

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en
Electrotechnique
Option : machines électriques

Thème
Thème

Calcul et exploitation d'un Turboalternateur

Proposé et dirigé par :

M^r M^d T.BELASSEL - H. AZOUZ

Etudié par :

- H. AIT OUAZZOU

Promotion 2009



*Je dédie Mon Travail avant tous A mes Chers Parents, Mon PERE qui ne cesse pas de M'encourager, et qui Ma toujours soutenu, Ma jolie MERE symbole de sacrifice et qui est tout pour moi, pour Sa Tendresse profonde **Que Dieux me les protègent **.*
A Mes chers Frères et Sœurs et ses familles
*Spéciale Dédicace à **Noura Dahmani**.*
A tous mes collègues de département d'électrotechnique.
A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire.

Hocine

Je dédie ce modeste travail à :

- ☀ Mes très chers parents*
- ☀ Mes frères et sœurs*
- ☀ Toute ma famille*
- ☀ Tous Mes amis (es)*

Hassane

Remerciements

Avant tout nous remercions Dieu le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude à notre promoteur MR Med.T.BELASSEL pour son aide précieuse qu'il nous a apporté et son disponibilité tout au long de notre travail.

Nos remerciements vont aussi au département de l'électrotechnique de tizi-ouzou et tous les enseignants qui nous ont enseignés durant toutes les années de notre cursus.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

PARTIE I

CHAPITRE I : PRODUCTION DE LA VAPEUR

I.1. Introduction.....	02
I.2. La combustion Lors d'une réaction chimique.....	02
I.3. Les éléments combustibles.....	02
I.4. Production de la vapeur.....	04
I.5. Générateur de vapeur.....	04
I.6. Cycle thermodynamique.....	06
I.7. Fonctionnement de la chaudière	07
I.8. Écoulement de la vapeur.....	07
I.9. Condenseur.....	07
I.10. Réglage du générateur de vapeur.....	08

CHAPITRE II : TURBINE A VAPEUR

II.1. Introduction.....	10
II.2. Constitution d'une turbine à vapeur.....	10
II.3. Refroidissement de la turbine.....	11
II.4. Nettoyage de la turbine.....	12
II.5. Remise en service.....	12

CHAPITRE III : GROUPE D'EXCITATION

III.1. Introduction.....	14
III.2. Description du groupe d'excitation.....	14
III.3. Refroidissement du groupe d'excitation.....	14
III.4. Contrôle, mesure et surveillance du groupe.....	15

CHAPITRE IV : L'ALTERNATEUR

IV.1. Introduction.....	18
IV.2. Principe de fonctionnement.....	18

IV.3. Description et Constitution de l'alternateur.....	19
IV.4. Refroidissement de l'alternateur.....	24
IV.5. Alimentation en gaz et étanchéité de l'arbre.....	27

PARTIE II

CHAPITRE I : Calcul électromagnétique

I.1. Introduction.....	32
I.2. Calcul des dimensions principales.....	32
I.2.1. Dimensions du stator.....	32
I.2.2. Paramètres de l'enroulement statorique.....	49
I.2.3. Dimensionnement du rotor.....	54
I.2.4. Calcul de circuit magnétique.....	60
I.3. Calcul des paramètres de la machine.....	74
I.4. Calcul des pertes et rendements.....	94

PARTIE III

I.1. Application numérique

Conclusion générale.

Annexes.

Bibliographie.

INTRODUCTION GENERALE

La production d'électricité est un secteur industriel, destiné à offrir à des clients, particuliers, organisations, industries, le service d'un approvisionnement régulier en énergie électrique.

La production d'électricité se fait depuis la fin du XIX^e siècle à partir de différentes sources d'énergie potentielles. Les premières centrales électriques fonctionnaient au bois. Aujourd'hui, la production se fait à partir du pétrole, du gaz naturel, du charbon, de l'énergie nucléaire, l'énergie hydraulique, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne.

Dans les grandes centrales thermiques et hydrauliques, pour transformer ces différentes sources d'énergies naturelles en énergie électrique, on utilise des turboalternateurs de grande puissance.

Dans notre pays les centrales thermiques à vapeur sont construites généralement au bord de la mer à cause du déficit que connaît l'Algérie en ressources hydrauliques.

Toutefois, pour que l'eau de mer soit utilisable, il faut au préalable le traiter, et ensuite la chauffer et l'élever à une température et pression bien déterminer sous forme de vapeur saturée, pour le détendre sur la turbine.

Dans le cadre de notre projet, qui a pour thème calcul et exploitation d'un turboalternateur synchrone bipolaire à axe de rotation horizontal, et à rotor à pôle lisse (200MW, 3000tr/min) entraîné par une turbine à réaction à plusieurs étages, notre but est le dimensionnement du groupe turboalternateur, de moyenne puissance, bipolaire et à refroidissement direct du stator (par eau) et du rotor (par hydrogène), dont la turbine fonction à vapeur.

Pour ce faire, nous avons reparti notre travail en trois parties, la première partie est constituée de quatre chapitres, le premier chapitre est consacré aux différentes étapes de la production de la vapeur, le second chapitre traite la constitution et fonctionnement de la turbine à vapeur utiliser, le troisième chapitre est consacré à la description et la surveillance du groupe d'excitation, on termine cet partie par le quatrième chapitre qui englobe la description et le fonctionnement du l'alternateur.

La seconde partie est constituée d'un chapitre consacré au dimensionnement du turboalternateur, dont on a calculé la feuille stator et ces différents paramètres, ensuite le rotor et le circuit magnétique, ainsi que les pertes et rendement.

