

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

Université de Jijel



*Faculté des sciences et de la technologie
Département d'électrotechnique*

Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Option : Electrotechnique industrielle

Thème

**Etude du système de refroidissement de turbo-alternateur
de la centrale de Jijel**

Encadreur: Pr. T. Hacib

Co-Encadreur: M^R. R. Kessasra.

Réalisé par:

- *Kimouche Hocine*
- *Boulassel Brahim*

Juin 2018

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **Allah** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur **Mr. Tarik Hacib, Professeur à l'université de Jijel**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Nos remerciements s'étendent également à notre co-encadreur **Mr. Rachid kessasra, Chef de service de production à la centrale de Jijel**, pour ses bonnes explications qui nous ont éclairé le chemin de la recherche et sa collaboration avec nous dans l'accomplissement de ce modeste travail.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail de Master.

Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Nous remercions aussi tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

*Nous dédions ce travail, Nos parents qui ont
sacrifié leur vie pour nous avons réussi et pour
les encourager. Que dieu
les garde éternellement heureux. A toute la
famille Kimouche, Boulassel, A tout nos amis et
nos collègues, et à tous ceux qui
aidé nous à le réaliser*

*Kimouche Hocine
Boulassel Brahime*

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Centrale électrique de Jijel : présentation et fonctionnement du turbo-alternateur.	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Centrale électrique de Jijel.....	3
I.3. Constitution de turbo-alternateur	5
I.3.1. Stator (Induit).....	5
I.3.2. Encoches et enroulement du stator	6
I.3.3. Rotor	7
I.3.4. Système d'excitation.....	8
I.3.4.1. .Rôle du système d'excitation	9
I.3.4.2. Dispositif porte balais	9
I.3.5. Paliers.....	10
I.3.6. Carcasse	11
I.3.7. Systèmes auxiliaires.....	12
I.4. Fonctionnement.....	12
I.5. Caractéristiques du turbo-alternateur	13
Conclusion.....	14
Chapitre II : Modes de refroidissement dans les turbo-alternateurs.	
II.1. Introduction	15
II.2. Echauffements de l'alternateur	15
II.2.1. Perte d'excitation.....	15
II.2.2. surcharges	15
II.2.3. Le court-circuit interne entre phase	16
II.2.4. Le court-circuit interne entre phase et terre.....	16
II.2.5. Echauffement anormal de toute la machine	16
II.2.6. Fréquence très élevé ou très faible	16
II.2.7. Rupture des conducteurs.....	16

II.3. Refroidissement	16
II.3.1. Refroidissement stator	16
II.3.2. Principe de fonctionnement de circuit SS refroidissement par l'eau de stator	18
II.3.3. Avantage de refroidissement par l'eau distillé	21
II.3.4. Refroidissement du rotor	21
II.3.4.1. Caractéristiques de l'hydrogène	21
II.3.4.2. Eléments constitutifs du système de refroidissement d'hydrogène	22
a. Collecteur de gaz.....	22
b. Poste de contrôle de gaz	23
c. Sécheur d'hydrogène	23
d. Pureté d'hydrogène	23
II.3.4.3. Principe de fonctionnement de circuit de refroidissement par hydrogène.....	24
II.3.5. avantage de refroidissement par l'hydrogène	28
II.4. Types de refroidissement des turbo-alternateurs	29
II.4.1. Refroidissement indirecte de l'enroulement du stator	29
II.4.2. Refroidissement direct de l'enroulement stator.....	29
II.4.2.1. Refroidissement direct gazeux.....	29
II.4.2.2. Refroidissement direct par liquide.....	30
II.4.3. Refroidissement direct de l'enroulement rotor.....	32

Chapitre III : Modélisation thermique des machines électriques.

III.1. Introduction	34
III.2. Effets de la chaleur et les causes de défaillance.....	34
III.3. Pertes dans les machines tournantes.....	35
III.3.1. Pertes Joule.....	35
III.3.2. Pertes fer.....	35
III.3.2.1. Pertes dans le circuit magnétique (par hystérésis).....	36
III.3.2.2. Pertes par courant de Foucault	36
III.3.3. Pertes mécaniques	37
III.3.3.1. Pertes par frottement dans les roulements	37
III.4. Problématique.....	38

III.5. Méthodes de modélisation thermique	38
III.5.1. Méthodes analytiques.....	39
III.5.2. Méthodes numériques	39
III.6. Présentation de la méthode nodale	40
III.6.1. Principes de la méthode	41
III.6.2. Expression des conductances et bilan d'énergie.....	42
III.6.2.1. Expression des conductances	42
III.6.2.2. Bilan d'énergie.....	45
Conclusion.....	46

Chapitre IV : Etude du comportement thermique de l'alternateur, simulation et expérimentation

IV.1. Introduction.....	47
IV.2. Modélisation thermique de l'alternateur	47
IV.2.1. Présentation du logiciel Motor-CAD	47
IV.2.2. Mise en œuvre de la méthode nodale par Motor-CAD.....	50
IV.2.2.1. Modèle thermique en régime permanent.....	51
IV.2.2.2. Modèle thermique en régime transitoire.....	52
IV.3. Etude du comportement thermique expérimental de l'alternateur	53
IV.3.1. Détermination de la température du rotor	53
IV.3.1.1. Discussion et interprétation des résultats	55
IV.3.2. Température du noyau de stator.....	56
IV.3.2.1. Discussion et interprétation des résultats	57
IV.3.3. Caractéristique de réglage de l'alternateur	57
IV.3.3.1. Discussion et interprétation des résultats	58
IV.3.4. Température de l'enroulement du stator (barres statoriques)	58
IV.3.4.1. Discussion et interprétation des résultats	60
Conclusion.....	60
Conclusion générale	62

Introduction générale

Introduction générale

Une machine électrique tournante est le siège de dissipations de différentes origines. Elles sont largement distribuées dans sa structure et, plus rarement, dans le fluide de refroidissement lui-même (machine à grande vitesse de rotation). Le dimensionnement thermique d'une machine électrique, c'est-à-dire le calcul du champ de température et la détermination des voies d'évacuation de la chaleur, fait appel à des lois générales et à des relations particulières que cet article vise à synthétiser.

Cependant, Le vieillissement d'une isolation est fonction de la température qu'elle atteint en service et de la durée pendant laquelle elle y est soumise. En conséquence les spécifications devront porter sur la valeur maximale de la température de l'isolation, cette valeur étant fonction de la nature de l'isolant utilisé et des conditions d'exploitation de la machine.

Un refroidissement forcé est indispensable à cause des fortes densités de pertes qui sont nécessaires pour faire un usage économique des matériaux magnétiques et électriques du générateur. Les zones les plus critiques dans la machine sont les enroulements, et particulièrement l'enroulement du rotor. On sait que l'espérance de vie d'un système d'isolation décroît rapidement si la température de fonctionnement excède les valeurs recommandées

Bien que des considérations relatives aux conditions d'évacuation de la chaleur et de localisation des pertes permettent de préjuger cette position et de disposer en conséquence des sondes au voisinage de l'emplacement présumé, il demeure néanmoins une incertitude.

C'est pourquoi on utilisera toujours une mesure de la température moyenne de l'enroulement, même lorsque les sondes seront placées dans la machine. De telles expérimentations ont été réalisées ces dernières années. Elles ont permis de fixer l'ordre de grandeur de la correction à faire intervenir sur la température indiquée par une sonde entre

sections pour atteindre la température du conducteur et ceci, en fonction des caractéristiques de l'isolation.

L'objectif de ce mémoire est l'étude du comportement thermique du turbo-alternateur de la centrale thermique de Jijel, et ça sur les deux cotés simulation et expérimentation. Ce manuscrit est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre fait l'objet d'une présentation de la centrale électrique de Jijel ainsi que de son turbo-alternateur. Après une description de ses différents ensembles, la problématique de notre projet d'élaboration d'un modèle de simulation pour le refroidissement est posé.

Le deuxième chapitre donne un aperçu sur les modes de refroidissement dans les turbo-alternateurs. Premièrement, on commence par un rappel sur les différentes contraintes thermiques qui peuvent survenir dans les turbo-alternateurs. Ensuite, les différentes techniques de refroidissements à partir des caractéristiques de l'hydrogène et de l'eau distillé vont être discutées.

Dans le troisième chapitre, après des rappels sur les différentes pertes, les effets de la chaleur et les causes de défaillance dans les machines électriques, la méthode nodale qui constitue une variante des modèles de type circuit thermique va être décrite dans un contexte général.

La mise en œuvre de cette méthode à l'aide d'un logiciel de modélisation thermique spécialisé fait l'objet du quatrième chapitre. Tout d'abord, on présente dans une première partie, les résultats de simulation issus de la mise en œuvre de la méthode nodale sous l'environnement Motor-CAD. Dans une seconde partie on s'intéresse à l'étude du comportement thermique de l'alternateur de la centrale de Jijel sur le plan expérimental.

En fin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

**Centrale électrique de Jijel:
présentation et fonctionnement du
turbo-alternateur**

Chapitre I

Centrale électrique de Jijel: présentation et fonctionnement du turbo-alternateur

I.1. Introduction

Une centrale de production d'énergie est un site industriel destiné à la production d'énergie (électricité, chaleur,...etc). Elle transforme différentes sources d'énergie naturelles en énergie intermédiaire, puis utile. On distingue plusieurs moyens de production d'énergie (renouvelables ou non renouvelables): centrales thermiques, hydrauliques, solaires photovoltaïques et thermiques, éoliennes,...etc.

Dans notre cas nous allons nous intéresser à la production d'énergie électrique par turboalternateurs de centrales thermiques à vapeur.

Les turbo-alternateurs sont des alternateurs entraînés à grande vitesse de rotation par une turbine à vapeur ou une turbine à gaz (plus souvent appelée turbine à combustion). Ils sont constitués de pôles lisses (encoches usinées par fraisage) et non de pôles saillants.

Ce chapitre sera consacré à la présentation des différents composants et à l'exposition de la démarche de fonctionnement du turbo-alternateur de la centrale thermique à vapeur de Jijel. Ce turbo-alternateur est conçu pour fonctionner dans les conditions du climat humide tropical, étant installé directement dans la salle des machines.

I.2. Centrale électrique de Jijel

Pour satisfaire la demande en énergie électrique à l'est du pays. La SONALGAZ a entrepris pour réaliser un projet de construction d'une centrale thermique pour couvrir le manque d'énergie électrique. Le déroulement des travaux de construction a été lancé en 1984, les études, la fourniture des équipements, les travaux de montage, les travaux de mise au point et des mise en service et les essais de garantie de l'équipement de l'installation de la centrale font partie du volume des travaux réalisés par la société Russe (**TECHNOPROMEXPORT**).

La centrale thermique de Jijel est située à l'Est du pays à 210 km à vol d'oiseau du capital, au bord de la mer méditerranée, elle est implantée à 12 km à l'Est de chef lieu de wilaya à proximité du port de DJENDJEN, de l'aéroport FARHAT ABBAS et de la route nationale 43.

Elle s'étend sur une superficie de 36 Hectares. La centrale thermique est composée principalement de trois groupes, chacun est constitué des équipements suivants :

- une chaudière (générateur de vapeur),
- une turbine (transmetteur de l'énergie thermique cinétique en énergie mécanique),
- un alternateur d'une puissance unitaire de 210 MW,
- un condenseur (qui ferme le cycle thermodynamique),
- une salle de commande principale et les auxiliaires généraux (communs pour les trois groupes).



Figure I.1. Site de la centrale thermique de Jijel.

Le principe de fonctionnement se base sur l'échauffement de l'eau pour la transformé en vapeur c'est le principe de la cocotte minute, la force de cette vapeur entraine une turbine dans la rotation va permettre la production de l'énergie électrique.

Tout d'abord pour chauffé l'eau on installe plusieurs brûleurs dans une chaudière, la flamme de brûleur alimentée par un combustible (le gaz), la chaudière est apaisée de plusieurs des tubes, l'eau est chauffée à haute température puis est dirigée vers un ballon où elle se transforme en vapeur, la vapeur est ensuite envoyée sous pression vers la turbine qui va être mise en mouvement, la turbine est couplée à l'alternateur qui génère l'électricité par rotation de rotor à l'intérieur de stator; l'énergie produite est évacuée vers le réseau d'électricité par l'intermédiaire

d'un transformateur, on sort de la turbine la vapeur est alors dirigée vers le condenseur dans laquelle circule de l'eau froide qui permet de retransformer la vapeur en eau.

I.3. Constitution de turbo-alternateur

Le turbo-alternateur de la centrale thermique à vapeur de Jijel est un turboalternateur synchrone triphasé de type TIB-200-MT3 refroidie à l'hydrogène et à l'eau de 210000 KW de puissance à fréquence de rotation de 3000 tr/min. Il est conçu pour la production de l'énergie électrique en association avec une turbine à vapeur dont la puissance est de 210000 KW.

Le turbo-alternateur est réalisé conformément aux normes exigées par l'Union des Républiques socialistes soviétiques (l'ex URSS) et les recommandations de la Commission d'Electrotechnique Internationale (CEI).

D'une façon générale un turbo-alternateur de puissance est composé des éléments suivants :

1. Le stator
2. Les encoches et les enroulements du stator
3. Le rotor
4. Le système d'excitation
5. Les paliers
6. La carcasse
7. Les systèmes auxiliaires

I.3.1. Stator (Induit)

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

Le champ magnétique tournant des alternateurs de grande puissance est établi par la circulation d'un courant dans les enroulements des pièces polaires. La densité du champ magnétique étant un des facteurs déterminants de la valeur de la tension induite et sur lequel on peut agir, on s'en servira pour faire varier la tension aux bornes de l'alternateur.

L'enroulement statique est généralement logé dans des encoches pratiquées dans le stator. Ces encoches contiennent des barres composées d'un ensemble de brins en cuivre transposés suivant le procédé Reubel (Voir les figures ci-après). Le niveau des puissances élevées de certaines machines entraîne des contraintes liées aux efforts électrodynamiques [1].



Figure I.2. Stator du turbo-alternateur.

I.3.2. Encoches et enroulement du stator

Le stator du turbo-alternateur contient 30 encoches ouvertes. L'enroulement du stator est en barres à deux couches du type en panier, donc il y a 60 barres. Le système de courant (ou tension) triphasé est constitué de trois courants (ou tensions) disposés à 120° les uns des autres, avec six sorties (3 sorties de phase et 3 sorties neutres). Les bornes de sortie côté neutre seront réalisées par un cloisonnement. Les bornes de sortie côté phase seront séparées par des cloisonnements individuels et auront les caractéristiques correspondant aux conditions d'installation et de service (Humidité et condensation éventuelles à l'arrêt, température de marche). Le montage de l'enroulement est imbriqué, et le nombre de paire de pôle égale à un, avec un pas de douze. Pour une conception identique de la construction de la tête de bobine, l'agrandissement du diamètre provoque une diminution de la fréquence propre des vibrations à quatre nœuds. Celle-ci peut alors se rapprocher de la fréquence double du courant statorique qui provoque les vibrations [2].

Les enroulements du stator sont fabriqués en fils de cuivre. Chaque spire de fil est isolée des autres spires.



Figure I.3. Enroulement du turboalternateur



Figure I.4. Encoches du turboalternateur

I.3.3. Rotor

Le rotor est réalisé d'une seule pièce forgée en acier. Pour contrôler le matériau, la pièce forgée est munie d'un trou axial longitudinal qui sert de support pour les barres d'amenée de courant à partir de l'enroulement rotor vers les bagues collectrices. Il est alimenté par un courant continu (DC) et c'est lui qui crée un champ magnétique tournant dans l'entrefer [3].

Le corps du rotor possède des encoches qui reçoivent un enroulement d'excitation. L'enroulement rotorique est composé de conducteur en forme d'auge. Deux conducteurs de ce type raccordés par paire forment un canal de circulation du gaz de réfrigération. Les conducteurs sont réalisés en cuivre de résistance mécanique élevée avec addition de l'argent.

L'isolation par rapport à la masse est assurée par un manchon en stratifié à fibre de verre et l'isolation entre spires par des joints en stratifié à fibre de verre.

L'isolement sous frette des têtes est réalisé au moyen de segment en tissu de verre imprégné sous pression avec traitement consécutif dans un four. L'enroulement rotorique est fixé par des cales en duralumin.

Les frettes de rotor, forgées d'une seule pièce d'acier amagnétique, sont emmanchées à chaud sur le corps du rotor et y sont fixées par des clavettes.

Les bagues collectrices sont emmanchées à chaud sur la douille intermédiaire isolée par rapport aux bagues ; les bagues sont placées au-delà du palier dans un boîtier spécial qui comporte le dispositif porte-balais.

Le rotor du turbo-alternateur tourne dans le sens d'horloge vu côté turbine.

La figure I.5 montre une vue générale du rotor du turbo-alternateur.



Figure I.5. Rotor du turbo-alternateur.

Le rotor porte à ces extrémités un **ventilateur** (Figure I.6) coté turbine et un **compresseur** coté excitation (Figure I.7) ainsi qu'un **diffuseur**. Le rôle de ce dernier est d'assurer une bonne circulation d'hydrogène et un bon refroidissement à l'intérieur de la génératrice.



Figure I.6. Ventilateur sans pales (Coté turbine).



Figure I.7. Compresseur.

I.3.4. Système d'excitation

Le courant continu exigé pour les électro-aimants ou pôles, provient ordinairement de générateurs à courant continu, en passant par deux bagues collectrices montées sur l'arbre de l'alternateur. Le circuit destiné à fournir ce courant continu se nomme circuit d'excitation. Le système d'excitation permet d'alimenter le rotor en courant continu d'excitation. Le contrôle de ce courant permet de réguler la tension de sortie de la machine. Le circuit d'excitation composé du :

- Transformateur d'excitation et du transformateur série ;
- Pont redresseur de service ;
- Pont redresseur de forçage ;
- Disjoncteur d'excitation de service ;
- Disjoncteur d'excitation de réserve ;
- Disjoncteur d'excitation de désexcitation ;
- Régulateur automatique de tension AVM.

