

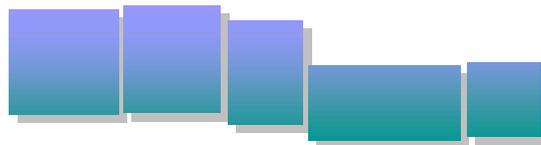
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMARI DE TIZI OUZOU  
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFOMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELCTROTECHNIQUE



# Mémoire de fin d'études

**En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
Electrotechnique  
Option : Machine électrique**



## **Etude de la protection électrique d'un alternateur Siemens de la centrale de Ras-Djinet**

**Proposé par :**

**SONALGAZ**

**Dirigé par :**

**M<sup>r</sup> Z. SAHLI  
M<sup>r</sup> H. AITAYELA**

**Réalisé par:**

**BOUALLELI Ahmed  
BOUSSAID Boualem**

Promotion: 2007/2008

## *Remerciements*

*Au terme de ce mémoire, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour mener à bout ce modeste travail.*

*Egalement, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur M<sup>r</sup> SAHLI.Z qui nous a fait l'honneur de nous prendre sous sa responsabilité, ainsi que pour ces orientations et précieux conseils, qu'il trouve ici toutes les expressions de notre respect et gratitude.*

*Nous remercions ainsi vivement et du profond de cœur tout le personnel de la centrale de Ras-Djinet, en particulier M<sup>r</sup> AITYALA.H pour sa contribution appréciable et son suivi tout au long de notre travail.*

*Nos remerciements s'adressent également aux enseignants qui ont contribué à notre formation, ainsi que les membres du jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.*

*Nous tenons, enfin, à remercier tous qui nous ont portés d'aide de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

<b>Introduction générale</b> .....	01
------------------------------------	----

## **Chapitre I : Généralités sur la centrale thermique de Ras-Djinet**

I.1. Introduction .....	02
I.2. Présentation de l'unité .....	04
I.3. Choix du site .....	05
I.4. Organisation d'une centrale thermique à vapeur .....	05
I.4.1. Chaudière .....	06
I.4.2. Condenseur .....	07
I.4.3. Turbine à vapeur .....	07
I.4.4. Alternateur .....	08
I.4.5. Excitatrice .....	08
I.4.6. Les transformateurs .....	09
I.5. Evacuation de l'énergie .....	09
I.6. Les auxiliaires de la tranche .....	10
I.6.1. Ventilateur de soufflage d'air de combustion VS 1,2 .....	10
I.6.2. Pompe d'extraction PPE 1,2 .....	10
I.6.3. Pompe de circulation PPC 1,2 .....	10
I.6.4. Ventilateur de recyclage VR 1, 2 .....	10
I.6.5. Pompes alimentaires PPA 1, 2, 3 .....	10
I.6.6. Les transformateurs MT/ BT .....	10
I.7. Principe de fonctionnement d'une tranche de production .....	11
I.7.1. Circuit eau-vapeur .....	11
I.7.2. Transformation de l'énergie .....	12
I.8. Conclusion .....	13

## **Chapitre II : Description de l'alternateur**

II.1. Introduction .....	14
II-2. Définition de l'alternateur .....	14
II.3. Plaque signalétique de l'alternateur .....	14
II.4. Les caractéristiques techniques et mécaniques de l'alternateur .....	14
II.4.1. La caractéristique technique .....	14
II.4.2. Les caractéristiques mécaniques .....	16
II.5. Caractéristique de fonctionnement à vide et de fonctionnement en charge .....	16
II.5.1. Caractéristique à vide .....	16
II.5.2. Caractéristique de court-circuit .....	17
II.5.3. Caractéristique en charge .....	17
II.6. Nombre de pôles de l'alternateur .....	18
II.7. Constitution .....	19
II.7.1. Stator .....	19
II.7.1.1. Enveloppe du stator .....	20
II.7.1.2. Paliers flasques .....	21
II.7.1.3. Circuit magnétique .....	21
II.7.1.4. Enroulement du stator .....	22

II.7.2. Rotor	24
II.7.2.1. Arbre du rotor.	24
II.7.2.2. Enroulement de rotor.	25
II.7.2.3. Frettes du rotor.	26
II.7.2.4. Amenée du courant d'excitation.	27
II.7.2.5. Ventilateur du rotor.	27
II.7.3. Paliers de l'alternateur	27
II.7.4. Etanchéité	27
II.7.5. Réfrigérants d'hydrogène	28
II.7.6. Excitation du rotor	29
II.8. Facteurs affectant la grosseur des alternateurs	30
II.9. Synchronisation de l'alternateur	31
II.10. Fonctionnement d'un alternateur	31
II.11. Paramètre de dimensionnement	32
II.12. Conclusion	33

### **Chapitre III : Les défauts de fonctionnement et les relais de protection**

III.1. Introduction	34
III.2. Les défauts	34
III.3. Origine des défauts (interne, externe)	34
III.3.1. Les défauts d'origine interne	35
III.3.1.1. Défaut d'isolation des conducteurs formant l'enroulement statorique	35
III.3.1.2. Défaut d'isolation des conducteurs de l'enroulement rotorique	36
III.3.1.3. Perte d'excitation (manque d'excitation)	36
III.3.2. Les défauts d'origine externe	36
III.3.2.1. Les courts-circuits	37
III.3.2.2. Déséquilibre	39
III.3.2.3. Perte de synchronisme	39
III.3.2.4. Déséquilibre de courant (intensités non égales)	40
III.3.2.5. Baisse de tension	40
III.3.2.6. Surtensions	40
III.3.2.7. Les surcharge	41
III.3.2.8. Max. fréquence ; Min. fréquence (variation de fréquence)	41
III.4. Durée des défauts	42
III.5. Détection des défauts	42
III.5.1. Détection directe	43
III.5.2. Détection indirecte	43
III.6. Elimination des défauts	43
III.6.1. Elimination des défauts d'origine interne	43
III.6.2. Elimination des défauts d'origine externe	44
III.7. Conséquence sur les machines et le système ou processus.	44
III.8. Les relais de protection	46
III.8.1. Définition	46
III.8.2. Qualité d'un relais de protection	47
III.8.3. Les différents types de relais	48
III.8.3.1. Relais de surcharge ou échauffement	48
III.8.3.2. Relais de surtension et baisse de tension	48
III.8.3.3. Relais de déséquilibre	48

III.8.3.4. Relais de retour de puissance active	49
III.8.3.5. Relais directionnel à maximum de courant	50
III.8.3.6. Relais de détection des variations de fréquence	51
III.8.3.7. Relais à maximum de courant pour la protection de l'alternateur contre les courts-circuits internes	52
III.9. Conclusion	52

## **Chapitre IV : Les différents types de protection**

IV.1. Introduction	53
IV.2. Généralités sur le système de protection	53
IV.2.1. Protection externes	53
IV.2.2. Protections internes	53
IV.3. Dispositif de protection électrique d'alternateur	53
IV.3.1. Transformateur de mesure	54
IV.3.1.1. Transformateur de courant	54
IV.3.1.2. Transformateur de tension	55
IV.3.2. Matrice de déclenchement	55
IV.3.2.1. Application	55
IV.3.2.2. Structure	56
IV.3.2.3. Mode de fonctionnement	56
IV.3.3. L'oscillostore	57
V.4. Différents types de protection	58
IV.4.1. Protection différentielle contre les défauts entre phases de d'alternateur	58
IV.4.1.1. Généralités et application	58
IV.4.1.2. Principe de détection	58
IV.4.1.3. Réalisation	59
IV.4.1.4. Action	61
IV.4.2. Protection à 80 % contre les mises à la terre accidentelles du stator	61
IV.4.2.1. Application	61
IV.4.2.2. Structure	61
IV.4.2.3. Fonctionnement de la protection	62
IV.4.2.4. Autre principes de détection des mises à la terre du stator	64
IV.4.2.4.a. Mise à la terre de point neutre par une résistance	64
IV.4.2.4.b. Mise à la terre de point neutre par un transformateur	65
IV.4.3. Protection à 100% contre une mise à la terre de stator	66
IV.4.3.1. Réalisation	67
IV.4.3.2. Action	68
IV.4.4. Protection contre les mises à la terre du rotor	68
IV.4.4.1. Généralités	68
IV.4.4.2. Principe de détection	69
IV.4.4.3. Réalisation	69
IV.4.4.4. Action	70
IV.4.4.5. Défaut entre spires de l'enroulement rotorique	70
IV.4.5. Protection contre la surintensité	71
IV.4.5.1. Généralités	71
IV.4.5.2. Rôle de la protection	71
IV.4.5.3. Principe de détection	71
IV.4.5.4. Action	71
IV.4.6. Protection contre les surtensions	72

IV.4.6.1. Rôle . . . . .	72
IV.4.6.2. Constitution . . . . .	72
IV.4.6.3. Fonctionnement . . . . .	72
IV.4.7. Protection contre le retour de puissance. . . . .	73
IV.4.7.1. Rôle. . . . .	73
IV.4.7.2. Application. . . . .	73
IV.4.7.3. Structure . . . . .	74
IV.4.7.4. Mode de fonctionnement. . . . .	74
IV.4.8. Protection contre l'asymétrie. . . . .	76
IV.4.9. Protection contre les pertes d'excitation. . . . .	78
IV.5. Conclusion. . . . .	79

## **Chapitre V : Analyse graphique des défauts**

V.1. Introduction. . . . .	80
V.2. Fonctionnement normal de l'alternateur. . . . .	80
V.2.1. Interprétation des graphes. . . . .	81
V.3. Fonctionnement anormal de l'alternateur. . . . .	82
V.3.1. Surintensité dans deux phases de l'alternateur. . . . .	82
V.3.2. Surintensité sur les trois phases de l'alternateur . . . . .	85
V.4. Conclusion . . . . .	86

<b>Conclusion générale . . . . .</b>	<b>87</b>
--------------------------------------	-----------

<b>Bibliographié . . . . .</b>	<b>88</b>
--------------------------------	-----------

### **Introduction générale :**

De nos jours, le monde a besoin de plus en plus d'énergie, une importante partie de celle-ci est utilisée sous forme d'énergie électrique qui est non polluante à l'environnement et son acheminement se fait à travers des câbles qui deviennent une solution économique dans le domaine de transport d'énergie. Pour satisfaire la demande en énergie électrique, qui ne se trouve pas dans la nature sous une forme exploitable à l'échelle des besoins industriels, il est nécessaire de partir d'une autre forme d'énergie que l'on appelle énergie primaire.

En Algérie, une grande partie de la production de l'énergie électrique est fournie par des usines utilisant des combustibles fossiles à savoir : les hydrocarbures. Ces usines appelées centrales thermiques, ces dernières ont pour rôle de produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique dégagée par la combustion de combustible. Celle-ci est réalisée par un générateur de vapeur ou chaudière.

La centrale thermique de Ras-Djinet occupe une place importante dans le réseau de production de l'énergie électrique national, elle est, en effet, la première centrale thermique à vapeur en Algérie vu sa puissance utile fournie (704MW). Elle est dotée de quatre tranches de production de l'énergie (ou groupes) et chaque tranche contient un alternateur.

L'alternateur de chaque tranche de la centrale de Ras-Djinet joue un rôle très important dans la production de l'énergie électrique en transformant l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

Notre travail consiste à étudier les caractéristiques de l'alternateur et son système de protection contre les différents défauts existant.

A cet effet, notre travail est constitué de cinq chapitres qui sont comme suit :

Chapitre I : généralité sur la centrale thermique de Ras- Djinet.

Chapitre II : description et caractéristiques de l'alternateur.

Chapitre III : les défauts de fonctionnement et les relais de protection.

Chapitre IV : les différents types de protection.

Chapitre V : analyses graphique des défauts électriques.

**Introduction générale :**

De nos jours, le monde a besoin de plus en plus d'énergie, une importante partie de celle-ci est utilisée sous forme d'énergie électrique qui est non polluante à l'environnement et son acheminement se fait à travers des câbles qui deviennent une solution économique dans le domaine de transport d'énergie. Pour satisfaire la demande en énergie électrique, qui ne se trouve pas dans la nature sous une forme exploitable à l'échelle des besoins industriels, il est nécessaire de partir d'une autre forme d'énergie que l'on appelle énergie primaire.

En Algérie, une grande partie de la production de l'énergie électrique est fournie par des usines utilisant des combustibles fossiles à savoir : les hydrocarbures. Ces usines appelées centrales thermiques, ces dernières ont pour rôle de produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique dégagée par la combustion de combustible. Celle-ci est réalisée par un générateur de vapeur ou chaudière.

La centrale thermique de Ras-Djinet occupe une place importante dans le réseau de production de l'énergie électrique national, elle est, en effet, la première centrale thermique à vapeur en Algérie vu sa puissance utile fournie (704MW). Elle est dotée de quatre tranches de production de l'énergie (ou groupes) et chaque tranche contient un alternateur.

L'alternateur de chaque tranche de la centrale de Ras-Djinet joue un rôle très important dans la production de l'énergie électrique en transformant l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

Notre travail consiste à étudier les caractéristiques de l'alternateur et son système de protection contre les différents défauts existant.

A cet effet, notre travail est constitué de cinq chapitres qui sont comme suit :

Chapitre I : généralité sur la centrale thermique de Ras- Djinet.

Chapitre II : description et caractéristiques de l'alternateur.

Chapitre III : les défauts de fonctionnement et les relais de protection.

Chapitre IV : les différents types de protection.

Chapitre V : analyses graphique des défauts électriques.

## I.1. Introduction :

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne ne serait envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de produire de l'électricité en grandes quantités. Les principaux modes de production de l'électricité sont :

- ❖ Les centrales éoliennes : se sont des centrales qui produisent de l'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent.



**Figure I.1. Parc éolien**

- ❖ Les centrales nucléaires : se sont des centrales qui produisent de l'énergie électrique à partir de l'énergie nucléaire.

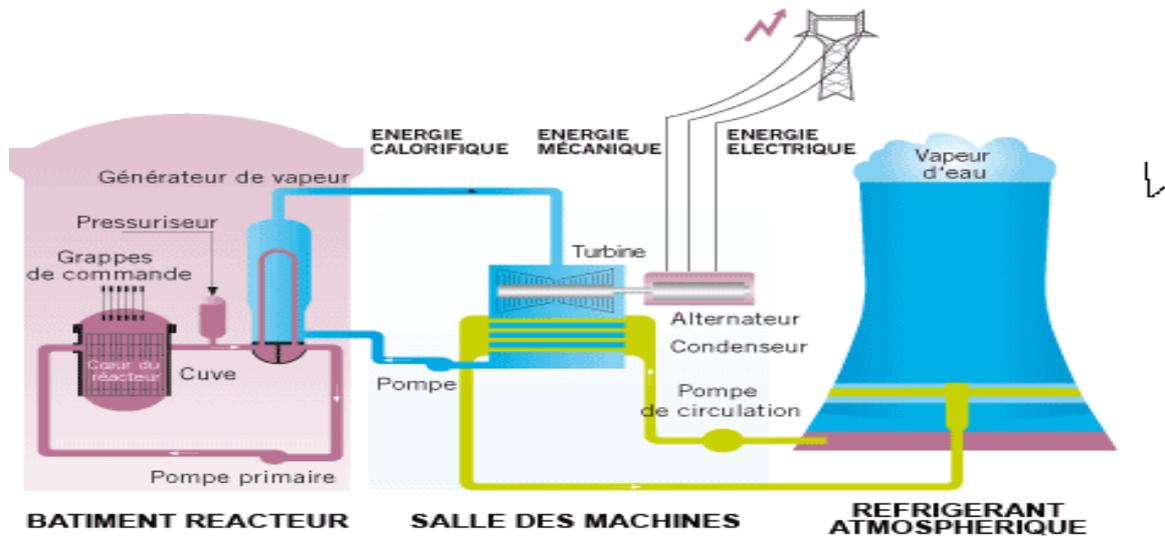


Figure I.2. Schéma d'une centrale nucléaire

❖ Les centrales hydrauliques : l'énergie électrique est produite par la chute d'eau et utilisée pour tourner une turbine.

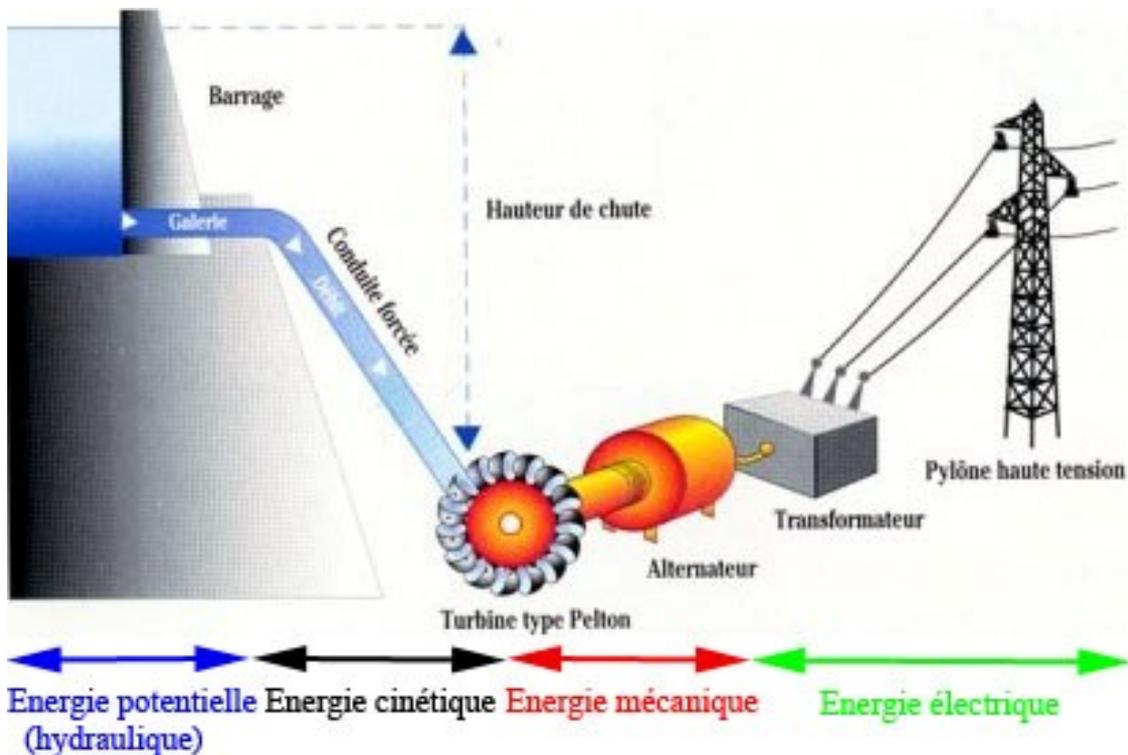


Figure I.3. Schématisation d'un système hydraulique

- ❖ Les centrales solaires photovoltaïques : l'énergie est produite par les rayonnements solaires en utilisant des héliostats.



**Figure I.4. Centrale solaire photovoltaïque.**

- ❖ Les centrales thermiques : se sont des centrales qui produisent de l'énergie électrique à partir de la combustion d'un gaz naturel ou de charbon dans une chaudière à vapeur.



**Figure I.5. Centrale thermique(Autriche).**

Le principe commun entre toutes ces centrales électrique c'est qu'elles fonctionnent grâce à :

- 1- Un réservoir d'énergie dite primaire qui sera transformée en énergie mécanique.
- 2- Un alternateur qui convertit l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

Dans ce chapitre on s'intéresse à la centrale thermique à vapeur de Ras-Djinet.

## **I.2. Présentation de l'unité :**

Notre pays compte trois importantes centrales thermiques à vapeur :

- Au port d'Alger.
- A Annaba.
- A Cap Djinet.

Cette dernière est classée la première ou la plus grande du pays. Elle a été réalisée entre 1980 et 1986, elle occupe une superficie de 35 hectares et située au bord de la mer à l'est d'Alger près de la ville de Cap Djinet dans la wilaya de Boumerdes. Elle fournit au réseau national de l'énergie électrique sous tension de 235 kV.

La centrale thermique de Ras-Djinet contient une station de pompage, une unité de dessalement d'eau de mer, une unité de déminéralisation d'eau dessalée, quatre groupes ou monoblocs d'une puissance unitaire de 176 MW par tranche sommant ainsi une puissance totale de 704 MW. [2]

### **I.3. Choix du site :**

Le choix de site s'est fait sur la base des critères suivants :

- Proximité de mer.
- Proximité de consommateurs importants, situés notamment à proximité de la zone industrielle de Rouiba et de Reghaia.
- Conditions de sous-sol favorable, ne nécessitant pas de fondations profondes.
- Située sur la route nationale Dellys-Alger, cela favorise son alimentation par voie routière en fuel-oil domestique (Mazout) en cas d'indisponibilité de gaz naturel.

### **I.4. Organisation d'une centrale thermique à vapeur :**

Le schéma de la figure [I.6] montre les parties principales d'une centrale thermique identifié comme suit :

- |                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| 1- Chaudière           | 7- Pompe d'alimentation |
| 2- Ballon de chaudière | 8- Turbine à vapeur     |
| 3- Surchauffeur        | 9- Pompe d'extraction   |
| 4- Resurchauffeur      | 10- Alternateur         |
| 5- Brûleur             | 11- Bâche tampon        |
| 6- Condenseur          | 12- Réfrigérant d'été   |

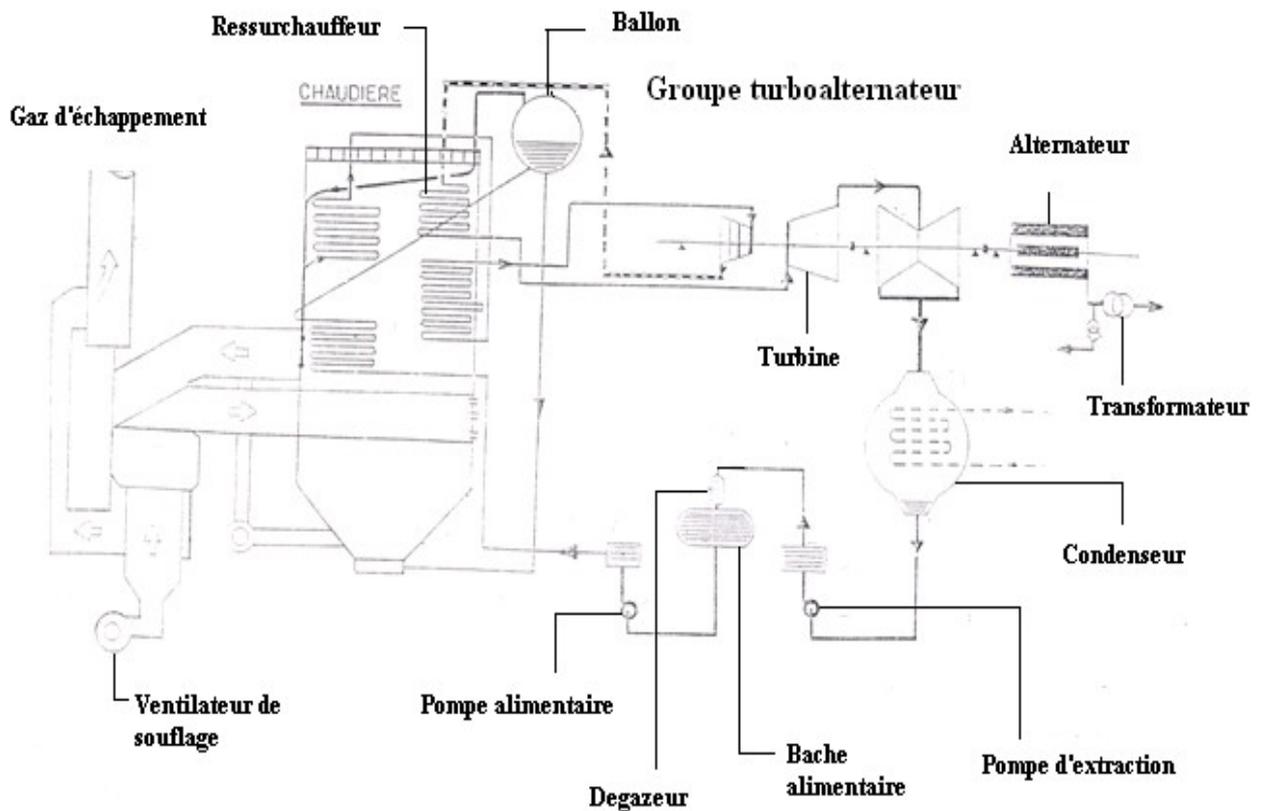


Figure I.6. Schéma simplifié d'une centrale thermique.

#### I.4.1. Chaudière :

Construite en hauteur dans laquelle on brûle le combustible. La chaleur est transférée à l'eau circulant dans une série de tubes qui entourent les flammes. La circulation est forcée par les pompes d'alimentation en eau pure.

##### I.4.1.a. Combustible principal :

Le combustible principal utilisé dans la chaudière est le gaz naturel de Hassi-R'mel, acheminé par gazoduc. Un débit de 160 000 m<sup>3</sup>/heure de gaz est nécessaire pour assurer la pleine charge des quatre groupes.

En cas d'indisponibilité de gaz, le secours est assuré par du fuel-oil domestique à l'aide d'un dispositif d'alimentation composé de deux réservoirs de 10 000m<sup>3</sup> chacun. [3]

**I.4.1.b. Ballon de réservoir :**

Contenant de l'eau et de la vapeur à haute pression. Il constitue à la fois le point de départ de la vapeur vers les turbines et le récepteur de l'eau d'alimentation de retour. La vapeur se dirige vers la turbine haute pression (HP) en passant par un surchauffeur.

**I.4.1.c. Surchauffeur :**

C'est un échangeur de chaleur, composé d'une série de tubes entourant le feu, provoque une forte augmentation de la température de vapeur (300°C environ). Cela assure une vapeur qui est absolument sèche et donne un meilleur rendement thermique.

**I.4.1.d. Resurchauffeur :**

C'est un échangeur de chaleur dans lequel, une partie de la vapeur qui est passée par le corps haute pression (HP) réchauffe l'eau d'alimentation. Les analyses thermodynamiques prouvent que le rendement ainsi obtenu est meilleur que si la vapeur dérive dans le resurchauffeur allait aux corps moyennes pression (MP) et basse pression (BP) de la turbine.

**I.4.1.e. Brûleurs :**

Chaque tranche contient huit brûleurs répartis sur les faces avant et arrière de la chambre de combustion. Ils provoquent la combustion du gaz ou du mazout projeté à l'intérieur de la chaudière.

