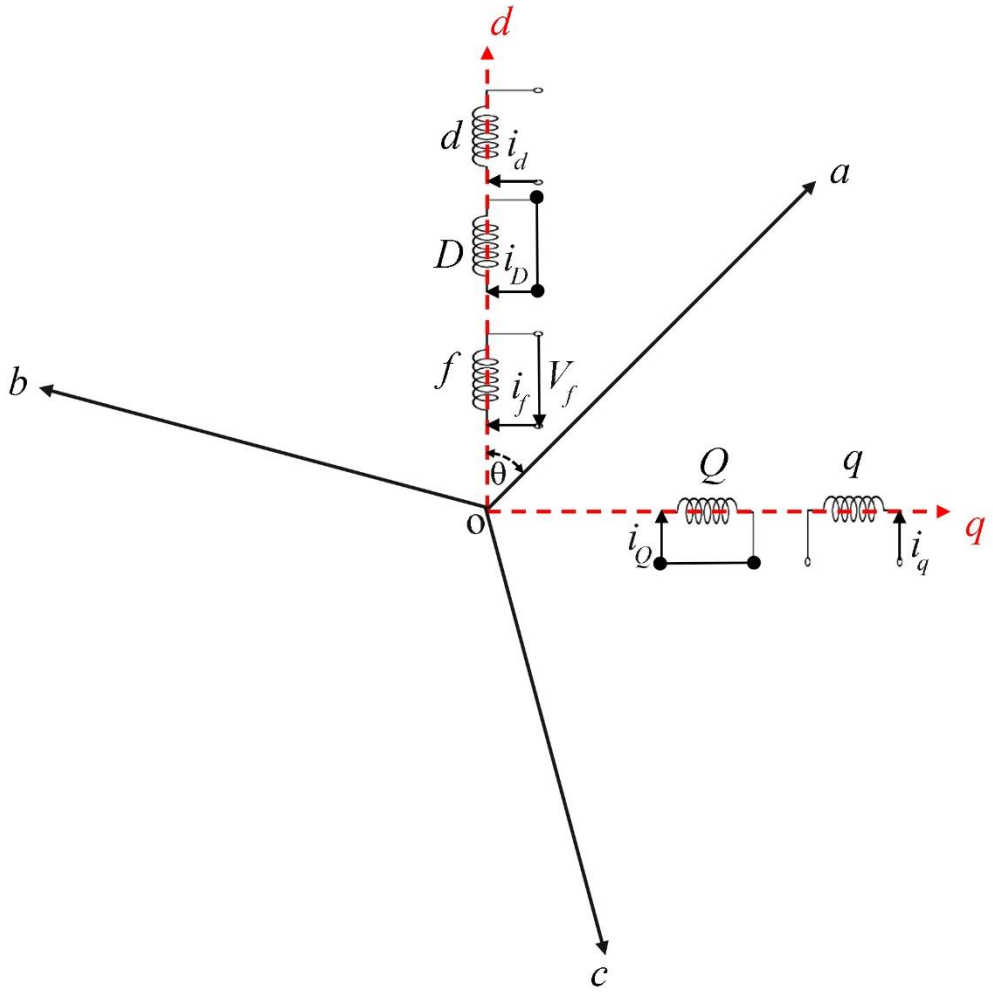
Les éléments de la matrice inductance rotorique ne varie pas avec (θ).

$$[L_{rr}]=\begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

II.4. Equation électrique dans les deux axes d et q

II.4.1. Transformation de Park

Ce modèle de la machine synchrone dans le repère (a, b, c) montre que les coefficients de la matrice inductance sont constantes, on utilise généralement, une transformation dite Park, cette transformation permet le passage de notre système réel triphasé (a, b, c) à un autre système d'axe (O d q), formant le référentiel de Park, lie au rotor et repéré par l'angle θ par rapport au stator.



Figure(IV.2) Schéma d'un alternateur triphasé aprés transformation de PARK

II.4.1.1. La matrice de transformation de PARK :

$$[P(\theta)]=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & cos(\theta-\frac{4\pi}{3})\\ -sin(\theta) & -sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta-\frac{4\pi}{3})\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (15)$$

II.4.1.2. La matrice inverse de transformation de PARK :

$$[P(\theta)]^{-1}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & -sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & -sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (16)$$

Le coefficient $(\sqrt{\frac{2}{3}})$ est pour une conservation de puissance.

La transformation de Park se fait comme suit :

$$[i_{dq0}]=[P(\theta)].\ [i_s]\ \Rightarrow [i_s]=[P(\theta)]^{-1}.[i_{dq0}]\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (17)$$

$$[V_{dq0}]=[P(\theta)].\ [V_s]\ \Rightarrow\ [V_s]=[P(\theta)]^{-1}.[V_{dq0}]\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (18)$$

$$[\Phi_{dq0}]=[P(\theta)].\ [V_s]\ \Rightarrow\ [\Phi_s]=[P(\theta)]^{-1}.[\Phi_{dq0}]\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (19)$$

Avec : $\{[V_{dq0}], [i_{dq0}], [\Phi_{dqo}]\}$ le système biphasé obtenu par la transformation de Park

II.5. Modèle de la machine

II.5.1. Etablissement des équations électriques

En Appliquant le changement de variables défini par les équations (17), (18), aux équations des tensions statorique et rotorique définie comme suit :

$$V_S=-\frac{d\Phi s}{dt}-R_S.\ i_S$$

$$Vr=\frac{d\Phi r}{dt}+Rr.ir$$

En passant par la transformation de Park, on aura :

$$V_{dq0}=-P(\theta)\frac{d\Phi s}{dt}-Rs.P(\Phi)i_s$$

$$V_{dq0}=-P(\theta)\frac{dP(\theta)^{-1}\Phi_{dq0}}{dt}-Rs.P(\Phi).P(\theta)^{-1}.i_{dq0}$$

$$V_{dq0}=-P(\theta).P(\theta)^{-1}\frac{d\Phi_{dq0}}{dt}-P(\theta)(\frac{d}{dt}P(\theta)^{-1})\Phi_{dq0}-Rs.P(\Phi).P(\theta)^{-1}.\ i_{dq0}$$