1.3.4.1. Rôle du système d'excitation

Parmi les services qui assure par le système d'excitation :

1. Démarrage, excitation préalable et couplage sur le réseau par synchronisation précise.
2. Auto synchronisation en régime perturbé du réseau.
3. Marche à vide et fonctionnement dans le réseau, régime de service restant dans les limites du diagramme de puissance du turbo alternateur.
4. Désexcitation de l'alternateur sous l'effet des protections.
5. Fonctionnement en régime de sous excitation admissible par l'alternateur.
6. Passage de l'excitation de service à celle de secours et vis versa.
7. Commande automatique ou manuelle du système d'excitation.
8. Forçage de l'excitation en régime automatique en cas de perturbation du réseau.
9. Limitation du courant d'excitation au double de sa valeur nominale, ainsi que la limitation de la surintensité d'excitation en tenant compte de la caractéristique d'échauffement de l'alternateur.
10. Limitation du courant d'excitation minimal au seuil de fonctionnement qui dépend de la valeur de la puissance active.

1.3.4.2. Dispositif porte balais

Il est destiné à l'amenée du courant vers l'enroulement du rotor (Figure I.10). Le principe de l'excitation est le même que celui d'un alternateur de petite puissance [4].



Figure I.8. Bagues collectrices.

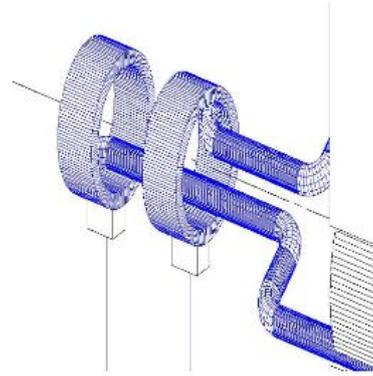


Figure I.9. Connexion des bagues collectrices à l'intérieur du rotor.



Figure I.10. Dispositif porte balais.

I.3.5. Paliers

Les paliers de l'alternateur se composent d'un coussinet et d'une chape. Les coussinets de paliers sont moulés en fonte avec réglage, la surface de travail du régule des coussinets est réalisées sous l'aspect d'un alésage "en citron".

La pose des coussinets dans les flasques est exécutée à l'aide de chapes. La chape coté bagues collectrices est isolée électriquement par rapport au corps [5].

La lubrification des paliers est forcée sous pression en provenance du system de graissage de la turbine. Afin d'effectuer le contrôle visuel de l'écoulement d'huile, le système est équipé de tubulures de contrôle d'huile.



Figure I.11. Sabot.



Figure I.12. Palier.

I.3.6. Carcasse

Elle comporte souvent un ensemble de châssis transversaux, raccordés mutuellement par des tuyaux, des poutres et des nervures. Généralement, la carcasse du stator est conçu pour :

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

La carcasse assure ainsi deux rôles :

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

Sur le dessus de la carcasse du stator se fixent les caissons des réfrigérants de gaz. Après l'installation du turbo-alternateur dans la centrale, ces caissons doivent être rapportés par soudure sur la carcasse du stator de manière à assurer l'étanchéité au gaz [1] [6] [7] .



Figure I.13. Carcasse du turboalternateur.

I.3.7. Systèmes auxiliaires

Ils assurent le bon fonctionnement de l'alternateur. Sur les très grosses machines on trouve :

- Un système de réfrigération d'hydrogène : il assure le refroidissement de l'hydrogène sous pression, indispensable à la réfrigération du rotor et du stator.
- Un système d'huile d'étanchéité : il a comme fonction d'assurer l'étanchéité indispensable de la carcasse alternateur au niveau des liaisons entre les parties fixes (carcasse) et la partie tournante (rotor). Cette étanchéité est indispensable du fait que l'hydrogène est sous pression.
- Un système de refroidissement du stator par eau: il permet l'évacuation des pertes des barres statorique par circulation d'eau directement dans les conducteurs. Sur les machines hydraulique et les petites machines en général, le refroidissement est assuré par de l'air.

I.4. Fonctionnement

Le principe d'induction magnétique est généralement expérimenté en déplaçant un aimant permanent dans une bobine. Une tension se crée aux bornes de la bobine. Un alternateur fonctionne selon ce principe : un électroaimant, alimenté par un courant d'excitation, est en rotation à l'intérieur de trois bobines : il produit ainsi trois tensions triphasées alternatives décalées de 120° [8].

L'énergie produite par le turbo-alternateur est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'électroaimant et à sa puissance, qui elle-même est proportionnelle au courant d'excitation.

Un alternateur est un générateur triphasé dont le courant est redressé puis filtré pour générer un courant continu. A chaque rotation du rotor trois tensions alternatives déphasées de 120° sont créées. Ces trois tensions sont ensuite couplées via un pont de diodes pour récupérer les alternances positive et négative en tension positive.

I.5. Caractéristiques du turbo-alternateur

La centrale thermique de Jijel est menée de trois turbo-alternateurs de puissance unitaire de 210 MW, qui sont fabriqués en Russie. Ces turbo-alternateurs sont de type TTB-200MT3, de puissance de 247Mvar et d'un facteur de puissance 0,85. Chaque turbo-alternateur tourne par une vitesse de rotation de 3000 tr/min, avec un mode de couplage étoile, un rendement de 98,45%, qui génère une tension statorique de 15,75 KV et un courant de 9060 A à une fréquence de 50 Hz à partir d'une tension d'excitation de 450 V et un courant de 1940 A avec un Type de refroidissement : Hydrogène - Eau.

La figure ci-dessous représente la plaque signalétique du turbo-alternateur TIB-200-MT3 de la centrale thermique de Jijel.



Figure I.14. Plaque signalétique du TIB-200-MT3

(Centrale thermique de Jijel)

Ci-dessous les caractéristiques du turbo-alternateur qui sont regroupées dans sa plaque signalétique.

1. Type de moteur : les moteurs sont normalisés par type en fonction de leur puissance et de leur vitesse de rotation.
2. Numéro de série.
3. Stator triphasé qui fournit une puissance de 247 MVA avec un $\cos \varphi=0,85$, une tension $V=15,75$ KV, un courant $A=9060$ A et une fréquence $f=50$ Hz avec un couplage de type étoile.
4. Rotor excité par une tension $V=450$ V et un courant $I=1840$ A qui tourne par une vitesse de rotation de 3000 tr/min.
5. Température de l'eau de refroidissement de gaz est égale à 27° .
6. Température d'hydrogène est égale à 40° .
7. Température de l'eau de l'enroulement du stator est égale à 40° .
8. Débit d'eau de refroidissement de gaz est égale à 400 m³/h.
9. Pression de l'hydrogène nominale est égale à 3 bar.
10. TOCT c'est la norme au quelle il est soumis le turbo-alternateur.
11. Masse du stator est de 174000 Kg.
12. Masse du rotor est de 48100 Kg.
13. Masse de l'alternateur est de 246000 Kg.
14. Classe d'isolation B/F.
15. Constructeur Russe (l'ex URSS).

Conclusion

Le turbo-alternateur de la centrale thermique de Jijel (TIB-200-MT3) est constituée de deux parties essentielles la partie statorique et rotorique. Ces deux parties regroupent des organes électriques tel que les conducteurs, des organes magnétiques ou circuits magnétiques, et finalement des organes mécaniques tel que les ventilateurs, l'arbre avec le rotor et les flasques.

Pour une utilisation rationnelle du turbo-alternateur on a décrit ses différents ensembles ce qui va nous aider pour faire l'étude thermique de ce turbo-alternateur est entamer la problématique de notre projet d'élaboration d'un modèle de simulation pour le refroidissement de l'alternateur.

Chapitre II

Modes de refroidissement dans les turbo-alternateurs

Chapitre II

Modes de refroidissement dans les turbo-alternateurs

II.1. Introduction

La dégradation des propriétés physiques des isolations et la température produit à la transformation de chaleur, jouent le rôle de contrainte indésirable dans l'enroulement de la machine surtout dans celui du rotor, qui provoque des chutes de performances de l'alternateur. Pour éviter ces problèmes la seule solution est la meilleure exploitation du système de refroidissement pour faire un usage économique des matériaux magnétiques et électriques du générateur.

Le rôle du système de refroidissement est l'évacuation de calories basées sur l'utilisation de fluides caloporteurs (l'air ou hydrogène) circulants dans le stator, dans le rotor ainsi que dans les conducteurs statoriques. Ceci va faire l'objet de ce chapitre.

II.2. Echauffements de l'alternateur

L'évacuation des différentes sources de chaleur dans une machine électrique s'effectue pendant le produit des différents phénomènes et pertes de types suivants [9] [10].

II.2.1. Perte d'excitation

Si le travail de l'alternateur en régime asynchrone est admissible selon les conditions du système énergétique, à la perte d'excitation il faut ouvrir le dispositif automatique de désexcitation avec un couplage shunt de l'enroulement du rotor par la résistance d'excitation et réduire la charge active pendant 30 seconde jusqu'à 60% de la valeur nominale.

II.2.2. surcharges

En courant statorique et rotorique, se produisant en cas de court-circuit dans les réseaux à la perte d'excitation (en courant statorique) et à d'autre régime anormaux.

II.2.3. Le court-circuit interne entre phase

C'est une grandeur qui semble indépendante des défauts de la machine. Même si des courants importants et riches en harmoniques circulent à l'intérieur des phases, les courants de phase ne sont pas affectés.

II.2.4. Le court-circuit interne entre phase et terre

L'importance de courant de défaut est fonction de la manière dont le neutre du système est relié à la terre.

Il est possible de contrôler le niveau du courant de défaut vers la terre en interposant des impédances.

II.2.5. Echauffement anormal de toute la machine

Le stator dissipe aussi plus d'énergie que le rotor ou bien l'alternateur est plus excité.

II.2.6. Fréquence très élevé ou très faible

La variation de fréquence liée à des variations de consommation. Lorsque la consommation augmente, la turbine de l'alternateur ralentit. Cette variation de fréquence n'a pas d'effet sur le consommateur car elle dure très peu de temps et est très légère.

II.2.7. Rupture des conducteurs

Une rupture des conducteurs peut survenir dans les connexions aux bornes ou dans les raccords entre bobines mal exécutées qui se défont à la suite de court-circuit répétés.

II.3. Refroidissement

Le refroidissement de turbo alternateur de la centrale de Jijel est de type mixte, l'enroulement statorique, les barres de liaison et les bornes de sortie sont refroidis à l'eau distillée (distillat), par contre le noyau du stator et le rotor est refroidi au gaz (hydrogène).

II.3.1. Refroidissement stator

Actuellement, l'enroulement du stator du grand turbo-alternateur à refroidissement par eau. Cette dernière doit être traitée pour que sa résistivité soit suffisamment élevée pour éviter :

- les risques d'amorçage.
- Les pertes par conduction dans les connexions hydraulique sous tension.

Le schéma de circulation d'eau est présenté ci-dessous. Il comprend des pompes (principales et de secours), des filtres, des échangeurs de chaleur, la robinetterie et les appareils de contrôle [11].

Le tableau II.1 regroupe les paramètres de l'eau utilisée pour le refroidissement.

Désignation	Valeur
Débit à l'entrée des réfrigérants	Mini 42 l/s
Débit à l'entrée des barres statorique	13,5 l/s
Température max à l'entrée des barres statoriques	40 ⁰ C
Température max à l sortie des barres statoriques	75 ⁰ C
Température réel à l'entrée des barres statorique	24,5 ⁰
Température réel à l sortie des barres statorique	34,9 ⁰ C
Température à l'entrée du 1 ^{er} échangeur	34,1 ⁰ C
Température à l sortie du 1 ^{er} échangeur	27,5 ⁰ C
Température à l'entrée du 2 ^{eme} échangeur	27,5 ⁰ C
Température à l sortie du 2 ^{eme} échangeur	24,1 ⁰ C
Suppression à l'entrée des barres statoriques	Max 2,5 bar
Déférence de pression dans les barres statoriques	1,5 à 2
Suppression à l'entrée de l'échangeur	Max 6 bar
Résistivité électrique du distillat à la température de 40 ⁰ C, KOhm.cm	75 KOhm.cm

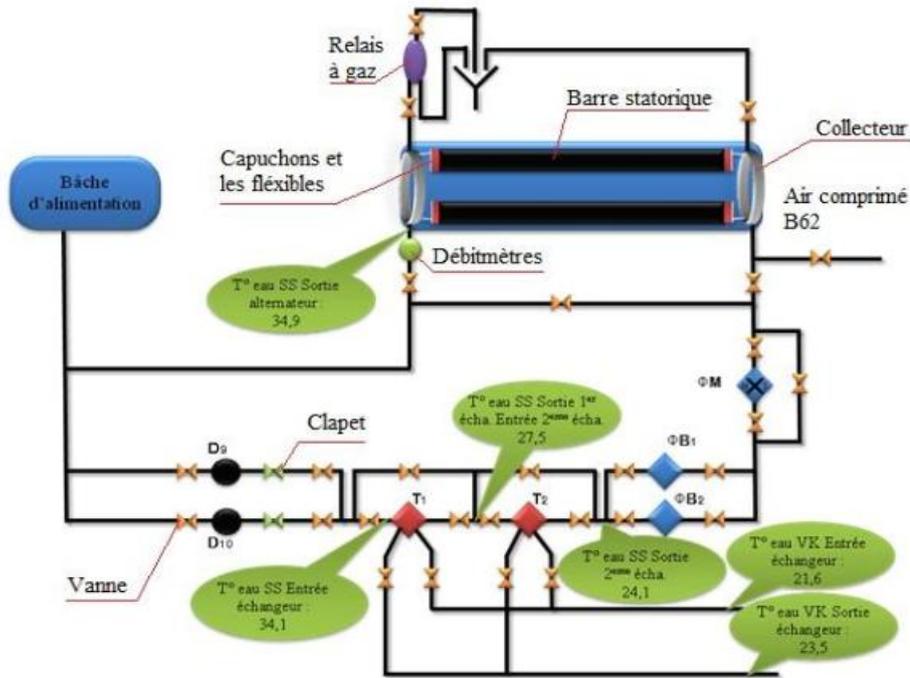


Figure II.1. Refroidissement par l'eau distillée (circuit SS)

II.3.2. Principe de fonctionnement de circuit SS refroidissement par l'eau de stator

Le collecteur assure la distribution de l'eau réfrigérant entre l'enroulement statorique, les barres de couplage et les bornes ont assurée par un collecteur. , des capuchons en caoutchouc et des tuyaux flexibles en plastique fluoré, le collecteur d'alimentation se trouve coté turbine (Bagues collectrices) et celui d'évacuation de côté collectrice [12].



Figure II.2. Barres statoriques (crème), Capuchons (rouge et blancs), Collecteur (chrome).

Les têtes de l'enroulement statorique isolées par le silicone et l'enroulement statorique est thermoactif de type "isoproleng" de classe "B". Chacune des phases de l'enroulement du stator à une suele branche.

Les réfrigérant sont isolables et nettoyables en marche. Les tubes seront disposés de façon à se dilater pour qu'ils n'engendrent aucune résonance pour les vibrations de l'alternateur. L'enroulement statorique est refroidi à l'eau douce.

Les éléments constituant le système de réfrigération sont :

- Un réservoir,
- Deux pompes (l'une de réserve D9, l'autre de secours D10),
- Deux filtres cépines $\Phi B1$, $\Phi B2$,
- Un filtre magnétique ΦM ,
- Deux échangeurs de chaleur T1, T2,
- Un ensemble de valves, de vannes.

La conception de l'ensemble de système de réfrigération, effectué par l'acier inoxydable, contient des appareils de contrôle et de mesure et un circuit d'alimentation d'accessoire en eau à partir des sources de la centrale. Ces systèmes fonctionnent dans un circuit fermé de l'eau distillat.

Les pompes D9 et D10 assurent la circulation de l'eau distillat à travers l'enroulement du stator. Lorsqu'une pompe est en service, l'autre est en réserve. L'alimentation des moteurs des pompes se fait par une source d'énergie indépendante. L'opération de système de refroidissement par eau de l'enroulement du stator fonctionne dans un circuit fermé.

L'eau distillat arrive à l'entrée des pompes depuis l'enroulement du stator et le réservoir. Il est amené dans l'espace entre tuyaux des échangeurs de chaleur T1, T2 où ils ont refroidis par l'eau du circuit fermé du refroidissement des mécanismes de l'unité monobloc, circulant dans les tuyaux. Les échangeurs de chaleur assurent le refroidissement du distillat à la charge nominale du turbogénérateur.

Le distillat est purifié des additions mécaniques par les filtres $\Phi B1$, $\Phi B2$. Un des filtres fonctionne régulièrement. L'encrassement des filtres est contrôlé par le manomètre différentiel avec le dispositif de signalisation PH10. Lors de l'obtention de la différence de donnée, le filtre de service est soumis à l'inspection et le filtre de réserve commence à fonctionner.

Le distillat est purifié des particules ferromagnétiques par le filtre magnétique ΦM . Le distillat refroidi et purifié passe par les tuyaux creux en cuivre de l'enroulement du stator et ensuite il est vidangé à l'entrée des pompes D9, D10.

La suppression de l'azote dans le bloc EC est maintenue dans les limites de 0.1+0.15 bar à l'aide du réducteur PD pour prévenir l'accès de l'oxygène de l'atmosphère dans le distillat.

Pour protéger le bac EC contre la surpression de l'azote dans le schéma (refroidissement par l'eau) on a la soupape fermeture hydraulique. Le remplissage du système par le distillat est effectué à l'aide de la soupape B69 depuis le système du bloc du condensat dessalé. Le niveau supérieur et inférieure du distillat dans le bac de vidange est contrôlé à l'aide de relais de niveau. Le bac de vidange est installé au-dessus du turbogénérateur de manière que le remplissage de l'enroulement du stator a été assuré pendant les arrêts de courte durée du turbogénérateur et les pompes mises hors circuit D9, D10.