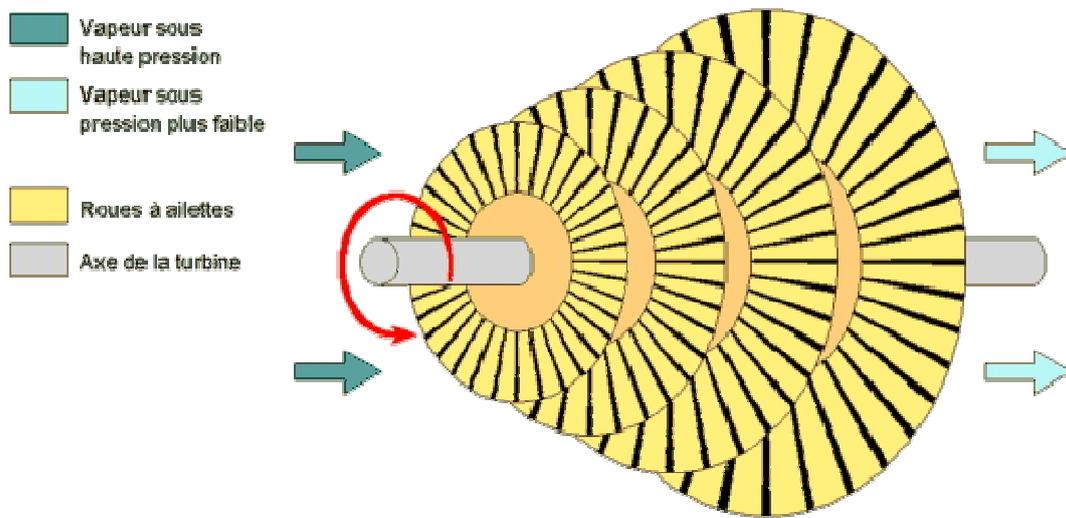
**I.4.2. Condenseur :**

Est un échangeur de chaleur, il provoque la condensation de la vapeur, grâce à la circulation d'eau froide venant de la mer et circulant dans les 15000 tubes qui se trouvent à l'intérieur du condenseur.

**I.4.3. Turbine à vapeur :****I.4.3.1. Définition :**

La turbine est une machine à une seule ligne d'arbre. Elle transforme l'énergie thermique disponible de la vapeur provenant de la chaudière en un mouvement de rotation de l'arbre. Le travail mécanique produit sert à entraîner l'alternateur à une vitesse nominale de 3 000 tr/mn.

A la sortie de la turbine, la vapeur détendue est conduite au condenseur.



**Figure I.7. Turbine à vapeur.**

Les quatre tranches de la centrale sont équipées des turbines identiques qui sont installées dans la salle des machines sur des fondations massives communes aux turbines et aux alternateurs.

Une turbine est constituée de trois corps séparés: haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP).

#### **I.4.4. Alternateur :**

L'alternateur est un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique sous une tension de 15.5 kV.

L'énergie disponible à l'arbre de la turbine est communiquée à l'alternateur qui réalise la transformation sous forme d'énergie électrique.

#### **I.4.5. Excitatrice :**

L'excitatrice de l'alternateur principal s'effectue en utilisant une excitatrice principale dont l'inducteur est fixe et l'induit tournant (alternateur inverse). Ce dernier est alimenté à travers des diodes également installées sur l'arbre de l'alternateur principal. L'énergie nécessaire à l'excitation de l'alternateur inverse (l'excitatrice principale) est fournie par un pilote dont l'inducteur est constitué par un aimant permanent.

Ses caractéristiques sont :

- puissance de la machine 710 kW.
- Courant maximal d'excitation 2450 A.
- Plafond de la tension d'excitation 240 V.

- Vitesse de rotation 3000 tr /min.
- Rendement du système d'excitation 90 %.

L'énergie électrique est évacuée au réseau et aux auxiliaires de la centrale à travers différents équipements électriques comme les transformateurs.

#### **I.4.6. Les transformateurs :**

Chaque tranche dispose de quatre types de transformateurs qui remplissent des fonctions différentes.

##### **I.4.6.a. Transformateur principal (15.5 kV/ 235 kV) :**

Ce transformateur reçoit l'énergie électrique de l'alternateur pour élever la tension en vue du transport. Il a une puissance de 220 MVA ; puisque les quatre tranches sont identiques, les transformateurs auront donc les mêmes puissances.

##### **I.4.6.b. Transformateur de réseau (63 kV/6.3kV) :**

Le transformateur de réseau est appelé aussi transformateur de secours. Son rôle est le démarrage de groupe en cas d'absence de tension sur le transformateur principal et en cas de panne de l'alternateur (l'alternateur à l'arrêt) ou un défaut sur le disjoncteur.

##### **I.4.6.c. Transformateur de soutirage (15.5kV/ 6.3kV) :**

Ce transformateur est caractérisé par une puissance nominale de 20 MVA qui alimente l'ensemble des auxiliaires basses tensions « BT » et moyenne tension « MT » au moyen des câbles haute tension. Les auxiliaires de basse tension fonctionnent en courant continu ainsi que les auxiliaires de la tranche.

##### **I.4.6.d. Transformateur MT/BT (6.3kV/ 400V) :**

Ces transformateurs alimentent les auxiliaires BT de puissance nominale de 1250 kVA et sont connectés sur le jeu de barre MT.

#### **I.5. Evacuation de l'énergie :**

Chaque tranche évacue par l'intermédiaire d'un transformateur principal et d'un avant-poste l'énergie vers le poste haute tension HT 235 kV de Boudouaou, situé à 45 km environ de la centrale. Chaque alternateur est raccordé par des gaines à barres à 220MVA à travers un disjoncteur de couplage. [2]

## **I.6. Les auxiliaires de la tranche :**

Ce sont des moteurs à moyenne tension MT qui participent directement à la production de l'énergie. Ils sont alimentés par un réseau triphasé provenant du transformateur de soutirage raccordé en aval du disjoncteur de groupe. Ces moteurs sont asynchrones à cage d'écureuil.

### **I.6.1. Ventilateurs de soufflage d'air de combustion VS 1, 2 :**

Chaque tranche comporte deux ventilateurs à simple flux et de type radial. Les ventilateurs de soufflage d'air de combustion ont pour fonction de fournir l'air de combustion nécessaire au générateur de vapeur.

Ils sont entraînés par un moteur asynchrone à vitesse constante. Des silencieux sont installés dans des conduites d'aspiration des ventilateurs.

### **I.6.2. Pompe d'extraction PPE 1,2 :**

Elle a pour rôle d'extraire l'eau condensée dans le puit du condenseur et le refouler à travers une série de réchauffeurs par surface dans le dégazeur ou dans la bêche alimentaire.

### **I.6.3. Pompe de circulation PPC 1,2 :**

Deux pompes de circulation refoulent l'eau de refroidissement vers le condenseur, Ces pompes sont de type vertical semi-axial entraînées directement par un moteur moyenne tension à 14 pôles.

### **I.6.4. Ventilateur de recyclage VR 1, 2 :**

Les ventilateurs de recyclage aspirent une partie de fumées dans des conduites entre la sortie de la chaudière et les réchauffeurs d'air.

Ils sont entraînés par un moteur asynchrone à vitesse constante.

### **I.6.5. Pompes alimentaires PPA 1, 2, 3 :**

Les trois pompes d'alimentation de la chaudière ont pour fonction de fournir la quantité nécessaire d'eau avec une pression nécessaire.

La pompe d'entrée reçoit l'eau du réservoir d'eau d'alimentation et la refoule en direction de la pompe principale. La pompe principale amène l'eau d'alimentation à la pression finale.

### **I.6.6. Transformateurs MT/BT :**

#### **●Enroulement MT :**

- puissance apparente =1250 kVA.
- tension nominale = 6,3 kV.

- couplage : triangle

● **Enroulement BT :**

- tension nominale = 380 V.
- facteur de puissance = 0,8.
- couplage : étoile.

## **I.7. Principe de fonctionnement d'une tranche de production :**

### **I.7.1. Circuit eau- vapeur :**

Après dessalement et déminéralisation de l'eau de mer, les pompes d'alimentation de la chaudière fournissent à celle-ci la quantité d'eau nécessaire. L'eau est réchauffée par les réchauffeurs avant d'être introduite dans l'économiseur à une pression de 160 bars et une température de 246°C en direction du ballon. Cette eau passe ensuite dans les collecteurs inférieurs de l'évaporateur. La vapeur saturée s'élève dans les tuyaux chauffés des parois à membranes vers les collecteurs supérieurs et retourne ensuite vers le ballon où la vapeur sera séparée de l'eau dans des cyclones avant de traverser une série de trois surchauffeurs puis vers le corps haute pression HP à une pression de 172 barres et une température de 540°C. La vapeur sort du corps HP vers les deux resurchauffeurs puis passe directement dans les corps moyen pression MP puis dans le corps basse pression BP où elle détend complètement. La vapeur est transformée en eau dans le condenseur. L'eau est extraite du condensateur par deux pompes d'extraction qui la refoulent vers les trois réchauffeurs en suite vers le dégazeur qui élimine les gaz. [2]

En dernier lieu l'eau passe dans la bache alimentaire d'où elle est extraite par les pompes alimentaires et le circuit reprend son cycle. Voir figure [I.8].

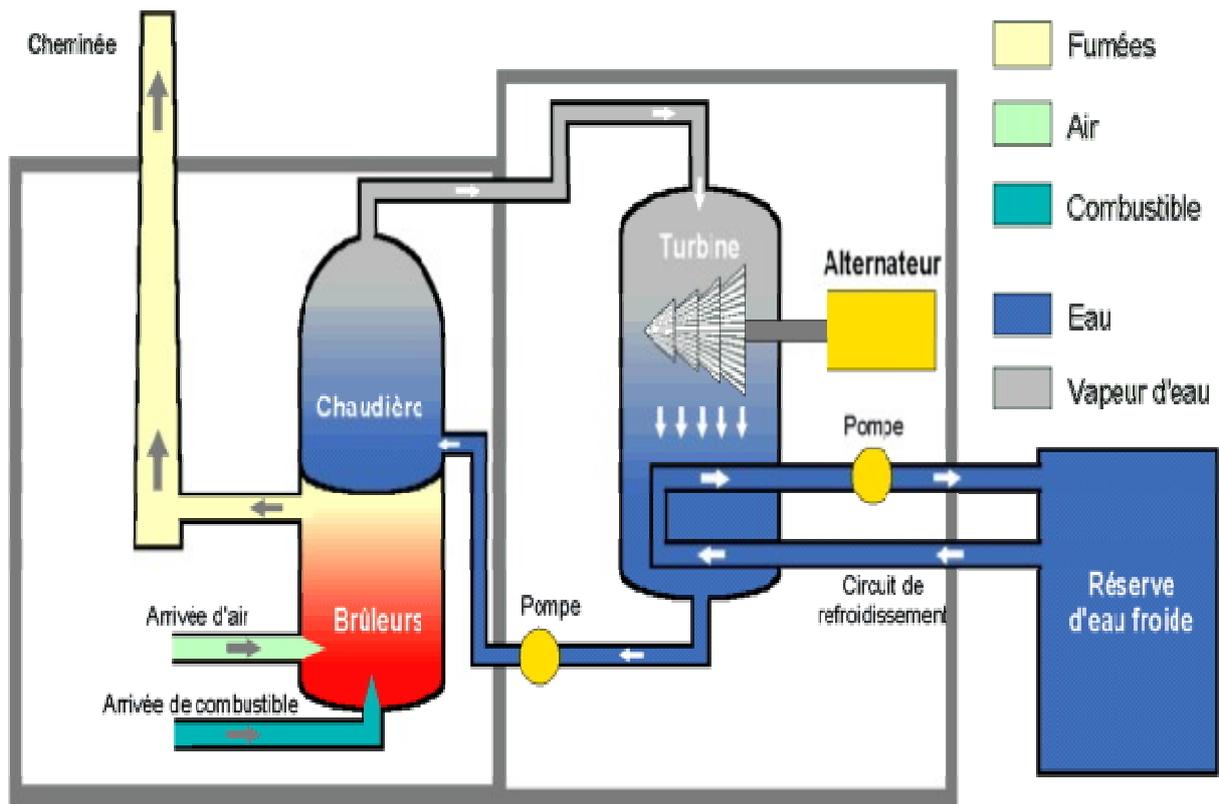


Figure [I.8] : schéma de circulation eau-vapeur

### I.7.2. Transformation de l'énergie :

- 1) Transformation de l'énergie chimique du combustible en énergie thermique dans la chaudière.
- 2) Transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique se fait dans la turbine à travers ses trois corps.
- 3) Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans un alternateur.

Voir figure [I.9].

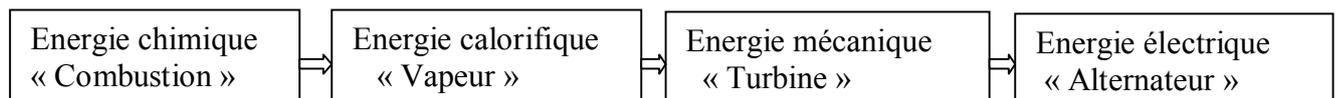


Figure [I.9] Schéma de transformation de l'énergie.

**I.8. Conclusion :**

Au terme de la description de la centrale thermique de Ras-Djinet, il est à retenir qu'elle présente différentes caractéristiques ; elle est constituée de quatre tranches identiques produisant 176 kW chacune, son fonctionnement est assuré par le bon fonctionnement des alternateurs fournissant une tension de 15,5 kV chacun.

A cet effet la protection de l'alternateur est nécessaire pour avoir un bon fonctionnement de la centrale.



## **II.1. Introduction :**

Chaque tranche de production de l'énergie électrique de la centrale thermique de Ras-Djinet est équipée d'un alternateur Siemens qui produit de l'énergie électrique sous une tension de 15,5 kV.

Dans ce chapitre, nous verrons les différentes étapes de fabrication et les constituants de cette machine.

## **II.2. Définition de l'alternateur:**

L'alternateur est en générale la source primaire de toute énergie électrique que nous consommons. Cette machine électrique constitue les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elle transforme l'énergie mécanique fournie par la turbine en énergie électrique avec une grande puissance.

Notre alternateur est triphasé, car le stator de ce dernier porte trois enroulements. Lorsque le rotor tourne à une vitesse constante, les tensions induites dans les trois enroulements ont une même valeur efficace déphasées de  $120^\circ$ .

## **II.3. Plaque signalétique de l'alternateur :**

Elle porte le type de l'alternateur, le numéro de fabrication, le numéro d'ordre et l'année de construction.

- Type de l'alternateur : HDTGO 215 / 2- 470
- Numéro de fabrication : 1.635 202 /205 /208 / 211
- Numéro d'ordre : 20,8080 100 /1-BE-N / 43084-95
- Année de construction : 1984 /1985

## **II.4. Les caractéristiques techniques et mécaniques de l'alternateur :**

### **II.4.1. La caractéristique technique :**

Cette caractéristique porte les indications techniques suivantes : la tension et le courant nominal, la puissance active et apparente, la vitesse de rotation, le facteur de puissance, le nombre de pôles et de phases de l'alternateur :

- Tension nominale = 15,5 kV.
- Puissance apparente = 220 MVA.
- Puissance active = 176 MW.
- Courant nominal = 8,195 kA.
- Facteur de puissance = 0,8.
- Fréquence = 50 Hz.
- Vitesse de rotation = 3000 tr/mn.
- Nombre de paire de pôles :  $2P = 1$  (bipolaire).
- Montage : étoile.
- Nombre de phase = 3

Sur le contenu de ces données, il est bon d'apporter les précisions suivantes :

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 dans les indications techniques de l'alternateur est la tension entre fils de ligne (tension entre bornes).
- Alternateur triphasé (nombre de phase =3) : le stator de l'alternateur porte trois enroulements. Lorsque le rotor tourne à une vitesse constante, les tensions induites dans les trois enroulements ont une même valeur efficace, mais n'atteignent pas leur valeur maximale en même temps. [1]

Comme on l'a indiqué dans les caractéristiques techniques, l'alternateur triphasé est toujours branché en étoile. Voir figure [II.1].

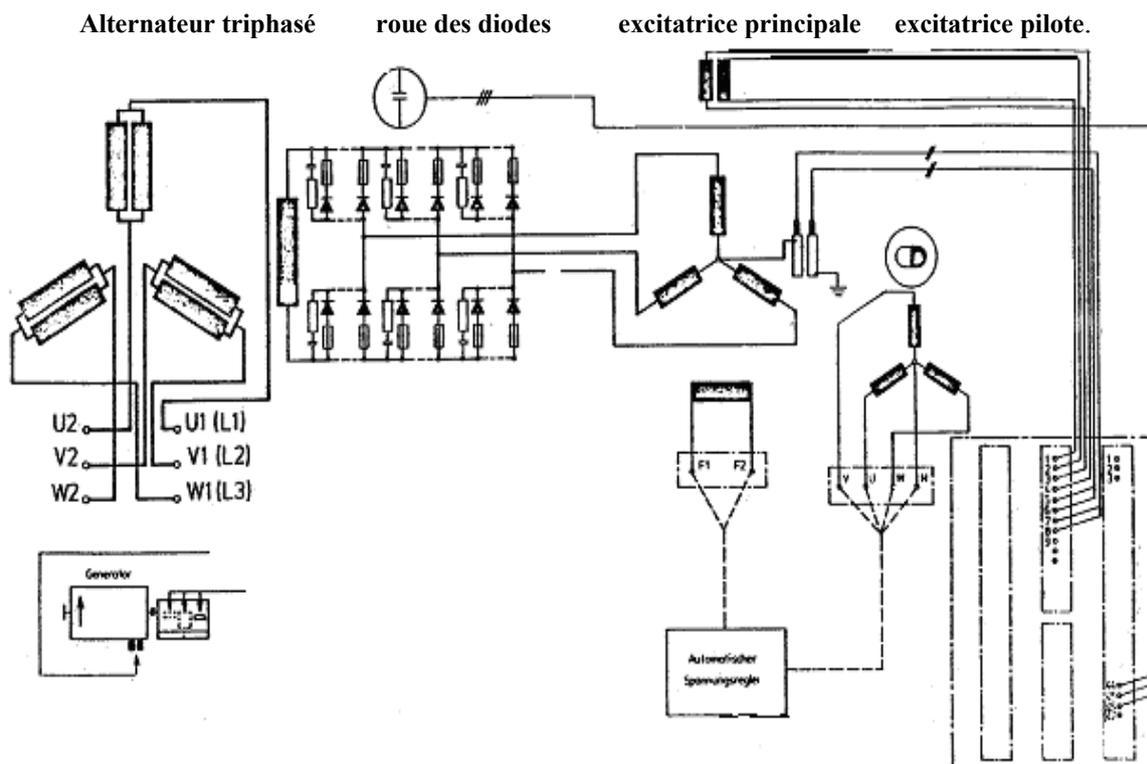


Figure [II.1] Alternateur triphasé branché en étoile.

#### II.4.2. Les caractéristiques mécaniques :

Elle porte le volume et le poids de l'alternateur (poids de rotor et de stator) :

- Poids du stator = 198 000 kg.
- Poids du rotor = 35 000 kg.
- Volume de l'alternateur = 62 m<sup>3</sup>.

### II.5. Caractéristique de fonctionnement à vide et de fonctionnement à charge : voir figure [II.2]

#### II.5.1. Caractéristique à vide (caractéristique interne) :

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 entraîné à sa vitesse normale.  $U_1 = F(I_2)$  à une vitesse constante.

Avec :  $U_1$  = Force électromotrice de l'alternateur.

$I_2$  = Courant d'excitation. [A]

**❖ Interprétation de la courbe :**

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 croît 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  $I_2=850A$ , mais si l'on double le courant, la tension ne monte qu'à 125%.

**II.5.2. Caractéristique de court-circuit :**

La caractéristique de court-circuit 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 la linéarité de la courbe  $I_1 = I_2$ .

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

**II.5.3. Caractéristique en charge :**

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

- 1- Charge résistive.
- 2- Charge inductive.
- 3- Charge capacitive.
- 4- Réseau infini.

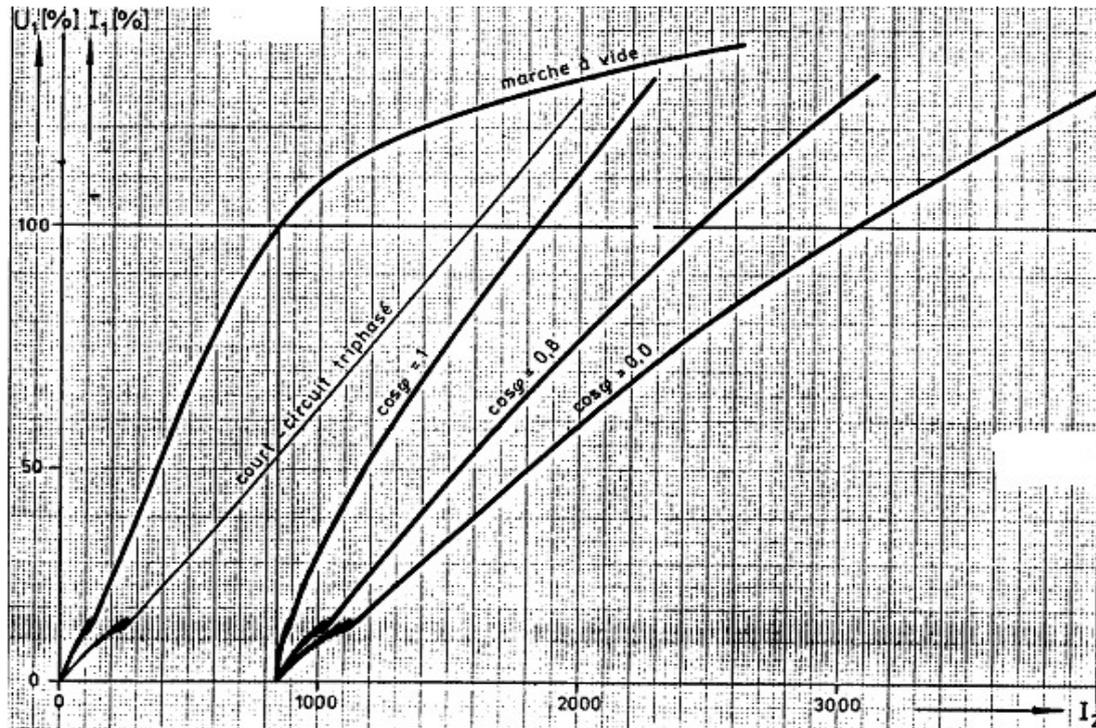


Figure [II.2] Caractéristique de fonctionnement à vide et de fonctionnement en charge

## II.6. Nombre de pôles :

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et la fréquence du courant à produire. Ainsi considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplace les pôles Nord et Sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur prend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle Nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle Sud. Chaque fois qu'une paire de pôle se déplace devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet.

Dans notre cas, l'alternateur est bipolaire ( $2P = 2$ ).

On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation suivante :  $f = \frac{Pn}{120}$

f : la fréquence de la tension induite [Hz].

P : nombre de pôles de rotor.

n : vitesse de rotation du rotor.

## II.7. Constitution :

L'alternateur comprend les principaux éléments suivants : Voir figure [II.3].

- 1- Stator
- 2- Rotor
- 3- Palier
- 4- Etanchéité
- 5 – Réfrigérant

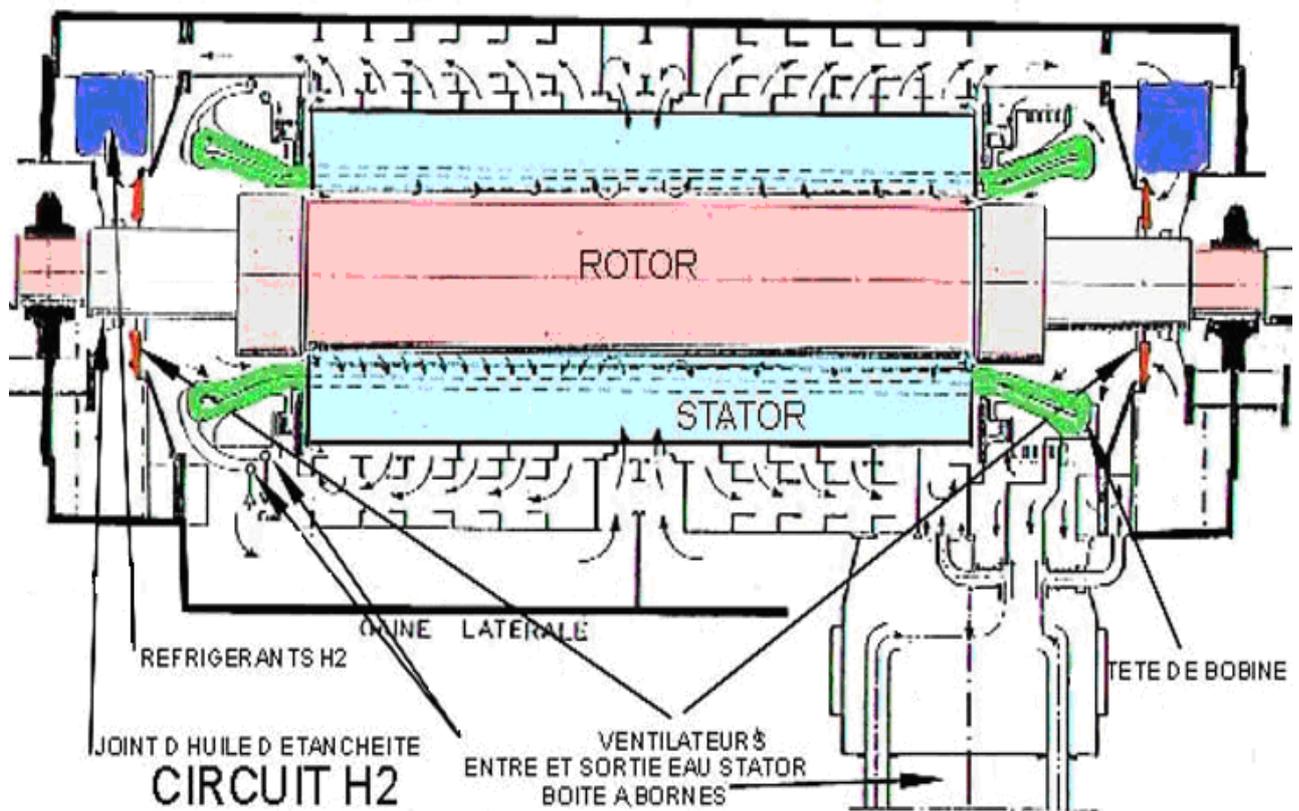


Figure [II.3] Schéma simplifié d'un alternateur

### II.7.1. 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.

2-Paliers flasques.

3- Circuit magnétique.