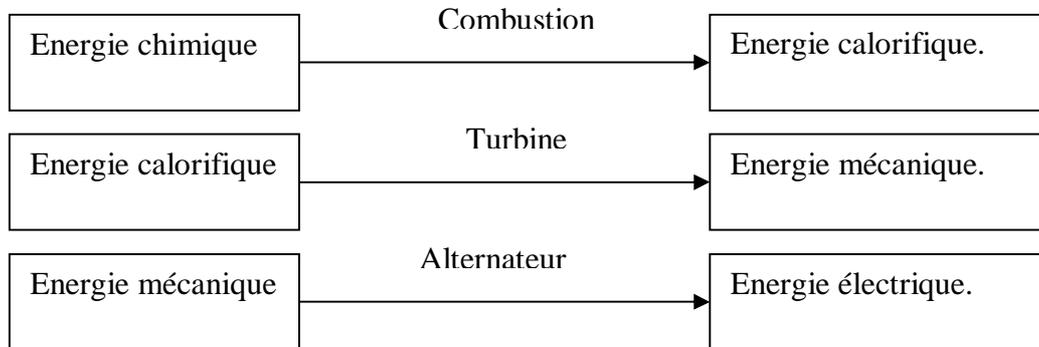
La dernière partie est consacrée aux différentes applications numériques, dans lequel on a utilisée un logiciel MATH CAD 13.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale.

PARTIE I

I.1. Introduction :

La production de l'énergie électrique à partir de l'énergie chimique se traduit par les étapes suivantes :



I.2. La combustion Lors d'une réaction chimique :

Les molécules de deux Substances se combinent pour former une nouvelle substance. Certaines réactions chimiques, notamment celles impliquant des atomes d'oxygène, produisent non seulement une nouvelle substance, mais dégagent, en même temps, de l'énergie sous forme de chaleur. Dans certaines réactions, la chaleur dégagée est tellement grande que l'augmentation de température qui en résulte porte les éléments à l'incandescence et produit ce qu'on appelle un feu. Ce type de réaction est une réaction de combustion. L'oxygène de l'air réagit vivement avec les atomes de carbone (C), d'hydrogène (H), de soufre (S) et toutes les substances contenant ces atomes, ce qui explique la combustion du charbon, du bois, du mazout et du gaz naturel. [8]

I.3. Les éléments combustibles :

L'union des atomes d'oxygène avec les atomes de carbone, d'hydrogène, de soufre, etc., se fait dans des proportions précises et connues. La chaleur dégagée et les nouvelles substances créées peuvent donc être déterminées d'avance lorsque l'on connaît la nature du combustible. Le (**tableau I.1**) en donne les détails. Ainsi, la combustion complète de 1 kg de carbone nécessite 2,67 Kg d'oxygène et il en résulte 33,8 Mj de chaleur. La réaction produit du gaz carbonique, gaz non toxique qui est le même que celui qu'on expire des poumons. Comme l'air sec contient 23,2% d'oxygène par unité de masse, il faut multiplier la masse d'oxygène par 4,3 pour obtenir la masse d'air (11,5 kg) requise pour la combustion complète de 1 kg de carbone. À partir des valeurs données dans le (**tableau I.1**), on peut calculer la valeur calorifique de n'importe quel combustible

dont on connaît la composition. Les (**tableaux I.2 et I.3**) donnent une idée de l'énergie dégagée par divers types de charbon, de pétrole et de gaz. [8]

Type	Masse	Masse d'oxygène requise	Chaleur dégagée*	Produits de la combustion	Masse d'air requise	Volume d'air**
	(kg)	(kg)	MJ		(kg)	(m ³)
carbone	1 kg	2,67	33,8	CO ₂	11,5	9,6
hydrogène	1 kg	8	120*	H ₂ O	34,5	28,8
soufre	1 kg	1	9,3	SO ₂	4,3	3,6
méthane CH ₄	1 kg	4	50*	CO ₂ + H ₂ O	17,2	14,3
éthane C ₂ H ₆	1 kg	3,73	47,5*	CO ₂ + H ₂ O	16,1	13,4
propane C ₃ H ₈	1 kg	3,64	46,5*	CO ₂ + H ₂ O	15,6	13

* Énergie disponible après avoir soustrait la chaleur latente de vaporisation de l'eau, laquelle n'est pas récupérable dans la chaudière.

** À une température de 20 °C et une pression atmosphérique normale de 101 kPa.

ÉLÉMENT	pourcentage dans le charbon		pourcentage dans le pétrole	
	min.	max.	huile légère	mazout
carbone	55	85	85,5	85
hydrogène	2	5	13,5	10,5
soufre	1	4	1	4
autres	42	6	-	0,5
MJ/kg	21	35	45	42

TABLEAU I.3 COMPOSITION DES GAZ NATURELS		
ÉLÉMENT	contenu en pourcentage	
	échantillon A	échantillon B
méthane CH ₄	63	96
éthane C ₂ H ₆	3	0,1
propane C ₃ H ₈	2	0
azote N ₂	28	1
autres	4	2,9
MJ/kg	33,8	48

I.4. Production de la vapeur :

La plupart de temps l'électricité est produite à partir d'une source de chaleur, en utilisant l'eau comme colporteur d'énergie. Cette vapeur est produite dans des chaudières en transformant l'eau en vapeur. Les générateurs de vapeur constituent l'un des moyens de production de celle-ci.

I.5. Générateur de vapeur :

Le générateur de vapeur appelé aussi chaudière est un appareil destiné à produire de la vapeur sous certaine condition de température et de pression. La chaudière est composée essentiellement de faisceaux vaporisateur, chambre de combustion, brûleurs, ballon chaudière et des appareils de récupération. [2]

1.5.1. Chambre de combustion (Foyer) :

La chambre de combustion est la partie principale du générateur de vapeur. C'est dans cette enceinte qu'en lieu les principaux échanges de chaleur (air-combustible) pour la préparation de la combustion. Ce mélange sera génère par les brûleurs dans la chaudière. [4]

1.5.2. Brûleurs :

La chaudière est équipée des brûleurs qui ont pour but d'engendrer et d'entretenir l'ignition du combustible

Les brûleurs provoquant la combustion du gaz, pulvérisé projeté à l'intérieur de la chaudière. Avant d'être projeté dans la chaudière. [2]

1.5.3. Ballon chaudière (ou réservoir):

Contenant de l'eau et de la vapeur à haute pression. Il constitue à la fois le point de départ de la vapeur vers les turbines et le récepteur de l'eau d'alimentation de retour. La vapeur se dirige vers la turbine haute pression (HP) en passant par un surchauffeur. Ce dernier, formé d'une série de tubes entourant le feu, provoque une forte augmentation de la température de la vapeur (200 °C environ). Cela assure une vapeur qui est absolument sèche et donne un meilleur rendement thermique. Dans ce réservoir de mélange d'eau et de vapeur on assure la séparation de la vapeur de l'eau au moyen de séparateurs dites cyclones. [8]

1.5.4. Faisceaux vaporisateurs :

Ce sont des tubes d'eau (écrans vaporisateurs) sous formes spirales, suspendus à la charpente de la chaudière et peuvent suivre librement toute dilatation thermique sans qu'apparaissent des contraintes inadmissibles dans les tuyaux.