Sachant que :

$$P(\theta)(\frac{d}{dt}P(\theta)^{-1})=\frac{d\theta}{dt}\begin{vmatrix}0 & 1 & 0\\ -1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{vmatrix}$$

$$P(\theta).P(\theta)^{-1}=1 \text{ et } \frac{d\theta}{dt}=\omega_r$$

Alors, on obtient les expressions des tensions suivantes :

Au stator :

$$\begin{cases}V_d=-R_S i_d-\frac{d\Phi_d}{dt}-\omega_r\Phi_q\\ V_q=-R_S i_q-\frac{d\Phi_q}{dt}-\omega_r\Phi_d\\ V_o=-\frac{d\Phi_o}{dt}-R_S i_o\end{cases} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (20)$$

Et au rotor :

$$\begin{cases}V_f=R_f i_f+\frac{d\Phi_f}{dt}\\ V_D=0=R_D i_D+\frac{d\Phi_D}{dt}\\ V_Q=0=R_Q i_Q+\frac{d\Phi_Q}{dt}\end{cases} \quad . \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (21)$$

II.5.2. Etablissement des équations magnétique dans les axes (dq)

En Appliquant le changement de variables défini par l'équation (III.19) aux équations des flux statorique et rotorique définie comme suit :

$$[\Phi_S]=[L_{SS}].\ [i_S]+[M_{sr}].\ [i_r]$$

$$[\Phi_r]=[M_{rs}].\ [i_S]+[L_{rr}].\ [i_r]$$

On aura :

$$[\Phi_{dq}]=[p(\theta).[L_{SS}].p(\theta)^{-1}].\ [i_{dq}]+[p(\theta).[M_{sr}].p(\theta)^{-1}].\ [i_{dq}] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (22)$$

Par substitution, les équations mathématiques des flux dans le repaire de Park sont données comme suit:

Au stator :

$$\begin{cases}\Phi_d = L_d i_d + M_{fd} i_f + M_{Dd} i_D \\ \Phi_q = L_q i_q + M_{qQ} i_Q\end{cases} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (23)$$

Au rotor :

$$\begin{cases}\Phi_f = L_f i_f + M_{fd} i_d + M_{fD} i_D \\ \Phi_D = L_D i_D + M_{fD} i_f + M_{dD} i_d \\ \Phi_Q = L_Q i_Q + M_{qQ} i_q\end{cases} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (24)$$

Avec :

L_{ff} : Inductance propre de l'inducteur.

L_{DD} : Inductance propre de l'amortisseur d'axe direct.

L_{QQ} : Inductance propre de l'amortisseur d'axe quadrature.

M_{fd} : Inductance Mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur d'axe direct

On remplace les équations magnétiques dans les équations électriques, on obtient :

$$\begin{cases}V_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} - M_{fd} \frac{di_f}{dt} - M_{dD} \frac{di_D}{dt} - \omega_r L_q i_q - \omega_r M_{qQ} i_Q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - M_{qQ} \frac{di_Q}{dt} - \omega_r M_{fd} i_f + \omega_r M_{Dd} i_D \\ V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M_{fd} \frac{di_d}{dt} + M_{fD} \frac{di_D}{dt} \\ V_D = 0 = R_D i_D + L_D \frac{di_D}{dt} + M_{dD} \frac{di_d}{dt} + M_{fD} \frac{di_f}{dt} \\ V_Q = 0 = R_Q i_Q + L_Q \frac{di_Q}{dt} + M_{qQ} \frac{di_d}{dt}\end{cases} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (25)$$

L'ensemble des relations précédentes peut se mettre sous forme matricielle :

$$[V_S] = -[R_S].[i_S] - [L_s].\frac{d[i_S]}{dt} - \omega_r [k_S] [L_S] [i_S] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (26)$$

Avec :

$$[V_S] = [V_d \quad V_q \quad V_f \quad 0 \quad 0]$$

$[i_S] = [i_d \quad i_q \quad i_f \quad i_D \quad i_Q]$

$[R_S] = \mathrm{diag}(R_S \quad R_S \quad R_f \quad R_D \quad R_Q)$

$$[L_S] = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{fd} & M_{dD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ M_{fd} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{dD} & 0 & M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

$$[K_S] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les tensions aux bornes des enroulements sont composées de : $[R_S].\ [i_S]$ qui représente les chutes de tensions aux bornes des résistances, $[\mathrm{Ls}]\ .\frac{d[i_S]}{dt}$ qui représente les forces électromotrices induites par les variations de courants, $\mathrm{P}\omega_r\ [k_S]\ [L_S]\ [i_S]$ qui représente les forces électromotrices induites dues à la rotation.

II.6. Equation électrique et mécanique

II.6.1. Equations des Puissances

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

$$P_e = V_a\ i_a + V_b\ i_b + V_C\ i_C \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (27)$$

En remplaçant les quantités (a, b, c) par (d, q, o) en utilisant la transformation de PARK, on aura :

$$P_e = \frac{3}{2}(V_d\ i_d + V_q\ i_q + 2V_O\ i_O\ ) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (28)$$

Après simplifications de l'équation (28) on aura :

$$P_e = \frac{3}{2}(id\frac{d\Phi_d}{dt} + i_q\frac{d\Phi_q}{dt} + 2\ i_O\frac{d\Phi_O}{dt}) + \frac{3}{2}(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d)\omega_r - \frac{3}{2}R_S(i_d^2 + i_q^2 + i_O^2) \quad \ldots. \quad (29)$$

Dont, le premier terme représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée ;

Le deuxième terme représente la puissance mécanique transformée en puissance électrique à l'intérieur de la machine et le troisième terme, représente les pertes joule dans l'induit.

Comme décrit ci-dessous. La puissance électrique sortant de l'induit est composé de trois termes : [8]

$P_{in} = P_j + P_{em} + P_{me}$…… (30)

P_{em} : correspond à la variation de l'énergie magnétique emmagasinée par unité de temps.

P_{me} : Puissance mécanique qui résulte de la transformation de la puissance instantanée de la machine, on aura la puissance électrique.