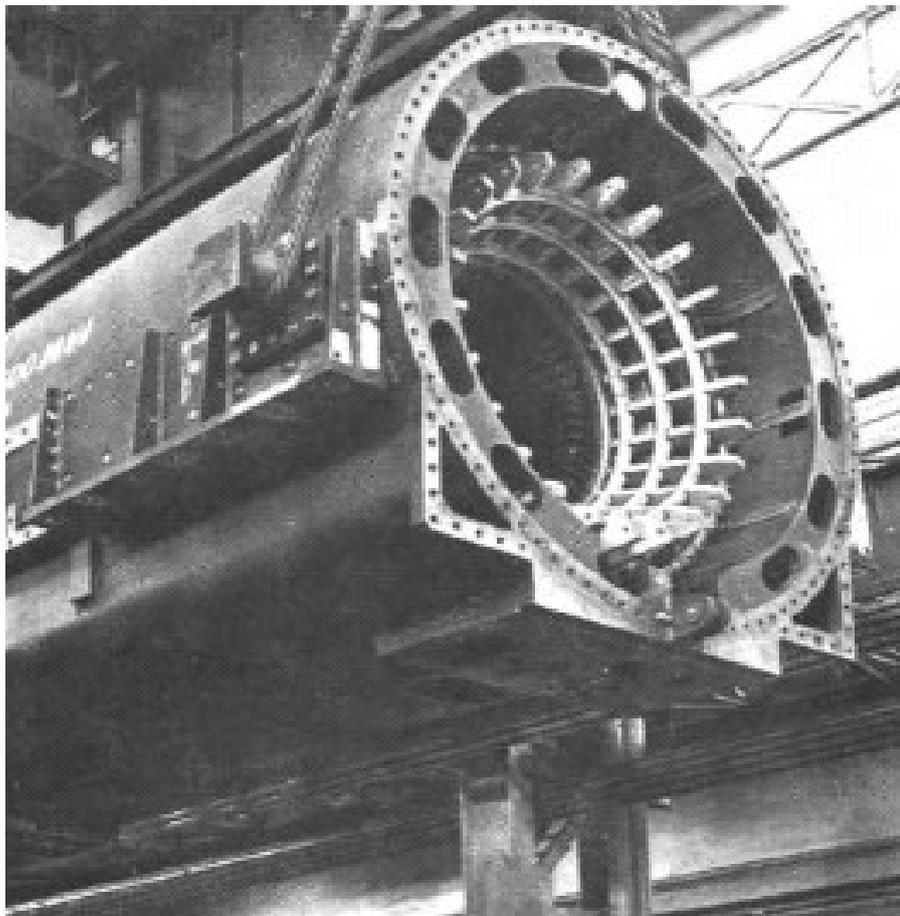
4-Enroulement du stator.

### II.7.1.1. Enveloppe du stator :

L'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. Voir figure [II.4].

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.



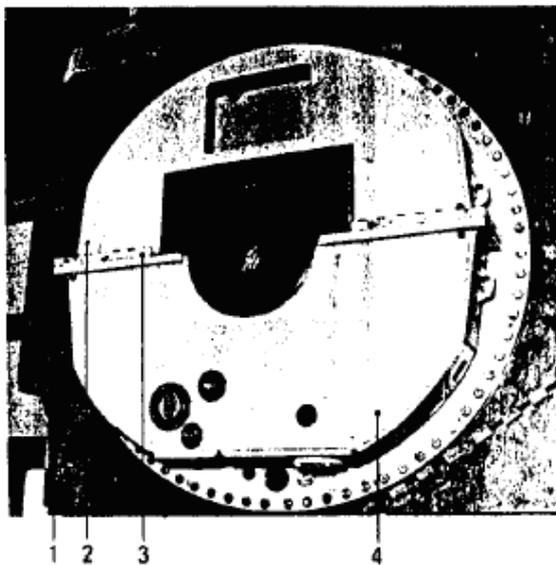
**Figure [II.4] Enveloppe du stator**

### II.7.1.2. Paliers flasques :

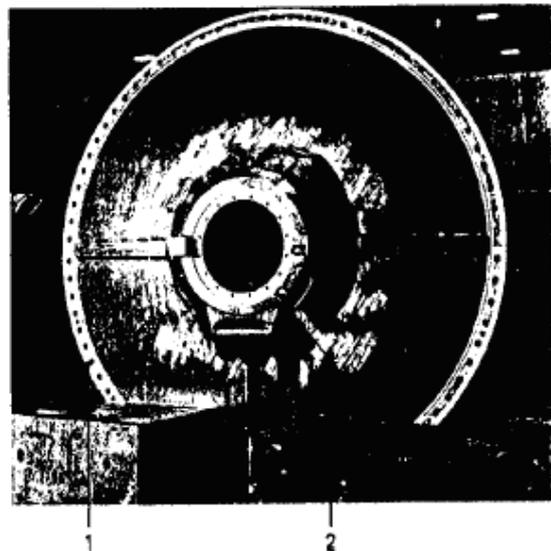
L'enveloppe du stator est fermée coté turbine et coté excitatrice par des flasques résistant à la pression. Les flasques contiennent les paliers de l'alternateur et les étanchéités d'arbre, et chaque flasque est constitué de caissons creux. Voir les figures [II.5] et [II.6].

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 appuie en permanence sur la fusée de l'arbre de rotor pendant la rotation de ce dernier.



1-Enveloppe du stator.      3-Plan de joint.  
2-Demi flasque supérieur.      4-Demi flasque inférieur.



1-Bride du palier flasque.  
2-Tuyauterie d'alimentation en huile d'étanchéité.

**Figure [II.5] Palier flasque monté**

**Figure [II.6] Palier flasque vu de l'intérieur de l'alternateur.**

### II.7.1.3. 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. Voir figure [II.7] et [II.8].

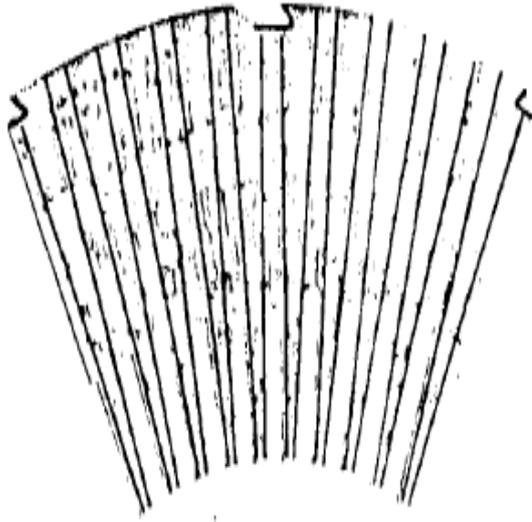
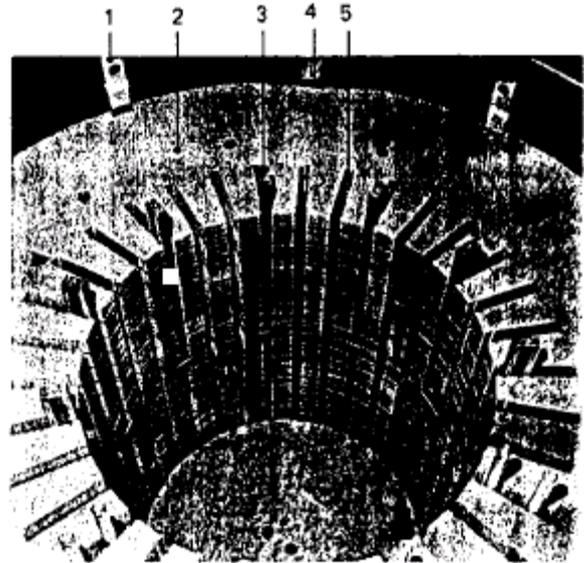


Figure [II.7] Segment de tôles avec entretoises



- 1 broche en queue-d'aronde
- 2 paquet de toles
- 3 mandrin d'empilage
- 4 isolation
- 5 encoche

Figure [II.8] Empilage du paquet de tôles

#### II.7.1.4. 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.

Avec ce type d'enroulement (à deux couches), les têtes de section forment un ensemble très régulier, ce qui permet de mieux résister aux efforts considérables qui peuvent intervenir en cas de défauts (mise en court-circuit). De plus, il est possible de constituer des sections à pas légèrement raccourci afin de réduire certains harmoniques.

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 de 360°.

Les conducteurs élémentaires de chaque barre de la couche supérieure ou inférieure sont soudés et isolés les uns par rapport aux autres pour réduire les pertes supplémentaires dans les têtes de bobines.

L'enroulement du stator est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. On préfère la connexion en étoile à celle en triangle pour la raison suivante :

- La tension par phase étant seulement  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ , ou 58% de celle entre phase, on peut réduire l'épaisseur de l'isolant dans les encoches. Cela permet de grossir la section des conducteurs et par conséquent, la puissance de la machine (alternateur).

#### A. 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 clivures de mica encollées au support au moyen de liant utilisé en petite quantité.

La liaison mica-support est suffisamment résistante pour le traitement ultérieur des barres.

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. Voir la figure [II.9].



**Figure [II.9] Protection d'extrémité de barres anti-effluves. (Couche de vernis conducteurs).**

L'enroulement du stator est relié à l'intérieur de la machine par des connexions à six bornes disposées dans une boîte 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.

### **II.7.2. 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 à 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.
- 2- Enroulement de rotor.
- 3- Les frettes.
- 4- Connecteur de courant d'excitation.
- 5- Ventilateur du rotor.

#### **II.7.2.1. Arbre du rotor :**

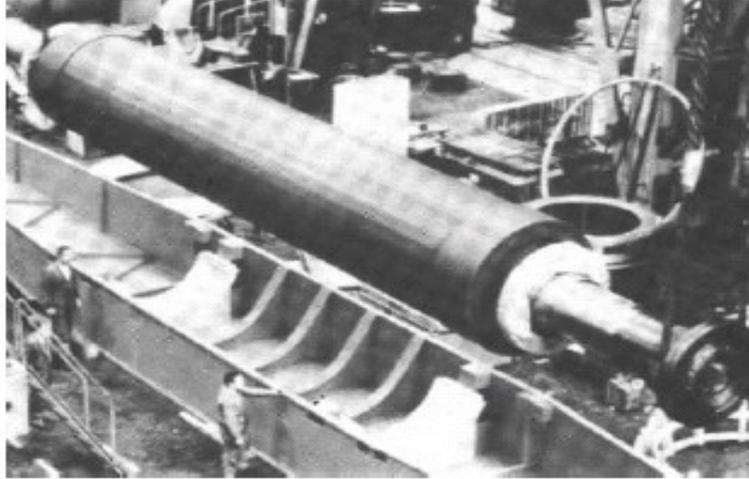
L'arbre du rotor est un élément massif monobloc forgé à partir d'un lingot coulé sous vide. Il se compose d'une partie active appelée « table » et deux fusées. Voir la figure [II.10].

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 à l'excitatrice.

La table de rotor est fraisée par des encoches radiales qui reçoivent l'enroulement inducteur.

Les 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.

La mise à la terre de l'arbre du rotor est assurée par des balais mis à la terre qui sont fixés sur les flasque de palier coté turbine pour évacuer les charges électrostatiques de la ligne d'arbre de rotor.



**Figure [II.10] Arbre du rotor**

#### **II.7.2.2. Enroulement de rotor :**

##### **A. Structure :**

L'enroulement inducteur 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.

##### **B. Matériau conducteur :**

Les conducteurs utilisés sont en cuivre à l'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.

##### **C. Isolation des conducteurs :**

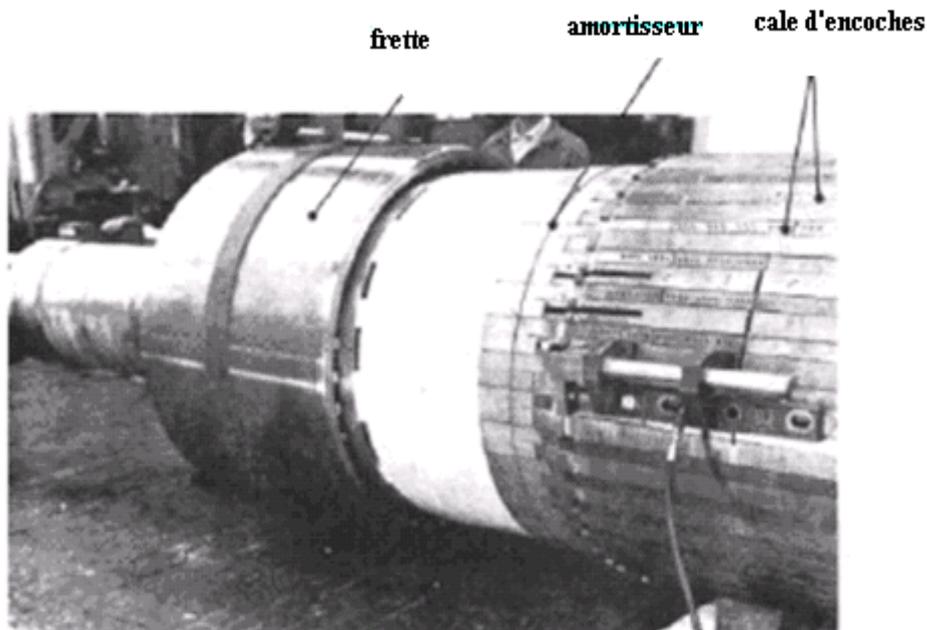
- L'isolation entre spires est constituée par du tissu de verre baké.

- L'isolation à la masse est réalisée au moyen de cornières en tissu de verre bakéliné dont les propriétés électriques et mécaniques sont améliorées par l'insertion d'une couche de nomex.

Les clavettes sont constituées d'un alliage de cuivre, de nickel et de silicium et qui présentent de remarquables caractéristiques mécaniques et une bonne conductibilité électrique. L'argentage du bec des frettes assure une bonne liaison électrique entre les clavettes et les frettes, étant donné que les clavettes jouent aussi le rôle de barre d'enroulement amortisseur.

#### **D. Calage des têtes de bobines :**

Les têtes de bobines sont calées entre elles au moyen de pièces isolantes de façon à éviter tout déplacement inadmissible des bobines. Voir figure [II.11].



**Figure [II.11] Pièces de calage des têtes de bobines**

#### **II.7.2.3. 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.

#### **II.7.2.4. 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 non entravée des connections.

#### **II.7.2.5. 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 fileté 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 fileté.

### **II.7.3. 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.

### **II.7.4. 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 boîte étanche boulonnée à un flasque et isolée pour éviter les courants d'arbre.

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

### **II.7.5. 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.

Les avantages que présente le refroidissement des alternateurs par l'hydrogène circulant en circuit fermé sont :

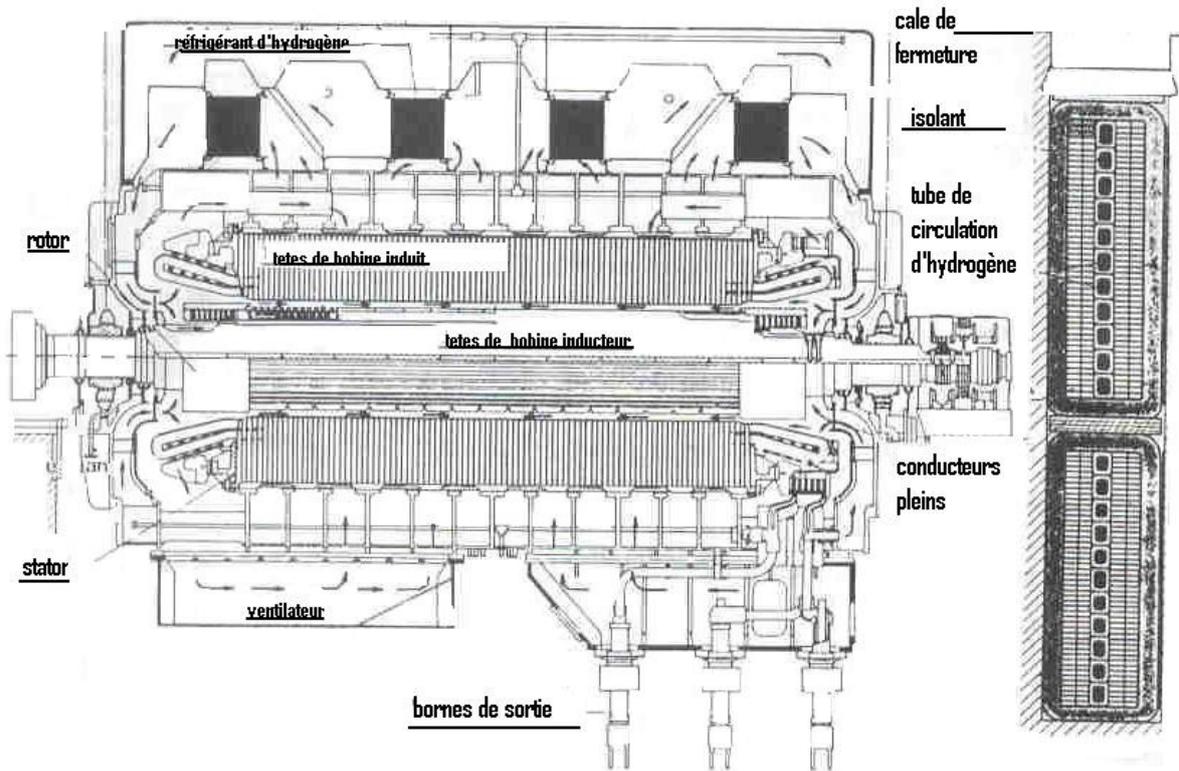
- ✓ Les pertes par ventilation sont proportionnelles à la masse volumique du fluide employé pour la réfrigération. Comme la masse de l'hydrogène est 14 fois moins élevée que celle de l'air, les pertes par ventilation seront 14 fois plus faibles.
- ✓ La conductibilité thermique de l'hydrogène étant 7 fois plus élevée que celle de l'air, les échanges de chaleurs se font plus facilement avec l'hydrogène. Les parties chaudes de l'alternateur cèdent plus rapidement leur chaleur à l'hydrogène qu'à l'air ; de même, l'hydrogène transmet plus vite sa chaleur aux tubes du réfrigérant.
- ✓ Les échanges de chaleurs se font d'autant plus facilement quand la pression de l'hydrogène est plus élevée.

Le flux d'hydrogène se divise en plusieurs parties :

- Une première portion assure le refroidissement des têtes des bobines.
- Une deuxième partie pénètre dans l'entrefer rotor-stator pour sortir par des canaux radiaux pratiqués dans l'empilage magnétique du stator.
- Une troisième, intéressant la partie centrale, pénètre par ces canaux d'une façon centripète (vers l'axe) pour ressortir par d'autres canaux d'une façon centrifuge (vers la périphérie).
- Enfin une dernière partie parcourt les encoches, au sein des conducteurs, dans des tubes prévus à cet effet.

L'hydrogène chaud est dirigé par un système de cloisonnement, vers les réfrigérants. Ils sont, le plus souvent (au nombre de quatre du type tubulaire) logés horizontalement dans l'enveloppe du stator (la partie supérieure de l'alternateur). [8]

La réfrigération est assurée par une circulation d'eau provenant des pompes d'extraction du condenseur principal.



**Figure II.12. Schéma de refroidissement de l'alternateur par réfrigérant d'hydrogène.**

Lorsqu'un des quatre réfrigérants est défaillant, l'alternateur ne doit pas fonctionner à plus de 67% de sa puissance nominale.

### II.7.6. Excitation du rotor :

L'alternateur est excité par un groupe appelé groupe d'excitation à redresseur tournant qui comprend les éléments suivants : Voir figure [II.13].

- Roue à diodes : elle comprend des diodes au silicium qui sont montées dans les roues de façon à constituer un pont triphasé.

- Excitatrice pilote triphasé : est un alternateur à 16 pôles internes. L'enveloppe contient le paquet de tôles et l'enroulement triphasé.

Le rotor est constitué par la roue et les pôles saillants.

- Excitatrice principale triphasé : est un alternateur à six pôles externes. L'enveloppe abrite les pôles, l'enroulement inducteur et l'enroulement amortisseur. L'excitatrice principale fournit le courant d'excitation de l'inducteur. [8]

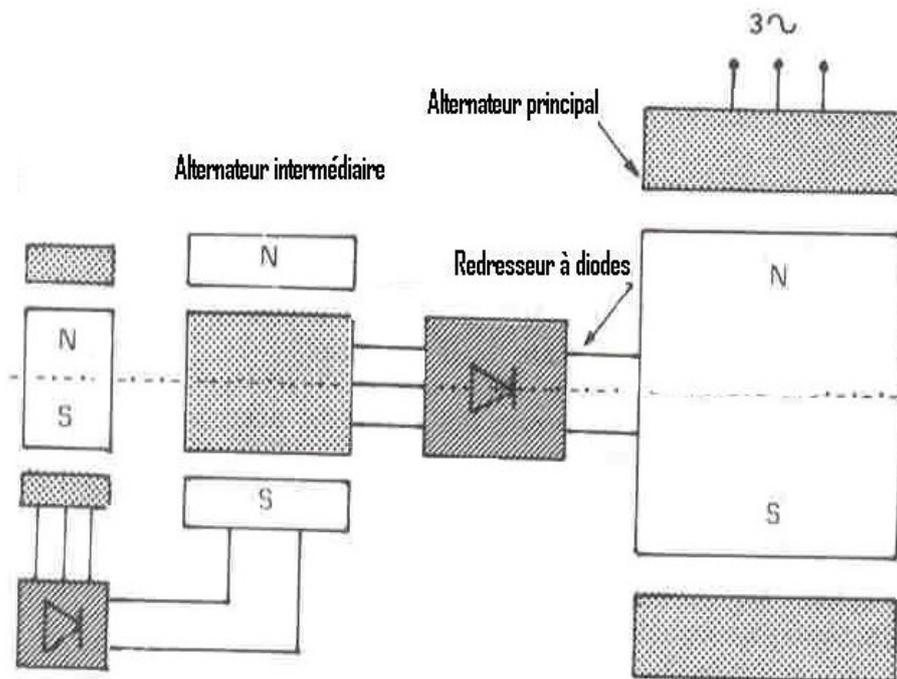


Figure [II.13] Schéma de principe de l'excitation à diodes tournantes sans balais.

## II.8. Facteurs affectant la grosseur des alternateurs :

La quantité énorme d'énergie électrique générée par les compagnies d'électricité les a rendus très sensibles à l'importance du rendement de leur alternateur ; chaque augmentation de 1% représente, pour chaque alternateur, des économies de plusieurs milliers de dollars par jours. Or, l'analyse des dimensions d'un appareil prouve que son rendement augmente à mesure que sa puissance croît. Par exemple, si un alternateur de 1kW possède un rendement de 50%, un alternateur de 10MW de forme identique mais de beaucoup plus grande taille aura inévitablement un rendement voisin de 90%.

D'autre part, plus la puissance d'une machine augmente, plus la puissance débitée par kilogramme augmente. En se référant de nouveau à notre exemple, si l'alternateur de 1kW pèse 20kg (50W/kg), celui de 10MW ne pèse que 20 000 kg, ce qui donne 500W/kg.

Une machine de grande puissance pèse donc relativement moins qu'une machine de faible puissance, de sorte que la première coûte relativement moins cher que la seconde.

Tout semble donc favoriser pour les grosses machines, cependant ce dernier avantage provoque des problèmes de refroidissement. [7]

## **II.9. 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 l'alternateur doit être la même que celle du réseau.
- 3- La séquence des phases de l'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 l'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 synchronoscope. 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 synchronoscope, 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.

## **II.10. Fonctionnement d'un alternateur :**

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  $U_1$  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  $\alpha$  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. Il existe une relation entre l'angle de décalage mécanique  $\alpha$  et le déphasage électrique  $\delta$  séparant les vecteurs de tension  $U_1$  et de tension du réseau.

Cette relation est donnée par l'équation suivante :  $\delta = \frac{P\alpha}{2}$

### **II.11. Paramètres de dimensionnement :**

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  $\cos\varphi$  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 de 15,5 kV. [6]
- Le rapport de court-circuit minimal varie légèrement d'un pays à l'autre ; 0,5 est une valeur assez fréquente. Ce paramètre n'a plus de signification pour la qualité de réglage de tension depuis l'apparition des régulateurs rapides ; il caractérise maintenant la possibilité d'absorption de puissance réactive en heures creuses.

**II.12. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons appris, le fonctionnement, les différentes caractéristiques et la construction d'un alternateur triphasé d'une tranche de production de l'énergie de la centrale de Ras-Djinet.

Cet alternateur de grande puissance est constitué de six éléments principaux, il est refroidi par l'hydrogène. Son excitation est assurée par un groupe d'excitation à redresseur tournant.

### III.1.Introduction :

Les machines électriques tournantes (les alternateurs) peuvent, comme tous les appareils industriels être affectés de défauts de fonctionnement. Ces défauts les rendent en général inaptes à plus ou moins long terme, à assurer leur service, et perturbent le fonctionnement d'autres matériels. Les défauts, ainsi que les conditions anormales de fonctionnement, doivent donc être détectés le plus rapidement possible et provoquer la déconnection électrique entre la machine et le réseau auquel elle est raccordée.

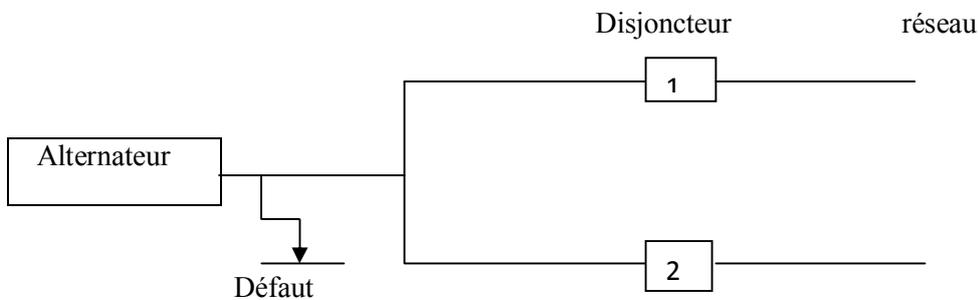
### III.2.Les défauts :

Ils sont caractérisés par un phénomène non conforme au fonctionnement normal des installations et pouvant dans certaines cas conduire à des dégâts dangereux pour le personnel ainsi pour le matériel.

### III.3.Origine des défauts (interne, externe) :

Nous distinguerons deux types de défauts à détecter par les relais de protection, selon leur origine :

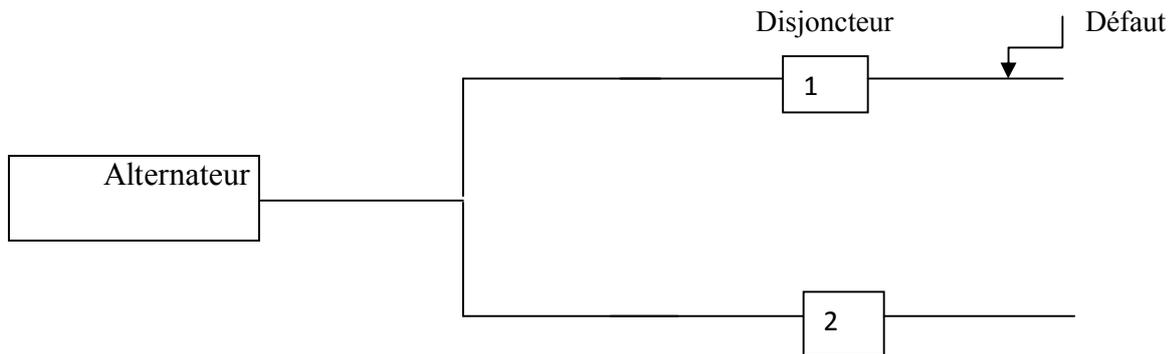
- ❖ Les défauts d'origine interne, dont la source est une avarie d'un composant de la machine électrique tournante (alternateur). [4]



**Figure III.1. Les défauts d'origine interne.**

L'alternateur ne peut rester sous tension. Toutes les liaisons avec le réseau doivent être ouvertes (ouverture disjoncteurs 1et 2).