L'eau se trouvant dans l'écran vaporisateur va être chauffée directement par rayonnement et par convection et se vaporise en partie, cette vapeur saturée sera dirigée vers le ballon chaudière. [4]

1.5.4. Appareils de récupération [4] :

Ce sont des échangeurs thermiques destinés à récupérer une partie de la chaleur contenue dans le gaz de combustion, et cela afin d'augmenter le rendement de la chaudière, et minimiser les pertes de chaleur. Les principales fonctions de ces appareils sont:

➤ Surchauffeur et resurchauffeur:

Ce sont des faisceaux tubulaires soumis aux températures élevées et sont constitués de nappes de tubes disposés en parallèles sous formes de serpentins, montés dans le parcours de gaz de combustion.

➤ L'économiseur :

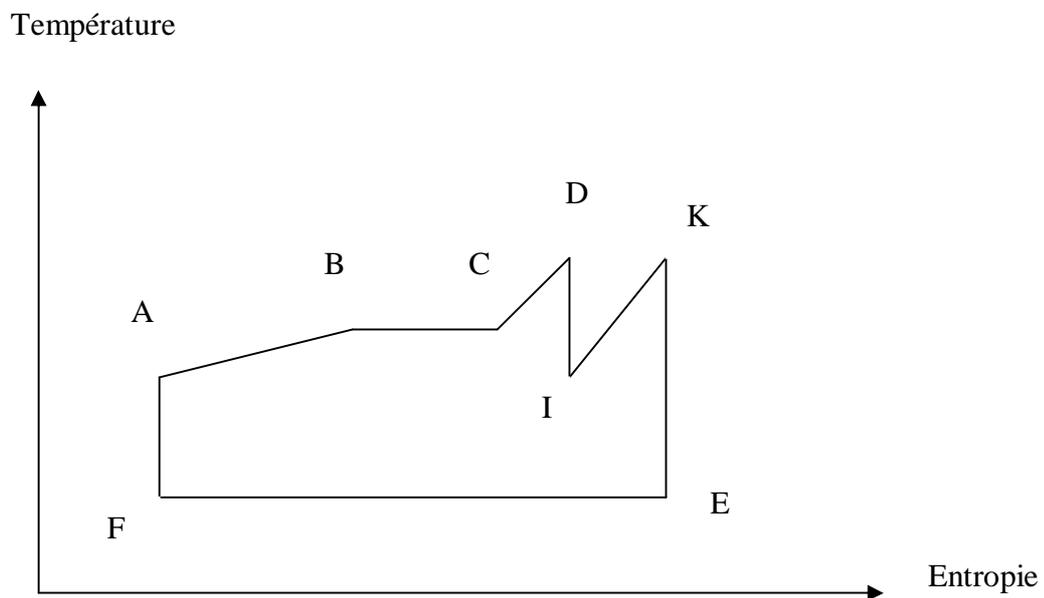
C'est une tuyauterie en forme de serpent, il se trouve à la fin de parcours de gaz de combustion. Il assure la réception, le réchauffement et l'acheminement de l'eau d'alimentation vers le ballon chaudière.

➤ Réchauffeur d'air :

Le réchauffeur d'air sert à réchauffer l'air de combustion par récupération de chaleur des fumées, ce qui augmente le rendement de la chaudière, et facilite le séchage et l'inflammation des combustibles humides.

I.6. Cycle thermodynamique :

Sur le **Graphes I.2** on décrit la température du cycle théorique de l'eau vapeur de la centrale thermique en fonction de l'entropie (une grandeur utilisée dans la thermodynamique qui permet d'évaluer la dégradation de l'énergie du circuit eau-vapeur).



Graphes I.2 : Cycle théorique eau-vapeur de la centrale thermique.

FA: Elévation de pression de l'eau d'alimentation.

AB: Elévation de la température de l'eau jusqu'à la saturation.

BC: Vaporisation à température constante.

CD: Surchauffe de la vapeur à pression constante.

DI: 1ère détente d'entropie.

IK: Resurchauffe d'une partie de la vapeur à pression moyenne.

KE: Détente entropie constante dans la turbine à basse pression.

EF: Condensation à température constante.

I.7 Fonctionnement de la chaudière :

La chaudière dite à circulation naturelle, fonctionne avec du gaz naturel et utilise le fuel comme combustible de secours. L'ignition s'opère dans la chambre de combustion en présence de l'air. La chaleur dégagée est transmise directement au tube écrans contenant l'eau grâce à des cyclones.

L'alimentation des tubes écrans en eau est obtenue grâce à quatre colonnes de descentes, disposés dans la chambre morte.

I.8 Ecoulement de La vapeur

I.8.1 Circuit eau-vapeur:

Le circuit eau-vapeur (**figure I.1**) se résume par les étapes suivantes :

- Chauffage d'eau dans l'économiseur,
- Vaporisation d'eau dans les tubes écrans (vapeur saturée),
- Surchauffage de la vapeur dans le surchauffeur.

La vapeur surchauffée se détend sur la turbine qui est constituée de trois corps : haute pression (HP), moyenne pression (MP) et de basse pression (BP). A la sortie du surchauffeur, la vapeur vive sera envoyée au corps HP, une fois la vapeur détendue, elle sera dirigée vers le resurchauffeur puis vers le corps MP pour arriver enfin au corps BP.

La vapeur surchauffée fournie à une pression et température bien déterminée, fait tourner la turbine à la vitesse de rotation nominale. Le réglage de cette vitesse se traduit par la quantité de vapeur admise à la turbine. [2]

I.8.2 Circuit vapeur-eau :

La vapeur subira la condensation, l'eau produite sera aspirée par des pompes d'extraction et refoulée vers les réchauffeurs BP, pour arriver dans la bêche alimentaire. Ensuite, elle sera extraite par des pompes alimentaires, en traversant les réchauffeurs HP, avant d'être introduite dans la chaudière, depuis laquelle l'eau reprend son cycle.