P_j: Pertes Joule

On aura la puissance électromagnétique comme suit :

$$Pem = \frac{3}{2}\omega_r(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad \text{…… (31)}$$

Dans notre machine $(p = 1)$, $\omega_r = p\ \omega_{rm}$ donc on aura :

$$Pem = \frac{3}{2}p\omega_{rm}(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad \text{…… (32)}$$

En divisant la puissance électromagnétique sur la vitesse de rotation ω on aura l'expression du couple électromagnétique de la machine.

$$C_{em} = \frac{p_{em}}{\omega} = \frac{3}{2}p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad \text{…… (33)}$$

On peut aussi établir l'expression du couple électromagnétique directement à partir de l'expression générale suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2}p[i]^T \frac{d[L]}{d\theta}[i] \quad \text{…… (34)}$$

avec $[i] = \begin{bmatrix}[i_S] \\ [i_r]\end{bmatrix}$: matrice du courant totale

$[L] = \begin{bmatrix} L_{SS} & M_{Sr} \\ M_{rS} & L_{rr} \end{bmatrix}$: Matrice inductance totale

p : nombre de paires de pôles (p=1 dans le cas de notre machine)

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_{SS}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants, on aura :

$$C_{em}=\frac{1}{2}[i_S]^r \frac{d[M_{Sr}]}{d\theta}[i_r]$$

Le développent de ce calcul conduit bien à l'équation (33) .le comportement électromécanique sera complété par l'équation du mouvement :

C_m-$C_{em}=J\frac{d\omega_r}{dt}$ avec :

J : moment d'inertie

Cm : couple mécanique

ω_r : vitesse instantanée de rotation

Pour des oscillations à faibles fréquences, le courant introduit dans les enroulements amortisseurs est négligeable. Par conséquent les enroulements amortisseurs sont ignorés, le couple d'amortissement produit par ces enroulements amortisseurs est donc également négligeable. Pour tenir compte de la composante du couple négligée, on introduit dans l'équation de mouvement un terme de compensation D (nommé aussi coefficient d'amortissement) ce coefficient représente l'amortissement naturel de systèmes.

L'équation du mouvement peut être donc réécrite comme suit :

$$\frac{d\omega_r}{dt}=\frac{1}{J}(Cm - Cem - D(\Delta\omega_r - 1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (36)$$

L'équation de l'angle de rotor de la machine est donnée par :

$$\delta = \omega_0(\Delta\omega_r - 1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (37)$$

ω_0 : vitesse de synchronisme en rad/s

Avec $\omega_0 = 2\pi f$ avec f : fréquence nominal en Hz

D : coefficient d'amortissement

δ : angle de rotor en radian

II.7. Ecriture en forme d'équation d'état sans amortisseurs

À partir des équations précédentes on peut déterminer le modèle d'état de la machine. Le vecteur d'état contient l'ensemble des courants et la vitesse de rotation, ce qui aboutit à une représentation non linéaire. Dans bon nombre de cas, l'influence des amortisseurs peut être négligée. En effet, ils interviennent essentiellement dans les régimes subtransitoires, et ne jouent aucun rôle significatif dans l'étude des régimes transitoires.

D'autre part, la machine synchrone étant quasiment toujours autopilotée, les vitesses de rotations du champ tournant et de rotor sont liées, ce qui réduit considérablement le rôle des amortisseurs dans ce type de fonctionnement. On considère par la suite uniquement le cas des machines synchrones sans amortisseurs.

II.7.1. Modèle linéaire sans amortisseur

Lorsque la variation de la vitesse ω_r est lente par rapport à la variation des courants i_d, i_q *et* i_f les dynamiques de vitesse et de courant peuvent être considérées comme étant découplées. On peut alors supposer la vitesse de rotation ω_r constante dans les équations électriques, et le modèle d'état est linéaire. Cette hypothèse est autant plus justifiée que la constante de temps mécanique est grande par rapport à la constante de temps électrique [9].

En faisant abstraction des amortisseurs les équations électriques deviennent :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \dfrac{di_d}{dt} - M_{fd} \dfrac{di_f}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \dfrac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r M_{fd} i_f \\ V_f = R_f i_f + L_f \dfrac{di_f}{dt} + M_{fd} \dfrac{di_d}{dt} \end{cases} \quad \ldots\ldots (38)$$

A partir des équations précédentes Nous pouvons écrire les dérivées des courants en fonction des tensions et des courants.

Les dérivées des courants en fonction des tensions et les courants sont présentées comme suit :

$$\begin{cases} \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{L_f R_S}{L_d L_f + M_{fd}^2} i_d + \dfrac{L_q L_f}{L_d L_f + M_{fd}^2} \omega_r i_q - \dfrac{R_f M_{fd}}{L_d L_f + M_{fd}^2} i_f + \dfrac{L_f}{L_d L_f + M_{fd}^2} V_d + \dfrac{M_{fd}}{L_d L_f + M_{fd}^2} V_f \\ \dfrac{di_q}{dt} = \dfrac{L_d}{L_q} \omega_r i_d - \dfrac{R_S}{L_q} i_q + \dfrac{M_{fd}}{L_q} \omega_r i_f - \dfrac{1}{L_q} V_q \\ \dfrac{di_f}{dt} = \dfrac{M_{fd} R_S}{L_d L_f + M_{fd}^2} i_d - \dfrac{L_q M_{fd}}{L_d L_f + M_{fd}^2} \omega_r i_q - \dfrac{R_S}{L_q} \left(1 - \dfrac{M_{fd}^2}{L_d L_f + M_{fd}^2}\right) i_f + \dfrac{M_{fd}}{L_d L_f + M_{fd}^2} V_d + \dfrac{1}{L_f} \left(\dfrac{M_{fd}^2}{L_d L_f + M_{fd}^2}\right) V_f \end{cases} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (39)$$

Par simplification, on obtient l'écriture matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_d(1+\delta_{fd})} & \frac{L_d}{L_q}\omega_r & \frac{M_{fd}}{\tau_d L_f(1+\delta_{fd})} \\ \frac{L_q}{L_d(1+\delta_{fd})} & -\frac{1}{\tau_q} & \frac{L_q M_{fd}}{L_d L_f(1+\delta_{fd})} \\ -\frac{M_{fd}}{L_d\tau_f(1+\delta_{fd})} & \frac{M_{fd}}{L_q} & -\frac{1}{\tau_f}+\frac{\delta_{fd}}{\tau_f(1+\delta_{fd})} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d(1+\delta_{fd})} & 0 & \frac{M_{fd}}{\tau_d L_f(1+\delta_{fd})} \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & 0 \\ \frac{M_{fd}}{L_d L_f(1+\delta_{fd})} & 0 & \frac{1}{L_d L_f(1+\delta_{fd})} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \end{bmatrix} \quad \ldots. (40)$$