- ❖ Les défauts d'origine externe, dont la source est localisée en dehors de la machine électrique, mais dont les conséquences peuvent entraîner des dégradations dans celle-ci. [4]



**Figure III.2. Les défauts d'origine externes.**

L'alternateur peut continuer à fonctionner après élimination du défaut par le disjoncteur 1.

### III.3.1. Les défauts d'origine interne :

#### III.3.1.1. Défaut d'isolation des conducteurs formant l'enroulement statorique :

L'isolation des conducteurs formant l'enroulement statorique peut se rompre ou se percer par des causes :

- Electriques (isolation mal imprégnée, décharges superficielles, pénétration d'humidités).
- Thermiques (suréchauffement par surcharge ou manque de refroidissement).
- Mécaniques (usure, efforts de court-circuit trop importants).

Ces défauts, dont l'évolution peut être lente au début du processus de dégradation, dégénèrent en général très rapide à la fin du processus en un court-circuit, du fait de la tension élevée appliquée à l'enroulement statorique. A ce stade, le court-circuit est en général permanent.

Le court-circuit peut se produire :

- Entre une phase et la masse, constituée par le circuit magnétique ou la carcasse.
- Entre deux phase, avec ou sans contact avec la masse.
- Entre les trois phases, souvent par évolution d'un court-circuit biphasé (extension d'arc).

Un court-circuit peut aussi se produire entre deux spires ou deux barres d'une même phase.

### **III.3.1.2. Défaut d'isolation des conducteurs de l'enroulement rotorique :**

L'isolation des conducteurs de l'enroulement rotorique peut également être défectueuse, le plus souvent par des causes :

- Mécaniques, par usure des isolants ou rupture.
- Thermique, par manque de refroidissement général ou localisé.
- Electrique, par percement de l'isolation ou, le plus souvent, par contournement du à une pollution (air, huile).

### **III.3.1.3. Perte d'excitation (manque d'excitation) :**

L'alternateur peut également subir une perte d'alimentation électrique de l'inducteur.

#### **❖ Les causes :**

- Baisse notable de courant d'excitation.
- Rupture de l'enroulement inducteur.

#### **❖ Les conséquences :**

- Absorption de l'énergie réactive par l'alternateur.
- Diminution du facteur de puissance  $\cos\varphi$ .
- L'alternateur est transformé en moteur.
- Echauffement des conducteurs.

#### **❖ Moyens de protection :**

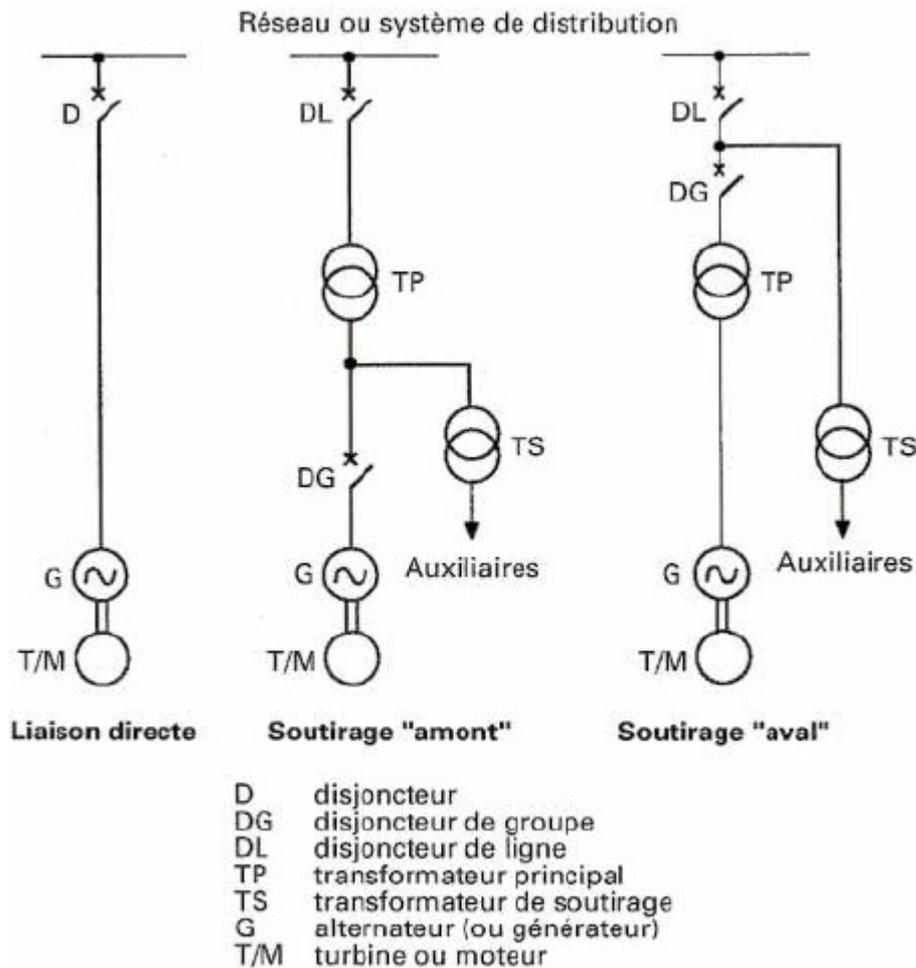
On peut utiliser un relais à minimum de courant continu sur le circuit d'excitation si celui-ci est accessible.

Dans le cas contraire, la protection doit détecter l'augmentation de l'énergie réactive absorbée. On utilisera un relais directionnel de courant réactif ou d'énergie réactive.

### **III.3.2. Les défauts d'origine externe :**

Les groupes constitués d'une turbine et d'un alternateur peuvent être connectés directement à un système de distribution (réseau d'usine, autoproducteur), soit raccordés au système général de production- transport-distribution d'électricité, ou au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur de tension, appelé transformateur principal (TP)

(figure III.3). Dans une centrale de production, l'énergie nécessaire aux auxiliaires est prélevée, soit en amont, soit en aval du transformateur principal, par un transformateur de soutirage (TS).



**Figure III.3. Schéma de raccordement d'un alternateur au réseau**

Les défauts pouvant affecté le système électrique sont de différentes natures :

### III.3.2.1. Les courts-circuits :

C'est le contact entre parties sous tensions :

- Monophasé : phase /terre.
- Polyphasé : phase /phase.

Ces courts-circuits peuvent se produire :

- Sur la liaison directe entre l'alternateur et le réseau, ou entre l'alternateur et le transformateur principal (TP) et /ou (TS).
- Sur la liaison entre le TP et le système électrique.
- Sur les alimentations des services auxiliaires.

### III.3.2.1.A. Court-circuit entre phases :

#### ❖ Les causes :

- La dégradation des isolants :
  - dégradation de la qualité de surface (pollution).
  - décharge partielle dans les vacuoles (micropoches) à l'intérieur des isolants.
  - dégradation thermique (température excessive).
- Les surtensions.
- La diminution accidentelle des distances d'isolement.

#### ❖ Les conséquences :

Des effets thermiques se développent :

- Incendie au niveau de l'arc de défaut, échauffement sur le trajet du courant de court-circuit.
- La coupure rapide limite les effets thermiques.
- Le défaut modifie les grandeurs électriques du réseau : naissance de creux de tension, le déséquilibre, surintensité...

Les grandeurs électriques ainsi accidentellement modifiées perturbent le fonctionnement des machines du réseau (instabilité).

#### ❖ Moyens de protection :

Emploi d'un relais à maximum de courant. Ce relais limite :

- Les effets thermiques.
- Les risques d'instabilité du réseau.

La coordination des divers relais à maximum de courant d'un réseau est réalisée de façon à ne mettre hors tension que la seule partie en défaut (sélectivité).

Ces relais ne peuvent sauvegarder la sélectivité dans les réseaux bouclés ou de structure maillée. On emploie alors des relais :

- Directionnels.
- Différentiels longitudinaux.

### III.3.2.1.B. Défaut phase-terre :

#### ❖ Les causes :

Ce sont les mêmes que celles qui développent des courts-circuits phase-phase.

Les contacts accidentels ont lieu entre phase(s) et terre ou entre phase(s) et masse, la masse étant reliée à la terre.

#### ❖ Les conséquences :

Les courants de défaut phase(s)-terre sont limités et ne dépassent généralement pas le 1/10 du courant de court-circuit entre phase.

Les conséquences se résument généralement à :

- Le courant de défaut phase-terre sera dans une machine limité à une vingtaine d'ampères, ce qui évitera des dommages au circuit magnétique.
- Echauffements des écrans des câbles.
- Surtensions développées dans le réseau.

### III.3.2.2. Déséquilibre :

Les déséquilibres entre la production et la consommation d'énergie électrique peuvent être dus à :

- Un manque de production, entraînant une baisse de fréquence du groupe turboalternateur.
- Un surplus de production, entraînant une hausse de fréquence du groupe turboalternateur.

### III.3.2.3. Perte de synchronisme :

Les pertes de synchronisme de l'alternateur raccordé au réseau peuvent provenir de :

- L'apparition et le maintien d'un court-circuit sur le réseau, proche de l'alternateur.
- L'augmentation de l'impédance de liaison (ouverture de lignes HT) au-delà de la limite de stabilité.

- L'augmentation de l'angle interne (diminution du courant d'excitation de l'alternateur).

#### **III.3.2.4. Déséquilibre de courant (intensités non égales) :**

Les courants déséquilibrés peuvent être dus à :

- Court-circuit.
- Rupture de phase.
- Rupture des conducteurs sans court-circuit.
- Une alimentation d'une charge monophasée importante.

##### **❖ Les conséquences :**

- Echauffement → dégradation des isolants.

#### **III.3.2.5. Baisse de tension :**

Les baisses de tension du réseau peuvent provenir d'une insuffisance de production de l'énergie (tension basse) ou de court-circuit (creux de tension). Ces phénomènes entraînent une surcharge en courant de l'alternateur.

#### **III.3.2.6. Surtensions :**

C'est le passage de la tension à une valeur supérieure à la valeur nominale. Elles sont dues à :

- Un défaut de fonctionnement de la régulation de la tension de l'alternateur.
- Une diminution brutale de la puissance fournie par la machine ou délestage, par ouverture de la ligne de raccordement au réseau par exemple.
- Coup de foudre.
- Arc à la terre.

##### **❖ Les conséquences :**

- Surcharge.
- Echauffement des circuits magnétiques par augmentation de perte fer. (courant de Foucault).
- Contraintes sur les isolants amorçages (court-circuit).

**III.3.2.7. Les surcharge :****❖ Les causes :**

Elles sont essentiellement dues à une augmentation de la demande d'énergie. Elles ont une origine électrique : augmentation anormale du nombre des consommateurs.

Les surcharges sont également dues à une diminution du facteur de puissance, à une diminution ou une augmentation de la tension du réseau.

**❖ Les conséquences :**

Les surcharges sont synonymes de surintensités.

Les surcharges provoquent les échauffements exagérés des câbles, des transformateurs, des machines. Elles diminuent la durée de vie des isolants.

**❖ Moyens de protection :**

Contrôle de l'intensité par un relais à image thermique, ou par un relais à maximum de courant afin de limiter dans le temps des surcharges constantes et connues.

**III.3.2.8. Max. fréquence ; Min. fréquence (variation de fréquence) :****❖ Les causes :**

On peut citer parmi les causes d'une variation de fréquence :

- Les surcharges d'un réseau alimenté par des sources de puissance limitées (réseaux autonome).
- Déclenchement d'une centrale importante
- Mauvais fonctionnement du régulateur de vitesse de l'alternateur.
- Séparation d'une charge importante.

**❖ Les conséquences :**

- Verrouillage des ilotages.
- Elles modifient les pertes fer du circuit magnétique.
- Les variations de fréquence gèrent le fonctionnement des récepteurs synchrones (enregistreurs, horloges...etc.).

**❖ Moyens de protection :**

A partir du contrôle de la fréquence réalisé par un relais à seuil (min-max ou les deux) :

- On réalise un délestage par suppression des consommateurs non prioritaires en cas de surcharge.
- On ilote un réseau en réseaux élémentaires si une perturbation de fréquence apparaît, perturbations souvent dues à une surcharge grave ou à un défaut électrique.
- La perturbation de fréquence sera d'autant plus importante quand le défaut ne sera pas éliminé rapidement. La stabilité des machines synchrones du réseau sera alors mise en jeu.
- Découplage d'une station équipée de gros moteurs asynchrones sur micro-coupure au réseau (réenclenchement rapide et lent).

**III.4. Durée des défauts :**

Les défauts électriques sont classés en défauts permanents, fugitifs et auto-extincteurs :

- ❖ Si le défaut entraîne des dégradations impliquant des réparations, il est dit : permanent.
- ❖ Si le défaut disparaît sous l'action des protections sans laisser de dégradation affectant les performances du réseau, le défaut est dit : fugitif.
- ❖ Si le défaut disparaît de lui-même, il est dit : auto-extincteur.

**III.5. Détection des défauts :**

La détection des défauts électriques des machines tournantes obéit à trois grands principes :

- Elle doit être la plus simple possible, pour assurer la plus grande fiabilité et la plus grande rapidité.
- Elle doit être sensible, en fonctionnant de manière fiable pour la plus petite variation possible des grandeurs caractéristiques du défaut.
- Elle doit être sélective, c'est-à-dire éliminer le défaut par le (ou les) organes le(s) plus proche(s) et permettre de discriminer les défauts internes et externes, car les actions qu'elle entraîne ne sont pas les mêmes.

Pour les alternateurs, deux modes de détection de défauts peuvent être envisagés.

### **III.5.1. Détection directe :**

Détection directe de l'avarie du matériel (par exemple, les défauts à la masse, par mesure du courant de défaut). Ce mode de détection est sélectif et, par suite, peut commander la mise hors service très rapide du matériel incriminé.

La détection directe est la plus satisfaisante, mais :

- Elle n'est pas toujours réalisable, du moins de façon fiable.
- Sa généralisation conduirait à multiplier le nombre de dispositifs de protection et, par accroissement corrélatif des risques de fonctionnement intempestif, à compromettre la qualité du service.

Par suite, elle sera surtout utilisée pour les défauts susceptibles d'endommager gravement le matériel, et bien sur lorsqu'elle constitue le seul moyen de détection.

### **III.5.2. Détection indirecte :**

Détection des effets indirecte du défaut par la mesure des variations de tension, courant, fréquence, puissance, etc.

Le dispositif de protection fonctionne lorsque les variations de ces grandeurs, en amplitude et en durée, dépassent les limites admissibles pour le matériel, quelle que soit l'origine du défaut.

## **III.6.Élimination des défauts :**

### **III.6.1. Défauts d'origine interne :**

En cas de défaut interne, la machine doit être séparée des sources d'énergie externes qui, en alimentant le défaut, contribuent à l'aggravation des dégradations. Le cinétique du défaut étant en général très rapide, l'action doit être exécutée dans les délais les plus courts, fonction du temps de réaction du relais (quelques dizaines de millisecondes) et du temps d'ouverture des disjoncteurs ou contacteurs (environ une centaine de millisecondes).

Dans le cas des alternateurs, l'action du relais (par exemple court-circuit à la masse, entre phase...) provoque en général et simultanément :

- L'ouverture du disjoncteur de groupe reliant l'alternateur au réseau (figure III.3).
- La fermeture des vannes d'alimentation en vapeur.
- L'ouverture du disjoncteur alimentant le circuit d'excitation.

- Si un tel dispositif est prévu, la fermeture d'un contacteur de désexcitation rapide, fermant le circuit de l'inducteur sur une résistance extérieure, destinée à dissiper rapidement l'énergie électromagnétique du rotor.

Cette séquence d'action est appelée déclenchement du groupe.

Le court-circuit à la masse de l'enroulement rotorique en un point représente un cas particulier en ce sens qu'il peut ne provoquer qu'une simple alarme, sans déclenchement. [6]

### III.6.2. Défauts d'origine externe :

En cas de défauts externes, il est demandé aux machines tournantes d'assurer leur service le plus longtemps possible, pour laisser le temps nécessaire aux relais de protection, extérieur à l'installation, pour éliminer ces défauts.

Dans l'alternateur, deux types d'action sont commandés par les relais de protection du réseau.

- Si la cause du régime anormal est sans ambiguïté (par exemple régimes déséquilibrés, variation de fréquence,...etc.) ou, très probablement, extérieure à l'alternateur, celui-ci est séparé du réseau, soit immédiatement, soit après une temporisation destinée à laisser agir les protections du réseau, par l'ouverture du disjoncteur de ligne (Figure III.1). L'alternateur fournit alors uniquement l'énergie électrique nécessaire aux auxiliaires de l'unité. Cette action est appelée îlotage. [6]
- Si l'origine, interne ou externe, du défaut ne peut pas être discriminée par les variations des grandeurs électriques (par exemple baisse de tension, rupture de synchronisme...), l'élimination du défaut se fait en deux temps :
  - Tout d'abord îlotage du groupe.
  - Si le défaut persiste, après une certaine temporisation, déclenchement du groupe.

D'autres régimes anormaux, dont les effets sur l'alternateur ne sont pas immédiats (par exemple surcharge) ne provoquent qu'une alarme.

### III.7. Conséquence sur les machines et le système ou processus :

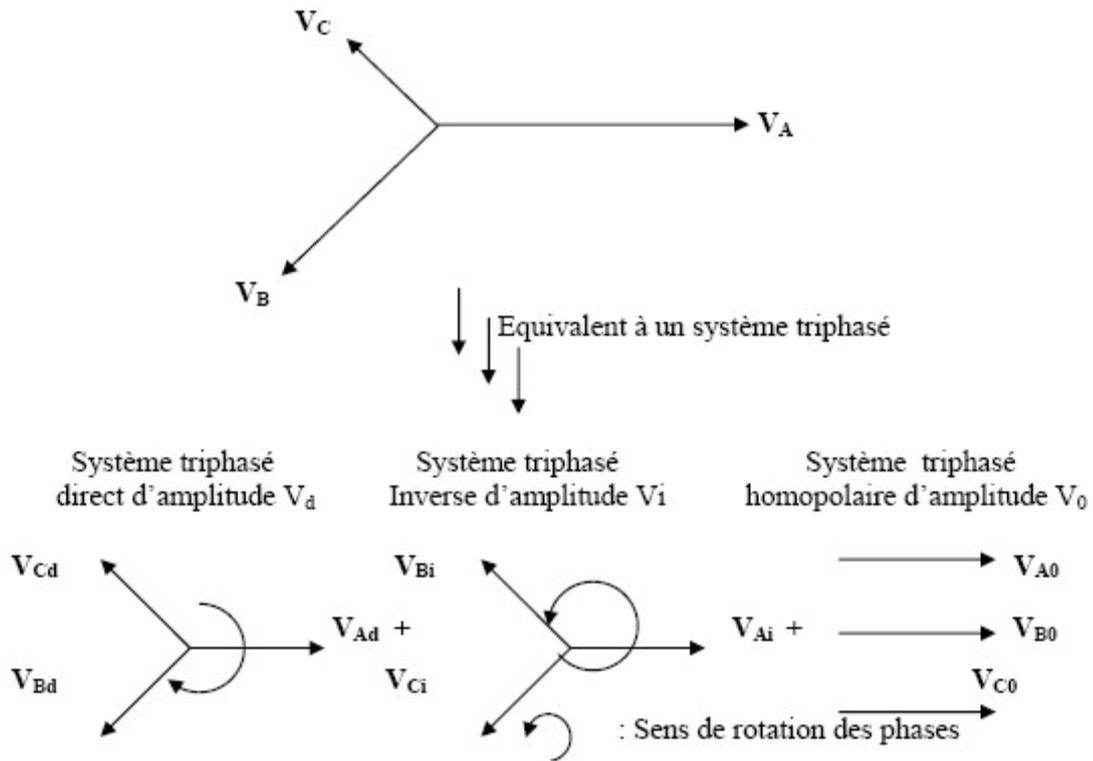
Les défauts de fonctionnement, qu'ils soient d'origine interne ou externe, ont les conséquences sur l'alternateur, en termes d'effets et sur le système électrique ou le processus industriel en termes de fonctionnement, ou d'action à mener pour rétablir une situation normale. Ces conséquences sont résumées dans le tableau 1, en indiquant les durées

approximatives de régimes anormaux supportables par l’alternateur et les actions commandées par les relais de protection. [10]

Tableau 2 – Conséquences des défauts sur les machines et le système ou processus-Alternateurs						
Défaut	Conséquences sur la machine			Conséquences sur le système ou le processus		
	Effet	Temps	Action (1)	Fonctionnement	Temps	Action (1)
<b>ORIGINE INTERNE</b>						
Masse du stator	Dégradation de l’isolation	0,1 s	D	Perte de la fonction production	–	–
Court-circuit entre phases du stator	Fusion des conducteurs. Fusion du circuit magnétique	0,1 s	D	Perte de la fonction production	–	–
Court-circuit entre spires du stator	(Défaut peu probable)	–	–			
Perte d’excitation	Contraintes de torsion. Échauffement des conducteurs	Quelques secondes	D	Variations importantes de la tension. Perte de la fonction production	Quelques secondes	–
Masse du rotor	1 <sup>er</sup> défaut : pas de conséquence	.....	A			
	2 <sup>e</sup> défaut : fusion des conducteurs, fusion du fer	0,1 s	D	Perte de la fonction production		
Court-circuit entre spires du rotor	Dégradation de l’isolation. Fusion des conducteurs (voir perte d’excitation)	.....	(2)	Perte de la fonction production	–	–
<b>ORIGINE EXTERNE</b>						
Court-circuit liaison alternateur-TP à la masse	(Voir masse du stator)	0,1 s	D	Perte de la fonction production	–	–
Court-circuit triphasé liaison alternateur-TP	Efforts importants sur conducteurs. Échauffements	0,1 s	D	Perte de la fonction production	–	–
Court-circuit liaison TP-système (HT)	Efforts sur conducteurs. Échauffements	Quelques secondes	I	Élimination du défaut sur l’ouvrage concerné	< 0,1 s à quelques secondes	E
Manque de production	Fréquence basse → Fatigue des ailettes de la turbine	Quelques secondes	I	Rétablissement de l’équilibre production-consommation. En dernier stade, perte de la fonction production	quelques minutes	(3)
Surplus de production	Fréquence élevée → Fatigue des ailettes de la turbine	Quelques secondes	I	Rétablissement de l’équilibre production-consommation. En dernier stade, perte de la fonction production	quelques minutes	(4)
Surcharge	Échauffement des conducteurs	Quelques minutes	A	Rétablissement de l’équilibre des charges (puissance réactive)	quelques minutes	(4)
Perte de synchronisme	Contraintes de torsion. Échauffement des conducteurs	Quelques minutes	I	Rétablissement de la stabilité du système production-transport	quelques minutes	(4)
Déséquilibre de courants	Échauffement amortisseur du rotor	Quelques minutes à quelques secondes	A I	Rétablissement de la structure du réseau	quelques minutes	E
	Échauffement des conducteurs	Quelques secondes	I	Rétablissement de l’équilibre des charges (puissance réactive)	quelques minutes	(4)
Baisse de tension	Si défaut persistant	Quelques secondes	D	Élimination du défaut sur l’ouvrage concerné	0,1 s	E
	Échauffement des conducteurs	Quelques secondes	I	Rétablissement de l’équilibre des charges (puissance réactive)	quelques minutes	(4)
Élévation de tension	Risque de claquage des isolants	Quelques secondes	D	Perte de la fonction production	–	–
Retour de puissance	Échauffement des ailettes de la turbine	Quelques minutes	D	Arrêt normal de l’unité ou rétablissement du fonctionnement normal de la régulation de vitesse de la turbine	–	–
(1) A : alarme D : déclenchement de l’unité ou de l’auxiliaire I : ilotage E : élimination du défaut réseau			(2) En général, pas de protection spécifique (3) Délestage fréquentométrique (4) (8)			

Les défauts sont toujours détectés par des relais sensibles aux composantes inverses et homopolaires.

Pour une installation triphasée, on peut représenter les trois tensions ou les trois intensités par trois systèmes :



Avec :

$$3V_d = V_1 + aV_2 + a^2V_3$$

$$3V_i = V_1 + a^2V_2 + aV_3$$

$$3V_0 = V_1 + V_2 + V_3$$

$$a = e^{j120^\circ}$$

### III.8. Les relais de protection :

#### III.8.1. Définition :

Les relais de protection sont des appareils dont le rôle est la mise hors service immédiate d'un appareil ou élément de réseau quand celui-ci devient le siège d'un défaut électrique. Ils donnent automatiquement des ordres de déclenchement et de signalisations lorsque la grandeur surveillée atteint ou dépasse la valeur de réglage.

Après détection de tout phénomène anormal la protection peut :

- Procéder au déclenchement du circuit en défaut afin de limiter les contraintes auxquelles ces défauts soumettent les matériels ou déstabilisent le réseau.
- Signaler les dépassements pour contrôler en permanence la qualité de l'énergie et assurer la sécurité des matériels et des personnes contre les dangers de l'électricité.

Il faut dire qu'un système de protection dans son ensemble est un élément très déterminant dans la qualité de service d'un réseau et il peut être jugé défaillant autant vis-à-vis d'un manque de fonctionnement que vis-à-vis d'un fonctionnement non désiré. C'est pourquoi seules les protections utiles sont retenues, et ceci pour ne pas avoir des fonctionnements aléatoires et désordonnés qui peuvent occasionner de graves conséquences.

### III.8.2. Qualité d'un relais de protection :

Pour qu'un système de protection accomplisse convenablement sa mission, il doit présenter les qualités suivantes :

➤ **Fiabilité :**

La fiabilité exprime le degré de confiance que l'on peut apporter à un matériel, la fiabilité d'un relais est liée à sa robustesse et à la qualité de ses contacts.

➤ **La sélectivité :**

Cette action consiste en ce que les relais mettent hors circuit la partie de l'installation en défaut à l'aide d'interrupteur les plus proches de cette partie une telle mise hors circuit permet de réduire au minimum le nombre de récepteur mis à l'arrêt.

➤ **La sûreté :**

Pour obtenir une grande sûreté de fonctionnement, il faut que le nombre de relais utilisés soit minimal autant que possible.