I.9 Condenseur :

Environ la moitié de la chaleur dégagée dans la chaudière doit être extraite de la vapeur qui arrive au condenseur. Il faut donc d'énormes quantités d'eau pour refroidir celui-ci. L'eau venant d'une source extérieure circule à travers les tubes du condenseur qui agit effectivement comme

échangeur de chaleur. La température de l'eau de refroidissement augmente de 5 °C à 10 °C lors de son passage à travers

le condenseur. L'eau provenant de la condensation de la vapeur a une température comprise entre 27 °C et 33 °C ; la température de l'eau de refroidissement est de quelques degrés plus basse. Le condenseur joue un rôle tout aussi important que la chaudière dans les centrales thermiques, et parmi ces rôles :

- Assurer la condensation de la vapeur du corps.
- Réintroduire l'eau condensée dans le circuit eau-vapeur,
- Dégager l'eau condensée et évacuer les incondensables,
- Augmenter la chute d'enthalpie de la turbine par une dépression atmosphérique afin d'obtenir un rendement aussi élevé que possible. [8]

I.10 Réglage du générateur de vapeur [4] :

Les facteurs qui doivent être maintenus à des valeurs déterminées pour le bon fonctionnement du générateur de vapeur sont :

- Le niveau d'eau au réservoir.
- La pression de vapeur à l'admission de la turbine HP.
- L'excès d'air de combustible.
- La température de surchauffe et resurchauffe.
- La dépression dans la chambre de combustion.

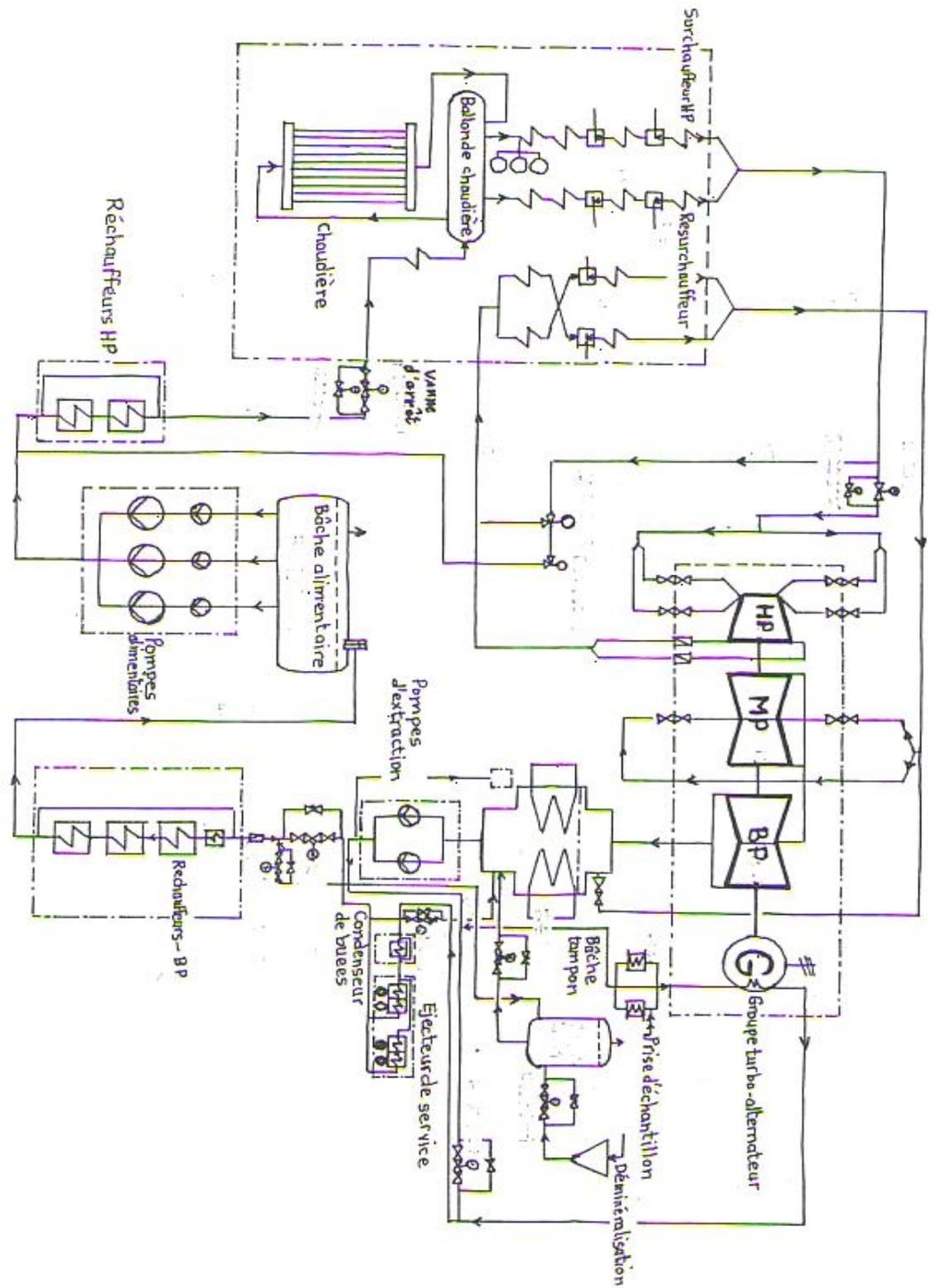


Figure I-1 : Schéma d'écoulement de la vapeur (circuit eau-vapeur)

II.1. Introduction :

Dans une centrale thermique il faut successivement produire de la chaleur par combustion d'un combustible, puis produire de la vapeur à toutes températures et à haute pression, ensuite faire détendre cette vapeur dans une turbine afin de produire un travail mécanique. Ce dernier sert à entraîner l'alternateur.

La turbine est une machine à une seule ligne d'arbre, composée de trois corps séparés HP, MP et BP. Elle comporte un certain nombre d'étages, dont chacun d'eux comprend une roue fixe (distributeur) et un autre mobile. Ces roues sont munies d'ailettes ou d'aubes laissant entre elles un intervalle pour le passage de la vapeur. Le jet de la vapeur sortant du distributeur est dévié sur la roue d'où il y a création d'un couple moteur qui entraîne le roue en rotation.