Avec :

$\tau_d = \frac{L_d}{R_S}$ La constante de temps de l'enroulement d

$\tau_q = \frac{L_q}{R_S}$ La constante de temps de l'enroulement q

$\tau_f = \frac{L_f}{R_f}$ La constante de temps de l'enroulement inducteur f

$\delta_{fd} = \frac{M_{fd}^2}{L_f.L_d}$ Le coefficient de dispersion entre l'enroulement f et d

III. Etude de la régulation de la tension d'un alternateur d'une centrale thermique :

La valeur de la tension induite dans un enroulement d'un alternateur dépend de trois facteurs :

- la vitesse de rotation de l'alternateur,
- L'intensité du champ magnétique,
- La longueur du conducteur placé dans le champ magnétique.

Etant donné que la vitesse de rotation de l'alternateur doit demeurer constante et que la longueur du conducteur est fixe, le facteur déterminant est l'intensité du champ magnétique. L'intensité du champ magnétique ou densité des lignes de force dépend du courant d'excitation, qui lui-même dépend de la tension d'excitation (loi d'Ohm). C'est donc dire qu'en faisant varier le courant d'excitation (ou la tension), on peut faire varier la tension aux bornes de l'alternateur. Le système d'excitation de l'alternateur est la source du courant continu créant le champ dans l'alternateur.

Dans ce chapitre, nous étudierons un système de puissance composé d'un turboalternateur d'une centrale thermique alimentant un réseau infini.

Une première charge de moyenne tension représentera la puissance consommée par les circuits auxiliaires de la centrale ainsi que toutes les pertes dans les lignes.

Une seconde charge en haute tension représentera une ligne alimentant une charge voisine de la centrale.

III.1. Description du circuit :

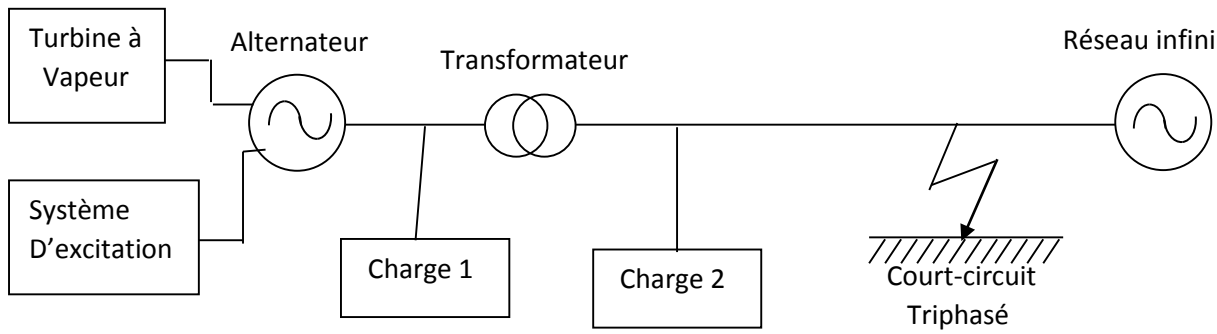
Nous avons réalisé ce circuit de l'ensemble turbine-alternateur avec charges sous MATLAB SIMULINK qui est donné par la figure

Ce schéma bloc nous permettra de synthétiser, et de voir le fonctionnement et comportement d'une façon générale d'un ensemble turbine-alternateur avec charges.

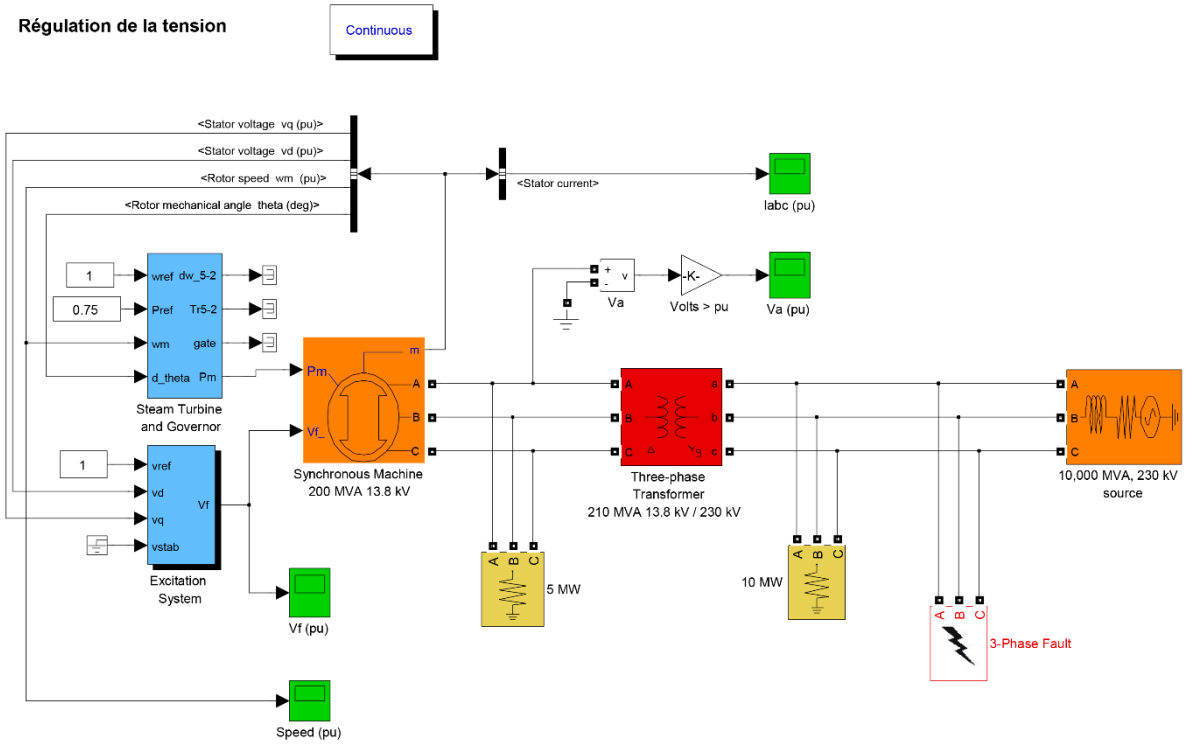
Le circuit comporte :