➤ **Rapidité de fonctionnement :**

Elle est nécessaire pour diminuer les dégâts provoqués dans le dispositif en panne afin d'éviter ses influences sur le fonctionnement normal des récepteurs dans la partie non avariée.

➤ **La sensibilité :**

Une très faible perturbation doit suffire pour que l'appareil fonctionne la sensibilité est nécessaire pour faire intervenir la protection dès qu'un défaut se manifeste. [9]

### **III.8.3. Les différents types de relais :**

#### **III.8.3.1. Relais de surcharge ou échauffement :**

Les surcharges prolongées, même de faible valeur échauffent les machines au-delà de leur température normale d'utilisation. Ces échauffements vieillissent prématurément les isolants des câbles et des enroulements. Le paramètre essentiel à observer est le courant permanent maximum. La protection de surcharge peut être conçue de différentes façon par :

- Des relais à image thermique.
- Des relais à maximum de température à sonde thermique.

Les relais à image thermique cherchent à reproduire une image de l'échauffement moyen des enroulements de l'alternateur surveillé. Ils autorisent par exemple des surcharges assez importante pour une machine resté auparavant en sous charge ou à l'arrêt. Ils conviennent bien à des régimes discontinus.

Les relais à maximum de température constitués de sondes en contact direct avec l'enroulement surveillent directement la température. [9]

#### **III.8.3.2. Relais de surtension et baisse de tension :**

Ces relais sont utilisés pour le contrôle de la valeur de la tension. Une tension trop forte est un facteur de vieillissement des machines et des matériels et l'occasion d'une augmentation importante des pertes.

Une tension trop basse est un facteur de mauvaise qualité de l'énergie fournie. En provoquant la tombée des contacteurs auto-alimentés, les chutes de tensions sont à l'origine de troubles importants dans les procédés.

Le relais fonctionne en voltmètre, lorsque la tension dépasse une certaine valeur (en plus ou en moins).

#### **III.8.3.3. Relais de déséquilibre :**

Lorsque les courants dans les trois phases d'un alternateur ne sont pas équilibrés, une composante inverse de courant apparaît et crée un champ tournant dans le sens opposé de rotation de l'alternateur. Ce champ tournant en sens inverse induit dans le rotor des courants à 100 Hz (fréquence double de la fréquence nominale). Ces courants induits échauffent le rotor

d'autant plus que le déséquilibre est élevé. Donc on mesurant le courant inverse, les relais de déséquilibre détectent ces conditions anormales de fonctionnement.

Le taux de déséquilibre est essentiellement fluctuant et l'on peut estimer qu'au niveau des récepteurs des utilisateurs sa valeur moyenne est le plus souvent comprise entre 0.5 et 2%.

Pour l'alternateur, le constructeur définit généralement le taux de composante inverse permanent admissible.

Au niveau de l'alternateur le réglage est compris entre 8 et 25% pour les machines à pôles lisses et 13 à 40% pour les machines à pôles saillants. La temporisation peut être de plusieurs secondes. (10 par exemple).

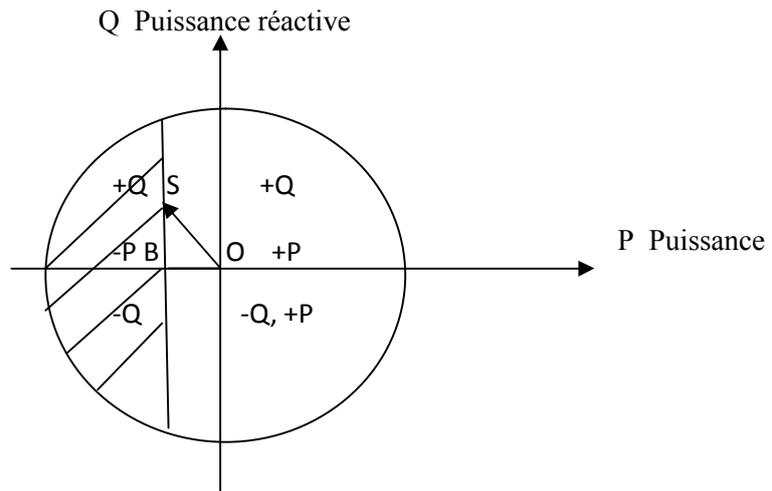
#### **III.8.3.4. Relais de retour de puissance active :**

La machine synchrone est une machine réversible. Elle peut fonctionner, soit en moteur, soit en générateur, selon le couple dans l'entrefer est résistant ou moteur.

Dans un alternateur, la roue polaire est en avance par rapport au champ tournant, dans un moteur elle est en retard et ce d'autant plus que la charge est importante. En fait, en voulant faire prendre plus de charge à l'alternateur, on donne plus de combustible, lequel va donner plus d'avance à la roue polaire et inversement.

Quand un générateur, couplé au réseau ou à d'autres machines, est l'objet d'une panne d'énergie motrice, il fonctionne en moteur synchrone alimenté par le réseau et se met lui-même à entraîner la turbine ou le moteur qui lui associé. Comme on l'a vu plus haut c'est électriquement acceptable, mais il faut quand même mettre fin à ce fonctionnement anormal par le fait qu'au lieu de produire, cette machine se met à consommer.

On évite cette anomalie en détectant l'inversion du sens de la puissance active par l'utilisation d'un relais de puissance qui fonctionne en wattmètre quand la machine appelle de la puissance active. [9]



La zone hachurée représente le fonctionnement du relais directionnel de puissance active.

La valeur OS représente la puissance apparente.

La portion O-B représente le réglage en puissance active en réception du réseau.

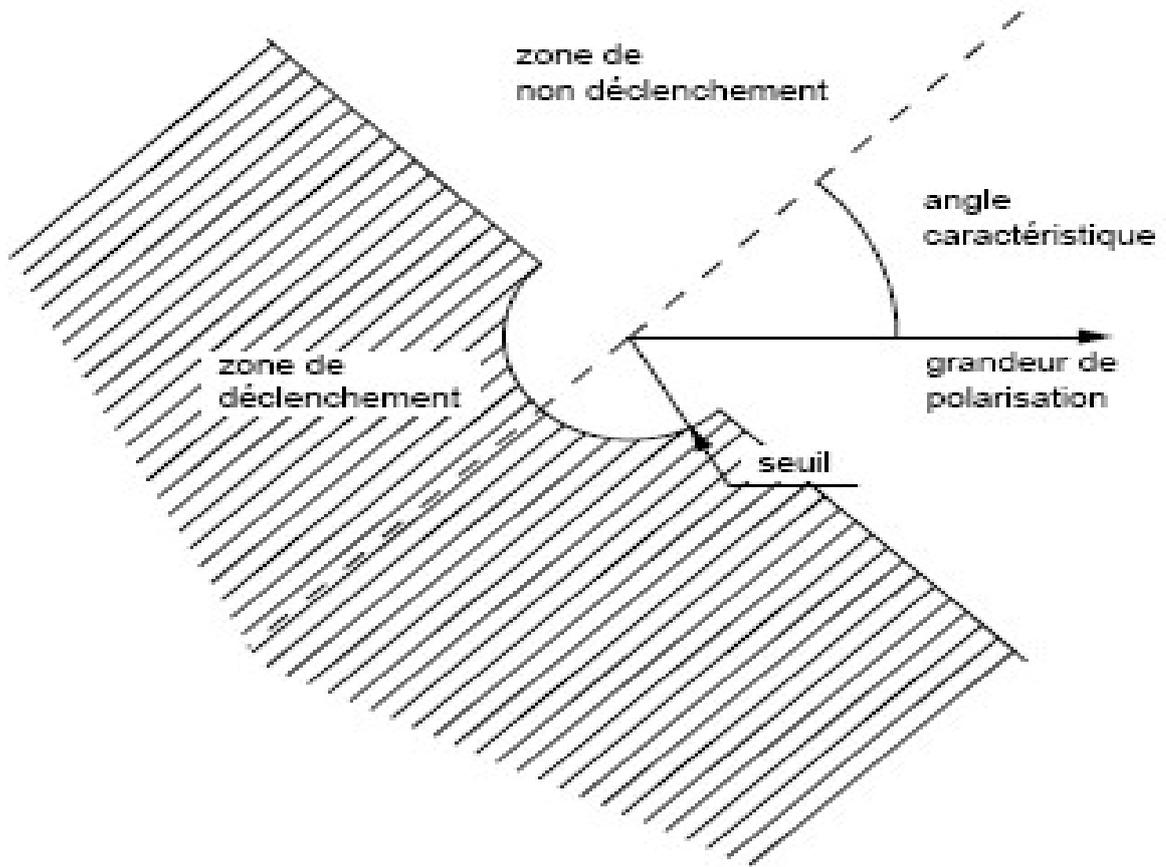
#### III.8.3.5. Relais directionnel à maximum de courant :

Pour localiser un défaut en amont ou en aval de l'endroit où est mesuré le courant, il faut déterminer le déphasage de ce courant avec une grandeur de référence : tension entre phases pour la directionnelle de phase, tension résiduelle pour la directionnelle de terre. Cette grandeur de référence est appelée grandeur de polarisation.

Ce type de relais directionnel est constitué par l'association d'un relais à maximum de courant avec un élément de mesure du déphasage entre le courant et la grandeur de polarisation.

Le déclenchement est soumis aux deux conditions suivantes :

- 1- Le courant est supérieur au seuil.
- 2- Le déphasage entre le courant et la grandeur de polarisation recalée par l'angle caractéristique, est compris dans la zone :  $+90^\circ$  ;  $-90^\circ$ . (Figure III.4). [11]



**Figure III. Caractéristiques de fonctionnement d'un relais à maximum de courant directionnalisé.**

### III.8.3.6. Relais de détection des variations de fréquence :

On compare la fréquence du réseau  $f$  à une fréquence étalon  $f_0$  générée par le relais.

❖ Pour le relais à minimum de fréquence si :

$f - f_0 < 0$  : le relais fonctionne.

❖ Pour le relais à maximum de fréquence si :

$f - f_0 > 0$  : le relais fonctionne.

$f_0$  est réglable par l'opérateur. Le relais est unipolaire et prend l'information sur la tension du réseau (TT). [5]

**III.8.3.7. Relais à maximum de courant pour la protection de l'alternateur au court-circuit interne :**

Le relais est tripolaire mesurant l'intensité différentielle longitudinale de phase. Le relais est sensible uniquement aux défauts se situant entre les deux capteurs qui délimitent la zone protégée. En absence de défaut interne à la zone comprise entre les deux capteurs, l'intensité entrante dans une phase est identique à l'intensité sortante.

L'avantage du relais différentiel est de permettre un réglage  $i_s$  inférieur au courant nominal  $I_N$ .

**III.9. Conclusion :**

Les relais de protection électriques participent à la limitation des dégradations des machines en cas de fonctionnement anormal ou d'avarie. Ils provoquent automatiquement leur séparation du réseau ou actionnent simplement une alarme, si le niveau de contraintes n'est pas trop élevé, en permettant ainsi à l'opérateur de prendre à temps les décisions appropriées pour assurer la sauvegarde du matériel.



### **IV.1.Introduction :**

Les alternateurs sont dimensionnés et conçus pour un service donné et ne peuvent fonctionner au-delà de ce service sans risques de dégradations. Le rôle des protections électriques est de détecter les variations des grandeurs électriques entraînant des dépassements des contraintes admissibles pour les composants et d'actionner l'organe de coupure isolant l'alternateur de réseau.

### **IV.2. Généralités sur le système de protection :**

On distingue deux types de protections :

#### **IV.2.1. Protection externe :**

Protection d'une installation contre les contraintes anormales dont l'origine est extérieure à cette installation. Cette protection provoque un déclenchement partiel de l'installation séparée du réseau accidenté mais restant sous tension.

#### **IV.2.2. Protection internes :**

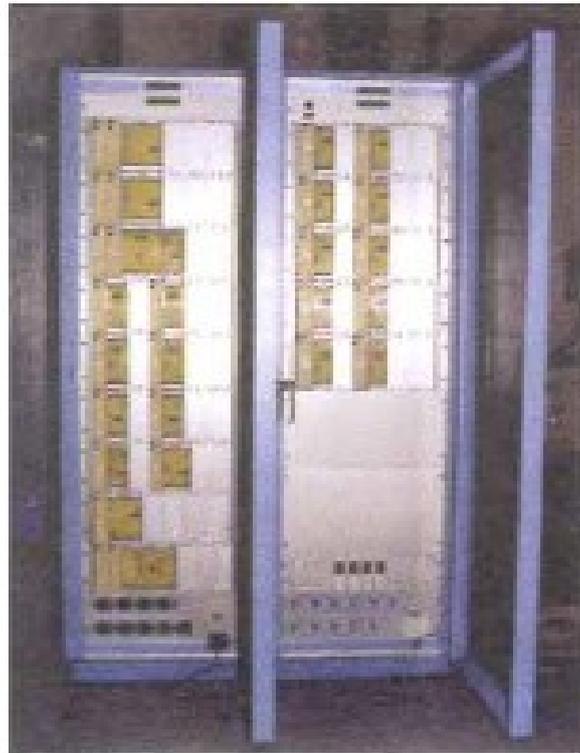
En cas d'avarie de matériel, ces protections limitent les conséquences de ses avaries en isolant la partie de l'installation où le défaut s'est produit. Ces protections provoquent un déclenchement total de l'installation.

Un réseau électrique est divisé en zones de protection, limitée par des disjoncteurs ; chaque zone comporte des dispositifs de protection nécessaires à l'élimination par ses propres disjoncteurs des défauts qui peuvent l'atteindre. On peut craindre la défaillance d'un dispositif de protection ou d'un disjoncteur et on est conduit à installer des protections de secours qui « voient » le même défaut que la protection normale. Quelquefois la protection « secours » agit sur les disjoncteurs d'une zone voisine.

### **IV.3. Dispositifs de protection électrique d'alternateur :**

L'alternateur est soumis à une surveillance électrique qui permet de signaler et de déclencher la machine à chaque fois qu'il y a un défaut électrique. Ce dispositif de surveillance est constitué d'un ensemble de relais de protection réalisé sous forme de carte électronique.

Toutes les cartes électronique sont logées dans une armoire de 2200 X 900 X 600 (h x l x p), munie de portes des deux cotes. [10]



**Figure IV.1. Armoire de protection d'alternateur.**

### **IV.3.1. Transformateur de mesure :**

Les transformateurs de mesure sont destinés à ramener les tensions et les intensités de grandes valeurs sur les circuits principaux, à des valeurs plus faibles faciles à :

- Mesurer par ampèremètres et voltmètres.
- Utiliser pour les installations de comptage.
- Utiliser pour alimenter les circuits de protection électrique ou de régulateurs.

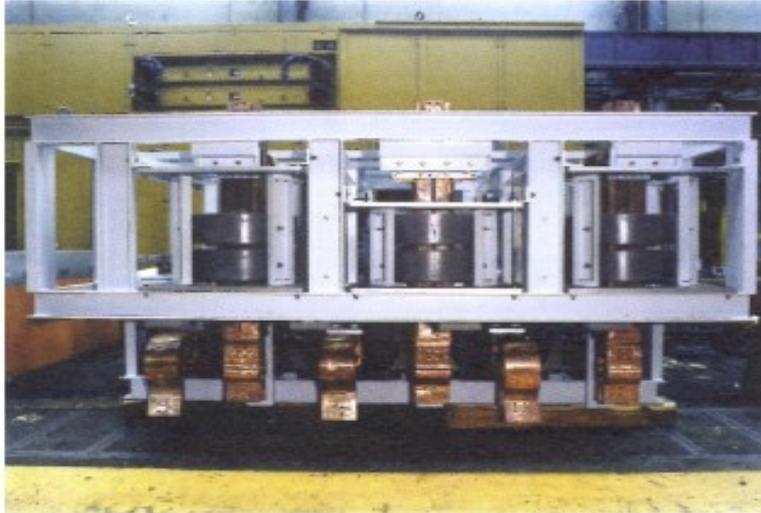
Ces transformateurs jouent le rôle d'intermédiaire entre la ligne ou le jeu de barre HT et les appareils de mesure, de contrôles et de régulation. Généralement placés sur armoire locale.

#### **IV.3.1.1. Transformateur de courant :**

Dans le cas des alternateurs de moyenne et grande puissance, les transformateurs de courants sont toriques (figure IV.2), placés autour des conducteurs soit du côté phase, soit du côté neutre.

Leur classe de précision dépend du ou des relais qu'ils doivent alimenter. Un même TC peut d'ailleurs alimenter plusieurs relais différents si leur classe de précision requise est la même.

La puissance de précision doit être suffisante pour alimenter l'ensemble des consommateurs (typiquement 30 à 50 VA).



**Figure IV.2. Transformateurs de courant aux bornes de l'alternateur.**

Le rapport de transformation est choisi dans la gamme normalisée, avec les valeurs de courant ;

- primaire : 1,2 à 1,5 fois le courant statorique assigné de l'alternateur (1,1 fois pour les grands alternateurs).
- Secondaire : 1A ou 5A.

#### **IV.3.1.2. Transformateur de tension :**

Les transformateurs de tension sont placés dans des compartiments séparés par phase et sont raccordés au jeu de barres ou de gaines de liaison avec le transformateur d'évacuation d'énergie (TP).

Leur classe de précision dépend de la précision requise pour les relais qu'ils alimentent. De même que pour les TC, leur puissance de précision doit correspondre à la consommation de l'ensemble des relais.

#### **IV.3.2. Matrice de déclenchement :**

##### **IV.3.2.1. Application :**

La matrice de déclenchement est un distributeur à barres croisées et sert à commuter de façon librement programmable les signaux de déclenchement arrivant dans les colonnes de

la matrice, sur les lignes de la matrice qui sont connectées aux transmetteurs d'ordres pour le déclenchement des interrupteurs.

Les entrées (colonnes) sont donc affectées aux dispositifs de protection, les sorties (lignes) aux interrupteurs.

#### **IV.3.2.2. Structure :**

La matrice de déclenchement comporte 30 colonnes (pour 30 signaux de dispositif de protection) et 9 lignes de matrice.

Si l'on a besoin de plus de 9 lignes de matrice, la matrice peut être complétée par une matrice supplémentaire de 9 lignes également.

La programmation se fait par des fiches à diodes de très haute fiabilité qu'on obtient notamment par le surdimensionnement choisi (courant de passage, tension de blocage).

Chaque colonne de matrice contient une diode luminescente rouge qui représente la signalisation du déclenchement. Cette signalisation est en maintien et peut être annulée sur place. (Voir figure IV.3).

#### **IV.3.2.3. Mode de fonctionnement :**

Les ordres de déclenchement (30 au maximum) envoyés par les dispositifs de protection aux colonnes de la matrice sont transmis aux lignes de la matrice par des connecteurs à diodes enfichables. De là, ils sont transmis aux émetteurs d'ordres.

Chaque colonne est reliée par une mémoire à une diode luminescente qui indique le déclenchement. En outre une mémoire collective est activée, découplée par diode. Ce message collectif est disponible en tant que sortie statique découplée à la broche b 28 et en tant que sortie de contact à la broche b 30.

Il est possible de remettre les mémoires à l'état initial en appliquant un potentiel M à la broche z 28. [1]

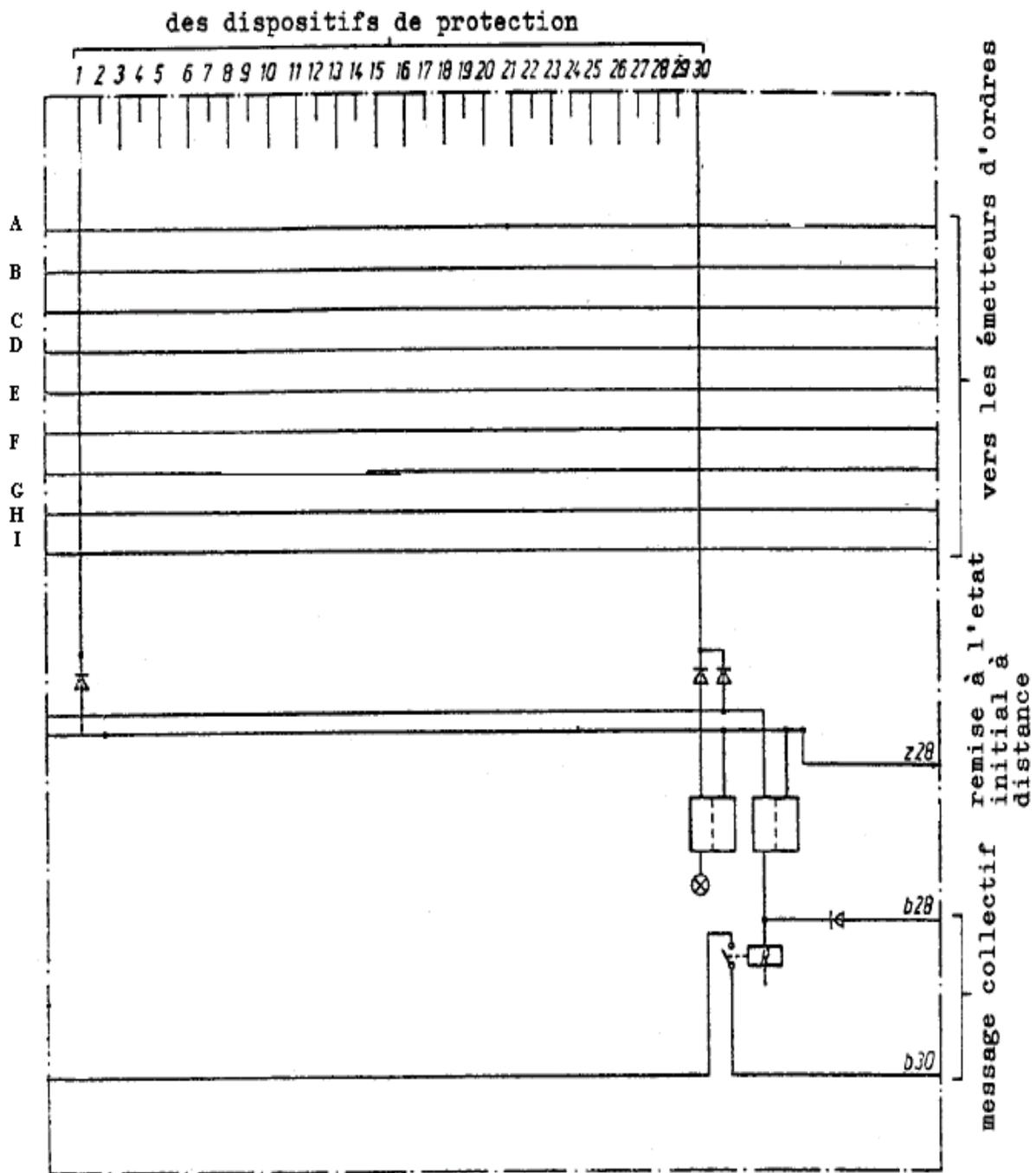


Figure IV.3. Matrice de déclenchement

### IV.3.3. L'oscillostore :

L'oscillostore est un instrument de mesure qui donne l'état des tensions et des courants de l'alternateur et de la ligne, pendant le défaut électrique et juste avant le déclenchement. Il se met en marche à chaque fois qu'une protection est activée.

L'état des courants et tensions est donné sous forme d'oscillogramme. Cet appareil est installé dans la salle de commande, il sert dans l'analyse des défauts.

#### **IV.4. Différents types de protections :**

##### **IV.4.1. Protection différentielle contre les défauts entre phases**

##### **d'alternateur :**

###### **IV.4.1.1. Généralités et application :**

- La protection différentielle sert à protéger l'alternateur contre les courts-circuits internes pouvant se produire uniquement entre les deux capteurs qui délimitent la zone à protégée. Son principe est basé sur la comparaison des courants à l'entrée et à la sortie de chaque phase qui devraient être égaux en cas d'absence de défaut.
- Dans les encoches du circuit magnétique, un défaut entre phases est toujours accompagné, ou précédé, par un défaut à la masse. Il sera donc détecté par le relais différentiel.

###### **IV.4.1.2. Principe de détection :**

Le principe utilisé répond au critère de détection directe. Sur chaque phase, un relais mesure la différence des courants  $I_1$  et  $I_2$ , entrant et sortant de cette phase (figure IV.4).

Cette différence, due au courant de défaut, est rapportée au courant circulant dans la phase.

La protection est donc constituée par un ensemble triphasé de relais différentiel.

Le courant minimal de défaut définissant le seuil de fonctionnement de la protection est donné par la relation suivante :

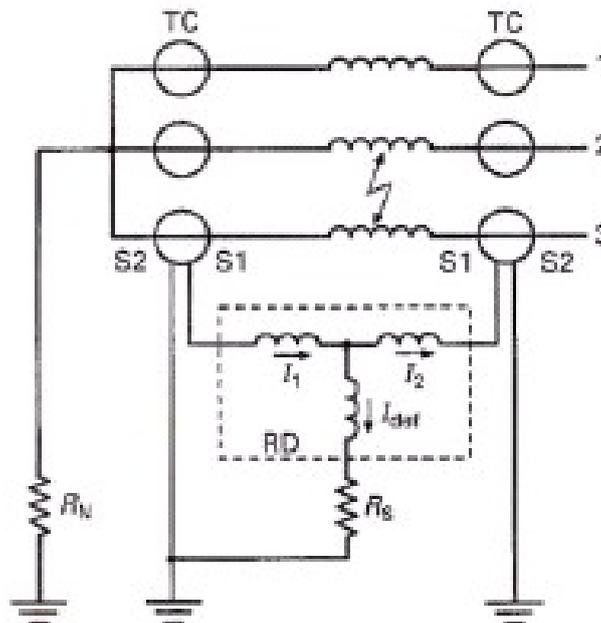
$$I_{def} = I_1 - I_2 = \frac{\alpha}{100} \left( \frac{I_1 + I_2}{2} \right) \rightarrow IV.1.$$

Avec :  $\alpha$  pourcentage de la protection.

La comparaison des intensités aux deux extrémités de la phase à protéger nous renseigne à tout moment sur l'état de celle-ci s'il n'y a pas de défaut.

- Si  $I_1 - I_2 = 0 \rightarrow$  pas de défaut.

- Et si  $I_1 = I_2 + I_{def} \rightarrow I_1 - I_2 \neq 0 \rightarrow$  il y a un défaut. [6]



$I_1$  courant entrant  
 $I_2$  courant sortant  
 $I_{def}$  courant de défaut  
 $R_N$  résistance de raccordement  
 de point neutre de l'alternateur

$R_S$  résistance de  
 stabilisation.  
 $R_D$  relais différentiel  
 $S_1, S_2$  secondaires des  
 T C.

**Figure IV.4. Protection différentielle (contre les défauts entre phases d'un alternateur) Principe de détection.**

**IV.4.1.3. Réalisation :**

**a) Transformateur de courant :**

Pour éviter les fonctionnements intempestifs suite à des défauts extérieurs à l'alternateur, les transformateurs de courant (TC) doivent se comporter de façon rigoureusement symétrique, surtout du point de vue magnétique, en régimes subtransitoire et transitoire et sous l'effet des composantes aperiodiques. L'erreur correspondante doit être très inférieure au seuil de fonctionnement dans une plage de 0 à 0,5 fois le courant assigné.