Le relais de contrôle KSQ est destiné au contrôle du gaz de l'enroulement du stator. Lors du fonctionnement du système de refroidissement par eau le drainage constant est effectué du point supérieur du collecteur d'évacuation de l'enroulement du stator à l'aide des relais de contrôle. Si l'hydrogène pénètre dans l'enroulement du stator, il passera dans le relais et éliminera le distillat.

La présence de l'hydrogène dans le relais et KSQ témoigne de l'apparition de l'inétanchéité du trajet de l'enroulement du stator.



Figure II.3. Relais a gaz (KSQ).

La température, la pression et le débit du distillat à travers l'enroulement du stator sont contrôlés à l'aide des thermomètres à mercure, des thermo convertisseurs de résistance, des manomètres et des débitmètres. Par contre, la résistance spécifique du distillat est mesurée par le salinomètre.

Pour évacuer l'air du système on a prévu les soupapes de drainage, le distillat de l'enroulement du stator doit être évacué par l'air sec à travers la soupape B62. La surpression de l'air doit être de 10 bar (10 kgf/cm^2) au maximum pour éviter la défaillance de l'enroulement du stator.

II.3.3. Avantage de refroidissement par l'eau distillé

- ✓ C'est un bon isolant,
- ✓ Il possède une grande chaleur spécifique,
- ✓ Il présente une faible viscosité [9].

II.3.4. Refroidissement du rotor

II.3.4.1. Caractéristiques de l'hydrogène

L'hydrogène est choisi pour assurer le refroidissement de rotor, de circuit magnétique du stator et les organes de serrage de l'alternateur. Ce choix est justifié par rapport aux propriétés physiques de ce gaz [13]

- ❖ Sa densité est quatorze fois inférieure à celle de l'air
- ❖ Sa conductivité thermique est sept fois supérieure à celle de l'air
- ❖ L'hydrogène limite le vieillissement des isolants, car il empêche la formation d'ozone.
- ❖ La pression interne absolue atteint 4 à 6 bars (0.4 à 0.6 MPa) dans les grands turbo-alternateurs actuels [13].

Le vieillissement des isolants retardé, l'augmentation de la pression de l'hydrogène accroît naturellement encore la possibilité d'échanges thermique.

Les problèmes d'installation, de contrôle et de sécurité posés par l'hydrogène sont maintenant classiques. L'étanchéité aux bouts d'arbre est assurée par des joints radiaux à fuite d'huile dans lesquels une pression d'huile légèrement supérieure à la pression interne d'hydrogène est appliquée entre deux bagues flottantes montées sur l'arbre avec un très faible jeu. Le débit d'huile passant sous la bague du côté de l'air retourne après dégazage dans le circuit général de graissage du groupe. Le débit d'huile du côté de l'hydrogène assure l'étanchéité et est généralement traité sous vide pour dégazer l'hydrogène dissous puis réinjecté dans le circuit des joints.

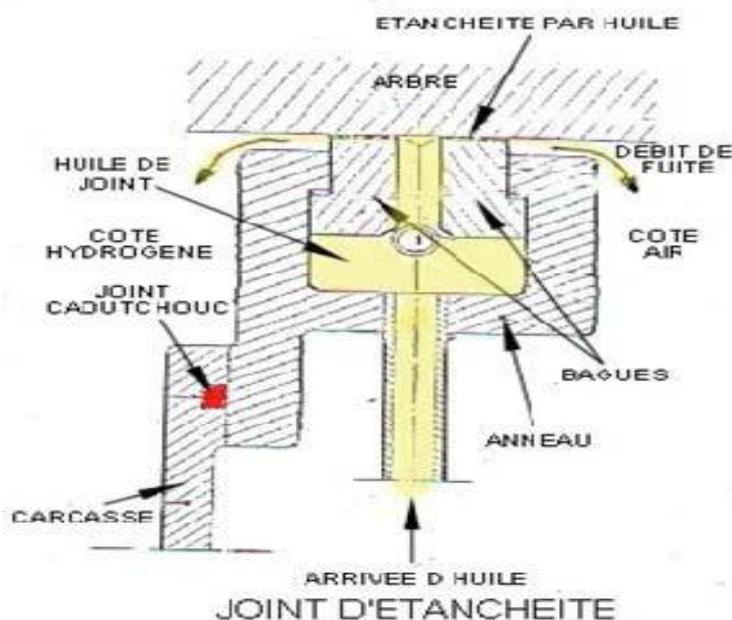


Figure II.4. Etanchéité de l'arbre

Pour éviter les problèmes posés précédemment on va procéder comme suit :

- Nettoyer l'alternateur au dioxyde de carbone avant remplissage en hydrogène, pour éviter les mélanges air-hydrogène.
- préciser la pureté de l'hydrogène présent dans le circuit (Entre 98 et 99.9 %).
- Inspection régulière de l'étanchéité de l'arbre de l'alternateur afin d'empêcher les fuites hors de la machine.

II.3.4.2. Eléments constitutifs du système de refroidissement d'hydrogène

a. Collecteur de gaz

L'hydrogène ou l'air sont admis dans le corps du turbo-alternateur à travers un collecteur d'hydrogène disposé, par construction, dans la partie supérieure du corps.

Le gaz carbonique est admis dans le corps de l'alternateur à travers un collecteur disposé dans la partie inférieure du corps.

Les collecteurs d'hydrogène et de gaz carbonique du turbogénérateur sont reliés par les conduites de gaz. Le corps du turbo-alternateur est équipé d'un réseau de conduites de drainage servant à drainer de l'eau ou de l'huile pouvant pénétrer dans le corps de l'alternateur. Sur chaque conduite de drainage est monté des relais de niveau avec un dispositif de signalisation ST018, 19,20, ST009, 11,12. (Avant les vannes noires c'est des vannes de drainage) [12] [14] [7].

b. Poste de contrôle de gaz

L'admission du gaz dans l'alternateur et l'échappement du gaz de ce dernier se font par l'intermédiaire du poste de contrôle de gaz auquel sont branchées les conduites du système extérieur d'admission d'hydrogène, de gaz carbonique et d'air, ainsi que les conduites des collecteurs d'hydrogène et de gaz carbonique de l'alternateur.

Le poste de contrôle de gaz est muni de monomètres ST003,004,007 pour contrôler la pression de gaz dans le corps de l'alternateur et dans les conduites du système extérieur d'hydrogène et de gaz carbonique, des robinets de piquage ST35S01, ST22S01 pour prélèvement d'essai de gaz lors de régimes transitoires, d'un récepteur de l'analyseur de gaz ST35S01, ST22S01, d'une soupape de sûreté ST36S02 pour protéger le corps de l'alternateur contre l'augmentation de pression d'hydrogène nominale dans le corps de l'alternateur[12].

c. Sécheur d'hydrogène

L'épuration de l'hydrogène d'aérosols d'eau et d'huile se fait dans le refroidisseur ST50W01 où les aérosols se condensent sous l'action d'une température négative de l'agent frigorigène du groupe frigorigène.

Le mode de fonctionnement du groupe frigorigène est réglé à l'aide de détendeur thermostatique ST10S01 de manière à ce que la température à la sortie du refroidisseur soit maintenue dans un intervalle de 0 à 5°C.

La circulation de l'hydrogène à travers le refroidisseur se fait sous la pression créée par le compresseur de l'alternateur lors de rotation du rotor. L'humidité de service ne doit pas dépasser 10 g/m³[12] [3] [7].

d. Pureté d'hydrogène

La pureté d'hydrogène dans l'alternateur est contrôlée par l'analyseur de gaz. L'hydrogène au long du volume de l'alternateur ne doit pas être inférieure à 97% [12] [3].

II.3.4.3. Principe de fonctionnement de circuit de refroidissement par hydrogène

Deux refroidisseurs de gaz incorporés dans le corps de l'alternateur maintiennent la température de l'hydrogène froid au niveau de consigne.



Figure II.5. Refroidisseur de gaz



Figure II.6. Entrée et sortie de
L'eau de mer



Figure II.7. Vue intérieur
(Place de refroidissement de gaz)



Figure II.8. Vue extérieur
(Place de refroidissement de gaz)

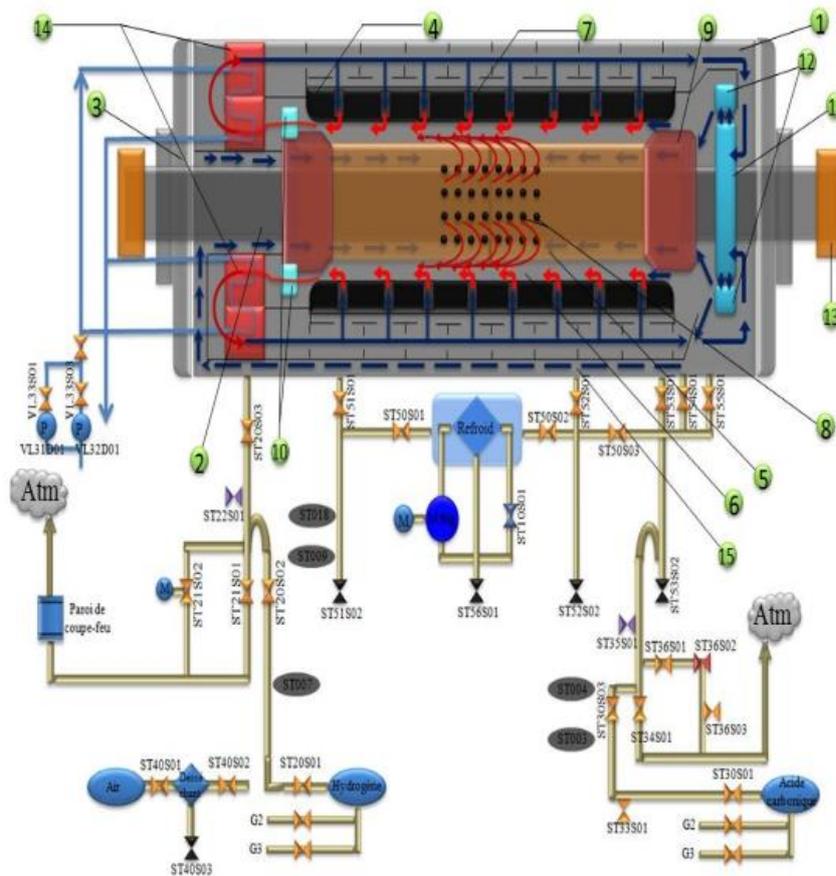


Figure II.9. Ventilation par hydrogène.

Tableaux II.2. Eléments du schéma de ventilation par hydrogène.

Indication	Indication
1- Le stator	10- Le ventilateur
2- Rotor	11- Le compresseur
3- La flasque	12- Le diffuseur
4- Les barres statorique	13- Le palier (coté excitation)
5- Les barres rotorique	14- Réfrigérant de gaz (coté turbine)
6- Entre fer	15- Pompe
7- Trous de ventilation des encoches statorique	16- Atm vers l'atmosphère
8- Trous de ventilation rotor	-Flèche en rouge Hydrogène chaud
9- La frette	-Flèche en bleu Hydrogène froid

La circulation de l'eau à travers les refroidisseurs est assurée par les pompes VL31D01, VL32D01 dont une est en service alors que l'autre est en réserve. L'eau fournie par la conduite d'eau de circulation sous charges servant à refroidir les mécanismes de la tranche

Énergétique arrive à l'entrée des pompes, puis ayant traversé les refroidisseurs de gaz s'écoule dans le canal décharge ouvert [3] [7]

Le débit d'eau minimal à travers les refroidisseurs de gaz de l'alternateur est de 400 m³/h. La pression de l'eau de refroidissement en aval et en amont de chaque pompe est contrôlée par manomètres [12].

Le débit d'eau uniforme à travers chaque refroidisseur de gaz est réglé à l'aide des vannes de vidange VL33S01, VL33S01 et le débit total est réglé à l'aide de vanne VL33S05. La température de l'eau à l'entrée et à la sortie des refroidisseurs de gaz est mesurée à l'aide des thermomètres et des thermo convertisseur de résistance [12] [3].

L'aéragé de l'alternateur se fait à circuit fermé avec réfrigération du gaz par les refroidisseurs incorporés dans le corps de l'alternateur. Le schéma de ventilation de l'alternateur est illustré sur la figure II.8 qui montre une séparation en zones haute pression et basse pression, la zone basse pression est desservie par un ventilateur axial emmanché sur l'anneau d'appui de la frette des têtes du rotor côté turbine qui refoule le gaz à travers les refroidisseurs de gaz dans les canaux de ventilation du noyau statorique et ensuite dans l'espace libre entre le rotor et le stator par des trous dans les encoches du stator (Figure II.10).

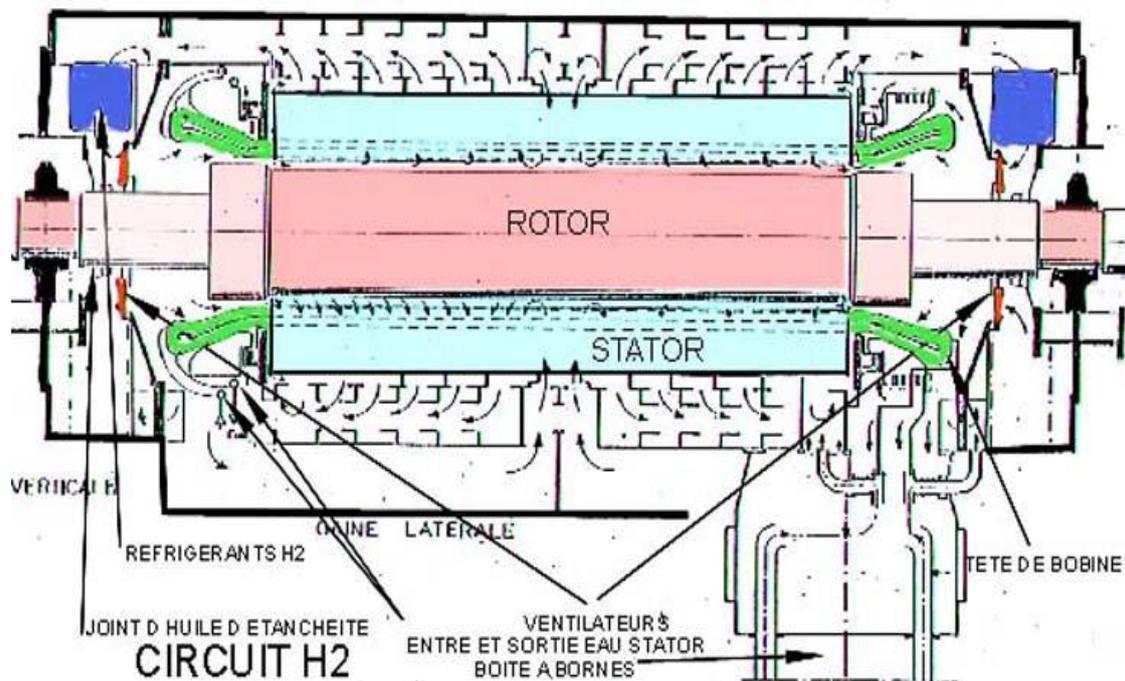


Figure II.10. Schéma de ventilation de l'alternateur.



Figure II.11. Trous de ventilation dans le stator.

Le gaz chaud retourne vers le ventilateur axial par l'air, afin de régler le débit de gaz circulant à travers les canaux radiaux de ventilation des tôles d'acier du noyau statorique. Le cadre du noyau statorique est placé dans une enveloppe munie de trous de différents diamètres sur toute sa surface.

La zone haute pression est desservie par un compresseur centrifuge emmanché sur l'arbre du rotor côté bagues collectrices, qui aspire une partie du gaz à la sortie des refroidisseurs.

Le diffuseur monté après la roue du compresseur est destiné à transformer la pression dynamique en pression statique.

A la sortie du compresseur le flux de gaz de la zone haute pression côté bagues collectrice est divisé en deux parties.

- Une partie du flux de gaz est amenée dans les conducteurs creux du demi-enroulement rotorique côté bague collectrice.
- La deuxième partie pratiquement égale à la première est amenée par deux conduits spéciaux dans le corps du stator vers le deuxième demi-enroulement rotorique côté turbine.

La zone haute pression est séparée de l'espace d'air à l'aide d'un joint spéciale [12] [3] [7].

II.3.5. avantage de refroidissement par l'hydrogène

- ✓ Pertes par ventilation plus basses,
- ✓ Conductibilité thermique supérieure,
- ✓ Plus longue durée des isolants,
- ✓ Danger d'incendie réduit,
- ✓ Plus bas niveau de bruit [9].

La distribution d'eau réfrigérante entre l'enroulement statorique, les barres de couplage et les bornes est assurée par un collecteur et des tuyaux flexibles en plastique fluoré.

Le circuit d'eau comporte une seule barre en série ou bien dans le circuit à barres de couplage la barre de l'enroulement – la barre de couplage – la borne de sortie, le collecteur d'alimentation se trouve du côté turbine et celui d'évacuation du côté bagues collectrices.

Le schéma de refroidissement à l'eau est illustre à la figure II.12 (schéma de refroidissement à l'eau de l'enroulement statorique). L'amenée d'eau au collecteur à travers le corps du stator et son évacuation sont exécutés au moyen de traversées. Le ventilateur centrifuge monté sur l'arbre du rotor assure le refroidissement des bagues collectrices par air [7] [3].