II.2. Constitution d'une turbine à vapeur

La turbine est constituée d'éléments suivants la **Figure II.1**

II.2.1. Corps haut pression (HP):

Il est à simple flux, et il utilise de la vapeur à haute pression. L'enveloppe externe est une construction en tonneau sans plan de joint axial, et l'enveloppe interne à un plan de joint axial, cette dernière est montée de façon à ne pas entraver les dilatations thermiques.[2]

II.2.2. Corps moyenne pression (MP) :

Il est à double flux, ceci s'explique du fait que la vapeur resurchauffer pénètre au milieu de l'enveloppe interne par le bas et par le haut. Il comporte aussi deux enveloppes, externe et interne qui jouent le même rôle que celles du corps HP. [2]

II.2.3. Corps basse pression (BP) :

Il est à double flux, et comporte trois enveloppes : l'enveloppe interne, intermédiaire et externe. L'enveloppe interne porte les premières étages de directrices est suspendu dans l'enveloppe intermédiaire de façon à pouvoir se dilater librement. L'enveloppe intermédiaire, indépendante de l'enveloppe externe, porte deux couronnes qui reçoivent les derniers étages de directrices. [2]

II.2.4. Aubages :

Les aubes mobiles des corps HP, MP et des premiers étages du corps BP sont fraisées. Les derniers étages du corps BP sont dotés d'aubes en forme de sapin.

Les aubes directrices des corps HP et MP ressemblent aux aubes mobiles, les autres aubes directrices ont un pied sous forme d'un crochet.

Les trois derniers étages du corps BP sont constitués par des couronnes des aubes directrices en tôles. [2]

II.2.5. Paliers :

Tous les rotors HP, BP et MP sont portés par les paliers. Le rotor HP est porté par un palier à deux coins d'huile et un autre combiné (palier porteur à deux coins d'huile+palier de butée). Les rotor MP et BP sont porté chacun par palier monté au bout d'arbre, le palier combiné est destinée à supporter la pousser axiale dans les deux sens. Les autres paliers porteurs ont des paliers à rotule. [2]

II.3. Refroidissement da la turbine :

Il est conseillé de réduire le temps de refroidissement de la turbine. Il convient notamment de l'accélérer lorsque des opérations d'entretien ou des réparations sont prévues peu ou immédiatement après l'arrêt de la turbine. [2]

II.3.1. Refroidissement de la turbine au cours de fonctionnement :

Le refroidissement de la turbine est amorcé avant même l'arrêt du groupe en procédant comme suit :

- Ramener la puissance au minimum,
- Réduire la température de la vapeur vive à des valeurs pouvant être maintenues constantes par la régulation de la chaudière.
- Contrôler les indications de l'appareil (WT) (contrôle des températures de paroi de la turbine).
- Après réduction de la puissance et de la température de la vapeur vive, laisser tourner le groupe turboalternateur jusqu'à ce que les températures de paroi de la turbine affichées sur l'appareil (WT) ne varient plus sensiblement. [2]

II.3.2. Refroidissement accélère à l'arrêt :

A l'arrêt, de l'air est aspiré à travers la turbine au moyen des pompes à vide pour accélérer le refroidissement. Le refroidissement accéléré du groupe turboalternateur doit être pratique uniquement lorsqu'il se révèle indispensable pour des raisons de disponibilité. [2]

II.4. Nettoyage de la turbine :

En régime normale, il se forme sur les aubages de la turbine des dépôts qui entraînent une diminution du rendement du groupe due à :

- Une modification des profils d'écoulement,
- Rugosité des surfaces des aubages (inégalité des surfaces).

Les dépôts de sel sont solubles dans l'eau et peuvent être éliminés par le nettoyage à vapeur saturée. Or, il existe des dépôts tels que les silicates alcalins et l'acide silicique, qui sont des silicates complexes (insoluble dans l'eau). Elles ne peuvent être éliminés que lorsque le corps de la turbine concerné est ouvert lors des révisions. [2]

II.5. Remise en service :

Une fois le nettoyage terminé, toutes les conduites montées provisoirement pour le nettoyage seront démontées, puis on procède comme suite :

- Ressouder les conduites de purges qui auraient été éventuellement ouvertes.
- Ramener le régulateur et les soupapes de réglage de leur position normale.
- Les conduites de nettoyage devront ensuite être obstruées par des capuchons en plastiques et restent à disposition pour d'autres nettoyages. [2]