- Un alternateur de 200 MVA, 13,8 kV produisant une puissance active de 150 MW.
- Un réseau infini de 10 000 MVA, de tension 230 kV
- Un transformateur triangle/étoile de 210 MVA
- Une charge de 5 MW sous 13,8 kV
- Une charge de 10 MW sous 230 kV

III.2. Schéma du système :



Figure(IV.3) Schéma du système de l'ensemble turbine-alternateur avec charges



Figure(IV.4) Schéma Bloc de l'ensemble turbine-alternateur avec charges sous MATLAB-SIMULINK

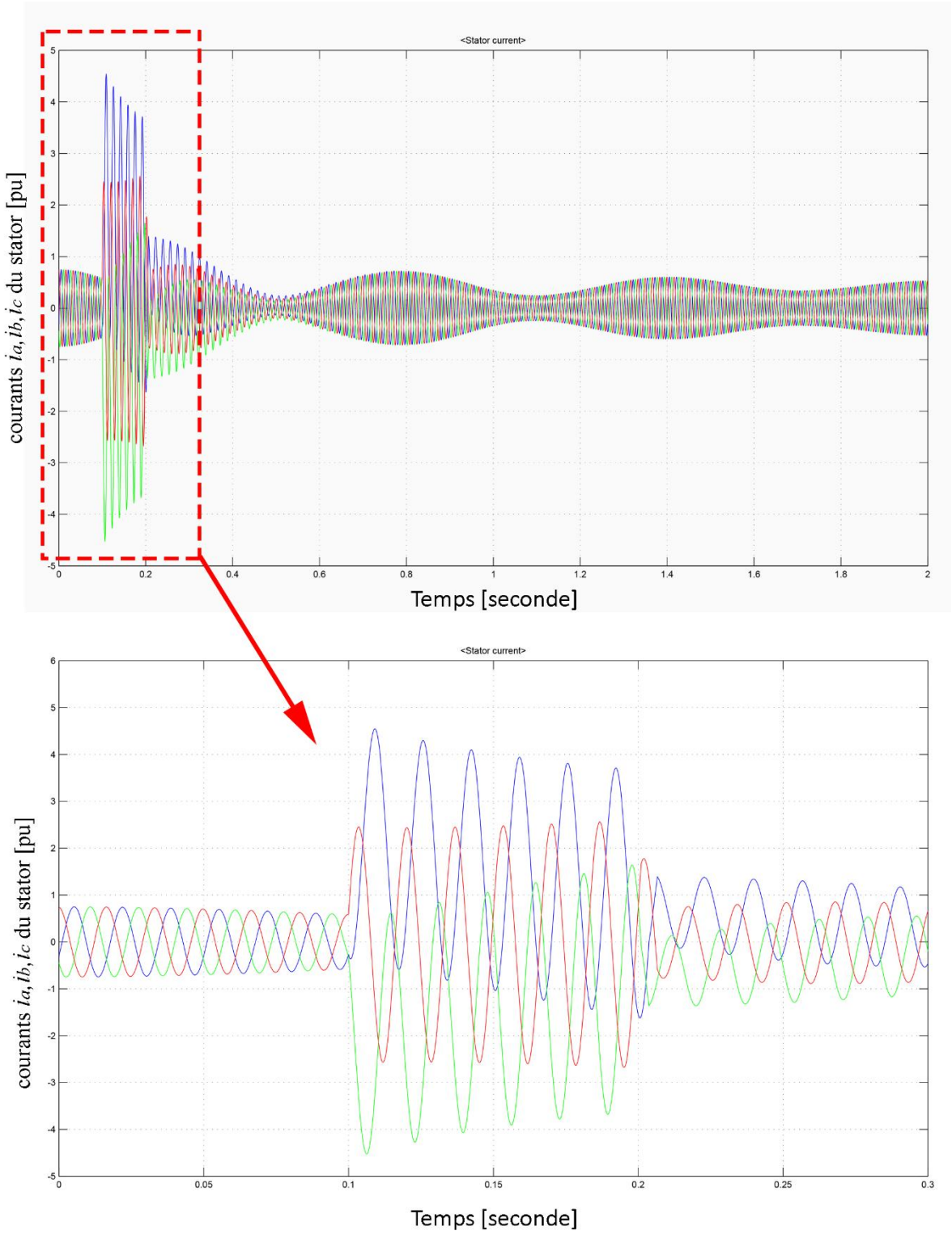
III.3. Mode opératoire :

On veut visualiser les signaux suivant :