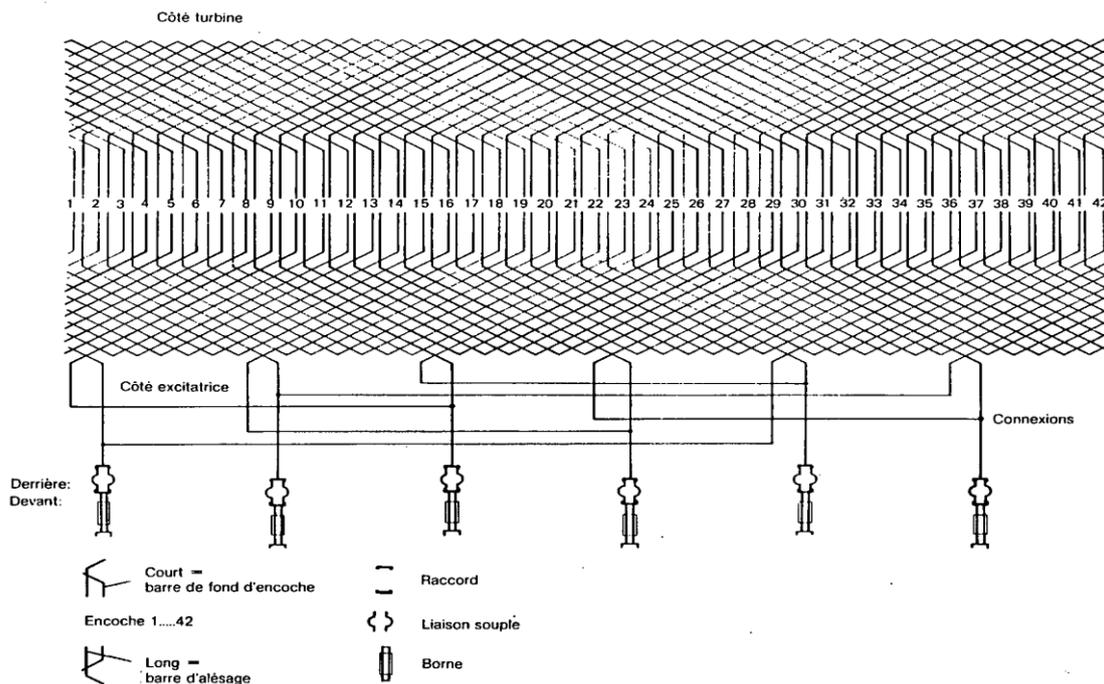


Figure II.12. Schéma de refroidissement à l'eau de l'enroulement statorique.

II.4. Types de refroidissement des turbo-alternateurs

Il existe trois types de refroidissement des alternateurs.

II.4.1. Refroidissement indirect de l'enroulement du stator

Les turbo-alternateurs de puissance moyenne (200 à 250 MW) comme ceux entraînés par une turbine à gaz sont refroidis par air, par contre les anciens turbo-alternateur de puissance (100 et 200 MW) sont refroidis dans l'hydrogène avec un refroidissement indirect, c'est-à-dire que les pertes par effet Joule dissipées dans les enroulements doivent traverser l'isolation électrique avant d'être évacuées par le fluide de refroidissement. Cette traversée entraîne un sur échauffement de quelques dizaines de degrés et limite donc sévèrement la densité de courant dans les enroulements pour un échauffement total imposé [12] [14] [7].

II.4.2. Refroidissement direct de l'enroulement stator

Le refroidissement direct du cuivre de l'enroulement stator se fait soit par gaz, soit par liquide.

II.4.2.1. Refroidissement direct gazeux

A partir du milieu de ce siècle, les constructeurs passent de l'air à des fluides de refroidissement qui sont plus efficaces, à savoir l'hydrogène et même l'eau pour le refroidissement direct des enroulements. L'air est le moyen de refroidissement le plus simple à manipuler, mais ses aptitudes de refroidissement sont restreintes. A titre d'exemple, l'hydrogène possède une conductibilité thermique sept fois plus élevée et pour la même pression absolue, sa densité n'atteint qu'un dixième de celle de l'air pour une capacité thermique volumétrique identique [12] [14] [7].

L'hydrogène circule axialement au centre des barres du stator dans des canaux à parois minces, généralement en acier amagnétique, en contact thermique étroit avec le cuivre à travers une très faible isolation. Ce refroidissement presque direct a été largement utilisé dans les turbo-alternateurs de quelques centaines de méga voltampères par les constructeurs utilisant la technique Westinghouse; il présente l'avantage de ne pas exiger d'appareillage auxiliaire important. Lorsque la puissance est très grande (≈ 800 MW), cette méthode exige d'accroître la pression d'hydrogène et la surpression de circulation, ce qui alourdit le rotor d'un turbocompresseur important (c'est-à-dire qui occupe une large place axiale au détriment des parties actives). Au-dessus de 800 MW, ce procédé de refroidissement disparaît au

bénéfice du refroidissement direct par liquide que les autres constructeurs utilisent dès 250 à 300 MW.

En revanche, la construction d'un alternateur refroidi à l'hydrogène est plus compliquée. Par rapport au refroidissement à l'air, cette construction exige une carcasse résistante à la pression, des dispositifs d'étanchéité spéciaux et des installations supplémentaires pour le traitement du gaz de refroidissement [12] [14] [7].

II.4.2.2. Refroidissement direct par liquide

L'enroulement statorique est réalisé sous forme d'enroulement à barres Roebel en deux couches. Lors du refroidissement indirect, on a besoin de barres relativement hautes. Pour optimiser le dimensionnement des barres en ce qui concerne la hauteur et le nombre de brins, on a dû procéder à des études approfondies, de même pour déterminer la nécessité éventuelle d'une transposition spéciale. Pour une conception identique de la construction de la tête de bobine, l'agrandissement du diamètre provoque une diminution de la fréquence propre des vibrations à quatre nœuds. Celle-ci peut alors se rapprocher de la fréquence double du courant statorique qui provoque les vibrations en question.

Il utilise une circulation dans certains brins creux des barres du stator (figure II.13). L'huile a été très vite détrônée par l'eau dont les qualités de refroidissement sont très supérieures à tous égards (coefficient de transmission thermique de surface et capacité thermique supérieurs, puissance de circulation réduite, pas d'évolution physique ou chimique dans le temps) [12] [14] [7].

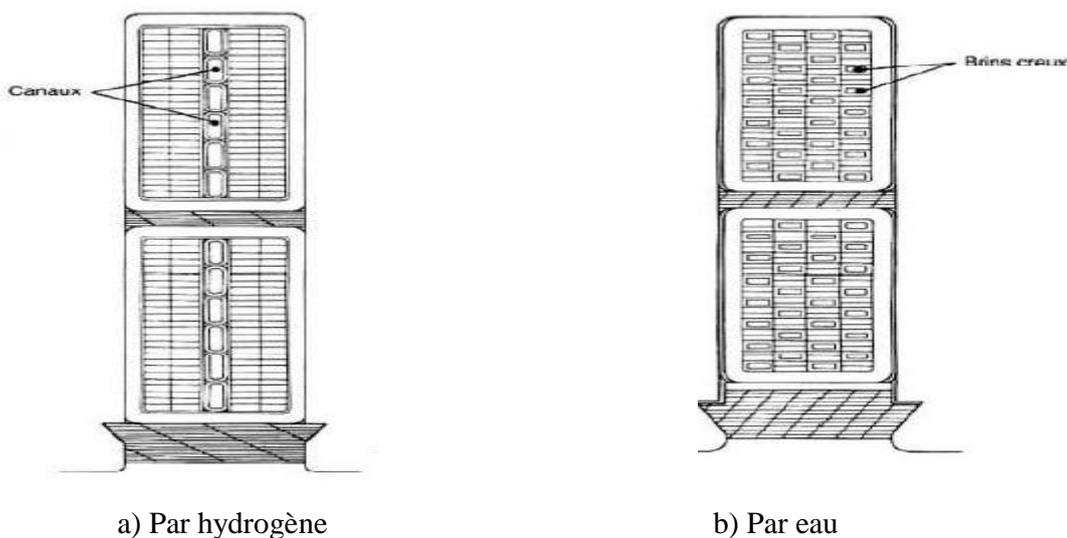


Figure II.13. Connexions hydrauliques frontales.

Figure II.14 montre les connexions hydrauliques frontales d'un enroulement de grand turbo-alternateur. Les collecteurs annulaires en acier inoxydable sont reliés aux barres par des canalisations souples en téflon (poly-tétra-fluor-éthylène ou PTFE).

La circulation de l'eau se fait dans une seule spire, avec les collecteurs d'entrée et de sortie du même côté, jusqu'à des puissances de l'ordre de 600 MW, et par barres avec un collecteur de chaque côté de l'alternateur, pour les puissances supérieures.



Figure II.14. Connexions hydrauliques de l'enroulement stator.

Avec ce système de refroidissement, le point le plus chaud de l'enroulement est maintenu au-dessous de 80°C, très loin des limites permises par l'isolation, avec des densités de courant de 6 à 10 A/mm, qui pourraient être accrues si nécessaire mais qui sont limitées à ces valeurs afin de maintenir le rendement de l'alternateur à son optimum économique.



Figure II.15. Bout de barre statorique.



Figure II.16. Barres statoriques.

II.4.3. Refroidissement direct de l'enroulement rotor

Le refroidissement direct de l'inducteur est assuré dans la très grande majorité des cas par de l'hydrogène comprimé. Ce gaz est mis en circulation par la vitesse relative du rotor lui-même et, aussi, par des ventilateurs ou des compresseurs, suivant un trajet variable d'un constructeur à l'autre [12] [14] [7].

- dans des canaux internes des conducteurs, avec dégagement radial localisé au centre de l'alternateur.
- avec alimentation par un canal axial situé sous l'encoche, et partage du flux d'hydrogène en multiples parcours radiaux formés par des découpes en forme de boutonnières dans le cuivre et éventuellement des rainures axiales, avec quelques variantes possibles dans les trajets d'échappement du gaz.
- dans les systèmes où le gaz est prélevé dans l'entrefer par des cales profilées, avec parcours interne, diagonal ou transversal [12] [15].

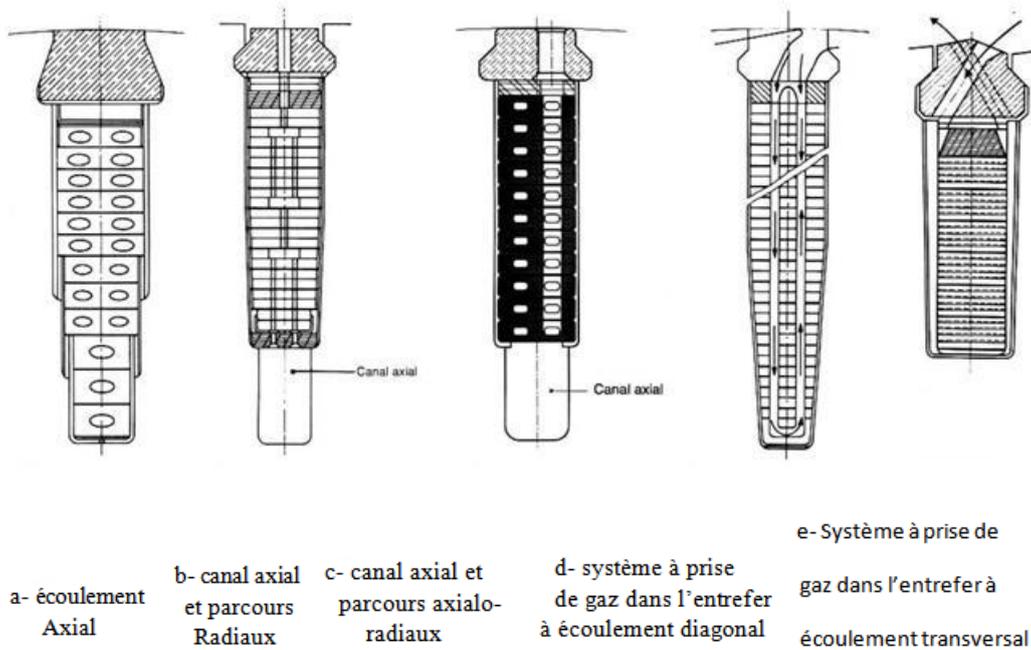


Figure II.17. Différent systèmes de refroidissement rotor par hydrogène - coupes d'encoches

Dans le rotor, les conducteurs de l'enroulement d'excitation sont réalisés sous forme de profils creux refroidis axialement. Après les ventilateurs, le gaz correspondant passe sous les deux frettes du rotor. Une partie de l'air de refroidissement pénètre des deux côtés dans la zone des têtes de bobines, passe par les conducteurs creux et quitte le rotor à travers des fentes dans les extrémité du fut.

Le refroidissement pénètre sous les frettes, directement dans les conducteurs et quitte le rotor après avoir parcouru une distance donnée. La seconde section est alimentée en gaz froid par une sous-encoche se trouvant en dessous de l'enroulement. Cette partie de gaz quitte le rotor au milieu de la machine. Le rapport des longueurs est choisi de manière à fournir une répartition de la température aussi homogène que possible dans l'enroulement [12] [14] [7].

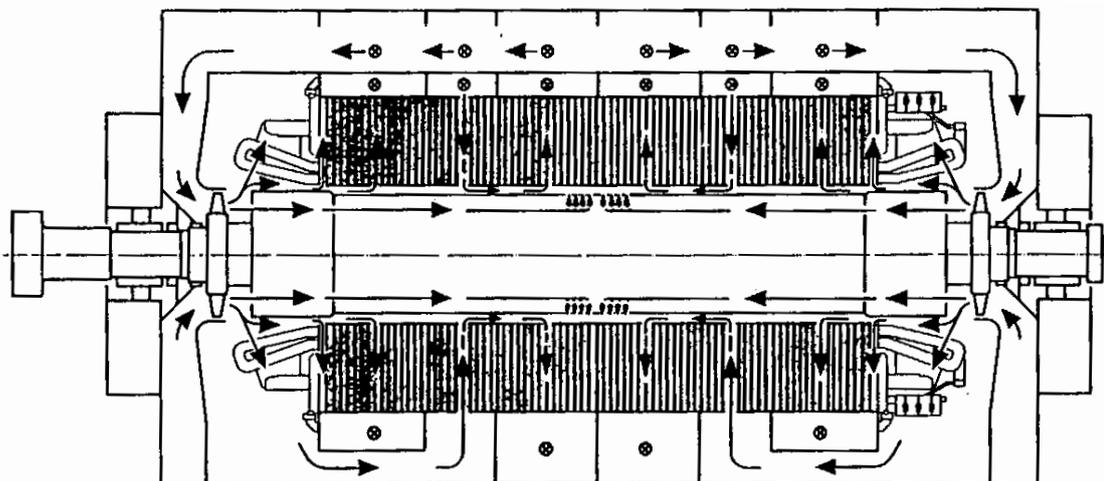


Figure II.18. Refroidissement par gaz.

Conclusion

Dans ce chapitre on a défini les différentes contraintes thermiques qui peuvent survenir dans les turbo-alternateurs de la centrale thermique de Jijel. De plus, on a présenté les différentes techniques de refroidissements à partir des caractéristiques de l'hydrogène, de l'eau distillé et de la gestion des risques d'hydrogène.

Chapitre III

Modélisation thermique des machines électriques

Chapitre III

Modélisation thermique des machines électriques

III.1. Introduction

Dans tous les domaines du génie électrique, à des degrés sont concernés par les problèmes thermiques. Les machines électriques, moteurs et alternateurs, compte tenu des puissances mise en jeu et des échauffements dus aux pertes ont été les premiers dispositifs étudiés d'un point de vue thermique.

La modélisation des machines électriques vise à prédire efficacement le comportement thermique. Ce dernier peut être réalisée avec des approches numériques mais c'est la méthode analytique de type circuit qui est privilégiée surtout dans un processus de conception.

Ce chapitre, et avant de traiter les modèles de type circuit thermique (Méthode nodale) dans un contexte général et plus spécifiquement appliqués aux machines électriques, les différentes pertes, les effets de la chaleur et les causes de défaillance dans les machines électriques ont été présentés. Aussi, les défauts et les limitations de ce type de modèles sont discutés et des méthodes sont proposées pour les éviter [15].

III.2. Effets de la chaleur et les causes de défaillance

La limite de température qu'une machine électrique peut atteindre dépend des tolérances thermiques des matériaux, comme les aimants permanents, l'isolant du bobinage et la colle utilisée pour fixer les aimants.

En effet, une des parties de la machine dont la température est critique concerne les aimants dont la densité de flux magnétique produite diminue avec l'augmentation de température jusqu'à un point critique nommé point de curie ($\approx 330^\circ$) où la démagnétisation devient irréversible. Lorsque la température des aimants augmente, le flux dans l'entrefer diminue et pour pallier cette diminution, il faut augmenter le courant au stator pour obtenir le même niveau de couple. Ensuite une température élevée des aimants, augmente leur risque de démagnétisation en cas de défaut comme un court-circuit [15].

III.3. Pertes dans les machines tournantes

Les pertes constituent les sources de chaleur dans une machine électrique. Classiquement, sont répertoriées les pertes par effet Joule, les pertes mécaniques et les pertes fer. Pour le point de fonctionnement 3000 tr/min, le système de refroidissement n'est pas suffisamment efficace pour évacuer les différentes pertes de la machine. Autour de cette vitesse, les températures de la machine sont les plus importantes (Figure III.1) [16].

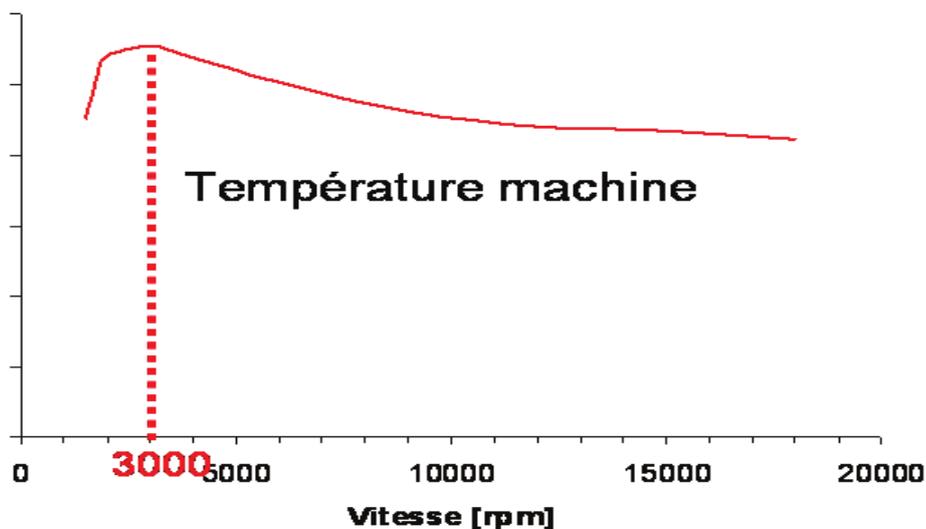


Figure III.1. Point critique autour de 3000 tr/min [16].