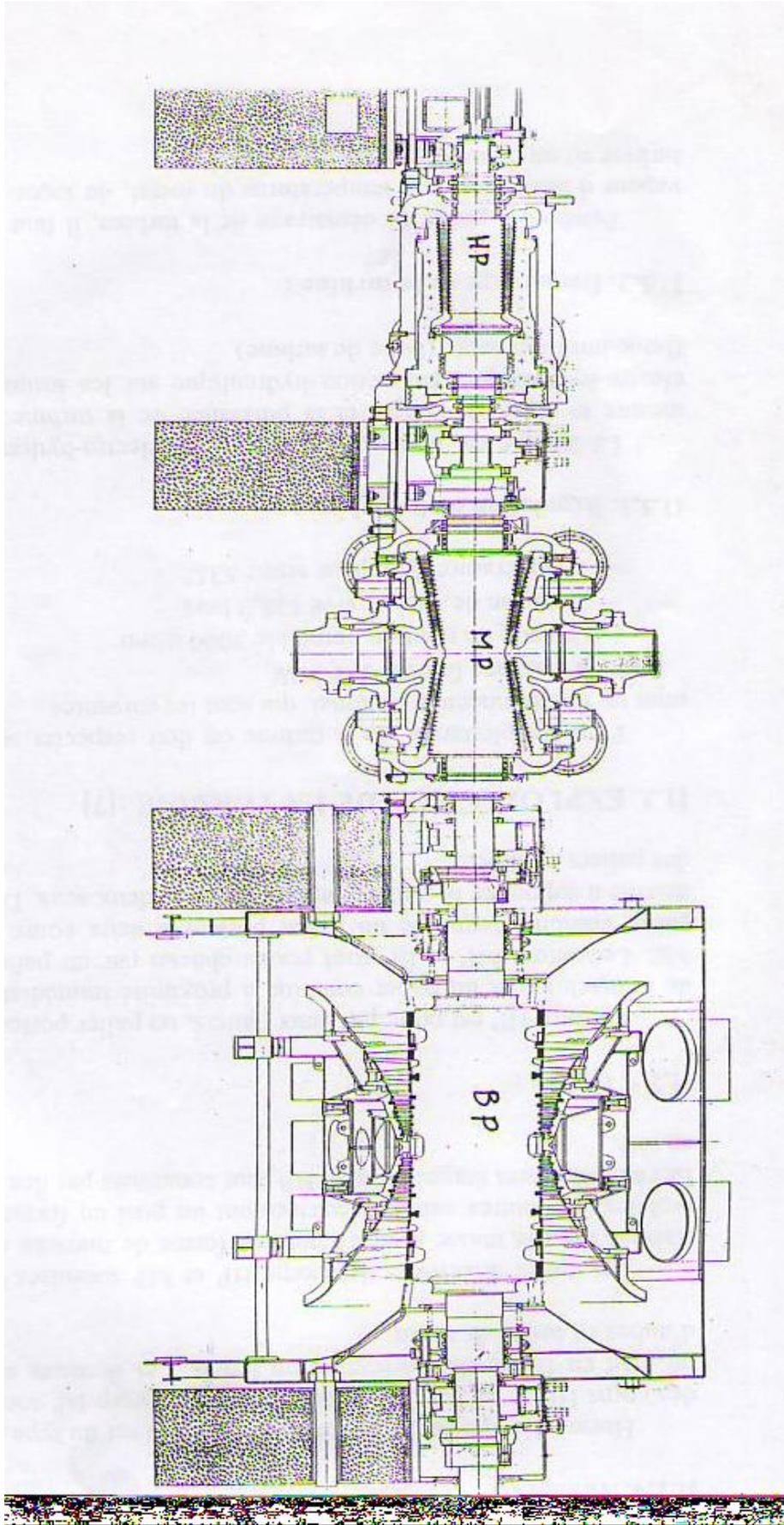


Figure (II.1) : Coupe longitudinale d'une turbine.

III.1. Introduction :

Pour fonctionner un turboalternateur, l'on doit faire appel à une source d'énergie externe. L'excitatrice remplit cette fonction. Il s'agit d'un accouplement mécanique du rotor de l'induit d'une excitatrice principale triphasé à l'inducteur de turboalternateur, par l'intermédiaire d'un pont à diode fixé sur le même arbre, qui alimente les enroulements inducteurs de l'alternateur par du courant continu. L'excitatrice principale est excitée par une excitatrice pilote à aimant permanent.

III.2 .Description du groupe d'excitation :

Le groupe d'excitation comprend les éléments suivants voir **figure III.1**

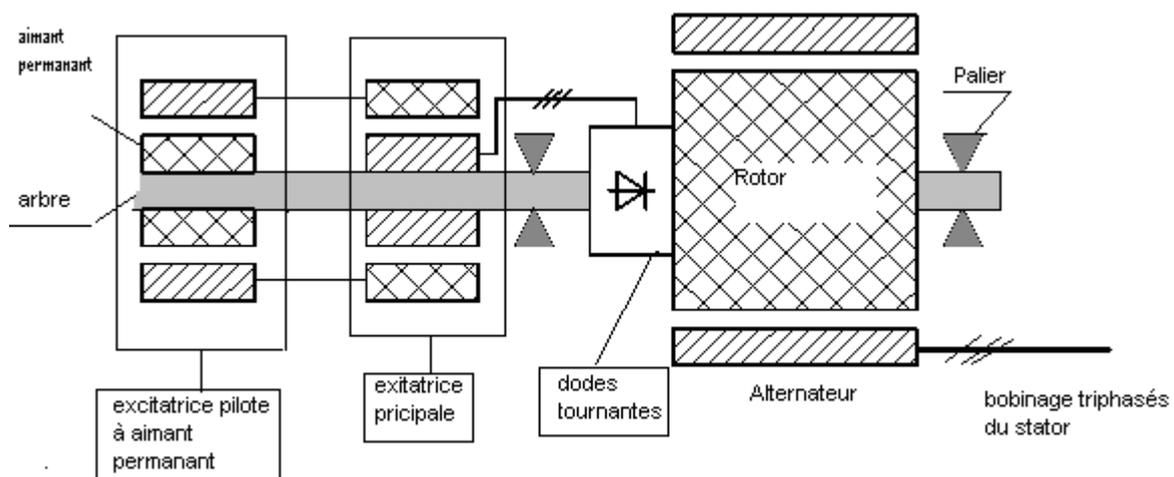


Figure III.1 : Groupe d'excitation.

III.2.1. Excitatrice pilote triphasée :

L'excitatrice pilote triphasée est un alternateur à plusieurs paires de pôles dans le stator, ce dernier est constitué de tôle magnétique et de l'enroulement triphasé. Le rotor est constitué par la roue polaire et les pôles saillants, dont chaque pôle se compose d'un aimant permanent revêtu du métal amagnétique. [3]

III.2.2. Excitatrice principale triphasée :

L'excitatrice principale est un alternateur triphasé à inducteur fixe (stator).L'inducteur abrite les pôles de l'enroulement inducteur et l'enroulement amortisseur. Ce dernier est constitué par des barres logées à la surface des épanouissements polaires. L'enroulement induit est logé dans les encoches du rotor. La tension triphasée induite dans le rotor est redressée par des diodes, permettant de fournir le courant d'excitation à l'alternateur. [3]

III.2.3 .Roue à diode :

Actuellement en utilise des systèmes d'excitation sans balais dans lesquels on trouve un alternateur exciteur et un groupe de redresseur (roue à diode). La roue à diode est constituée de diodes au silicium protégées par des fusibles formant ainsi un pont triphasé à diode. Afin d'éviter les brèves pointes de tensions de commutation, les roues sont équipées de circuit RC.