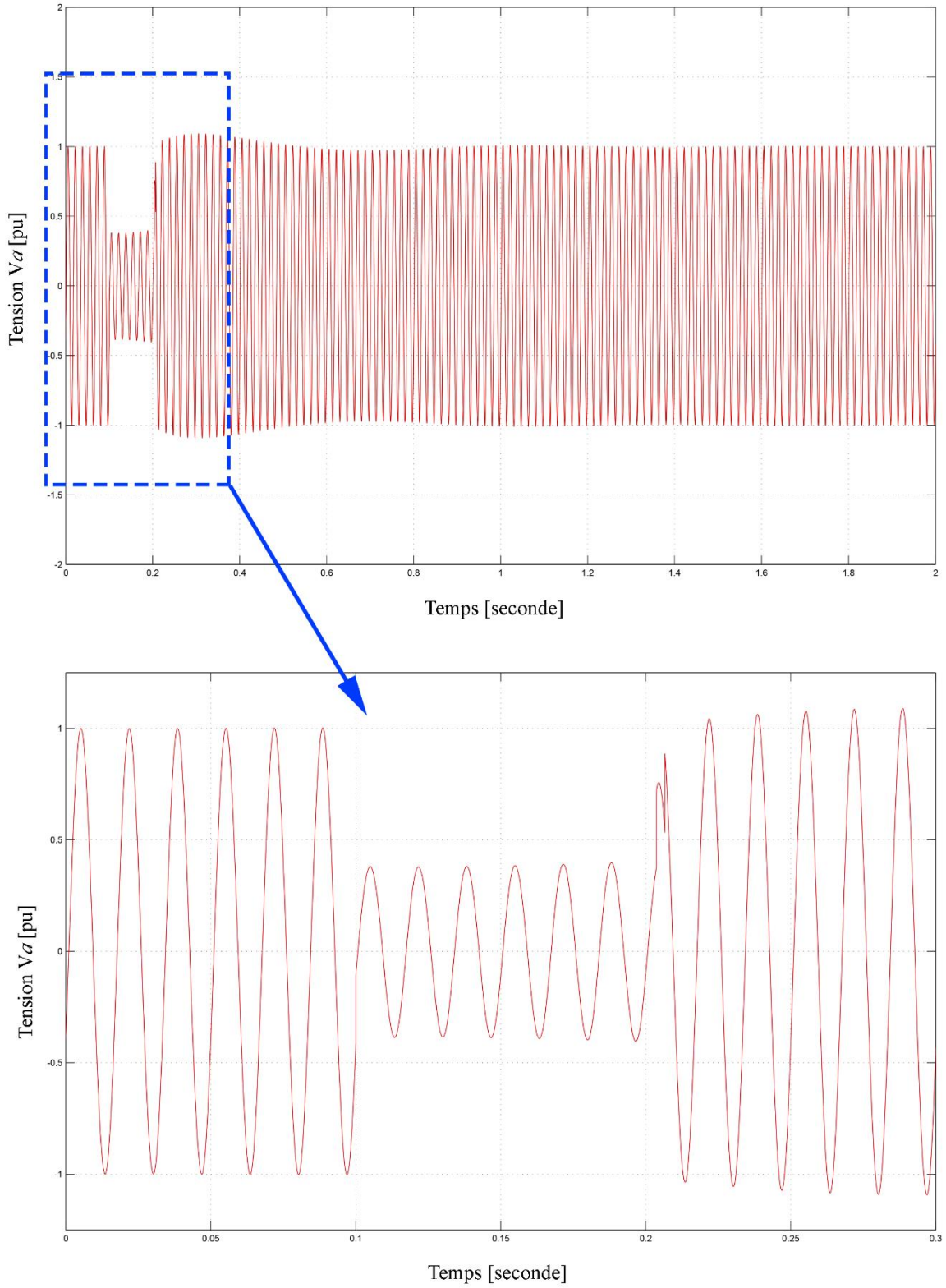
Les courants induits du stator, la tension débitée de l'alternateur, la vitesse de l'alternateur et le courant d'excitation dans le rotor.

On lance la simulation entre 0 seconde et 2 secondes

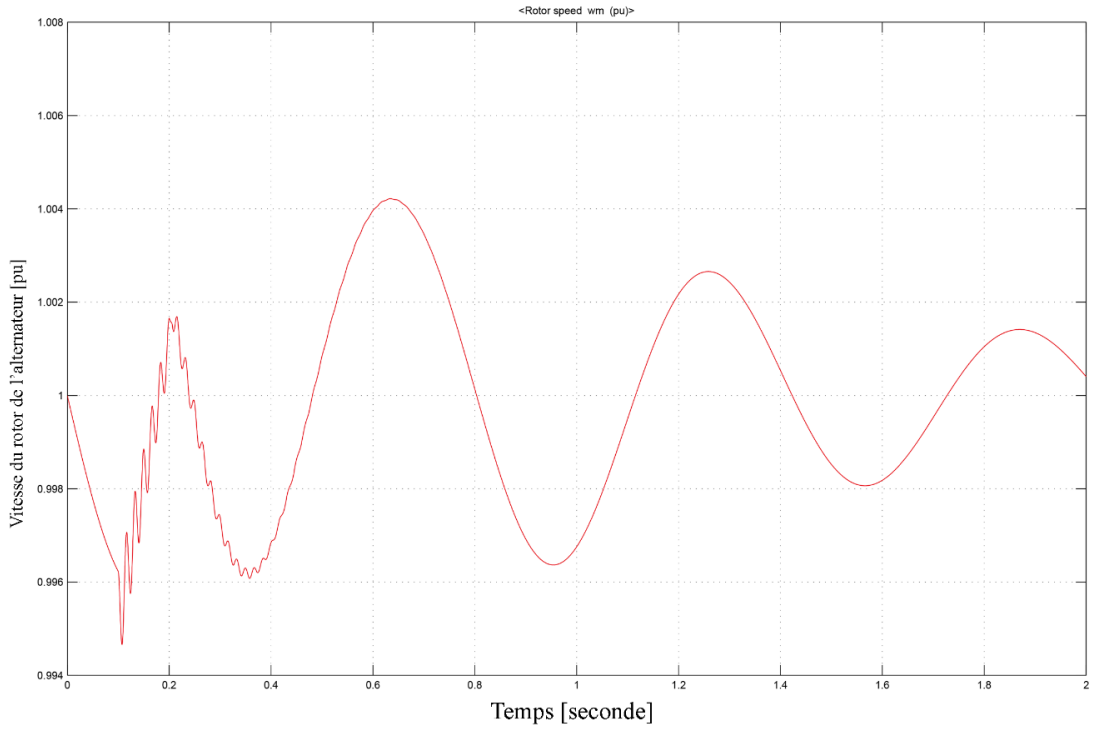
Un court-circuit triphasé survient entre 0,1 seconde et 0,2 seconde (donc de durée 0,1 seconde). Le court-circuit est éliminé 6 cycles après son apparition.