III.3.1. Pertes Joule

Les pertes Joule statoriques dépendent de la valeur de la résistance de l'enroulement en fonction de la température du cuivre, de la valeur et de la forme du courant qui le parcourt. Quel que soit le couplage, étoile ou triangle, ces pertes sont données par la relation III.1 :

$$P_J = \frac{3}{2} R_s(T) P_{eff} \quad (\text{III.1})$$

III.3.2. Pertes fer

Les pertes fer constituent les sources de chaleur principales dans les matériaux magnétiques de la machine, principalement au rotor et au stator. Ces pertes sont dues à la variation du champ magnétique dans ces zones de la machine, et peuvent être induites par deux phénomènes principaux : l'hystérésis et les courants de Foucault. Le premier décrit les

pertes dues aux propriétés d'hystérésis des matériaux magnétiques; le deuxième est dû à la circulation des courants induits dans ces matériaux [17] [18] [19].

III.3.2.1. Pertes dans le circuit magnétique (par hystérésis)

L'évaluation de ces pertes dans les machines électriques fait l'objet de nombreuses études, où des états de l'art et des propositions de nouvelles méthodes sont présentés. La séparation des pertes fer, selon chaque phénomène créé dans le circuit magnétique, constitue le modèle de base d'évaluation des pertes fer pour tout type d'évolution d'induction, que ça soit sinusoïdale ou non-sinusoïdale [18].

III.3.2.2. Pertes par courant de Foucault

Quand un champ magnétique variable est appliqué à un matériau électrique, une tension est induite dans ce matériau selon la loi de Faraday et un courant électrique circulera dans le matériau. Selon la loi de Lenz, ce courant sera dirigé de manière à créer un flux opposé à celui qui lui a donné naissance. Ce courant induit dans la masse métallique est appelé courant de Foucault. Ce courant est à l'origine de dissipations de chaleur par effet Joule. Afin de limiter ces dissipations, les circuits magnétiques du stator et rotor sont généralement constitués d'un empilement de tôles parallèles au sens du flux et isolées entre elles par du vernis ou un traitement de surface [17].

Analytiquement, ces pertes peuvent être évaluées par la formule III.2 qui reste valable pour une onde sinusoïdale, dans le cas d'un matériau homogène, isotrope et à champ uniforme. Dans cette formule, K_F est une constante qui dépend du matériau, f est la fréquence, e l'épaisseur de la tôle et B_{max} est la densité de flux maximale dans le matériau [17] [18].

$$P_{cf} = K_f \cdot (e \cdot f \cdot B_{max})^2 \quad (\text{III.2})$$

III.3.3. Pertes mécaniques

III.3.3.1. Pertes par frottement dans les roulements

Les roulements constituent le siège des pertes de puissance sous forme de chaleur par la présence des frottements dans ses différentes zones. Ces pertes peuvent provenir de plusieurs origines :

- Frottements entre les corps roulants et les bagues (points 1,2 et 5 de la figure III.2),
- Frottements entre les corps roulants et la cage (points 4 et 6 de la figure III.2),
- Frottements entre la cage et les bagues,
- Frottement visqueux dû au mouvement du lubrifiant,
- Frottement du joint d'étanchéité.

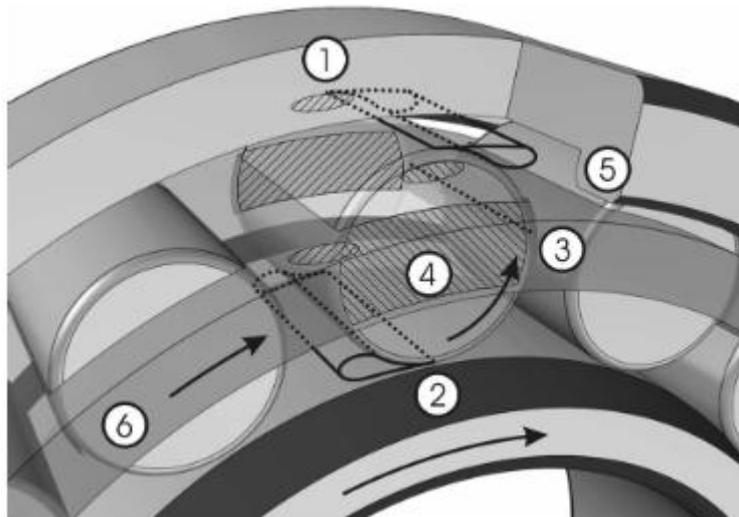


Figure III.2. Localisation des sources de pertes dans les roulements [20].

Ces pertes dépendent de plusieurs facteurs tels que le type du roulement, l'intensité et la direction de la charge, la vitesse de rotation, les caractéristiques du lubrifiant et autres facteurs

RQ : La protection thermique des machines peut être assurée par divers dispositifs, plus ou moins élaborés et coûteux :

- mesure du courant dans la machine et calcul de l'échauffement (relais thermique, disjoncteur);
- sonde interne tout ou rien;
- sonde thermocouple, intégrée au moteur et raccordée à un relais de mesure;

- calcul de l'état thermique de la machine par le calculateur du variateur de vitesse qui alimente la machine.

Les pertes peuvent être également considérées comme des sources d'incertitude, en particulier les pertes fer et les pertes mécaniques à hautes vitesses.

III.4. Problématique

La machine électrique est un système dissipatif thermiquement non homogène et à géométrie complexe, malgré l'existence de symétries. Et une des difficultés rencontrées dans son développement est le dimensionnement thermique. Le problème est tel que l'étude sur l'aspect thermique était à la traîne par rapport aux autres considérations électriques, magnétiques et mécaniques. L'analyse thermique d'un moteur fait intervenir simultanément: la connaissance des pertes de puissance transformées en chaleur et l'efficacité de leur évacuation (Pertes de chaleur). Les problèmes d'évaluation de la répartition des pertes, du choix du type d'écoulements et d'échange de chaleur, de la complexité géométrique et la diversité des propriétés thermophysiques des constituants sont principalement les sources de difficulté.

III.5. Méthodes de modélisation thermique

La température des machines électriques constitue un des facteurs principaux limitant leurs performances. Cette température doit respecter les limites imposées par conception et ne doit pas les dépasser. Par conséquent, afin de pouvoir prédire l'élévation de la température dans les machines, des modèles thermiques sont employés. Ceux-ci permettent d'une part de modéliser thermiquement les machines en vue de les surveiller, d'autre part d'améliorer leur performances. Ces modèles doivent respecter la complexité des phénomènes thermiques en étant capables de prendre en compte certaines modifications sur la conception. Citons par exemple, le choix du mode de refroidissement de la machine qui impacte directement ses températures internes. Ces modèles doivent également considérer les types de service de la machine, que ça soit un service continu, intermittent, temporaire ou autres types [21] [22].

La modélisation des machines électriques vise à prédire efficacement le comportement thermique. Ce domaine est en pleine effervescence et devient un élément primordial pour continuer à augmenter la puissance massique des machines. De plus en plus, les méthodes

numériques comme les éléments finis, s'imposent à plusieurs égards pour la conception de machines, particulièrement au niveau de la précision des résultats. Mais les modèles analytiques demeurent toujours d'intérêt, puisque pour le moment, ils offrent une rapidité de calcul indispensable dans un processus d'optimisation.

Dans les travaux de modélisation thermique des machines électriques, deux types de méthodes sont généralement utilisées : la méthode analytiques tel que la méthode nodale et les méthodes numériques dites "finies" tel que la méthode des éléments finis.

III.5.1. Méthodes analytiques

La méthode analytique ou nodale est basée sur une analogie électrique-thermique. La tension est la température, le courant électrique représente le flux injecté dans un nœud, la capacité et la résistance électrique sont respectivement une capacité et une résistance thermique. le circuit à constantes localisées décrit les différents chemins de transfert de chaleur, permettant ainsi de déterminer les températures dans une zone de la machine pour une distribution des pertes. Cela est réalisé en divisant la machine en des volumes élémentaires considérés chacun à une température homogène. Ensuite, la valeur des pertes et une capacité thermique de chaque volume sont évaluées. L'échange de chaleur entre deux volumes voisins est estimé par le calcul des résistances thermiques de conduction, de convection et de rayonnement en utilisant des corrélations analytiques et empiriques.

III.5.2. Méthodes numériques

Les méthodes "finies" sont utilisées dans plusieurs domaines. Elles sont construites sur plusieurs techniques. Les différences finies, les éléments finis et les volumes finis sont les techniques les plus utilisées. Ces méthodes permettent de calculer la température en quelques points de la machine selon le degré de discrétisation. La précision du calcul dépend de la résolution de discrétisation. Ces méthodes numériques peuvent être utilisées dans les géométries complexes.

La modélisation thermique par la méthode des éléments finis est actuellement intégrée dans des logiciels commercialisés sous forme d'un module thermique. L'avantage de l'utilisation de la méthode des éléments finis est sa capacité de déterminer la distribution des températures locales avec une grande précision dans les différentes zones de la machine.

Par comparaison entre cette méthode et la méthode nodale, il ressort que la méthode nodale présente un grand avantage sur le temps de calcul et que sa précision dépend de la maîtrise des paramètres tels que les coefficients d'échange par convection et les échanges fluidiques [23].

III.6. Présentation de la méthode nodale

Les méthodes nodales ont été utilisées pour la première fois dans les années 70 dans le calcul numérique des réacteurs nucléaires, dès lors elles ont connu un grand succès dans ce domaine grâce à leur efficacité et leur rapidité.

La méthode nodale est la méthode la plus utilisée dans le domaine de la modélisation thermique des machines électriques, elle nécessite au préalable la connaissance des échanges qui ont lieu au sein de la machine. Dans certains cas, la mise en œuvre d'un modèle par cette méthode fait recourir à la méthode des éléments finis appliquée à la mécanique des fluides en vue de déterminer les paramètres sensibles du modèle comme les coefficients d'échange.

Une analogie peut être faite entre le transfert de chaleur et le transfert de charge électrique. La similitude entre les deux domaines est représentée par le Tableau III.1.

La méthode nodale permet à partir de cette similitude de construire un circuit thermique similaire à un circuit électrique dont la résolution permet de calculer les températures en des nœuds de la machine. Le circuit thermique étant conçu, peut être résolu par des logiciels dédiés à la résolution des circuits électriques [23] [24].

Tableau III.1. Similitude entre la thermique et l'électricité.

Quantité	Système thermique	Système électrique
Potentiel	T	E
Flux/courant	Q	I
Résistance	R	R
Conductance	1/R	1/R
Capacitance	C	C
Loi d'Ohm	$Q=T/R$	$I=E/R$

La méthode nodale a été largement utilisée dans les travaux de modélisation thermique des machines électriques. Le modèle simplifié proposé par Mellor [23] été très utilisé pour la modélisation thermique des machines asynchrones totalement fermées.

Les modèles thermiques servent à estimer des températures et la localisation des points chauds pour orienter et peaufiner des stratégies de refroidissement. Le design du système de refroidissement a un impact significatif sur le comportement global de la machine et ne devrait pas être négligé. Les équations mathématiques aux dérivées partielles qui gouvernent les phénomènes de transfert de chaleur sont très simples et s'avèrent appropriées à l'utilisation d'un modèle de type circuit thermique. Cette méthode a l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre et s'impose quand le temps de calcul doit être minimisé comme dans le cas d'un processus de conception ou d'optimisation. En revanche, le caractère diffus de la chaleur rend l'élaboration d'un réseau thermique délicat. Les résultats obtenus avec de tel modèle sont fonction des hypothèses simplificatrices et du niveau de raffinement utilisé [25].

III.6.1. Principes de la méthode

Le fonctionnement de la machine électrique impose des variations significatives des températures entre ses différentes zones. Dans ce cas, la machine ne peut pas être modélisée comme un seul élément homogène en température. En conséquence, la discrétisation spatiale de la machine en plusieurs volumes élémentaires, considérés homogènes chacun, constitue la première étape pour la résolution numérique du problème thermique. Chaque volume est affecté à un nœud et est défini du point de vue thermique et physique (nature des matériaux, modes d'échange thermique,...) ainsi que par la géométrie de chaque élément, la méthode nodale est basée sur l'analogie électrique - thermique, où le modèle nodal est représenté sous la forme d'un réseau électrique modélisé par des éléments de base (sources de courant/tension, résistances et capacités). Le modèle thermique est alors constitué de la juxtaposition de blocs qui représentent les volumes élémentaires. Ceux-ci sont reliés entre eux par des éléments qui modélisent les différents modes de transfert de chaleur [26] (Figure III.3).

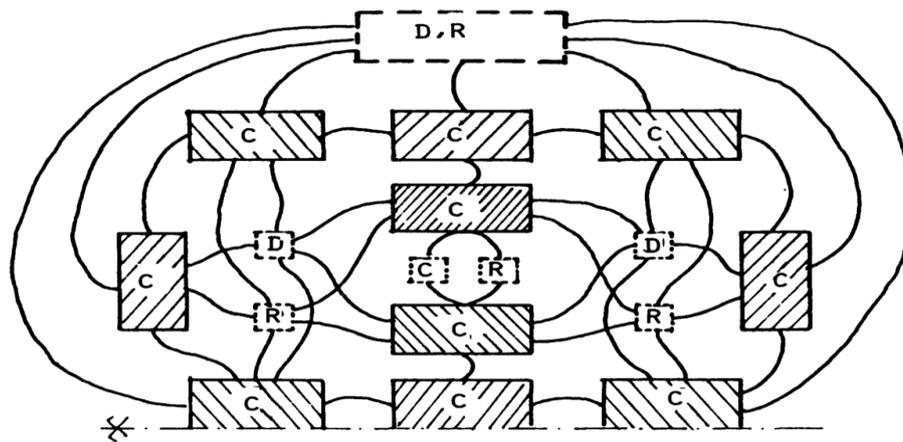


Figure III.3. Définition des éléments du réseau nodal et de leurs interconnexions.

C : Conduction, D : Convection : Rayonnement.

Le nombre de nœuds (ou de blocs) et des éléments du circuit thermique dépend du niveau de discrétisation. Ce dernier est fonction de la précision souhaitée au niveau de la distribution des températures et de l'identification des chemins des flux de chaleur. L'augmentation du nombre de nœuds impose un temps de calcul plus important et un circuit plus complexe. Cependant, la réduction de ce nombre peut induire des erreurs sur l'évaluation des températures et des chemins de flux. Les modèles thermiques peuvent ainsi passer d'un modèle à 1 nœud (machine à température homogène), à des modèles à plusieurs nœuds vers des modèles à des dizaines (voire centaines) de nœuds et des centaines d'éléments. La méthode nodale a été largement utilisée dans des études de modélisation thermique des machines électriques de différentes topologies. Elle est appliquée dans le cas des machines asynchrones, synchrones à aimants permanents, à flux axial et les alternateurs [27].

III.6.2. Expression des conductances et bilan d'énergie

III.6.2.1. Expression des conductances

La connexion entre les différents nœuds du réseau est gérée par les résistances ou les conductances thermiques des principaux modes de transfert de chaleur dans la machine : conduction, convection et rayonnement. Celles-ci peuvent être des conductances linéaires, ou non linéaires qui dépendent de la température. La non-linéarité dans ce calcul est basée sur la variation de la conductance en fonction de la température. En effet, cette dernière impacte les paramètres thermophysiques des matériaux ou des fluides tels que la masse volumique, la conductivité, la chaleur massique et la viscosité dynamique.

Notons tout d'abord que le transfert de chaleur entre deux nœuds consécutifs i et j est défini par :

$$\phi_{ij} = G_{ij} \cdot [T_j - T_i] \quad (\text{III.3})$$

$$G_{ij} = 1/R_{ij} \quad (\text{III.4})$$

avec G_{ij} et R_{ij} désignent respectivement la conductance et la résistance thermique, modélisant un des trois phénomènes de transfert de chaleur.

Dans le cas de la conduction dans un élément plan (Figure III.4), la conductance est calculée par l'expression suivante :

$$G_{ij} = \frac{S_{ij}}{\frac{e_{ij}}{\lambda_{ij}} + \frac{e_{ji}}{\lambda_{ji}}} \quad (\text{III.5})$$

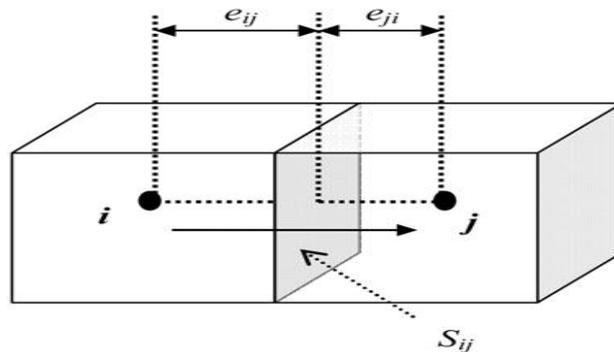


Figure III.4. Géométries des éléments pour le calcul des conductances de conduction.

(Élément plan)

Dans le cas d'un élément cylindrique (Figure III.5), la conductance est calculée de la manière suivante :

$$G_{ij} = \frac{\alpha_{ij} \cdot l_{ij}}{\frac{\ln \left(\frac{R_{ij}}{R_{ii}} \right)}{\lambda_{ij}} + \frac{\ln \left(\frac{R_{jj}}{R_{ij}} \right)}{\lambda_{ji}}} \quad (\text{III.6})$$

Avec λ_{ij} et λ_{ji} sont les conductivités vers la frontière entre la zone i et j respectivement.

Par rapport au transfert thermique par convection entre une zone fluide et une zone solide, ou bien dans le cas du rayonnement, la conductance est exprimée de la manière suivante :

$$G_{ij} = h_{ij} \cdot S_{ij} \quad (\text{III.7})$$

avec h_{ij} , le coefficient d'échange convectif ou radiatif et S_{ij} la surface d'échange.