III.3. Refroidissement du groupe d'excitation :

Le groupe d'excitation est refroidi par air en circuit fermé (**figure III.2**), l'air chaud est refroidi à son tour dans deux réfrigérants disposés en partie haute du groupe d'excitation. Le ventilateur est monté sur l'arbre du groupe, l'air froid est envoyé immédiatement à l'excitatrice grâce à une configuration adéquate de l'enveloppe. Les roues à diodes sont entourées d'une enveloppe et s'auto ventilent grâce à un guidage approprié de l'air.

L'excitatrice pilote se trouve sur le trajet de l'air de refroidissement mis en circulation par le ventilateur, comme il n'a besoin que d'une petite quantité d'air de refroidissement, aucune communication spéciale n'est prévu entre cette excitatrice et la zone d'aire chaud.

Un système de ventilation de secours est prévu pour éviter toutes risque d'arrêt du groupe d'excitation en cas de défaillance des réfrigérants. [3]

III.4 .Contrôle, mesure et surveillance du groupe [3] :

Dans le but de bien protéger le système d'excitation et de bien l'exploiter, des mesures des paramètres sont prises sur le système. Les principaux dispositifs de contrôle et de mesure du groupe sont les suivants :

III.4.1. Contrôle de température :

Contrôler la température de l'air froid en aval du réfrigérant et sur la température de l'aire chaud des roues à diodes et de l'excitatrice principale.

III.4.2. Contrôle des fusibles :

La surveillance des roues à diodes en exploitation consiste à vérifier les inducteurs de fusion des fusibles au moyen d'un stroboscope monté sur le capot de la roue. La position d'indicateur de fusion indique si le fusible est intact ou il est fondu par suite de claquage d'une diode.

III.4.3. Mesure de courant d'excitation :

Il est mesuré indirectement au moyen d'une bobine montée entre les deux pôles de l'excitatrice principale. La tension induite de la bobine est proportionnelle au courant d'excitation.

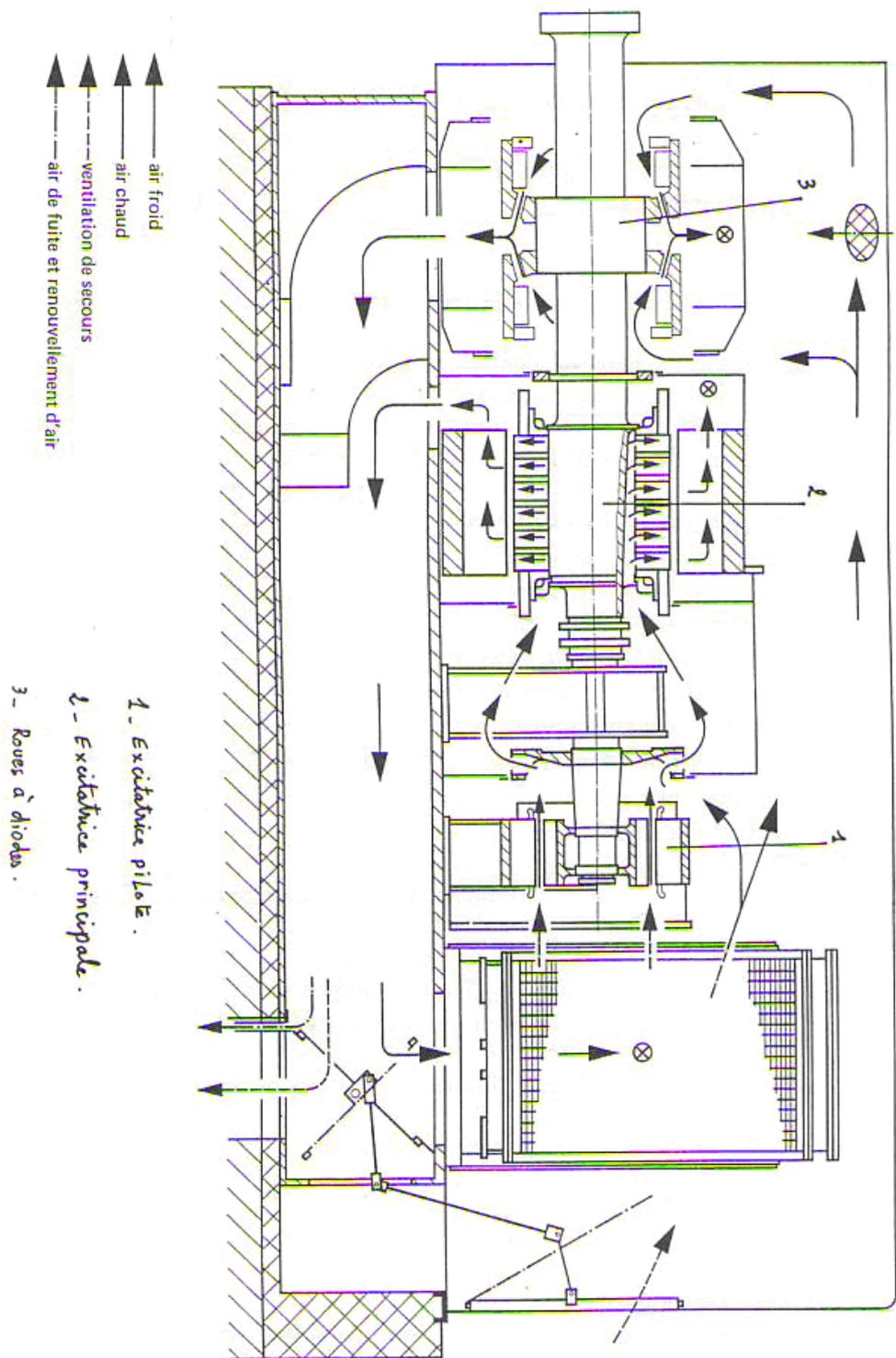


Figure III.2 : Schéma de refroidissement d'un groupe d'excitation.

IV.1. Introduction :

Les turboalternateurs sont des machines synchrones, qui diffèrent d'elles par leurs géométries, leurs systèmes d'excitations et leurs refroidissements. C'est des machines tournantes à la vitesse de synchronisme que le champ tournant et qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique (sous la forme de courant alternatif). Actuellement sont adoptées deux formes, les alternateurs à pôles inducteurs saillants dont la vitesse est relativement lente, on les rencontre dans les centrales hydrauliques, et les turboalternateurs tournant à grande vitesse ou leur inducteur est à pôle lisse, qui sont accouplés à des turbines à vapeur dans les centrales thermiques.