Pour cela, les transformateurs de courant d'une même phase doivent être appairés, c'est-à-dire avoir des caractéristiques (erreur, courbe de magnétisation) identiques ou pour le moins très proches. On utilise, en général des TC de classe de précision 5 P 10 ou 5 P 15, spécifiés

pour protection différentielle, et issue d'un même lot de fabrication. Les résistances de filerie du câblage secondaire des TC doivent aussi être égales et aussi faible que possible.

### b) Relais de protection :

Un relais à maximum de courant est disposé sur chaque phase. La valeur de réglage, exprimée en pourcentage du courant de phase est typiquement de 10 à 20 %.

Toutefois, en cas de défaut monophasé extérieur à l'alternateur, le courant différentiel peut atteindre une valeur proche de celle d'un défaut entre phase, situé à proximité de la connexion de neutre, du fait des particularités constructives (erreur de TC, sensibilité de relais). Pour éviter les déclenchements intempestifs, le relais doit donc être désensibilisé et suivre une loi à seuil constant, pour les faibles courants de défaut.

La caractéristique de fonctionnement qui en résulte est représentée sur la figure (IV.5). Le seuil d'insensibilité est couramment fixé de 5 à 20 % du courant assigné  $I_n$ .

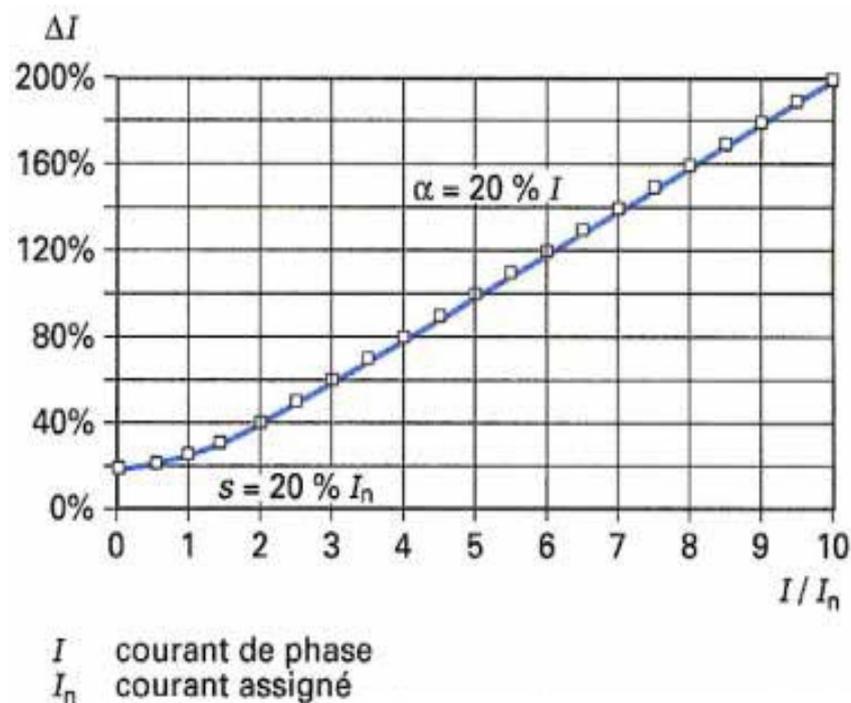


Figure IV.5. Protection différentielle d'alternateur. Caractéristique de fonctionnement

Avec : S seuil d'intensité

$\Delta I$  courant différentiel

$\alpha$  pourcentage de courant différentiel.

- ❖ La résistance de stabilisation  $R_S$  augmente artificiellement l'impédance de relais. De cette façon, si l'un des deux transformateurs de courant venait à être saturé sur un défaut extérieur, le courant de mesure  $I_{\text{def}} = I_1 - I_2$ , n'atteindrait pas la valeur de seuil.

#### **IV.4.1.4. Action :**

Déclenchement du groupe instantané.

### **IV.4.2. Protection à 80% contre les mises à la terre accidentelles du stator :**

#### **IV.4.2.1. Application :**

Le défaut se produit le plus fréquemment dans l'alternateur est la mise à la terre accidentelle du stator, elle résulte d'un défaut d'isolation de l'enroulement de la machine par rapport à la masse (paquet de tôles statorique).

Un défaut à la terre donne lieu à une tension de décalage, qui est mesurable à l'enroulement triangulaire ouvert de transformateur de protection de l'alternateur. L'amplitude de tension de décalage dépend du lieu de défaut par rapport à la masse. Elle est pleine lorsque le défaut à la masse est aux bornes de l'alternateur. Elle diminue lors d'un défaut à la masse proche de neutre et se réduit à zéro dans le point neutre de la machine.

Les défauts à la terre dans le point neutre de la machine ou à proximité de celui-ci ne peuvent pas être saisis par ce dispositif de protection.

#### **IV.4.2.2. Structure :**

La protection contre les mises à la terre du stator se compose des ensembles suivants :

1. Carte de mesure.
2. Une carte de valeur limite (émetteur de tension).
3. Une minuterie.

#### **-Carte de mesure :**

L'entrée de mesure de tension sert à abaisser les tensions externes (de transformateur de tension) venant de l'installation et à assurer une séparation galvanique entre le coté installation et le circuit de mesure de la protection électronique.

Cette carte a une tension nominale  $U_N = 100V$ , et une fréquence nominale  $f_N = 50Hz$ .

#### **- Emetteur de tension :**

L'émetteur de tension est un étage de valeur limite pour le courant alternatif et sert à la surveillance de la tension de mesure. Il se distingue en particulier par une haute précision, une faible consommation propre ainsi que des temps de réponse courts.

**- Minuterie :**

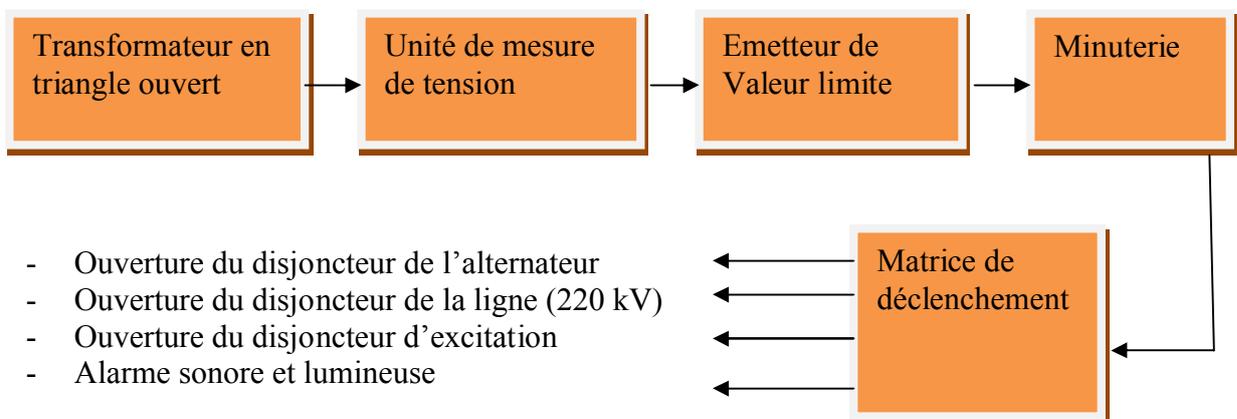
La minuterie sert à temporiser les signaux. On l'utilise lorsqu'une extrême précision est une faible dispersion du temps de propagation en même temps qu'un court délai de remise en disponibilité sont exigés.

**IV.4.2.3. Fonctionnement de la protection :**

La tension de décalage se présente au primaire du transformateur triangulaire ouvert de la protection, puis elle est transmise à l'entrée de la carte de mesure pour évaluation. La tension qui s'y produit est transmise à la carte de valeur limite pour comparaison. Si elle dépasse la valeur de consigne prés réglée, il se produit un signal de déclenchement à travers la minuterie. Après un temps prés réglés dans celle-ci, la matrice de déclenchement donne les ordres suivants :

- Ouverture du disjoncteur de l'alternateur.
- Ouverture du disjoncteur de la ligne 220kV.
- Ouverture disjoncteur d'excitation.
- Alarme sur pupitre en salle de commande. [4]

➤ **Schéma simplifié d'action :**



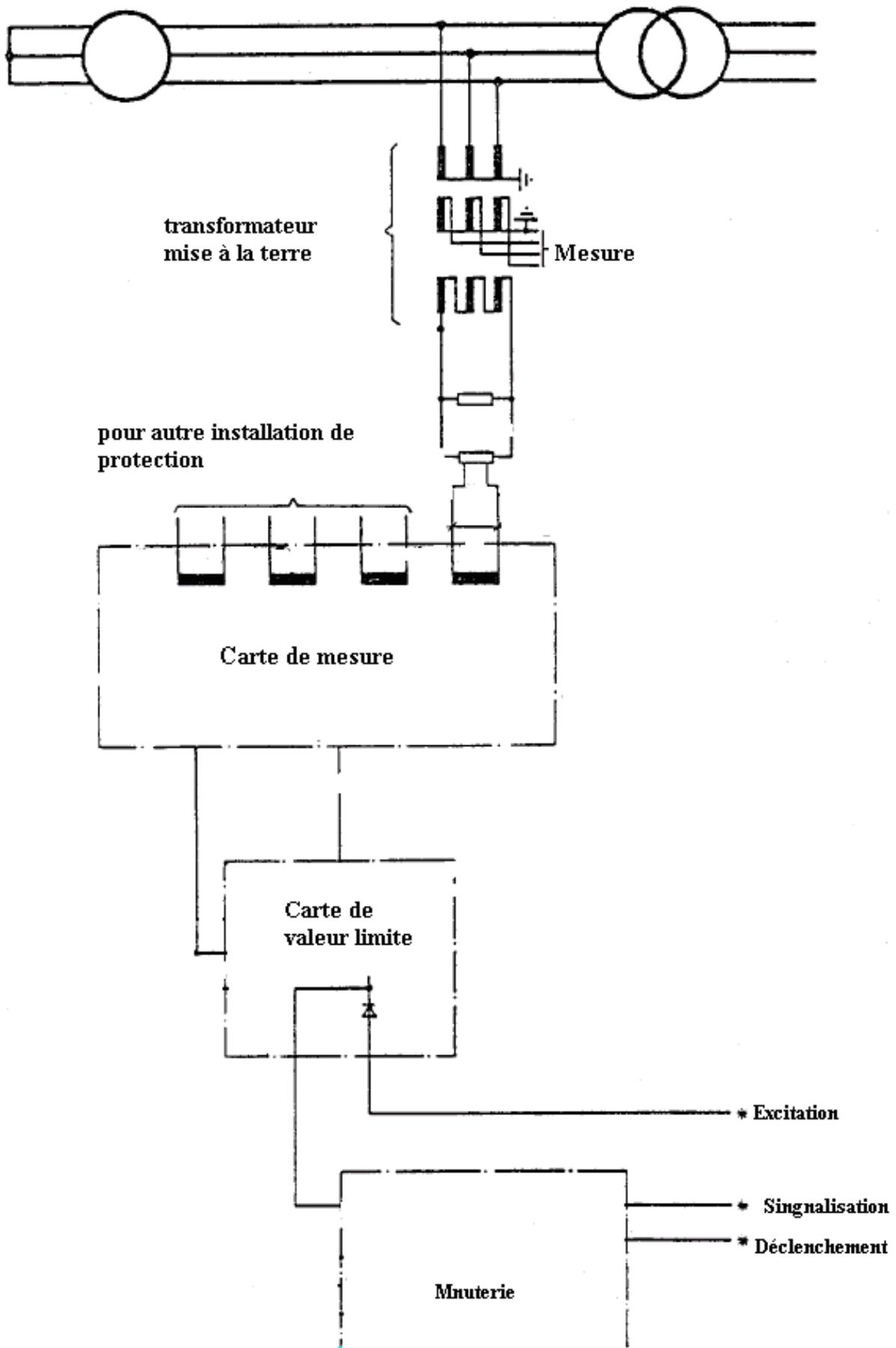


Figure VI.6. Protection contre les mises à la terre accidentelles du stator.

#### IV.4.2.4. Autres principe de détection des mises à la terre du stator :

##### IV.4.2.4.A. Mise à la terre de point neutre par une résistance :

Nous considérons dans un premier temps, le cas d'un alternateur unique débitant sur un réseau par l'intermédiaire d'un jeu de barre et d'un transformateur élévateur. Le point neutre de l'alternateur est raccordé à la terre par une résistance.

Le défaut à la masse, qu'il ait son origine sur un enroulement statorique doit être éliminé très rapidement, les dommages pouvant devenir très graves s'ils atteignent le circuit magnétique.

##### - Principe de détection :

La protection la plus courante répond au principe de détection directe. Le courant de défaut est mesuré dans la connexion du point neutre à la terre, à travers une résistance de limitation (figure IV.7.).

Le courant traversant le défaut est donné par la formule suivante :

$$I_{def} = \frac{V}{R_{def} + R_{enr} + R_N} \rightarrow IV.1.$$

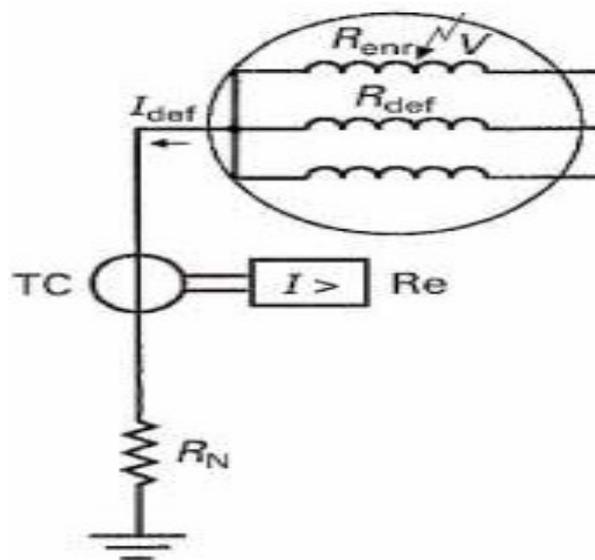


Figure IV.7. Principe de détection.

Avec :  $I_{def}$  : courant de défaut.

$V$  : tension simple entre l'endroit du défaut et la masse.

$R_{def}$  : résistance de défaut.

$R_{\text{enr}}$  : résistance de la partie de l'enroulement, entre le point neutre et l'endroit du défaut

$R_N$  : résistance de raccordement du point neutre de l'alternateur à la masse.

TC Transformateur de courant.

$R_e$  Relais à maximum de courant de neutre.

Avec les simplifications suivantes :

- $R_{\text{déf}}$  supposé nulle de façon conservative.
- $R_{\text{enr}}$  négligeable devant  $R_N$ .

La formule (IV.1.) devient :

$$I_{\text{def}} = \frac{V}{R_N} \rightarrow \text{IV.2.}$$

Les formules (IV.1) et (IV.2) ne sont valables que pour un circuit pratiquement résistif c'est-à-dire tel que la résistance  $R_N$  est très grande devant la résistance de l'enroulement. Cela est vrai dans la réalité, la résistance  $R_N$  étant dimensionnée à une valeur élevée pour limiter le courant de défaut à quelques dizaines d'ampères. [10]

L'image de courant de défaut est transmise au relais à maximum de courant par l'intermédiaire d'un transformateur(TC). Si la valeur du courant dépasse la valeur de seuil de relais, ce dernier envoie un signal de déclenchement aux disjoncteurs d'excitation, d'alternateur et de ligne.

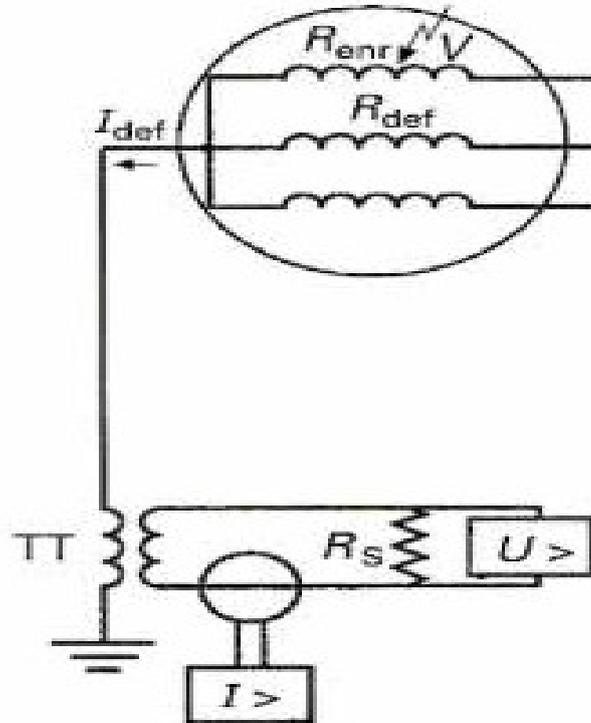
#### **IV.4.2.4.B. mise à la terre du point neutre par un transformateur :**

Le point neutre de l'alternateur est mis à la terre par un transformateur dont le secondaire est chargé par une résistance  $R_S$ , cette disposition permet d'utiliser une résistance de faible valeur, de construction robuste, tout en représentant une valeur équivalente au primaire du transformateur suffisamment élevée pour limiter le courant de défaut à quelques dizaines d'ampères.

#### **-principe de détection :**

Le défaut est détecté par une mesure de courant dans la résistance  $R_S$  ou de la tension à ses bornes (figure IV.8).le courant mesuré est transmis au relais à maximum de courant et la tension mesurée est transmise au relais à maximum de tension. Si leurs valeurs dépassent les

valeurs de seuils des relais de protection, ces derniers envoient un signal de déclenchement aux disjoncteurs suivants : d'excitation, d'alternateur et de la ligne.



**Figure IV.8. Principe de détection par la mise à la terre du point neutre par transformateur.**

**Avec :** TT : transformateur de tension  
 $R_s$  : résistance de charge.  
 $U >$  relais à maximum de tension.

#### **IV.4.3. Protection à 100% contre les mises à la terre du stator :**

La protection contre les mises à la terre accidentelle du stator est appliquée pour la détection de défaut à la terre dans l'enroulement du stator de la machine électrique. Elle constate des défauts à la terre sur l'ensemble du côté de la machine y compris son point neutre.

Pour pallier le manque de sensibilité de la protection à détection directe vis-à-vis des défauts proche du point neutre, certains relais comprennent un dispositif d'injection de tension à basse fréquence, aux bornes d'une résistance additionnelle placée dans la connexion du point neutre de la machine à la masse (figure IV.9).

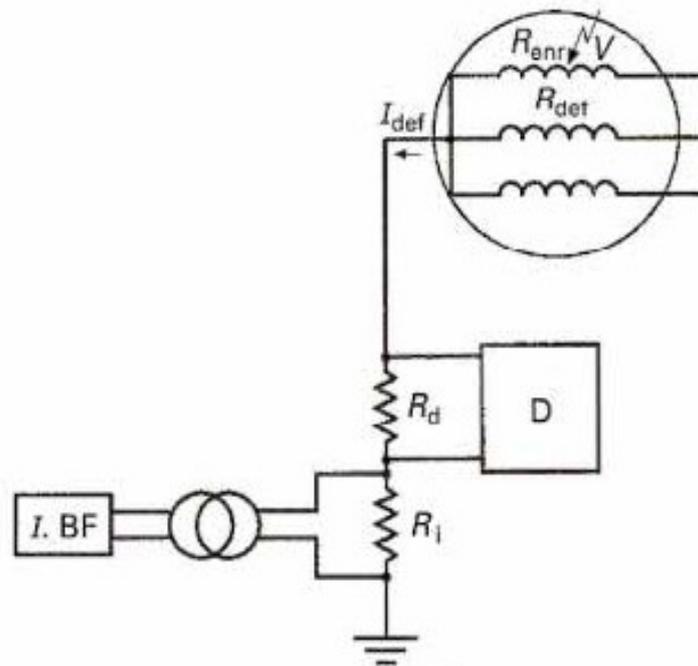


Figure IV.9. Protection masse stator à 100 %.

Avec : D : détecteur.

I.BF : injection à basse fréquence.

$R_d$  : résistance de détection.

$R_i$  : résistance d'injection.

#### IV.4.3.1 Réalisation :

##### Résistance de limitation du courant de défaut :

La détermination de la résistance  $R_N$  doit satisfaire deux critères opposés :

- d'une part,  $R_N$  doit avoir une valeur suffisamment élevée pour limiter le courant de défaut à une valeur acceptable pour minimiser les dommages au matériel (typiquement 10 à 30 A), compte tenu de la valeur maximale de la tension [voir la formule IV.2.].
- d'autre part, la valeur de  $R_N$  doit être relativement basse pour limiter les surtensions, surtout transitoire, provoquées sur les phases saines par l'apparition du défaut ; pour cela, il faut que la puissance active dissipée dans la résistance de neutre au moins égale à la puissance capacitive du circuit, soit :

$$R_N I_{\text{def}}^2 \geq 3 C \omega V^2 \rightarrow (\text{IV.3}).$$

Avec :

C : capacité entre phase et la masse de l'alternateur.

$\omega$  : pulsation du réseau ( $\omega = 2\pi f$ ).

A partir de la relation (IV.2), la relation (IV.3) s'écrit avec une tension entre phase

$U = V\sqrt{3}$  :

$$\frac{V^2}{3R_N} \geq \omega C U^2$$

Soit :

$$R_N = \frac{1}{3\omega C} \rightarrow \text{IV.4.}$$

### **Transformateur de courant :**

Le courant de défaut est mesuré par l'intermédiaire d'un TC de rapport unité (par exemple 5A/5A). En raison du fonctionnement de courte durée en cas de défaut, il y a intérêt à surcharger ce TC pour améliorer la sensibilité de la chaîne de détection.

### **Relais de protection à maximum de courant :**

La détermination de la valeur de réglage vise à obtenir le maximum de sensibilité, en tenant compte du principe de fonctionnement et des effets parasites de la chaîne de détection. Selon le principe de fonctionnement, le courant de défaut est proportionnel à la tension simple développée par la machine à l'endroit de défaut. Plus un défaut est proche du point neutre, plus la tension est faible, et plus le courant à mesurer est faible.

En pratique, le courant minimal détectable, qui n'entraîne pas de déclenchements intempestifs est de l'ordre de 5 à 10 % du courant maximal de défaut. On peut donc admettre que l'enroulement statorique est protégé à 95 ou 90 %.

#### **IV.4.3.2. Action :**

Déclenchement du groupe instantané ou légèrement temporisé (typiquement 0,1s).

### **IV.4.4. Protection contre les mises à la terre du rotor :**

#### **IV.4.4.1. Généralités :**

L'enroulement rotorique étant à potentiel flottant, le court-circuit à la masse en un point n'a pas de conséquences électriques immédiates sur le fonctionnement de l'alternateur.

Toutefois, en fixant les potentiels par rapport au fer du rotor, il risque d'affranchir un second défaut latent qui entraînerait alors un court-circuit entre les polarités dont les conséquences risqueraient d'être grave (fusion de l'arbre, vibration excessives dues au déséquilibre magnétique).

#### **IV.4.4.2. Principe de détection :**

Le principe de la protection consiste à placer une source de tension alternative (sinusoïdale ou à forme d'onde rectangulaire, selon les fournisseurs) à basse fréquence entre le circuit rotorique et la masse, et à mesurer ainsi la résistance d'isolement (figure IV.10). Cette disposition assure la séparation galvanique entre la source et l'alimentation en courant continu de l'inducteur et permet de distinguer le courant utile de mesure des courants parasites à 50 Hz ou autres fréquences. **[10]**

#### **IV.4.4.3. Réalisation :**

- le module d'injection est un générateur de tension dont la fréquence est de quelques hertz ou un sous-multiple de la fréquence du réseau (par exemple :  $f/4$ ). La valeur de la résistance d'injection est de quelques centaines d'ohms.
- le module de détection réalise une mesure de tension aux bornes d'une résistance shunt de quelque kilohms, insérée dans le circuit.

La sensibilité du relais est réglée pour détecter une résistance d'isolement du rotor inférieure de 1 à 5 k $\Omega$ , typiquement.

- le (ou les) condensateur(s) de couplage, d'une capacité de quelques microfarads, doit être dimensionné pour la tension maximale susceptible d'apparaître entre rotor et masse, soit quelques kilovolts, pendant les régimes transitoires de l'alternateur.

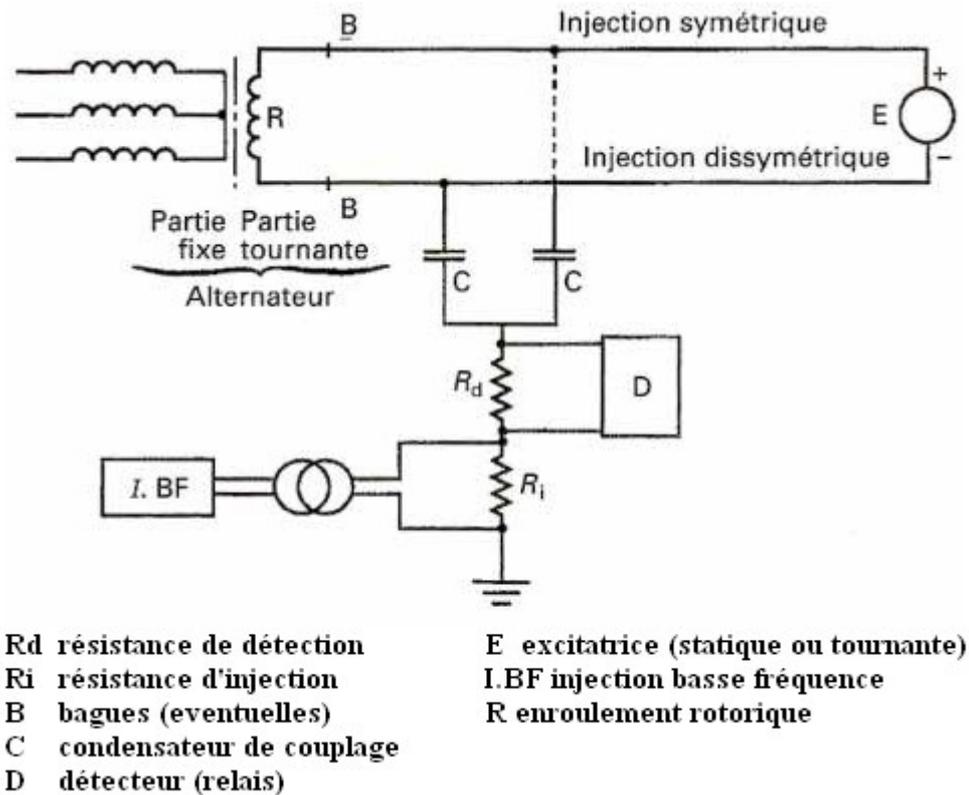


Figure IV.10. Protection contre la mise à la terre du rotor.