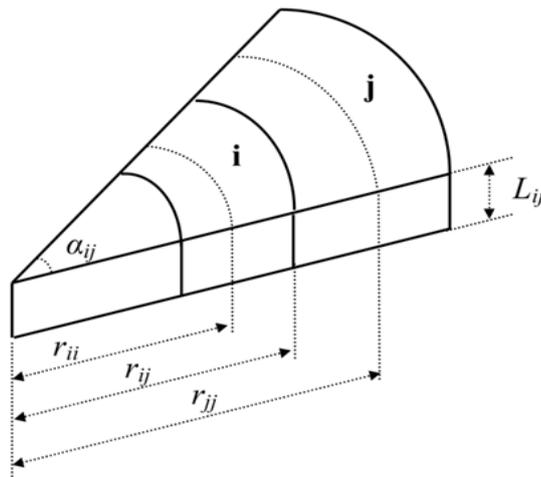


Figure III.5. Géométries des éléments pour le calcul des conductances de conduction.

(Élément cylindrique)

En général, les différents composants de la machine électrique sont des éléments cylindriques, sans ou avec génération de chaleur. Dans le premier cas, la conductance de l'élément passif est simplement calculée par l'équation III.6. Cependant, la présence d'une source de chaleur à l'intérieur d'un volume modifie le calcul des conductances. En effet, le problème réside au nœud où la source de chaleur et la capacité sont placées. Pour obtenir une distribution uniforme de ces pertes dans le volume, [28] propose une représentation nodale englobant deux réseaux en T dans les deux directions radiale et axiale (Figure III.6).

Les deux éléments (source et capacité) sont ainsi placés à une température moyenne du volume T_m , où les propriétés thermophysiques des matériaux sont calculées.

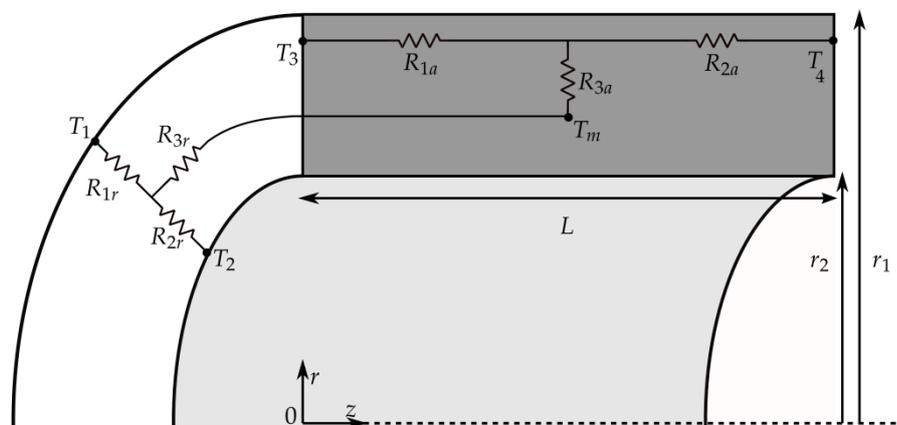


Figure III.6. Représentation d'un élément cylindrique avec les réseaux en T.

(Directions radiale et axiale)

Les résistances de la figure III.5 sont évaluées de la manière suivante :

$$R1r = \frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot r \cdot L} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot r2^2 \cdot \text{Log}\left(\frac{r1}{r2}\right)}{(r2^2 - r1^2)}\right) \quad (\text{III.8})$$

$$R2r = \frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot r \cdot L} \cdot \left(\frac{2 \cdot r2^2 \cdot \text{Log}\left(\frac{r1}{r2}\right)}{(r2^2 - r1^2)} - 1\right) \quad (\text{III.9})$$

$$R3r = \frac{1}{4 \cdot \alpha \cdot (r1^2 - r2^2) \lambda \cdot L} \cdot \left((r2^2 + r1^2) - \frac{4 \cdot r1^2 \cdot r2^2 \cdot \text{Log}\left(\frac{r1}{r2}\right)}{(r2^2 - r1^2)}\right) \quad (\text{III.10})$$

$$R1a = \frac{L}{\alpha \cdot \lambda \cdot a \cdot (r1^2 - r2^2)} \quad (\text{III.11})$$

$$R2a = \frac{L}{\alpha \cdot \lambda \cdot a \cdot (r1^2 - r2^2)} \quad (\text{III.12})$$

$$R3a = \frac{L}{3 \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot a \cdot (r1^2 - r2^2)} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

a est l'angle d'ouverture d'une portion de cylindre,

r et a sont les indices qui représentent respectivement la direction radiale et la direction axiale.

Dans le cas où les températures des deux côtés du cylindre sont égales, les équations III.11, III.12 et III.13 se réduisent à :

$$Ra = R1a + 2 \cdot R3a \quad (\text{III.14})$$

III.6.2.2. Bilan d'énergie

La discrétisation de la machine et la définition des différents éléments du circuit permettent d'établir un système d'équations mathématiques afin de résoudre le problème thermique. L'écriture de ce système est basée sur le bilan d'énergie dans chaque nœud, et peut se faire de la manière suivante :

$$Ci \cdot \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j \neq i} G_{ij} \cdot [T_j - T_i] - p_i \quad (\text{III.15})$$

C_i , p_i désignent respectivement la capacité thermique et la source de chaleur injectée au nœud i . La solution de ce système algèbre-différentiel pour l'ensemble des nœuds permet d'obtenir les flux qui traversent le nœud i ainsi que sa montée de température en régime transitoire. En

s'intéressant uniquement au régime thermique permanent, le terme (dT_i/dt) de l'équation III.15 est supprimé; il s'agit de résoudre l'équation :

$$\sum_{j \neq i} G_{ij} \cdot [T_j - T_i] = p_i \quad (\text{III.16})$$

Actuellement, il existe des logiciels thermiques qui sont utilisés pour la simulation thermique des machines électriques par la méthode nodale. Parmi ces logiciels on peut citer Motor-CADTM utilisé pour la modélisation thermique d'une variété de machines électriques telles que les machines asynchrones, les machines synchrones à aimants permanents et les machines synchro-reluctances.

Conclusion

La modélisation et l'expérimentation sont deux phases totalement indissociables pour valider tout modèle thermique, quelle que soit la méthode numérique utilisée. La phase expérimentale fournit les températures expérimentales, les conditions aux limites ainsi que les sources de chaleur internes. La simulation permet d'obtenir des conductivités bien particulières (bobinages, fluides, résistances thermiques de contact) et, en final, des points non atteignables expérimentalement. Ces deux phases ainsi que la présentation et la mise en œuvre du logiciel Motor-CAD constituent l'objet du chapitre IV.

Chapitre IV

**Etude du comportement thermique de
l'alternateur, simulation et
expérimentation**

Chapitre IV

Etude du comportement thermique de l'alternateur : simulation et expérimentation

IV.1. Introduction

La température des machines électriques constitue un des facteurs principaux limitant leurs performances. cette température doit respecter les limites imposées par conception et ne doit pas les dépasser. Par conséquent, afin de prévoir prédire l'élévation de la température dans les machines, des modèles thermiques sont employés. ceux-ci permettent de modéliser thermiquement les machines en vue de la surveillance.

Généralement, les études thermiques qui existent dans la littérature s'appliquent sur des machines électriques isolées de leur environnement. cependant, dans certains cas d'applications (Alternateurs, démarreurs,...) l'environnement mécanique de la machine impacte directement ses performances thermiques.

Ce chapitre présente la démarche globale pour établir un modèle thermique d'une machine électrique. Nous nous intéressons tout d'abord à présenter, dans la première partie du chapitre, le modèle thermique d'un turbo-alternateur de centrale thermique à vapeur et les résultats de simulation issus de la mise en œuvre de la méthode nodale sous l'environnement Motor-CAD. La deuxième partie du chapitre est dédiée à l'étude du comportement thermique de l'alternateur de la centrale de Jijel à partir des données de mesures issues de l'expérimentation.

IV.2. Modélisation thermique de l'alternateur

IV.2.1. Présentation du logiciel Motor-CAD

Motor-CAD est un des logiciels thermiques les plus utilisés pour la simulation du comportement thermique des machines électriques utilisant la méthode nodale. Ce logiciel est utilisé dans ce qui suit pour la modélisation thermique du turbo-alternateur de la centrale thermique à vapeur de Jijel. Ce turbo-alternateur synchrone triphasée refroidi à l'hydrogène et à l'eau de 210000 KW de puissance à fréquence de rotation de 3000

tr/min. Il est conçu pour la production de l'énergie électrique en association avec une turbine à vapeur [29].

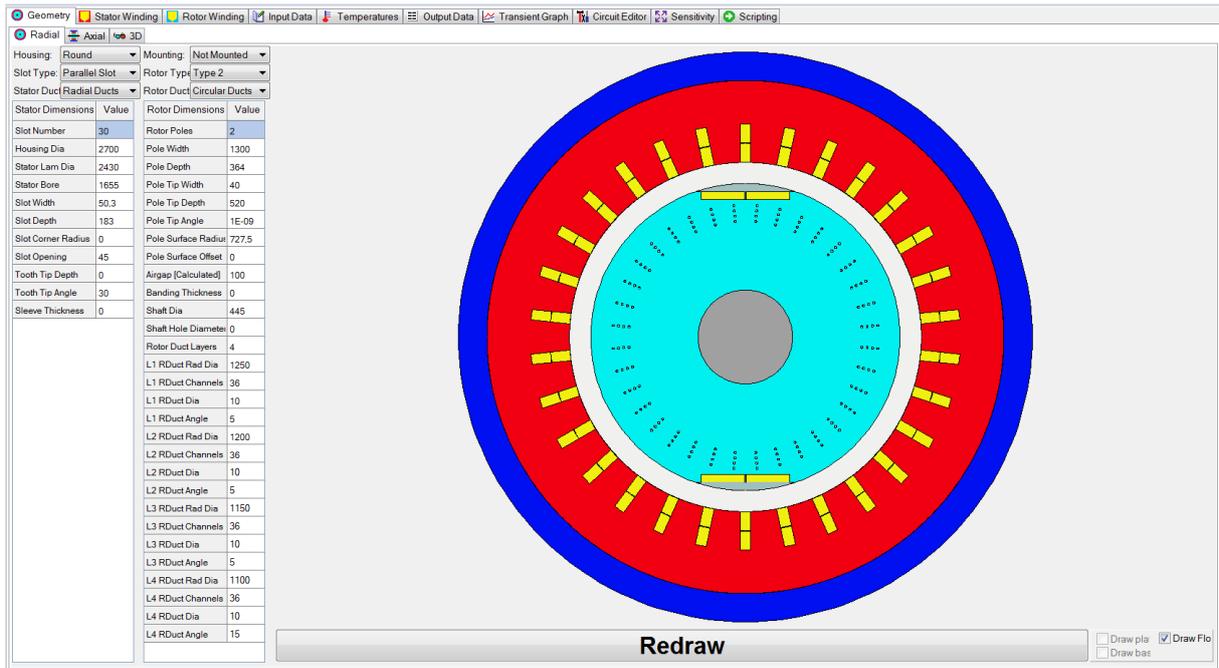
Ci-dessous les caractéristiques géométriques du turbo-alternateur regroupées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Caractéristiques géométriques de turbo-alternateur.

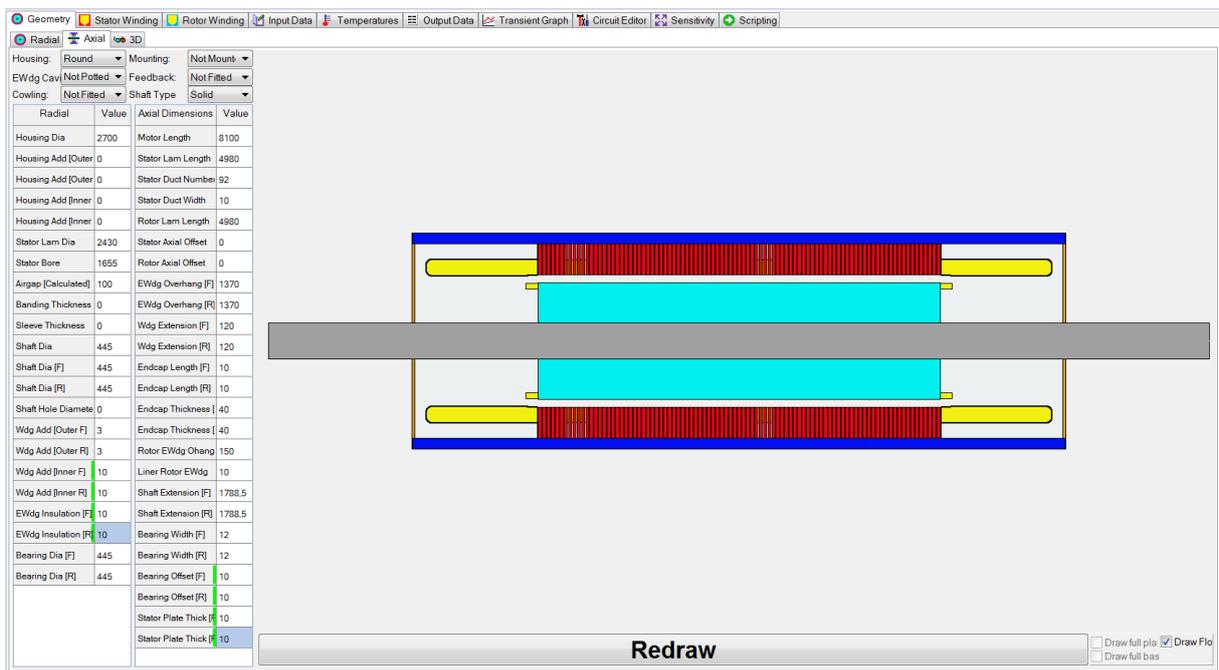
Paramètres	Valeurs
Nombre des encoches du stator	30
Nombre de paire de pôles	1
Nombre des conducteurs par encoche statorique	2
Longueur et largeur de coupe radiale de barres statorique [mm]	74x50
Longueur du stator [mm]	8100
Profondeur et largeur de l'encoche statorique [mm]	183x50,3
Longueur du circuit magnétique [mm]	4980
Longueur du circuit magnétique avec bobinage [mm]	7720
Diamètre du stator avec la carcasse [mm]	2700
Diamètre interne du stator [mm]	1655
Diamètre du circuit magnétique du stator [mm]	2430
Nombre des canaux radial de refroidissement de stator	92
Nombre des trous de refroidissement par barre statorique	20
Entrefer [mm]	100
Longueur de l'arbre du rotor [mm]	11677
Diamètre de l'arbre du rotor [mm]	445
Diamètre du rotor [mm]	1075
Nombre des conducteur par encoche rotorique	10
Nombre des encoches rotorique	36
Profondeur de l'encoche rotorique [mm]	173,5

En intégrant ses paramètres géométriques, les coupes radiale (Figure IV.1.a) et axiale (Figure IV.1.b) de turbo-alternateur sont tout d'abord créées sous le logiciel.

Dans l'interface du logiciel Motor-CAD, chaque couleur représente une partie de la machine (Carcasse en bleu foncé, circuit magnétique du stator en rouge, circuit magnétique du rotor en bleu clair, enroulements en jaune,...etc).



a) Coupe radiale



b) Coupe axiale

Figure IV.1. Interface de Motor-CAD pour le turbo-alternateur.

Les différents modes de refroidissement fréquemment utilisés dans les machines de grandes puissances sont prisent en compte par ce logiciel. Ces modes sont réalisés par le

passage d'un liquide ou d'un gaz dans des canaux fermés afin de refroidir la machine. La figure IV.2 montre une coupe axiale du turbo-alternateur avec deux systèmes de refroidissement. Le premier est un système de réfrigération d'hydrogène pour le refroidissement du rotor et du stator (Flèches en gris). Tandis que le deuxième est un système de refroidissement du stator par eau (Flèches en vert).

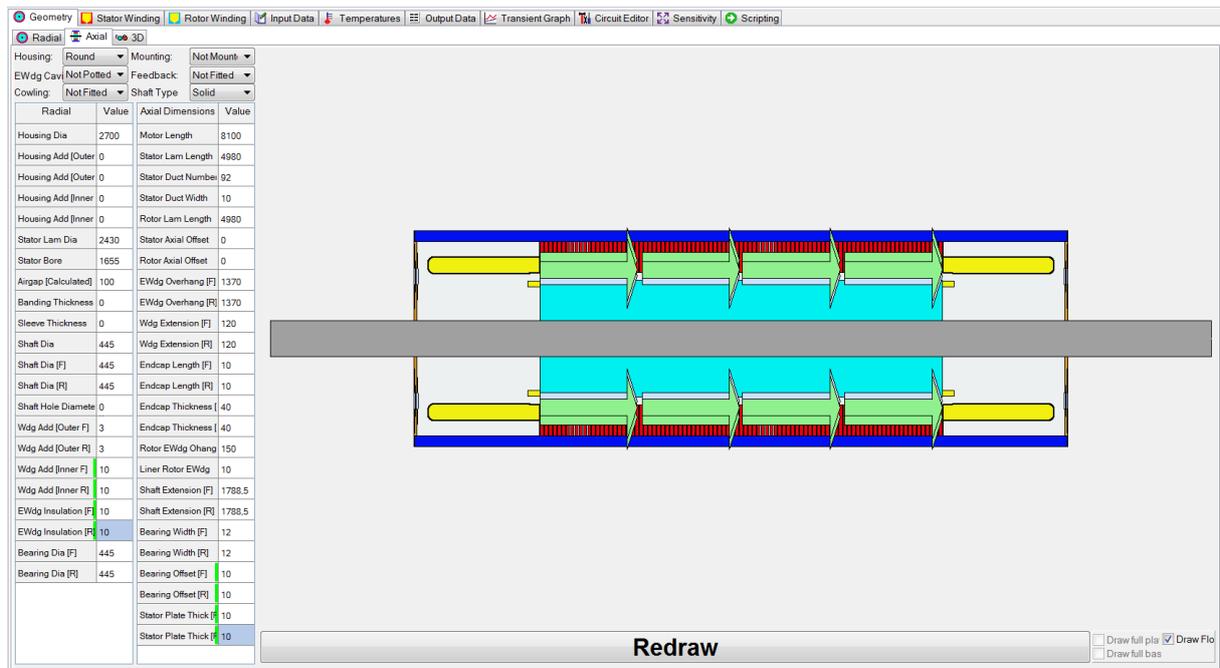


Figure IV.2. Interface de Motor-CAD pour le turbo-alternateur avec leurs circuits de refroidissement.