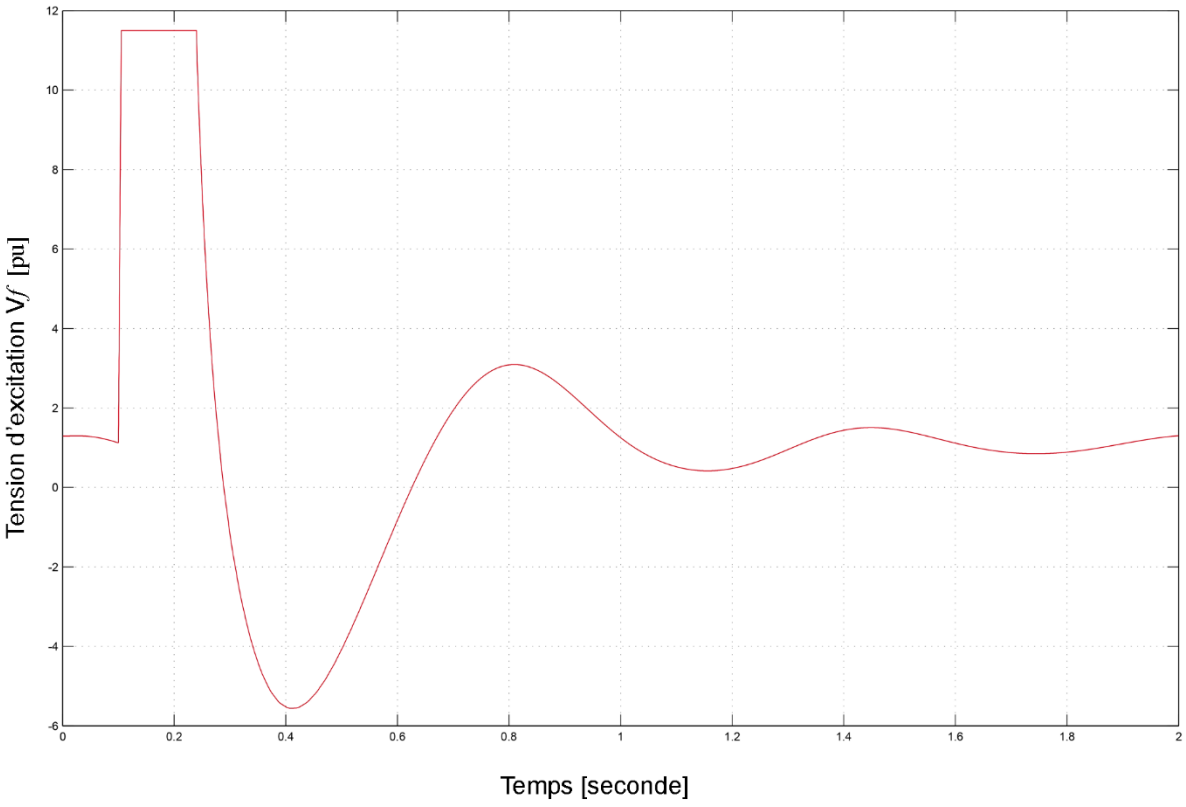
Figure(IV.5) Evolution des courants induits du stator



Figure(IV.6) Evolution de la tension débitée (Va)



Figure(IV.7) Evolution de la vitesse du rotor de l'alternateur



Figure(IV.8) Evolution de la tension (*Vf*) d'excitation

III.4. Constatation :

Les résultats obtenus par la simulation permettent de faire les observations suivantes : dans la Figure(IV.6) on remarque que la tension *Va* est égale au début de la simulation à 1[pu] puis la courbe tombe à 0,4 [pu] durant le défaut et reprend rapidement sa valeur initiale après élimination du défaut, c'est-à-dire après 0,2 seconde.

Pendant le défaut, dans la Figure(IV.5), les courants induits i_a, i_b, i_c du stator donc de charge deviennent très grands, presque 5 fois le courant de fonctionnement.

Dans la Figure(IV.8) on constate que la courbe de la tension d'excitation dans le rotor augmente brusquement de 1 [pu] à 11,5 [pu] pendant tout le défaut et revient progressivement à sa valeur initiale après l'élimination du défaut.

Sur la Figure(IV.7) la vitesse de la machine augmente à 1,01 [pu] durant le défaut et oscille aussi autour de 1 [pu] pendant toute la régulation.

III.5. Interprétation :

La rapidité de la tension à reprendre sa valeur initiale est due au fait que la tension d'excitation *Vf* varie instantanément de sa valeur initiale 1[pu] à 11,5 [pu], valeur qu'elle prend durant tout le défaut (0,1seconde).

La turbine à vapeur a pour rôle de transformer l'énergie calorifique emmagasinée par la vapeur d'eau haute température et haute pression en une énergie mécanique de rotation contrôlée par la position de la vanne d'admission principale appelée encore valve de contrôle. Cette énergie est transformée en énergie électrique grâce à l'alternateur entrainé par la turbine. Les temps de réponse des différentes parties de la vapeur sont généralement modélisés par une seule constante de temps. On note que quelques fractions de puissance mécanique sont expirées dans les différents étages de la turbine (basse, moyenne et haute pression). Entre la valve de contrôle et le premier étage haute pression, la constante de temps typique varie de 0.1 à 0.4 seconde alors que dans une réchauffe installée, ce temps est lent et dure quelques secondes. Le temps mis entre la moyenne et la basse pression est pratiquement entre 0.3 et 0.6 secondes. La vitesse prend donc plus de temps à se stabiliser que la tension, cela est due principalement à la vitesse d' (ouverture/fermeture) des valves qui est limité dans notre cas à 0,1 [pu]/seconde.

IV. CONCLUSION :

Pour les machines, en exploitation, la tension d'un alternateur alimentant un réseau doit être maintenue constante quels que soient le facteur de puissance et l'intensité du courant débité par le stator. Pour arriver à ce résultat, on augmente la force électromotrice interne en agissant sur le courant dans le rotor de l'alternateur appelé "courant d'excitation". Si on augmente ce courant, le champ produit par le rotor augmentera, il en résultera une augmentation de cette force électromotrice interne et par conséquent de la tension aux bornes. On obtiendrait le résultat inverse en diminuant le courant d'excitation.

Un alternateur produit en même temps des puissances réactives et actives en fonction des besoins de la charge à alimenter. Produire trop de puissance réactive revient à surexciter l'alternateur : risque de détériorer le bobinage du rotor. Produire trop de puissance active revient à augmenter le courant dans le bobinage du stator : risque de détériorer le bobinage. Lors du fonctionnement, il faudrait donc veiller à ne pas dépasser les valeurs limites des courants du stator et du rotor.