#### IV.4.4.4. Action :

Alarme ou éventuellement déclenchement du groupe si l'historique de la machine fait craindre à l'exploitant qu'un premier défaut n'en affranchisse un second.

#### IV.4.4.5. Défauts entre spires de l'enroulement rotorique :

Un court-circuit entre spire de l'enroulement rotorique engendre du fait des balourds thermiques ou magnétiques, des vibrations plus ou moins importantes, décelées par le système de surveillance vibratoire de la ligne d'arbre du groupe turboalternateur.

Si le nombre de spires court-circuitées est important, la diminution de l'excitation peut être suffisamment forte pour que la protection contre les pertes de synchronisme agisse. Le régulateur de tension délivrerait, en outre, un ordre de surexcitation qui entraînerait la signalisation prévue sur la surcharge en courant d'excitation.

Si, enfin, le court-circuit entraîne un contact entre l'enroulement et la masse, ce défaut peut être détecté par la protection mise à la masse du rotor.

Pour l'ensemble de ces raisons, une protection spécifique n'est en général pas installée.

### IV.4.5. Protection contre la surintensité :

#### IV.4.5.1. Généralités :

La protection contre les surintensités dans l'enroulement statorique est destinée à la prévention des surcharges. Elle peut aussi être utilisée en protection de secours contre les courts-circuits externes qui ne seraient pas éliminés par les relais de protection du réseau.

Il est à noter que l'échauffement des conducteurs statoriques est également surveillé par des sondes thermométriques, ou par image thermique.

#### IV.4.5.2. Rôle de la protection :

Le rôle de la protection contre la surintensité est de protéger l'alternateur contre les courants de courts-circuits qui se produisent dans l'alternateur ou à l'extérieur (réseau).

#### IV.4.5.3. Réalisation et principe de détection :

- la protection répond au principe de détection directe.
- Le courant est généralement mesuré sur une seule phase, car la surcharge est à priori équilibrée. Le système de protection se compose :

D'un transformateur de courant de rapport  $I_{pn} / 5A$  ou  $I_{pn} / 1 A$ .  $I_{pn}$  étant le courant normalisé immédiatement supérieur à la valeur maximale permanente statorique  $I_a$ ; par exemple à la puissance apparente  $S = S_n : U = 0,95 U_n ; I_a = 1,05 I_n$ ,  $S_n$ ,  $I_n$ ,  $U_n$  donnant les valeurs assignées de puissance apparente, courant et tension de l'alternateur.

D'un relais de protection à maximum de courant, réglé à une valeur comprise entre 1,1 et 1,2  $I_n$  et temporisé de quelques secondes (2 à 10 s) ; éventuellement, un deuxième relais, réglé à une valeur supérieure à (1,2  $I_n$  ou plus) et temporisé (5 à 10 s) provoque le déclenchement du groupe. [4]

#### IV.4.5.4. Action :

Alarme en salle de commande.

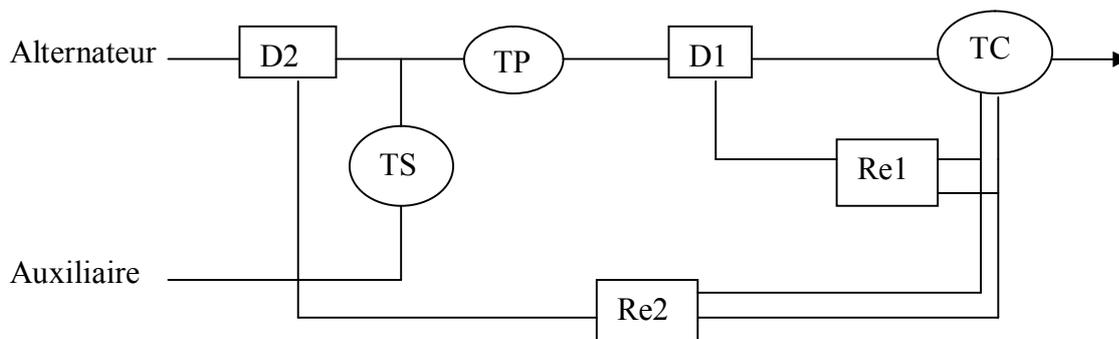


Figure VI.11.Schéma simplifié d'une protection contre la surintensité.

**Avec :** Re1, Re2 relais à maximum de courant

TC transformateur de courant

D1 disjoncteur de la ligne

D2 disjoncteur de l'alternateur

TP transformateur principal

TS transformateur de soutirage

#### **IV.4.6. Protection contre les surtensions :**

##### **IV.4.6.1. Rôle :**

Le rôle de la protection contre les surtensions est de protéger l'alternateur contre la rupture d'isolation au niveau du stator suite à une surtension.

Elle a pour but de détecter ou éliminer les surtensions importantes qui peuvent endommager l'alternateur.

##### **IV.4.6.2. Constitution :**

La protection contre les surtensions comporte :

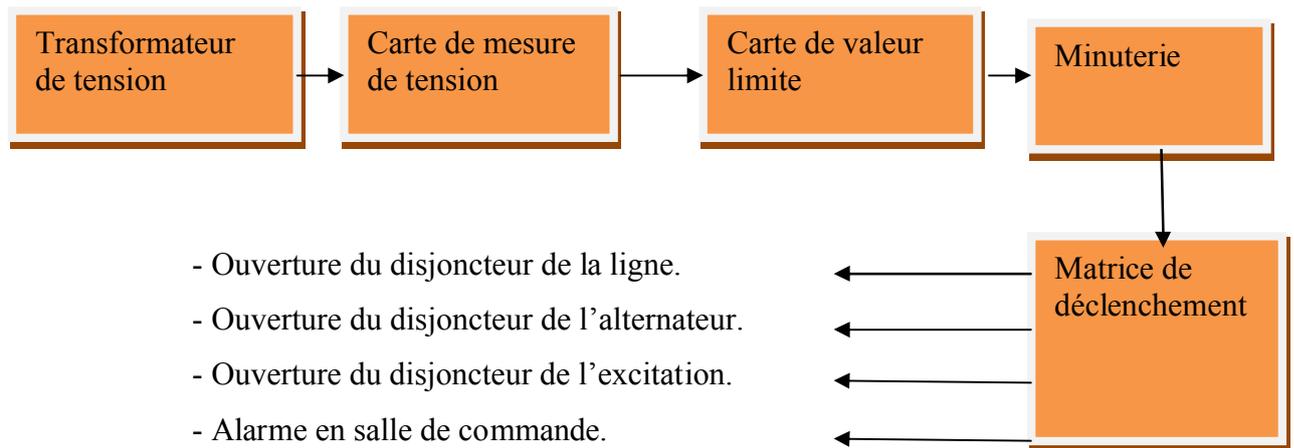
- Une carte de mesure.
- Une carte de valeur limite.
- Une minuterie.

##### **IV.4.6.3. Fonctionnement :**

La tension secondaire du transformateur de tension (T T) est transmise à la carte de mesure pour évaluation, puis elle est transmise à la carte de valeur limite pour comparaison. Lorsque la valeur de celle-ci dépasse la valeur limite, l'émetteur réagit et émet un signal de déclenchement vers la matrice de déclenchement par l'intermédiaire de la minuterie. Cela après un retard pré réglé 0,1– 0,4 S. [1]

La matrice de déclenchement donne les ordres suivants :

- Ouverture du disjoncteur de la ligne.
- Ouverture du disjoncteur de l'alternateur.
- Ouverture du disjoncteur de l'excitation.
- Alarme en salle de commande.



**Figure IV.12. Schéma simplifié d'action**

#### **IV.4.7. Protection contre le retour de puissance :**

##### **IV.4.7.1. Rôle :**

Le fonctionnement en moteur synchrone de l'alternateur ne présente aucun inconvénient pour celui-ci, mais peut créer des dommages à l'organe d'entraînement en cas de durée prolongée :

Echauffement des ailettes des turbines à vapeur (principalement pour les corps de turbines à basse pression), défaut mécaniques de moteurs thermiques.

Le rôle de la protection contre le retour de puissance est d'éviter à l'alternateur de fonctionner en moteur d'entraînement de la turbine. Ce dernier absorbe la puissance du réseau au lieu d'en fournir.

##### **IV.4.7.2. Application :**

Cette protection permet la sauvegarde du système turbo-alternateur, lorsque la turbine ne fournit pas assez d'énergie pour compenser les pertes à vide de l'alternateur. Elle évite à ce dernier d'absorber la puissance à partir du réseau.

Le retour de puissance se provoque aussi en cas de réglage défectueux de la vitesse ou de la fréquence de la turbine.

**IV.4.7.3. Structure :**

La protection contre le retour de puissance comporte les unités suivantes :

- Convertisseur de courant.
- Convertisseur de tension.
- Emetteur de puissance.
- Minuterie.
- Élément de couplage pour l'introduction de l'état de fermeture rapide (arrêt d'urgence).

Le convertisseur de tension forme avec le convertisseur de courant et l'unité de mesure un relais de puissance entièrement statique.

**IV.4.7.4. Mode de fonctionnement :**

Dans l'unité d'entrée de courant, les trois courants de phase sont transformés en tensions proportionnelles. L'alimentation des courants se fait moyennant une fiche. Lorsqu'on la retire, les transformateurs de courant sont court-circuités automatiquement.

L'unité de mesure de puissance, comporte pour chaque phase un multiplicateur qui établit le produit du courant par la tension de phase. Les valeurs de sortie des trois multiplicateurs sont additionnées et représentent une grandeur mesurée proportionnelle à la puissance réelle, et transmise dans la carte de valeurs limites.

Lorsque la valeur limite mise au point est dépassée (domaine d'ajustement 0,4 ... 3% ou 0,8 ... 6% de puissance nominale) une diode lumineuse rouge s'allume sur le panneau frontal de l'émetteur et un signal est émit vers la minuterie.

L'ajustement des deux relais de temporisation est de 0,2 ... 12,8 secondes. La valeur plus faible est réglée seulement s'il y a fermeture rapide.

L'intégration du signal, fermeture se fait par l'intermédiaire de l'unité de couplage. [1]

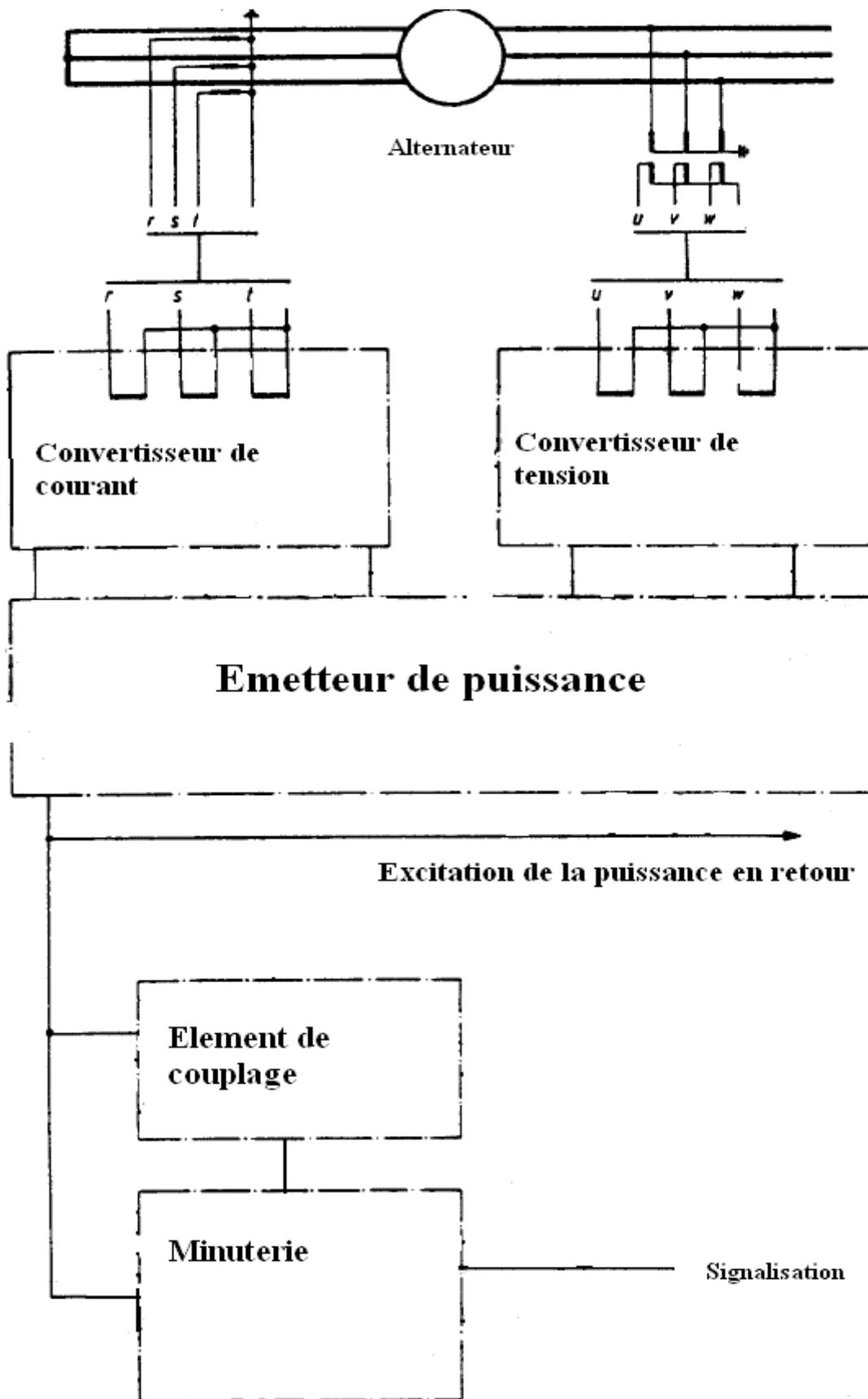


Figure. IV.13. Schéma des connexions de la protection triphasé contre le retour de puissance.

#### IV.4.8. Protection contre l'asymétrie :

Dans les grandes génératrices à courant triphasé, le rotor est l'élément de machine dont le matériau est le plus fortement usé.

Le champ magnétique tournant inverse qui se crée pendant le déséquilibre de phases, induit dans le rotor des courants de fréquence double qui, à cause de leur fréquence relativement élevée, n'ont qu'une faible profondeur de pénétration.

Les alternateurs ou plus spécifiquement les amortisseurs du rotor, supportent par conception un taux de composante inverse.

$$i_2 = \frac{I_2}{I_n} = \frac{\text{composante inverse de courant}}{\text{composante assignée de l'alternateur}}$$

La détection d'un courant inverse nécessite l'emploi d'un ensemble de filtre déphaseurs, alimentés par les transformateurs de courant TC de phase. (Figure VI.14).

Un circuit sommateur et les filtres déphaseurs réalisent la composante inverse  $I_2$  ; en effet celle-ci est donnée par la formule :

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_U + a^2 I_V + a I_W)$$

Où :  $I_U, I_V, I_W$  représentent les courants de phase et  $a = \exp^{j 120^\circ}$

Cette expression peut encore s'écrire :

$$I_2 = \frac{1}{3}[(I_U - I_V) + a(I_W - I_V)]$$

Les courants  $I_U, I_V, I_W$  sont appliqués au relais par l'intermédiaire de transformateurs. Les tensions observées aux bornes des secondaires sont les images des courants  $(I_U - I_V)$  et  $(I_W - I_V)$ .

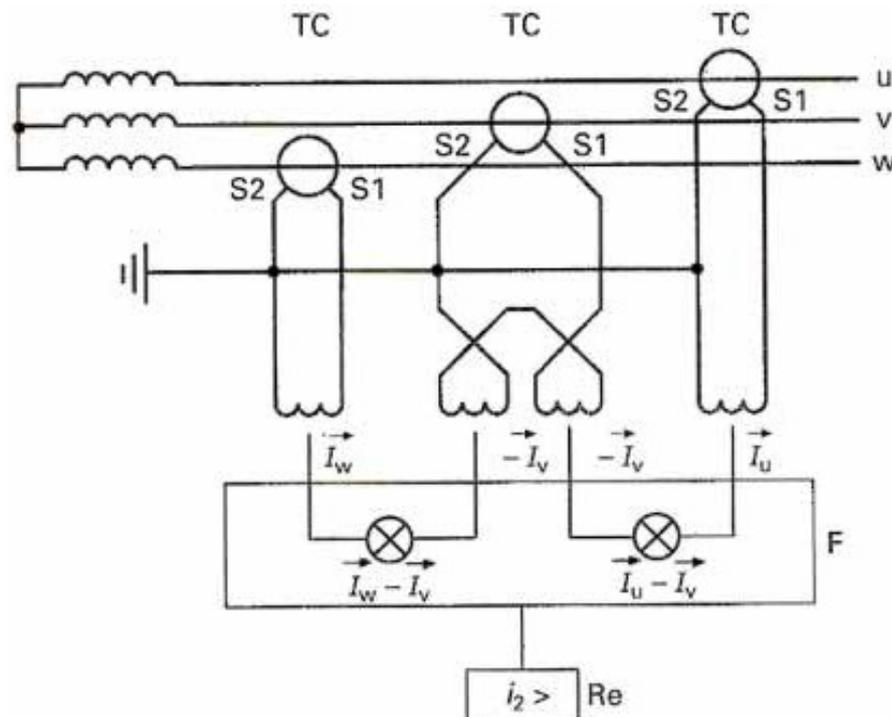
❖ **Réalisation :**

Les transformateurs de courant ont un rapport  $I_n / 5A$  ou  $I_n/1A$ . Le relais de protection à maximum de composante inverse de courant, est temporisé selon la loi  $i_2^2 t = Cte$ , avec un seuil minimal réglable en valeur de  $i_2$ .

Le seuil minimal doit correspondre, selon la loi ci-dessus à un temps suffisant pour que l'opérateur du réseau ait le temps d'effectuer les manœuvres destinées à rétablir l'équilibre des phases (typiquement 15 à 20 min). [6]

❖ **Action :**

- Alarme pour un pourcentage de courant inverse  $i_2$  supérieur au seuil minimal de fonctionnement, temporisé de quelques secondes.
- Ilotage de l'unité, si le critère  $i_2^2 t$  dépasse la valeur réglée, avec inhibition de quelques secondes pour les grandes valeurs de  $i_2$ .



- $I_u, I_v, I_w$  courant de phase
- F filtre sommateur et déphaseur
- Re relais à maximum de courant
- S1, S2 sortie du secondaire des TC
- $i_2$  taux de composante inverse de courant ( $i_2 = I_2 / I_1$ )

Figure IV.14. Protection contre l'asymétrie.

Principe de détection

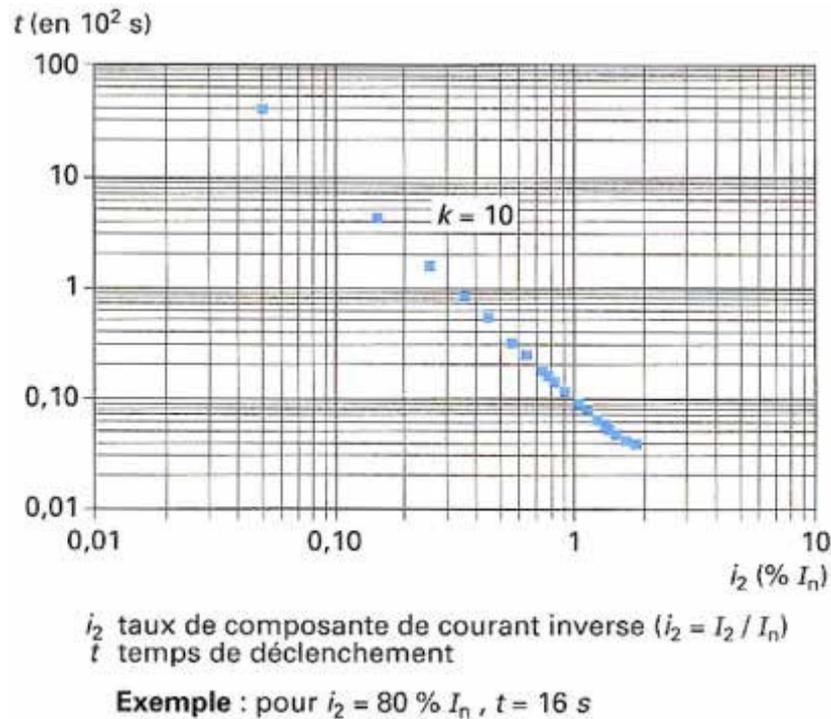


Figure IV.15. Protection contre l'asymétrie. Loi de déclenchement.

#### IV.4.9. Protection contre les pertes d'excitation :

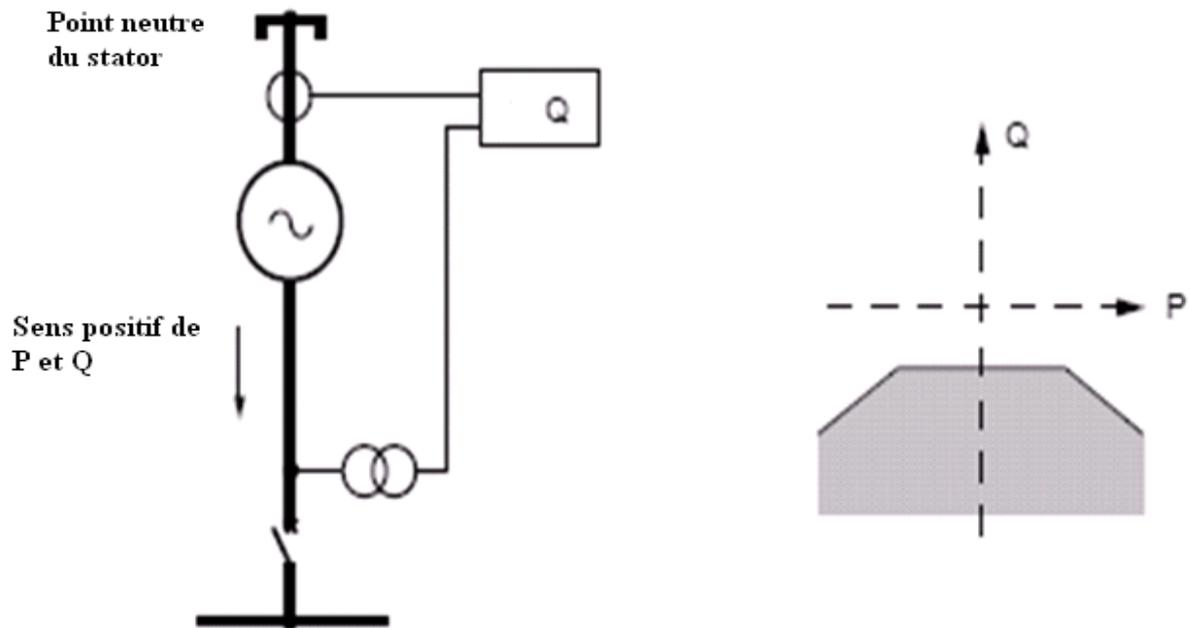
La rupture ou la mise en court-circuit de l'enroulement d'excitation d'un alternateur est un défaut majeur. Il provoque, soit le fonctionnement de l'alternateur en génératrice asynchrone, soit l'arrêt de la conversion d'énergie et l'augmentation de vitesse. Le premier cas se produit si le circuit d'excitation est en court-circuit ou si le rotor est muni d'enroulements amortisseurs ; le régime est stable mais la machine n'est pas dimensionnée pour l'accepter très longtemps. Dans le second cas, le régime est instable et l'arrêt de la machine entrainante doit être commandé au plus vite.

Il est donc nécessaire de surveiller le circuit d'excitation. Malheureusement celui-ci est assez souvent inaccessible, totalement situé au rotor. On utilise alors la mesure de la puissance réactive absorbée par l'alternateur ou la mesure de l'impédance à ses bornes (figure IV.16).

La mesure de la puissance réactive est la plus simple et la plus utilisée pour protéger les alternateurs de moyenne puissance. Elle permet de détecter à l'aide d'un relais directionnel de la puissance réactive toute absorption de puissance réactive, donc un fonctionnement de l'alternateur en génératrice asynchrone. Le seuil de détection doit pouvoir être réglé à une

valeur inférieure à  $S_n$  (puissance apparente nominale de l'alternateur) ; typiquement,  $0,4 S_n$ .

[5]



**Figure IV.16. Protection contre les pertes d'excitation par un relais de retour de puissance réactive.**

#### IV.5. Conclusion :

La continuité d'exploitation et la limitation au strict minimum des conséquences des défauts de tous types sont obtenues par le bon choix des dispositifs de protection et de leur réglage.

### V.1. Introduction :

L'enregistrement et l'analyse graphique des défauts qui se produisent dans la centrale thermique de RAS DJINET se fait par un logiciel appelé « BEN 32 ».

Le BEN 32 ou centre de gestion est le logiciel utilisé pour lire et analyser les enregistrements effectués par les perturbographes des séries BEN D' ELECTRONIC INSTRUMENT. Basé sur un ordinateur personnel, il permet :

- La récupération d'enregistrements à distance par l'interface de communication.
- L'analyse graphique des données (avec agrandissement, mesure...).
- L'impression des données avec disposition.
- L'exécution de plusieurs tâches simultanément (communication, analyse, impression...).