IV.2.2. Mise en œuvre de la méthode nodale par Motor-CAD

Un modèle thermique nodal à trois dimensions est ensuite généré tenant compte des différents modes et chemins de transfert de chaleur possibles à l'intérieur et à l'extérieur de l'alternateur (Voir chapitre III).

Le modèle thermique tridimensionnel de la machine est illustré dans la figure IV.3. Les rectangles colorisés représentent des résistances thermiques. Un rectangle vertical représente une résistance radiale. Un rectangle avec deux couleurs représente une résistance de contact entre deux parties. Les symboles R et C indiquent respectivement le rayonnement et la convection. Les cercles superposés et colorisés représentent les sources de chaleur des parties correspondantes.

La figure IV.4 montre la cartographie thermique de l'alternateur. Cette figure illustre les températures simulées dans les différentes régions de l'alternateur.

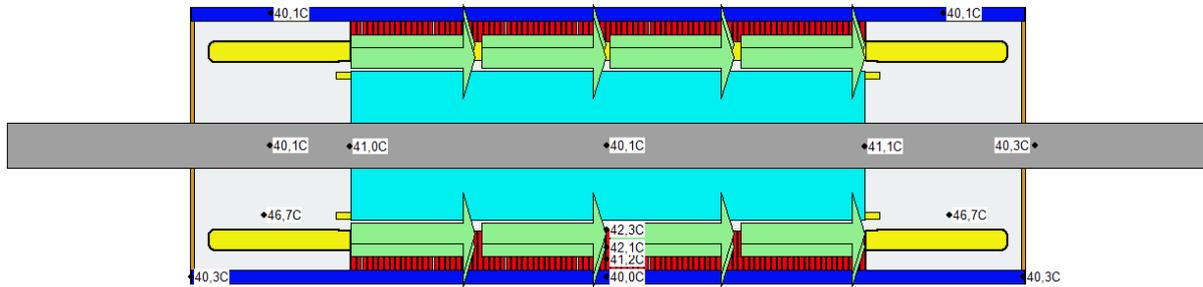


Figure IV.4. Cartographie thermique de l'alternateur.

Nous remarquons à travers cette figure que la majorité des flux de chaleur est évacuée par le circuit de refroidissement à travers le plan radial, des encoches vers les tôles du stator (culasse/dents) et ensuite vers le carter.

IV.2.2.2. Modèle thermique en régime transitoire

En régime thermique transitoire, les températures les plus sensibles de la machine sont aux niveaux des têtes de bobines et des encoches. La montée des températures est alors simulée sur une durée de 60 seconds.

La figure IV.5 représente les évolutions des températures simulées aux différentes régions de l'alternateur. Nous remarquons à partir de cette figure que les évolutions simulées sont cohérentes aux évolutions réelles des températures en régime transitoire.

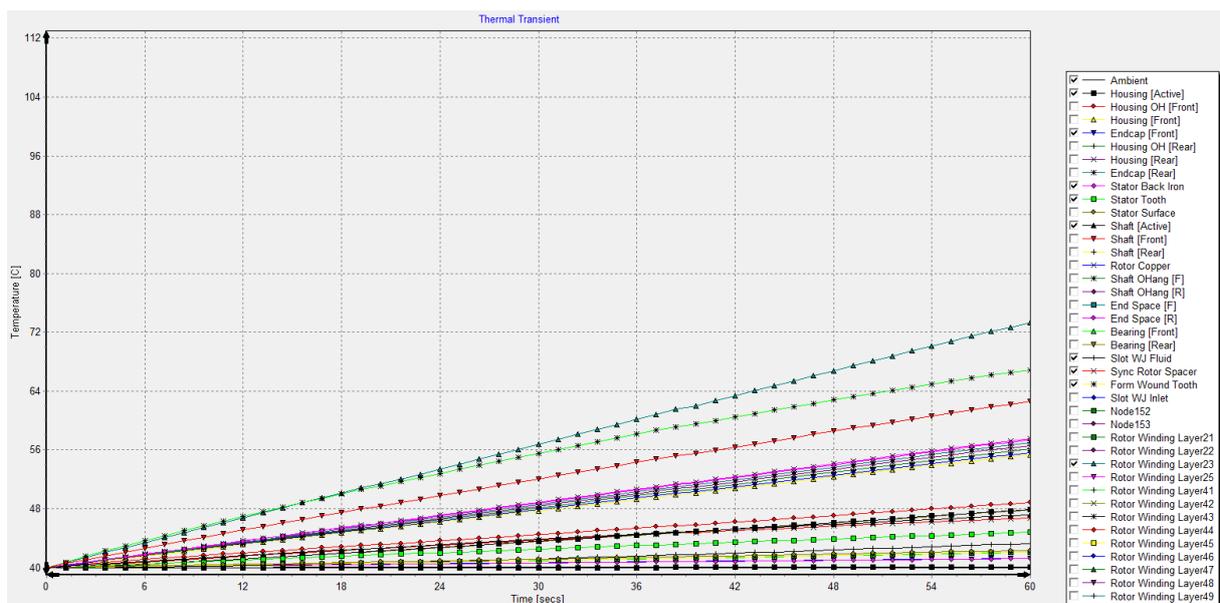


Figure IV.5. Evolutions des températures simulées de l'alternateur.

IV.3. Etude du comportement thermique expérimental de l'alternateur

Comme il a été signalé dans les chapitres précédant, l'alternateur de la centrale de Jijel qui est de puissance de 200 MW, qui est le siège d'un échauffement qui dû à la fois des pertes très importants et de la nature de son fonctionnement.

Pour étudier le comportement thermique de cette alternateur, on va adopter la méthode suivante : étant donné que la centrale de Jijel comporte des appareils de mesure et des appareils de surveillance, on va les exploiter pour :

- Déterminer la température du rotor
- Confirmer les paramètres du système électrique du stator
- Relevée les températures du noyau stator pour différentes charges
- Suivre le comportement en température de l'eau de refroidissement dans les branches de l'enroulement du stator.
- Confirmer la caractéristique de réglage de l'alternateur (comparer celle déterminée à partir du diagramme de potier et celle déduite expérimentale)
- Relevés des températures de l'enroulement du stator pour différentes charges
- Suivre le comportement thermique de l'échangeur de chaleur de refroidissement hydrogène
- Relevés des températures des portes balais et du métal des paliers d'étanchéité de l'hydrogène à l'intérieur du corps de l'alternateur.
- Relevée des paramètres de distillat de refroidissement du stator de l'alternateur

Les différentes mesures sont prises à tension constante et à facteur de puissance constant. Les mesures de puissance sont faites par la méthode de deux wattmètres (P1 et P2). Les températures sont prises directement du système de surveillance de température (scrutateur de températures ou installation de supervision en temps réel du turbo-alternateur)

IV.3.1. Détermination de la température du rotor

Le tableau IV.2 résume les performances de turboalternateur. Une étude approfondie de ce tableau peut aider à tracer les courbes représentées sur les figures IV.6 et IV.7.

Tableau IV.2. Grandeurs de turbo-alternateur.

N°	U2	I2	R2=U2/I2	T2(°C)	I ² (kA) ²	P2=U2*I2
01	216	987	0.219	24	0.974	213.5
02	235	1050	0.224	26	1.1	247.5
03	250	1100	0.227	28	1.21	275.5
04	288	1260	0.228	31	1.59	363.66
05	296	1300	0.228	35	1.69	385.7
06	301	1350	0.223	37	1.82	413.35
07	323	1450	0.223	41	2.1	468.35
08	339	1567	0.216	47	2.46	532.82
09	350	1650	0.212	50	2.72	578.55
10	356	1700	0.209	57	2.89	606.1
11	361	1750	0.206	60	2.54	633.65
12	367	1800	0.204	63	3.24	661.2
13	372	1850	0.201	66	3.42	688.75
14	377	1908	0.197	67	3.64	720.2

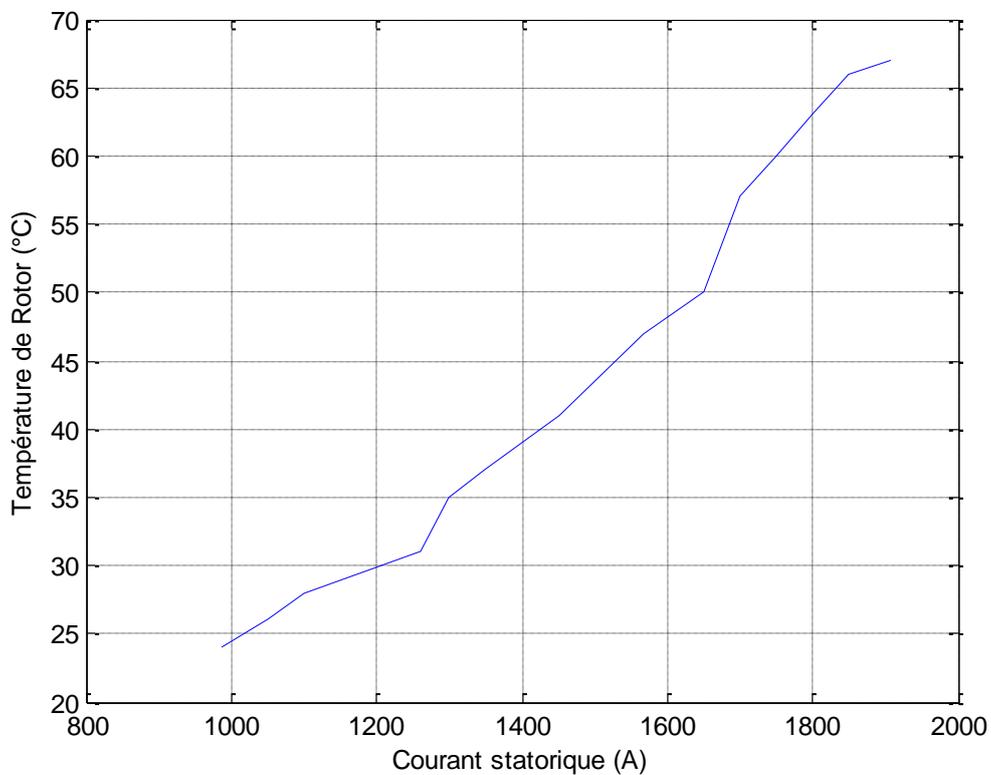


Figure IV.6. Variation de la température du rotor en fonction du courant statorique.

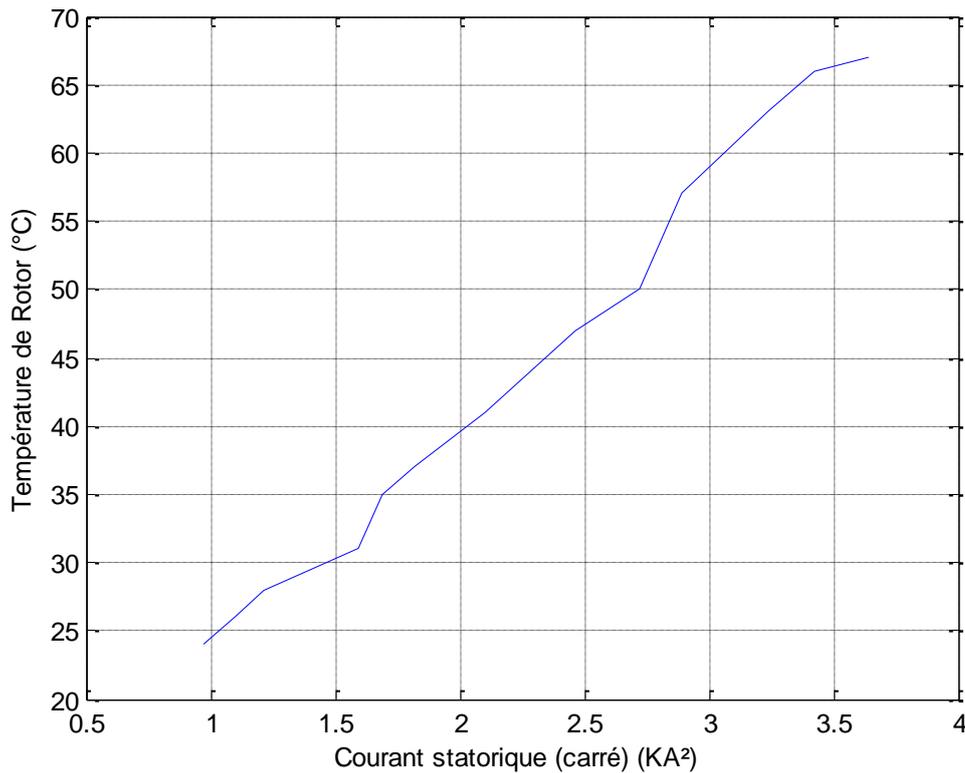


Figure IV.7. Variation de la température du rotor en fonction du carré du courant statorique.

Les figures ci-dessus montrent la variation de la température du rotor en fonction du courant statorique et du carré du courant statorique respectivement.

IV.3.1.1. Discussion et interprétation des résultats

Etant donné que le rotor ne dispose pas d'appareil directe de mesure de température, ainsi la méthode adoptée pour l'essai montre son rapproche de la valeur fournie par le dispositif de mesure de température qui est un calculateur à la base d'un transformateur d'intensité. La température déduite monte qu'elle augmente ainsi d'une façon non linéaire en fonction de l'intensité du courant.

Il faut signaler que la température du rotor n'est pas fonction seulement du courant du rotor mais aussi d'autres paramètres comme l'énergie réactive qui est variable durant le jour et l'état saint du réseau. Il faut, signalé que l'alternateur est doté d'une protection qui calcul le temps de refroidissement du rotor en cas de la non symétrie des paramètres électriques du réseau, dans le cas où la composant inverse est très important cette protection agira dans le sens d'arrêter l'alternateur.

IV.3.2. Température du noyau de stator

Le tableau IV.3 résume les valeurs de température du noyau de stator (Circuit magnétique).

Tableau IV.3. Valeurs de température du noyau de stator (Circuit magnétique).

	T031	T032	T033	T034	T035	T036	T037	T038	T039	T040
1	23	24	25.3	24	23.8	25	23.8	22	24	23
2	24.5	27	26.5	25	27	26	27	23	25.2	24
3	26	28.5	27.5	27	28.5	29.5	28.5	25	27.5	26
4	28.5	32	30	28.5	33.2	33	33.2	26.5	28.	27.5
5	30	34.5	33.5	30	35.5	35.5	35.5	28	30.8	29
6	32.5	37.5	35.5	32.5	39.5	38.5	39.5	30.5	32.1	31.5
7	36	41.5	39.5	35	43.5	42.5	43.5	33	35.9	34
8	39	46	44	38	49	47	49	36	38.2	37
9	45	52	50	43	56	53	56	41	43.8	42
10	48	57	56	47	61	58	61	45	47.2	46
11	54	62.5	61.5	52	65.5	63.5	65.5	49	51.5	50
12	62	69	68	60	72	70	72	58	59.3	59
13	72.5	77	74.5	70.43	81.2	78.3	84.8	68.8	70.34	69

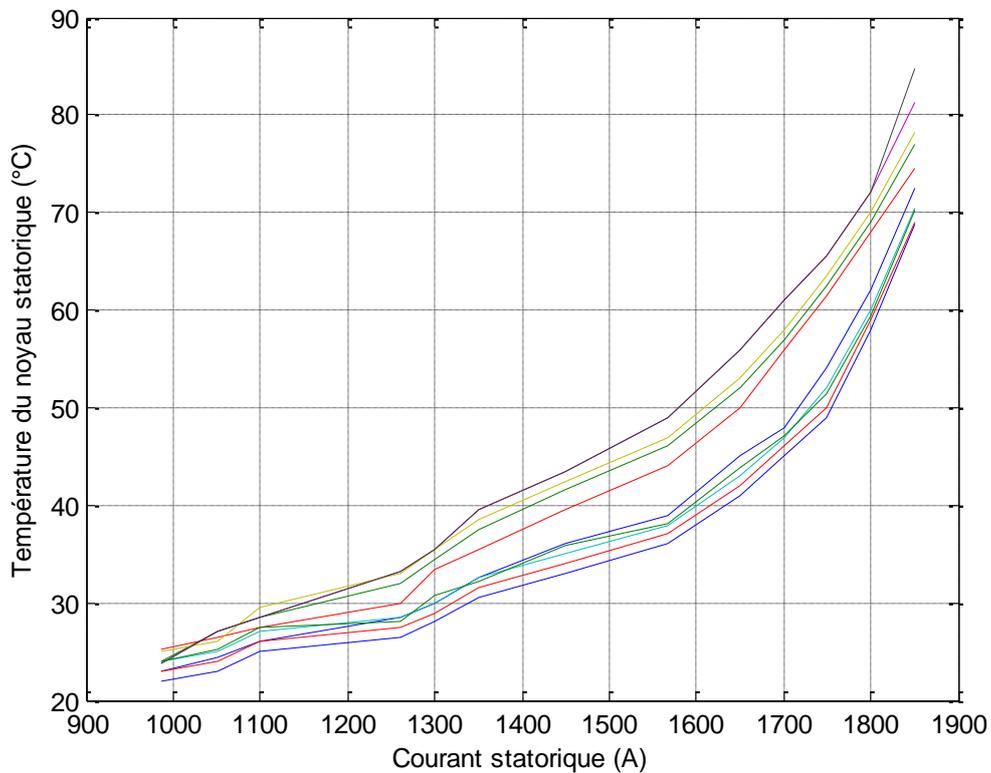


Figure IV.8. Variation de la température du circuit magnétique en fonction du courant statorique.