Conclusion générale :

Vu l'architecture et le nombre important des intervenants, le réseau électrique est considéré parmi les systèmes les plus complexes. Le système électrique haute tension est constitué de trois sous-systèmes qui sont le sous-système de puissance englobant les centrales de production, les postes de transformation, les lignes de transport, les nœuds de consommation, le sous-système de pilotage engendrant le réseau d'observation et de signalisation, le réseau de communication, le système de contrôle - commande et le sous-système humain comportant les divers niveaux d'intervenants. La conduite efficace du réseau électrique est assurée grâce à une coordination adéquate des trois sous-systèmes. Seulement, la difficulté majeure de conduire le réseau réside à la fois dans les exigences du matériel, et aux contraintes sévères et inévitables de l'impossibilité de stocker l'énergie électrique et le caractère aléatoire de la charge. Comme autres difficultés de conduire le réseau, il y'a le problème de la prise de décision, la disponibilité des moyens pour réaliser une action et la justification de l'action qui sont allégées par les procédures et consignes d'exploitation. Par ailleurs, dès que la situation anormale est étendue et plusieurs événements ont lieu successivement, il est difficile d'obtenir et analyser les informations pour agir au temps opportun. Pour ces situations perturbées, les consignes de travail peuvent être modifiées par rapport à la normale.

Bien que les centrales, les postes et les lignes du réseau électrique soient contrôlés individuellement et en permanence, il est impératif de contrôler le fonctionnement du système dans sa globalité à cause de la forte interaction entre tous les éléments du réseau. A titre d'exemple, la défaillance d'un seul groupe de production dérègle la tension de plusieurs nœuds du réseau et affecte la fréquence du réseau.

Pour ces raisons, il est nécessaire de disposer d'un coordinateur qui parvient à coordonner et à harmoniser la participation de chaque composante du réseau à partir de sa vision globale du système. Le rôle du coordinateur est confié au Dispatching.

Le problème de la tension est, essentiellement local (excitation des machines, compensation statique ou synchrone). Il faut limiter les transits de réactif dans le réseau. On admet des plages de variations de l'ordre de 5 à 10% selon le niveau de tension et le type de clientèle.

Pour ce qui concerne les machines, en exploitation, la tension d'un alternateur alimentant un réseau séparé doit être maintenue constante quels que soient le facteur de puissance et l'intensité du courant débité par le stator.

Pour arriver à ce résultat, on augmente la force électromotrice interne en agissant sur le courant dans le rotor de l'alternateur appelé "courant d'excitation de l'alternateur ". Si on augmente ce courant, le champ produit par le rotor augmentera, il en résultera une augmentation de cette force électromotrice interne et par conséquent de la tension aux bornes. On obtiendrait le résultat inverse en diminuant le courant d'excitation.

Dans les centrales, ce réglage est obtenu automatiquement à l'aide de régulateurs de tension.

Dans le cas d'un réseau multi-machine, La puissance réactive de chaque alternateur est fonction du courant d'excitation de l'alternateur, c'est-à-dire de l'intensité du courant dans le rotor de l'alternateur.

Le travail qu'on a réalisé dans le cadre de ce projet, avec l'appui d'un stage pratique au sein de la centrale thermique de Ras-Djinet, nous a permis de mettre en pratique nos connaissances théoriques et de nous familiariser avec le monde industriel ainsi que l'utilisation objective des logiciels de simulation numérique.

Ce mémoire a eu pour objet à l'étude d'un alternateur ainsi que les différents systèmes et modes de régulation de la tension dont nous avons montré que dans le système de production d'énergie électrique, il est très important de maintenir la fréquence dans une plage de fonctionnement étroite en valeur et tolérance, le respect strict de cette valeur est non seulement nécessaire au fonctionnement correct des charges mais indispensable.

Bibliographie

[1] IEA Statistics - Algeria : Balances for 2012,

7 octobre 2014.International Energy Agency

[2] H.BOUDISSA R.HASNAOUI

« Etude et dimensionnement d'un poste d'interconnexion 400kV »

Mémoire de fin d'étude d'ingéniorat en électrotechnique, 2004, UMMTO

[3] Notice de formation

KWU (Kraft Work Union)

[4] M.CHATBI, A.LADJ

« Etude des protections électriques du jeu de barres 6.3kVde la centrale de Ras-Djinet ».

Mémoire de fin d'étude d'ingéniorat en électrotechnique, 2009, UMMTO

[5] Alain Hebert, Claude Naudet, Michel Pinard

« Machines électriques - électronique de puissance Théorie - applications – laboratoires » Edition: Dunod 1985

[6] Theodore Wildi, Gilbert Sybille

« Électrotechnique 4e éd ». Juillet 2005 Éditeur : DE BOECK

[7] Pierre MAYE

« Aide-mémoire électrotechnique »édition DUNOD, 2006

[8] ILARION PAVEL

« L'invention du moteur synchrone par Nikola Tesla » Bibnum, bibliothèque numérique de textes scientifiques, Fondation maison des sciences de l'homme 2013

[9] **Daniel SOUQUE, Laurent CHATONNET, Étienne MONNOT**

« Réglage de tension - Rôles, obligations et organisation du producteur pour les besoins du système électrique en France » Référence D4096, Éditions : Techniques de l'Ingénieur, 2013

[10] **A.HADDAD, M.AMERANE**

« Etude de la stabilité d'une machine synchrone reliée à un réseau de puissance infinie ». Mémoire de fin d'étude Master académique en électrotechnique, 2014, UMMTO

[11] **F.KHETTAB**

«Modélisation et simulation d'une machine synchrone».

Mémoire de fin d'étude d'ingéniorat en électrotechnique, 2008, UMMTO

[12] **N.KECILI**

«Modélisation et simulation numérique d'un système d'excitation statique d'un turbo-alternateur».

Mémoire de fin d'étude d'ingéniorat en électrotechnique, 1991, UMMTO

[13] **A.CHABOUNI, S.GHANINE**

« Etude de la centrale électrique de Ras-Djinet »

Mémoire de fin d'étude Licence professionnel en électrotechnique, 2012, UMMTO

[14] **Abdallah Mouhammad BARAKAT**

« Contribution à l'amélioration de la régulation de tension des générateurs synchrones : nouvelles structures d'excitation associées a des lois de commande H∞ »

Thèse de Doctorat en Génie Electrique et Automatique de l'université de Poitiers, 2011