Les enregistrements du perturbographe sont stockés dans la mémoire semi-conducteur du BEN. Pour traiter ces données, le système peut être équipé de différents périphériques :

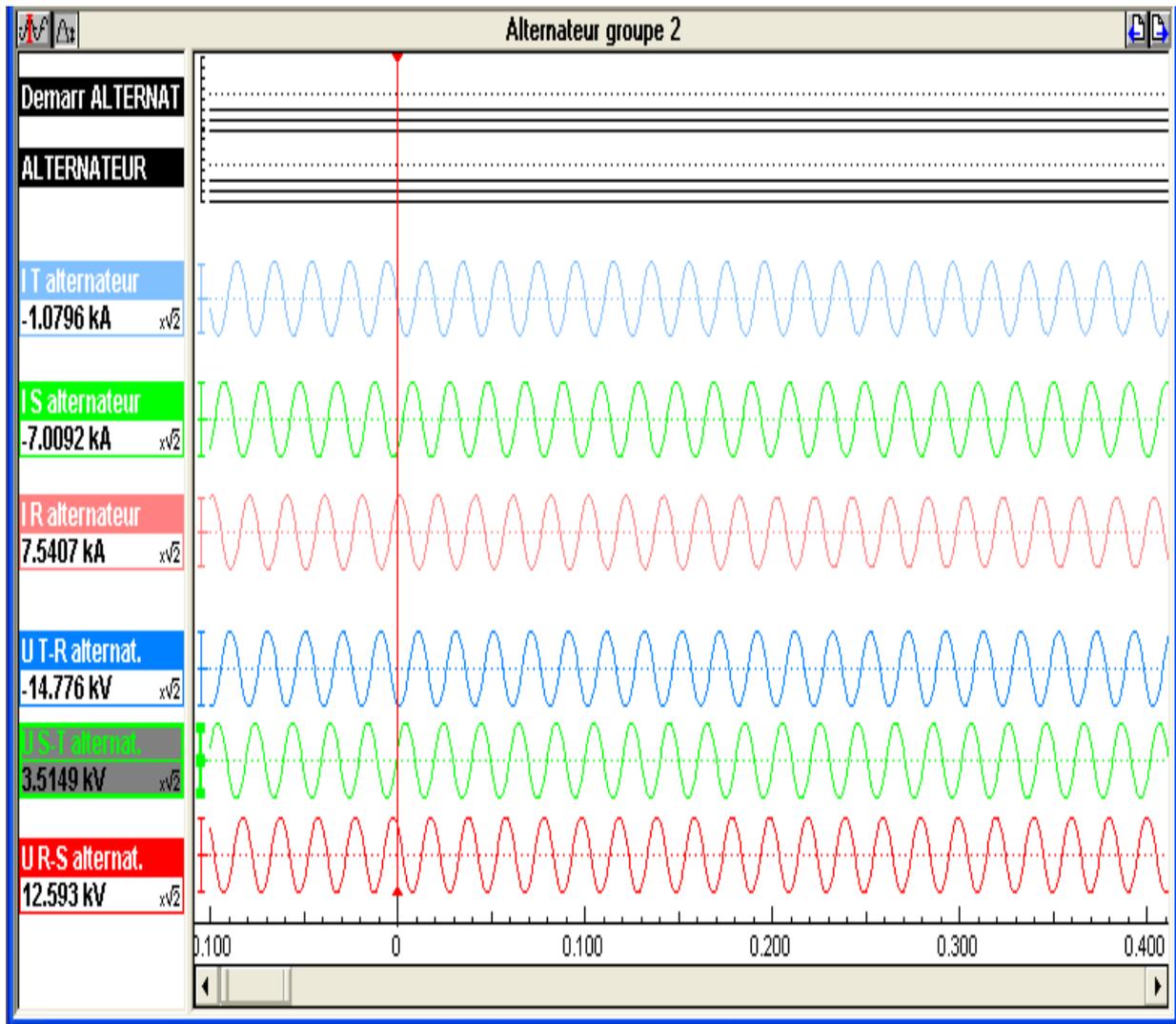
- **Imprimante** : impression alphanumérique et/ou graphe des résultats :
  - Identification du perturbographe.
  - Identification de la date et l'heure de démarrage.
  - Longueur de la pré-faute et de l'enregistrement.
  - Impression de l'échelle de temps.

- **Disque dur** :

Pour augmenter leur mémoire locale à long terme, la plupart des perturbographes des séries BEN peuvent être équipés de disque dur. [1]

### V.2. Fonctionnement normal de l'alternateur :

Au fonctionnement normal de l'alternateur de la centrale de Ras Djinet (sans perturbations), le BEN 32 a enregistré les différents graphes des courants et des tensions dans les trois phases de l'alternateur (figure IV).



**Figure V. 1. État normal de l'alternateur**

### V.2.1. Interprétations des graphes :

La figure V.1 montre que les trois courants de l'alternateur ( $I_T$ ,  $I_S$  et  $I_R$ ) ont une même valeur efficace qui est proche de la valeur de courant nominale  $I_n$  ( $I_T = I_S = I_R \approx 8,20$  kA) avant et après le point zéro, même chose pour les trois tensions composées qui sont égales ( $U_{T-R} = U_{S-T} = U_{R-S} \approx 15,35$  kV) et qui sont aussi proche de la tension nominale  $U_n$ , ce qui signifie l'absence des défauts internes ou externes qui influent sur le fonctionnement normal de cet alternateur.

Le BEN32 peut aussi enregistrer les courants et les tensions dans les différentes phases de l'alternateur sous forme d'un diagramme des phases (diagramme vectoriel) figure V.2.

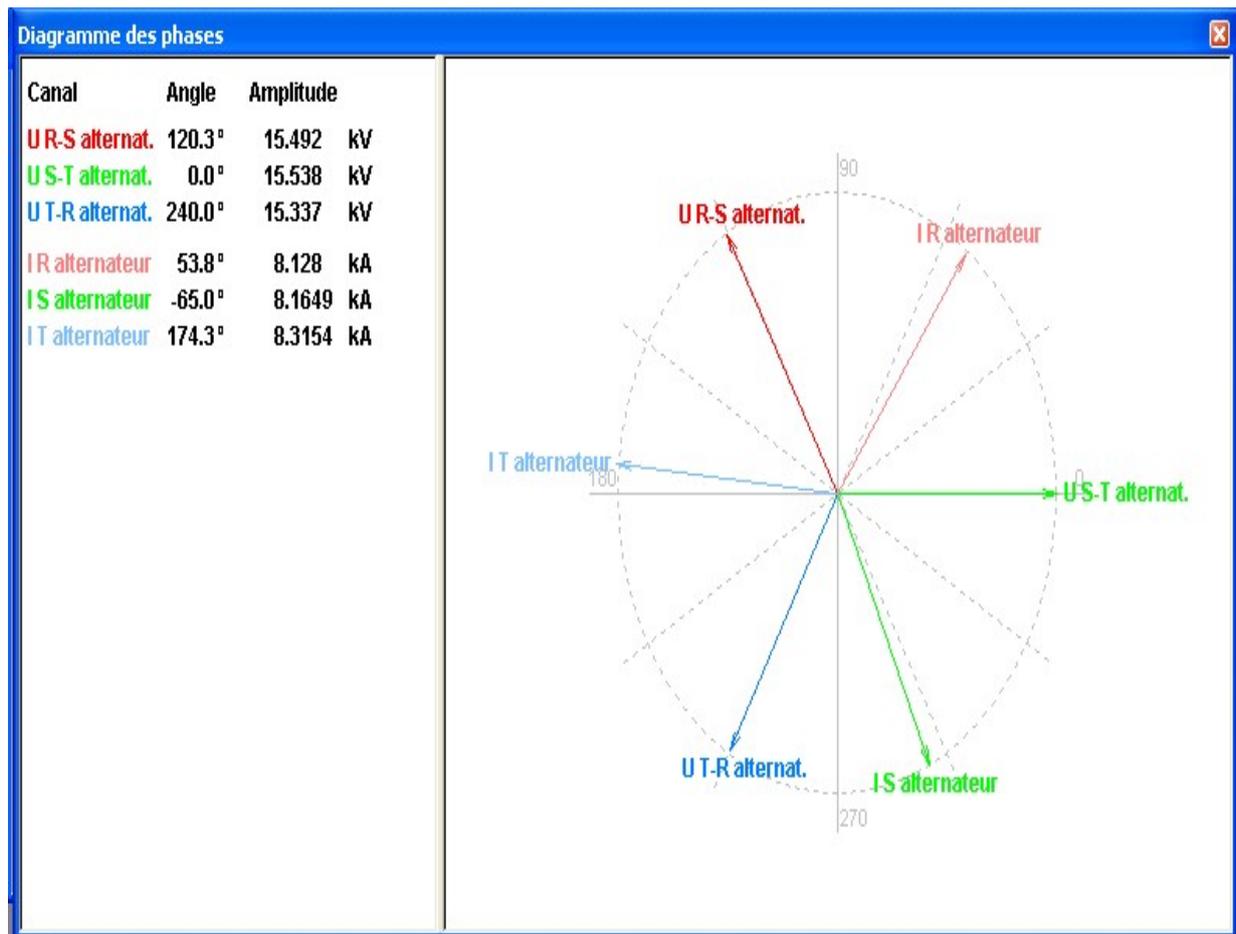


Figure V.2. Diagramme des phases.

### V.3. Fonctionnement anormal de l'alternateur :

Les défauts suivants ont été survenus au niveau de la centrale de Ras-Djinet et enregistrer par le BEN32.

#### V.3.1. Surintensité dans deux phases de l'alternateur :

L'état des courants et des tensions dans les trois phases de l'alternateur sont représentés dans les figures (V.3) et (V.4).

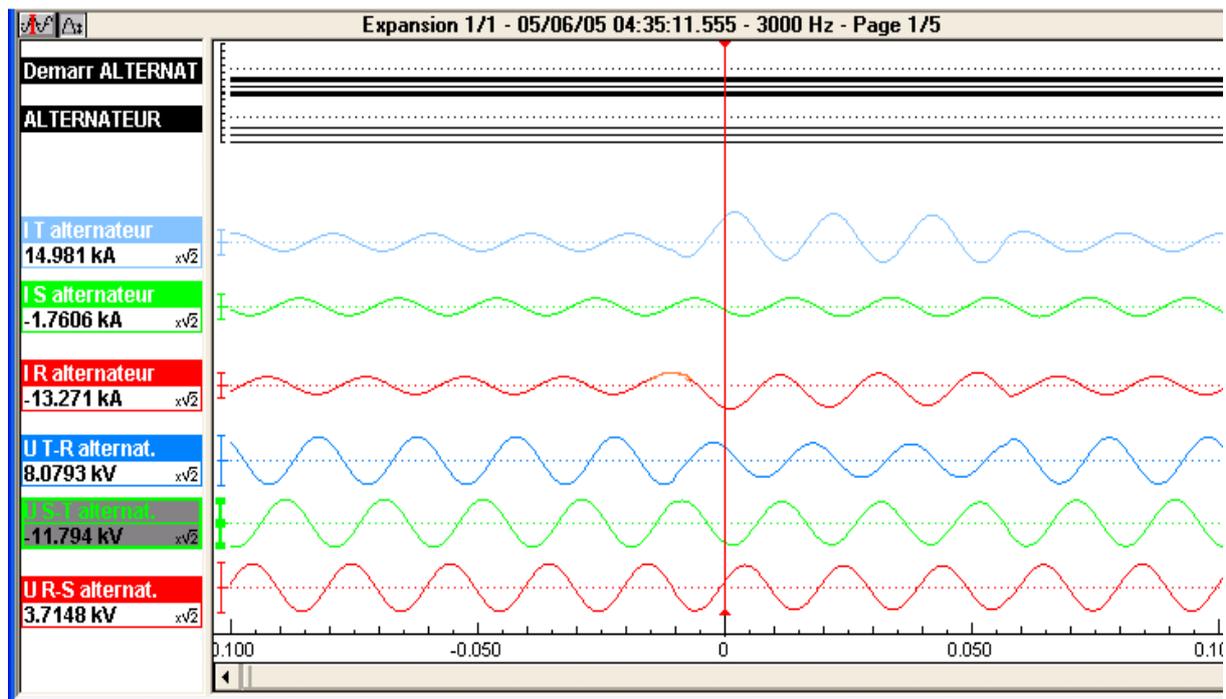


Figure V.3. État anormal de l'alternateur (cas d'une surintensité sur les phases T et R)

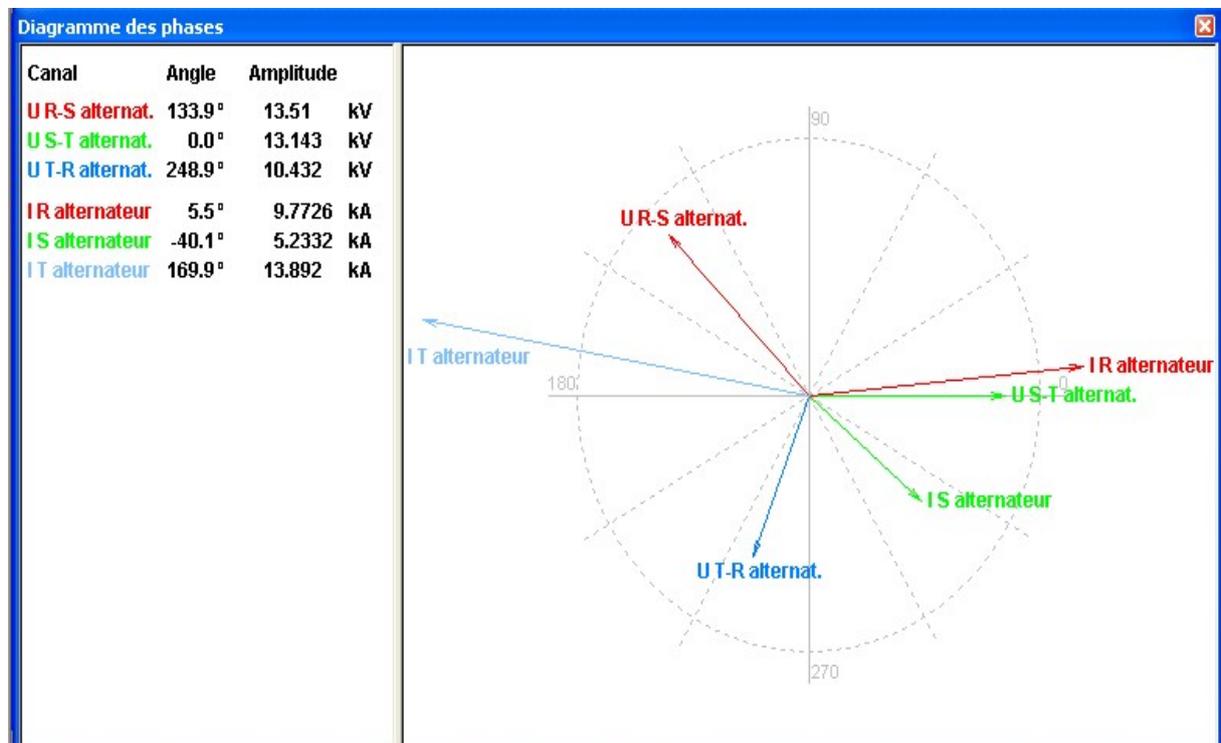


Figure V.4. Diagramme vectoriel

### ❖ Interprétation des graphes :

Les creux de tension dans les deux phases R et T de l'alternateur sont principalement causés par plusieurs phénomènes (surcharge, courts-circuits ...) conduisant à des courants élevés dans les deux phases précédentes. La durée d'un creux de tension est en général conditionnée par les temporisations de fonctionnement des organes de protection (disjoncteur de l'alternateur, disjoncteur d'excitation...).

L'alternateur retrouve son état initial après 70 ms environ sans intervention des protections, ce qui signifie que le défaut est auto-extincteur.

L'apparition des défauts provoque des creux de tensions pour tous les utilisateurs parce que les trois phases de la ligne se comportent exactement comme les trois phases de l'alternateur (figure V.5).

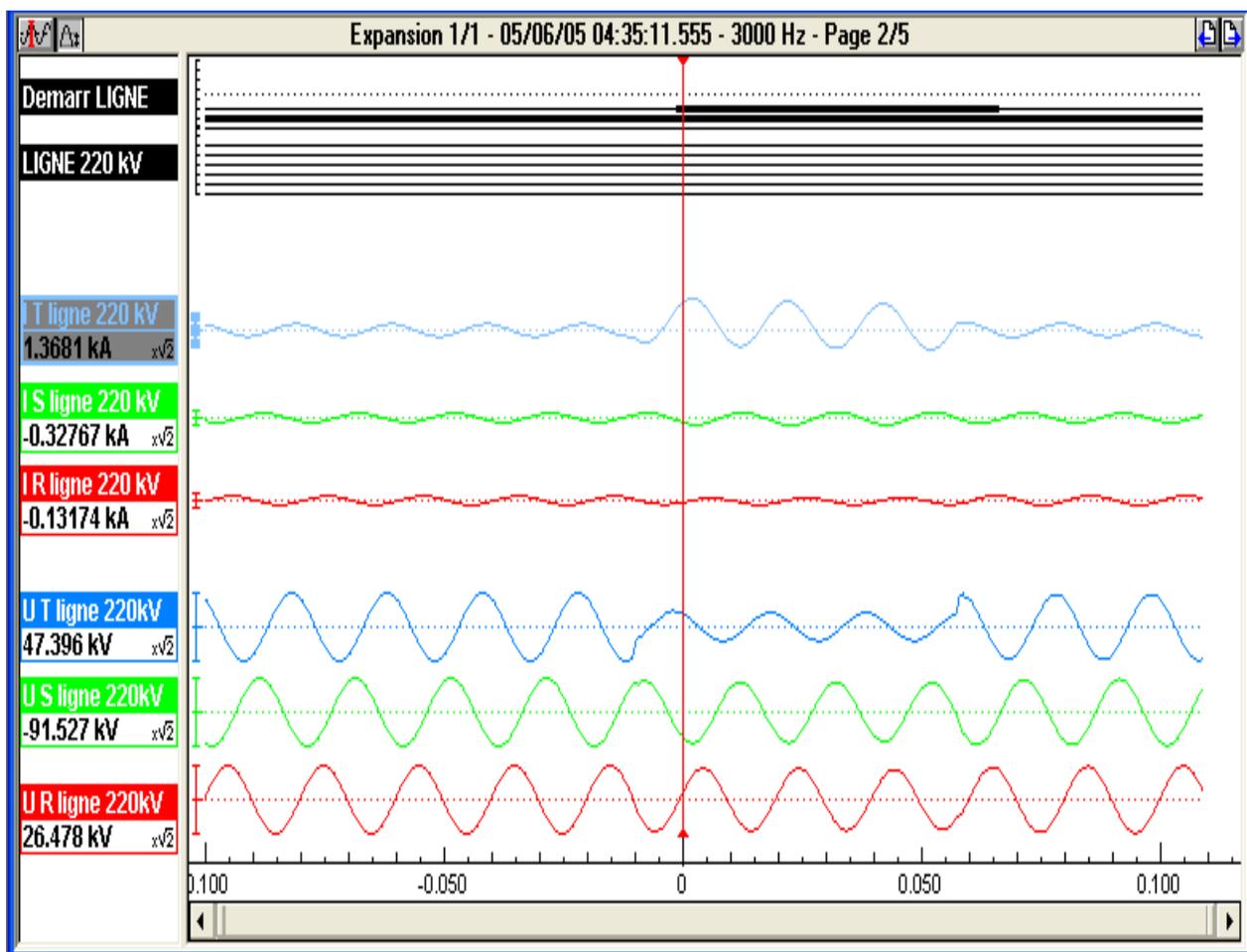


Figure V.5. L'état de la ligne 220kV en cas d'une surintensité.

### V.3.2. Surintensité sur les trois phases de l'alternateur :

L'état des courants et des tensions dans les trois phases de l'alternateur sont représentés dans les figures (V.6 et V.7).

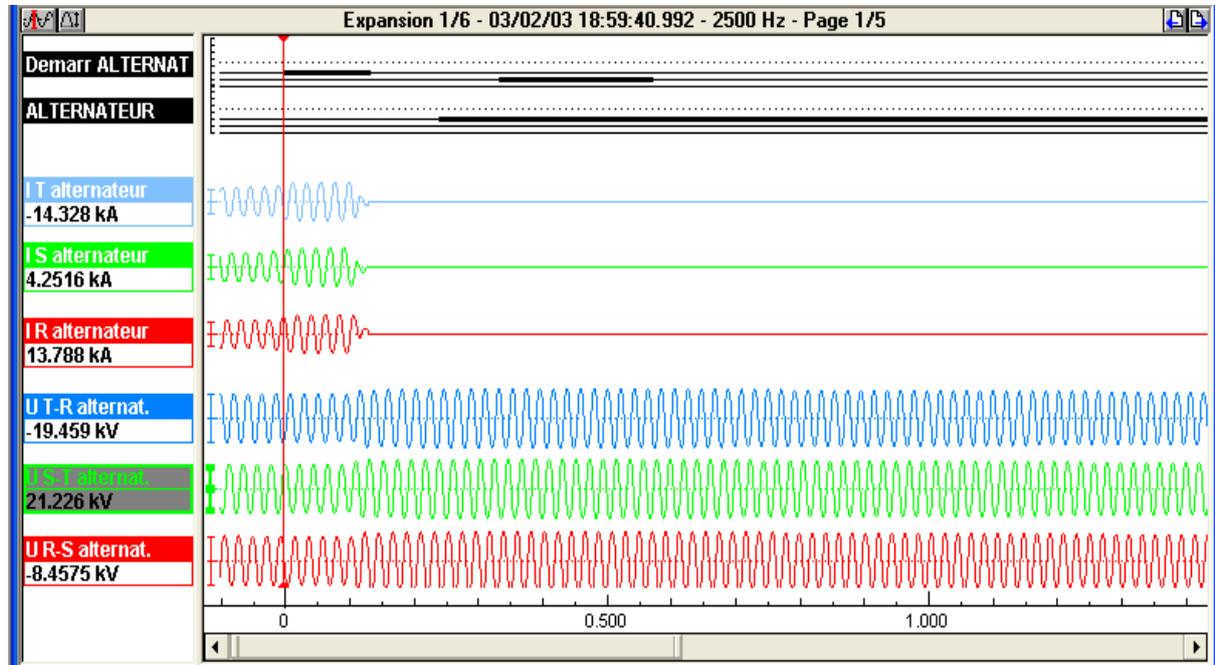


Figure V.6 : surintensité sur les trois phases de l'alternateur.

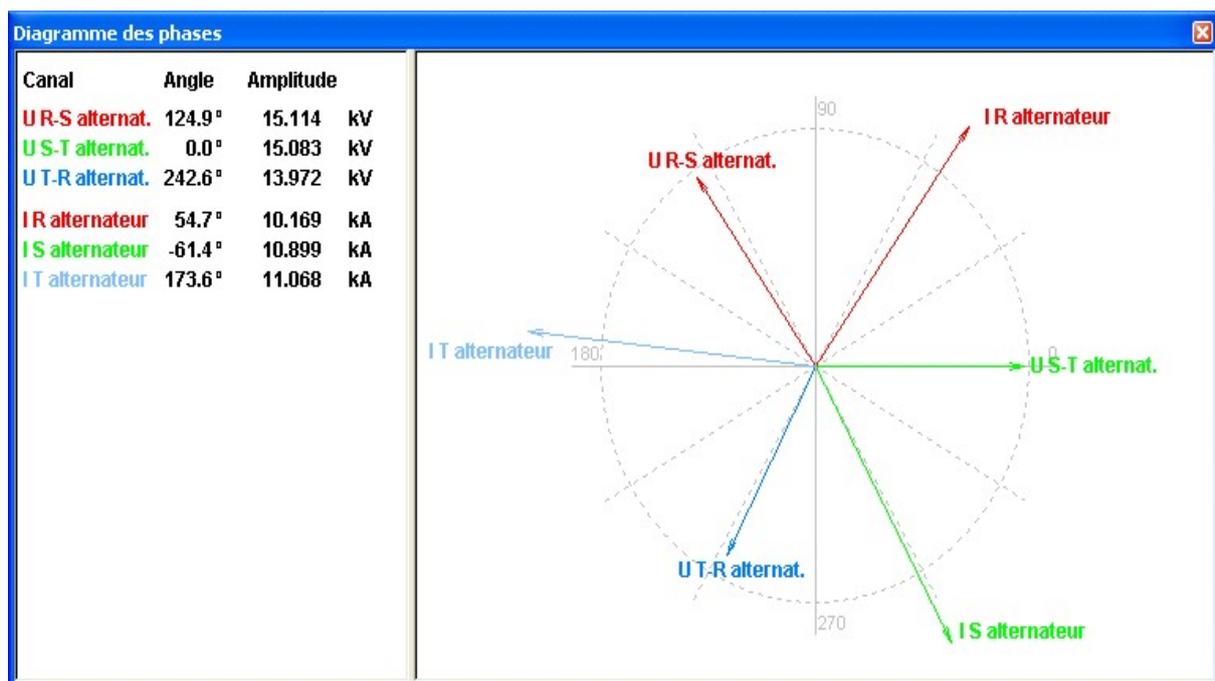


Figure V.7 : diagramme des phases

**Interprétation des graphes :**

On remarque que les courants dans les trois phases de l'alternateur sont augmentés jusqu'à une valeur de 11,5 kA environs ; l'équivalent de 23% par rapport à leur valeur nominale (avant le point zéro). Par conséquent, les trois tensions ont enregistrées une petite diminution pendant la surintensité.

Après 127,2 ms les trois courants s'annule à cause de déclenchement de disjoncteur de l'alternateur qui sépare le réseau de l'alternateur (alternateur à vide).

**V.4.Conclusion**

D'après les interprétations précédentes nous constatons que le ben32 peut enregistrer les différents types de défauts avec tous les détails nécessaires, pour faciliter la tache des opérateurs lors de l'analyse.

## **Conclusion générale**

### **Conclusion générale :**

La conception et le choix des relais de protection des alternateurs répondent au besoin d'élimination rapide des défauts électriques, dans le but de limiter les dégradations apportées à ces machines, sans trop perturber le fonctionnement des équipements qui leur sont raccordés.

Un schéma de protection doit d'être le plus complet possible, en couvrant l'ensemble des défauts probables, tout en gardant à l'esprit le compromis entre l'exhaustivité et le coût de l'équipement de protection. Du point de vue économique, ce compromis prendra en compte, d'une part, le coût de réparation d'un équipement endommagés et, d'autre part, celui de la protection : coût directs (investissement), induits (réducteurs de mesure) et indirects (probabilité de défaillance).

A chaque type de défaillance correspond en général un relais de protection, avec une certaine possibilité de redondance, ou de secours par un autre relais, éventuellement par une action retardée.

La réalisation de ces relais repose maintenant sur des techniques éprouvées dans le relevage statique, ainsi que, plus récemment, dans les techniques de contrôle commande numériques.

## Bibliographie :

- [1] document interne de la centrale thermique de RAS-DJINET. « Siemens »
- [2] DELLILI. S, DROUCHE ; « Etude et protection des auxiliaires électriques - 6,3 kV- d'une tranche de la Centrale de Ras-Djinet » ; mémoire de fin d'étude DEUA ; université de MOULOUD MAMMERI de TIZI OUZOU ; 2001.
- [3] « Centrale thermoélectrique de RAS-DJINET ».  
Brochure de la centrale de RAS-DJINET.
- [4] BOUZID.S, OUBELGACEM.M ; « protection électrique de l'alternateur » ; mémoire de fin de formation ; Ecole technique de Blida.
- [5] Pierre Roccia ; « protection des machine et des réseaux industriels haute tension » ; CT n° 113 ; MERLIN GERIN ; 1985.
- [6] GILBERT RUELLE ; « turboalternateur » ; technique de l'ingénieur D 3530.
- [7] Théodore WILDI, Gilbert SYBILLE ; « ELECTROTECHNIQUE » ; 4<sup>e</sup> édition : de Boeck.
- [8] Francis MILSAT ; « Machine électrique tome III » ; BERTI.
- [9] Mohamed Bachir BENABID ; « Les protections électriques des centrales de production de l'électricité ».
- [10] BIRNARD GUIGUES ; « Protections électriques des alternateurs et moteurs » ; Technique d'ingénieur D 3775.
- [11] Pierre BERTRAND ; « les protections directionnelles » ; CT n° 181 ; MERLIN GERLIN ; Juillet 1996.