L'évolution de la température du circuit magnétique en fonction du courant statorique est montrée sur la figure IV.8.

IV.3.2.1. Discussion et interprétation des résultats

Tout en restant sur le plan général, on peut préciser qu'au sujet de l'indétermination de la position du point chaud, il n'est évidemment pas possible de placer un grand nombre de sondes pyrométriques dans la machine. C'est pourquoi on utilisera toujours une mesure de la température moyenne de l'enroulement, même lorsque les sondes seront placées dans la machine. De telles expérimentations ont été réalisées ces dernières années, elles ont permis de fixer l'ordre de grandeur de la correction à faire intervenir sur la température indiquée par une sonde entre sections pour atteindre la température du conducteur, et ceci, en fonction des caractéristiques de l'isolation.

IV.3.3. Caractéristique de réglage de l'alternateur

Le tableau IV.4 résume les valeurs caractéristiques de réglage de l'alternateur.

Tableau IV.4. Valeurs caractéristique de réglage de l'alternateur.

	P1	P2	Is	Us	P1/P2	Cos(ϕ)	Ir	I_{2r}
1	56.4	13.2	3000	15750	4.27	0.85	1028	1030
2	65.7	15.4	3500	15750	4.27	0.85	1096	1095
3	75.1	17.6	4000	15750	4.27	0.85	1160	1163
4	84.7	19.6	4528	15750	4.32	0.85	1233	1237
5	93.4	22.45	5000	15750	4.16	0.85	1308	1305
6	103.3	24.2	5500	15750	4.27	0.85	1382	1378
7	112.6	26.5	6000	15750	4.25	0.85	1448	1454
8	122	28.7	6500	15750	4.25	0.85	1525	1530
9	127.5	30	6792	15750	4.25	0.85	1579	1576
10	131.4	30.9	7000	15750	4.25	0.85	1614	1609
11	140.8	33	7500	15750	4.27	0.85	1692	1688
12	150	35.1	8000	15750	4.27	0.85	1765	1769
13	159.6	37.5	8500	15750	4.26	0.85	1845	1850
14	170	40	9057	15750	4.25	0.85	1933	1940

Une meilleure exploitation de ce tableau peut aider à tracer les courbes représentées sur la figure IV.9.

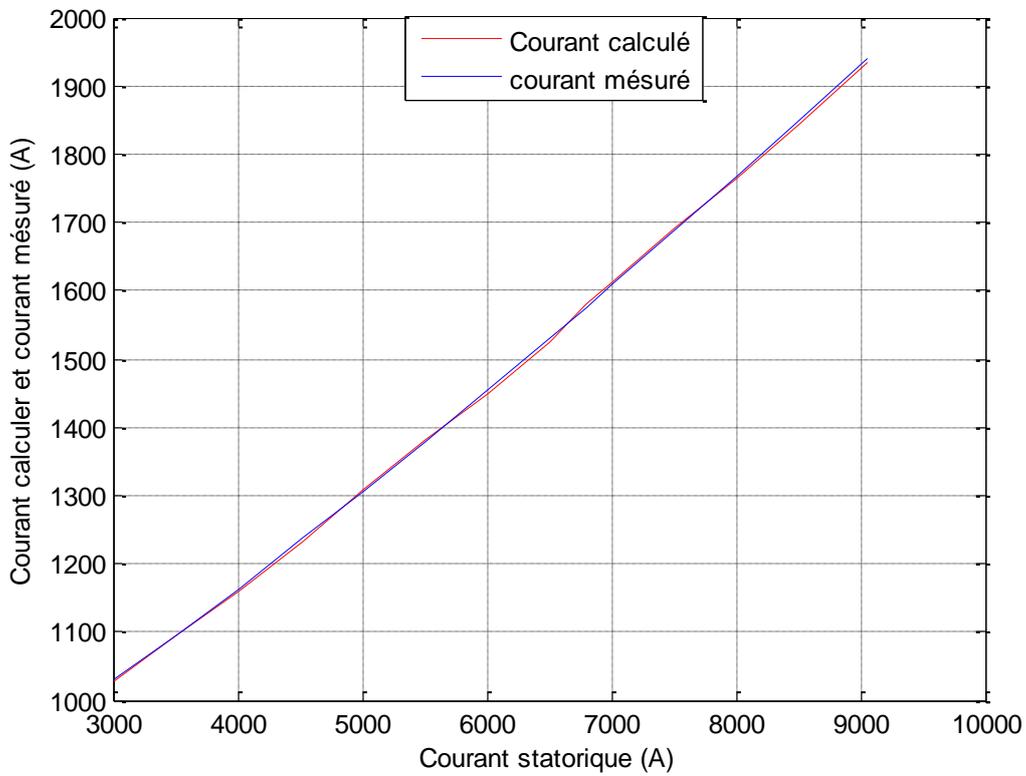


Figure IV.9. Variation des courants calculés et mesurés en fonction du courant statorique.

IV.3.3.1. Discussion et interprétation des résultats

A partir des résultats obtenus, on remarque une bonne concordance entre les valeurs des courants calculés et mesurés, par explication on peut dire que lorsque la température des barres statorique n'est pas élevée, alors ces derniers peuvent transporter un courant presque identique à celui calculé.

IV.3.4. Température de l'enroulement du stator (barres statoriques)

Le tableau IV.5 résume les différentes valeurs de la température des barres statoriques de l'alternateur.

Tableau IV.5. Températures des barres statoriques de l'alternateur.

	T011	T012	T013	T014	T015	T016	T017	T018	T019	T020
1	26.1	26.2	26.5	25.4	24.7	24.1	26.2	26.00	26.1	24.4
2	27.3	27.7	27.5	26.91	26.21	25.71	27.3	27.1	27.3	25.91
3	28.9	28.9	29	28.9	27.2	26.9	28.7	28.6	28.9	26.9
4	30.	30.	30.5	31.	29.2	29.5	30.5	30.1	30.	28.9
5	32.8	31.9	32.5	32.58	31.58	31.9	32.5	31.9	32.8	31.58
6	34.9	35.8	35	35.8	35.1	34.7	35	34.1	34.9	34.8
7	37.3	36.9	37	37.5	36.8	36.9	37	36.3	37.3	36.5
8	39.1	39.8	39	39.6	38.9	38.8	39	38.9	39.1	38.6
9	41.9	42.5	42	42.9	41.2	40.7	42	42.0	41.9	40.9
10	45.2	46	45	45.8	43.1	42.6	45	45.2	45.2	42.8
11	47.5	47.9	47	47.6	44.9	44.9	47	46.9	47.5	44.6
12	49.5	50.5	49.5	49.4	47.7	47.5	49.5	48.9	49.5	47.4
13	52.23	53.2	51.23	51.69	50.5	49.13	51	52	52.23	49.9

La figure ci-dessous présente les résultats de la variation des températures des barres statoriques en fonction du courant statorique.

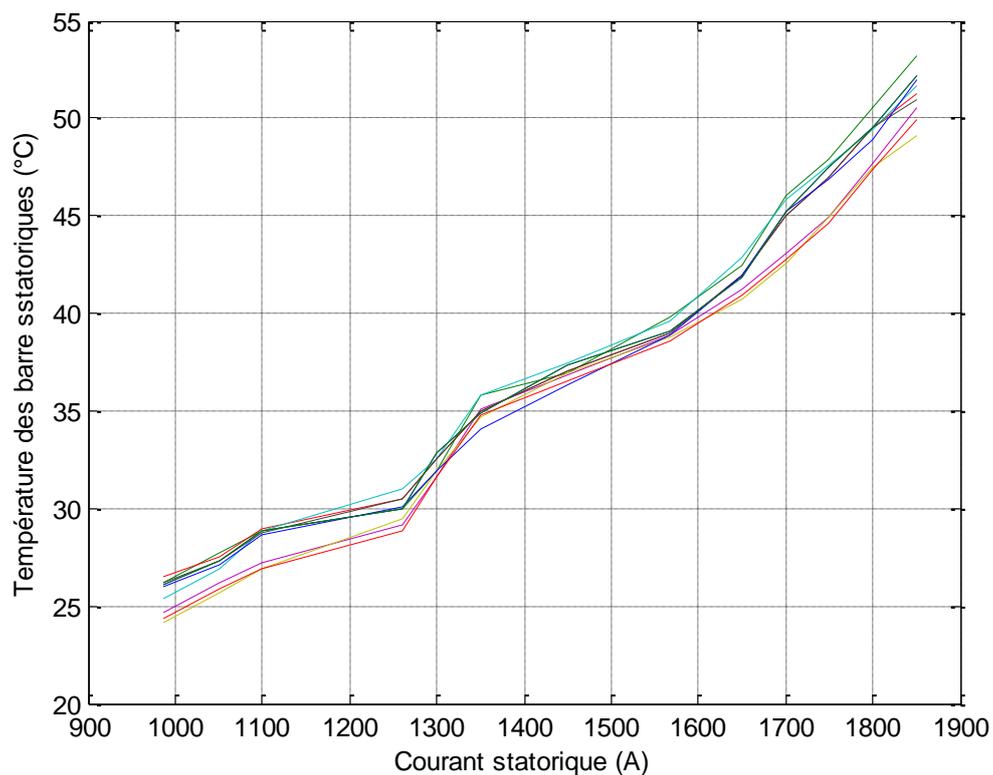


Figure IV.10. Variation des températures des barres statoriques en fonction du courant statorique.

IV.3.4.1. Discussion et interprétation des résultats

La maîtrise de la température de fonctionnement de l'alternateur repose sur le bon fonctionnement des deux réfrigérants, de l'eau statorique (circulant dans les barres de l'alternateur) et de l'hydrogène circulant dans le corps de l'alternateur, cela veut dire qu'il faut toujours maintenir un taux d'échange thermique de ces deux réfrigérants très élevé.

L'allure des courbes obtenues pour les enroulements du stator et du noyau du circuit magnétique présente plus de non linéarité de plus que la température du fluide de refroidissement est élevé, sans oublier la fiabilité de la chaîne de mesure des températures.

L'hydrogène a un double rôle, assure le refroidissement et conserve l'isolation, cela veut dire que maintenir l'état thermique de l'alternateur c'est conserver son isolation qui est la finalité de surveiller le comportement thermique de l'alternateur.

D'autre part l'état de l'hydrogène influe aussi sur la température du rotor, et sur l'alternateur d'une façon générale. La régénération de l'hydrogène comme étant fluide qui assure le maintien de l'alternateur à un état fonctionnel souhaitable est conditionné par la température de l'eau de mer (eau réfrigérante : échange de la chaleur avec l'hydrogène). La température de l'eau de mer varie de l'hiver à l'été de 7°C en hiver à 26°C pendant l'été, chose qui a beaucoup de répercussion sur l'état thermique de l'alternateur, il faut signaler la non disponibilité de l'eau de mer entrainera directement l'arrêt de l'alternateur.

Conclusion

Afin d'améliorer l'étude des machines électriques et la réalisation des modélisations multi-physiques, le logiciel Motor-CAD présente une passerelle vers plusieurs logiciels de simulation. En revanche, Motor-CAD nécessite la connaissance parfaite et les informations détaillées sur la géométrie et les matériaux de la machine. De plus, le logiciel possède un nombre défini de machines électriques sans que l'utilisateur puisse intégrer de nouvelles topologies ou des machines particulières. Finalement, les différents modes de calcul des éléments du réseau thermique (résistances, capacités et pertes) ne sont pas exploitables.

Tout en restant sur le plan général, on peut préciser qu'au sujet de l'indétermination de la position du point chaud, il n'est évidemment pas possible de placer un grand nombre de sondes pyrométriques dans la machine. C'est pourquoi on utilisera toujours une mesure de la température moyenne de l'enroulement, même lorsque les sondes seront placées dans la machine. De telles expérimentations ont été réalisées ces dernières années, elles ont permis de

fixer l'ordre de grandeur de la correction à faire intervenir sur la température indiquée par une sonde entre sections pour atteindre la température du conducteur, et ceci, en fonction des caractéristiques de l'isolation.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectifs de ce mémoire de fin de cycle sont multiples : d'une part effectuer des recherches sur les technologies du futur dont les paramètres essentiels sont la compréhension, maîtrise et mise en œuvre les modèles existants, d'autre part acquérir des expériences et des connaissances pointues dans les domaines industriels.

Pendant notre stage, nous nous sommes familiarisés avec le secteur de l'industrie. Nous avons relevé les différentes parties de la centrale thermique de JIJEL, ainsi que le principe de fonctionnement de cette dernière et on a pu suivre tout un cycle de production en commençant par la station de pompage de l'eau de mer jusqu'à l'évacuation de l'énergie électrique vers le réseau.

Sachant que l'alternateur a besoin d'un refroidissement continu, le système de refroidissement à base d'hydrogène et d'eau distillée (système mixte), a montré beaucoup d'avantage soit concernant le dimensionnement (taille de l'alternateur) ou concernant la conservation de l'isolation (durée de vie prolongée).

L'étude faite explique les valeurs des températures au niveau de l'alternateur en temps réel qui sont très fiables, avec les résultats obtenus suite aux expériences car on est très loin des températures maximales, l'alternateur fonctionne dans les conditions souhaitables.

L'étude d'échauffement de l'alternateur est très compliqué du faite du nombre des paramètres qui influence les valeurs des températures et de voir l'impact de chaque paramètre indépendamment des autres qui nécessite beaucoup de données et moyens, soit sur le plan pratique ou théorique.

Ce domaine est très intéressant vu qu'il touche une partie très importante en relation avec le dimensionnement et la durée de vie de l'équipement chose qui donne beaucoup de perspectives dans les travaux de l'avenir.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] WWW.aLstom.com,WWW.ABB-aLston-Power.com
- [2] « Nouveau turbo-alternateur refroidi à l'air de la classe de 300 MVA », revue.ABB .1/1996.
- [3] P.BRUTSAERT, D.LALOY, P.ROBERT&D.VERBEKE. « D3570 », T.d'ingénieur 10 nov. 2005
- [4] « Manuel d'exploitation de refroidissement de la centrale de Jijel », document technique de la central de Jijel
- [5] Y.BERTIN , "D3460 ", T.d'ingénieur, 10 mai 1999
- [6] M.VERRIER, P.CHAY, M.GABION , "D3530 T.d'ingénieur Da, 10 févr. 2009
- [7] Haase, H..Largiadèr, H.Conception et fonctionnement sur banc d'essai d'un turboalternateur de 200 MVA refroidi par air. CIGRE Session 1984, Rapport 11-09.
- [8] <http://blog.seatronic.fr/fiches-pratiques/energie/production/alternateur/principe/>
- [9] W.Chttibi & F.Bouadam rapport de stage de la centrale Jijel 2009/2010.
- [10] J.Eric Torlay « Etude des courants et des tensions d'arbre et de phase dans les grands alternateurs » 09 Mar 2012.
- [11] D.SOUQUE, L.CHATONNET &É.MONNOT « refroidissement de turboalternateur » T.d'ingénieur, 10 nov. 2013
- [12] « Description technique et notice d'utilisation », Fichier technique de la centrale thermique de Jijel.JL521 ME F 2/149
- [13] M.VERRIER,P.« D3530 V2 », Turboalternateurs,T.d'ingénieur,10 02 2009
- [14] WWW.trace-industry.com
- [15] M. Kirouac « développement de modèle analytique thermique pour des machines à a permanents » Maîtrise en génie électrique université de Québec, Canada 2015
- [16] J.Lutun. Modélisation thermique des alternateurs automobiles. Energie électrique. Université de Grenoble, 2012. Français.
- [17] G. Grellet. Pertes dans les machines tournantes. Techniques de l'ingénieur, Généralités sur les machines électriques tournantes,10 12 1989.
- [18] A. Fasquelle, «contribution à la modélisation multi-physique: électro-vibro-acoustique et aérothermique de machines de traction,» Thèse de l'Ecole Centrale de Lille, Lille, 2007.

- [19] C. Schlegel, A. Hösl & S. Diel. Detailed Loss Modelling of Vehicle Gearboxes. In Proceedings 7th Modelica Conference, Como, Italy, Sep. 20-22, 2009.
- [20] A. Grobler, «Thermal modelling of a high speed permanent magnet synchronous machine,» PHD at the Potchefstroom campus of the North-West University, Potchefstroom, 2011.
- [21] L. Youngkook, «A stator turn fault detection method and a fault-tolerant operating strategy for interior pm synchronous motor drives in safety-critical applications,» PHD at Georgia Institute of Technology, Georgia, 2007.
- [22] A.Chirila, C. Ghita, A. Craciunescu, I.D. Deaconu, V. Navrapescu & M. Catrinou, «Rotating Electric Machine Thermal Study,» chez International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Las Palmas de Gran Canaria, 2010.
- [23] J.F. Trigeol, «Identifaction des pertes d'une machine électrique par une approche thermique et à l'aide d'une technique inverse,» Thèse de doctorat à l'Université de Poitiers, Poitiers, 2004.
- [24] J.F. Trigeol, Y. Bertin et P. Lagonotte, «Coupling control volume modeling in fluid and lumped thermal model – Application to an induction machine,» chez IEEE Industrial Electronics, Paris, 2006
- [25] P. Mellor, D. Roberts et D. Turne, «Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design,» IEE Proceedings, pp. 205-218, 1991.
- [26] D. Roye,R. Perret. Définitions des règles de modélisation thermique des machines électriques tournantes. Rev. Phys. Appl. (Paris), vol. 20, no. 3, pages 191202, 1985.
- [27] J. Lindstrom. Thermal model of a permanent-magnet motor for a hybrid electric vehicle. Rapport technique, Chalmers University of Technology, Sweden, 1999.
- [28] P.H. Mellor, D. Roberts & D.R. Turner. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, vol. 138, no. 5, pages 205218, Sep 1991.
- [29] D.A. Staton & A. Cavagnino. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 55, no. 10, pages 35093516, Oct 2008.
- [30] A. Boglietti, A. Cavagnino & D.A. Staton. Determination of Critical Parameters in Electrical Machine Thermal Models. In Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, pages 7380, Sept 2007.