IV.2. Principe de fonctionnement :

L'alternateur produit des courants alternatifs dont la fréquence est donnée par la formule suivante : $f = n.p[Hz]$

f : Fréquence de rotation [Hz].

p : Nombre de paire de pôles.

n : Vitesse de rotation [tr/min] .

La rotation de l'inducteur revient à la rotation de la vectrice induction magnétique \vec{B} , à la vitesse w , qui induit un flux variable dans le bobinage statorique, donc une f.e.m à ces bornes.

$$\bar{\phi} = \vec{B} \cdot \vec{S} = B.S.\cos(W.t) \Rightarrow e = -\frac{n.d\phi}{dt}$$

Avec : e : force électromotrice.

n : nombre de conducteurs.

L'inducteur est constitué par un électroaimant et l'induit se compose de trois bobines décalées de 120° . Le passage des courants dans les enroulements, crée une F.m.m tournante de vitesse

$\Omega = \frac{\omega}{p}$ de même vitesse que le rotor. L'interaction entre les deux pôles de l'induit et l'inducteur,

produit le couple électromagnétique qui freine le rotor permettant ainsi, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

IV.3. Description et Constitution de l'alternateur :

Le plan de la coupe de la (**figure VI.1**) permet d'identifier les organes principaux d'un turboalternateur. [6]

IV.3.1. STATOR

Le stator d'un turbo alternateur comprend

Carcasse (ou enveloppe métallique) :

La structure du stator des turboalternateurs est souvent conditionnée par la solution adoptée pour le transport. La solution la plus fréquente comporte une carcasse monobloc autoportante, permettant de supporter le poids des parties actives internes. Le stator est l'unité la plus lourde et la plus rigide de l'alternateur. La carcasse qui, en plus de son rôle de support du circuit magnétique, constitue l'enveloppe étanche à l'hydrogène doit être conçue pour éviter une déformation en cas d'explosion.

Circuit magnétique encoché :

Le circuit magnétique du stator étant traversé par un champ tournant. Afin de réduire les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dans cette partie active de l'alternateur, il faut que le circuit magnétique soit constitué d'un empilage de tôle mince, chaque couche de l'empilage est constituée de plusieurs segments.

Les tôles magnétiques ont une épaisseur de 5mm au silicium à haute résistivité, isolées entre elles par des dépôts de vernis. Le circuit magnétique est fortement serré axialement par des tirants et la forme de ses extrémités doit être soigneusement étudiée pour éviter que les franges de lignes de champ frontales ne provoquent dans certains fonctionnements. La chaleur dégagée par le circuit magnétique est évacuée par des canaux axiaux qui résultent de la division axiale de l'empilage en plusieurs paquets de tôle.

Suspension élastique :

Afin d'assurer le fonctionnement le plus silencieux possible en évitant de transmettre aux fondations la vibration à 4 noeuds du circuit magnétique, celui-ci est fixé dans la carcasse par l'intermédiaire d'une suspension élastique qui, par sa flexibilité radiale, affaiblit l'amplitude des vibrations transmises à la carcasse.

Un enroulement (ou bobinage), triphasé, logé dans les encoches du circuit magnétique :

L'enroulement des turboalternateurs est parmi les plus simples, c'est un enroulement imbriqué comportant généralement un nombre entier assez élevé d'encoches par pôle et par phase. L'encoche contient deux barres dont chacune est composée d'un nombre de conducteur élémentaire (pleins et creux), les brins conducteurs sont tressés avec une torsion de 360° dans la partie située dans le fer, afin d'annuler les inégalités de tension induite entre le haut et le bas de l'encoche. La structure des barres est conditionnée par le mode de refroidissement utilisé (interne par eau dans notre cas). Le courant statorique parcourant la barre se répartit, donc, presque uniformément sur l'ensemble de la section de la barre, ce qui se traduit par une diminution des pertes supplémentaires dépendant du courant.

L'Isolation :

L'isolation de l'enroulement des turboalternateurs est réalisée par un enrubannage sur toute la longueur des barres conductrices, Le ruban utilisé contient du mica constituant la barrière diélectrique principale entre conducteurs, ce mica est employé soit sous forme de support du ruban est généralement un tissu de verre. Ce ruban peut être soit injectée dans l'isolation posée sèche sur les barres (procédé par imprégnation), soit incorporée au ruban avant la pose (procédé par ruban pré imprégné). La surface extérieure de l'isolation est recouverte d'une peinture légèrement conductrice dans la partie située dans le fer des barres, afin de fixer à la masse le potentiel électrique externe de l'isolation, sans toutefois permettre le passage d'un courant dangereux entre les tôles. La classe d'isolation (F : 155°C) a peu de signification pour les enroulements refroidis par eau puisque leur température ne dépasse pas 80°C , d'autres critères, surtout mécaniques, sont beaucoup plus importants, telle que, les forces électromagnétiques qui se produisent dans certains phénomènes transitoires, et qui provoquent la destruction des enroulements. De ce fait, il faut bien fixer les enroulements dans l'encoche.

IV.3.2. ROTOR :

Le rotor se compose des éléments suivant la (**figure IV.2**)

Arbre du rotor :

Le rotor se présente sous forme d'un cylindre de diamètre limité et de longueur conditionnée par la puissance. Pour les turboalternateurs à 2 pôles, à 3 000 tr/min, la solution monobloc est très généralement utilisée ; c'est celle qui conduit au niveau de vibration le plus faible. La masse de la pièce à forger reste dans des limites courantes qui permettent d'obtenir une pièce très saine. L'arbre de rotor se compose d'une partie active sur 2/3 de sa circonférence d'encoche longitudinale de façon à former deux pôles massifs opposés. Les extrémités de l'arbre sont usinées en forme de bride, peuvent ainsi assurer l'accouplement du rotor de l'alternateur à la turbine et à l'excitatrice.

Inducteur :

L'enroulement inducteur se compose de plusieurs bobines logées dans les encoches longitudinales dans la partie active du rotor. Les bobines sont montes en série, et enroulées de façon à constituer deux pôles. Chaque conducteur est centré pour former une demi-spire lesquelles sont logées dans les encoches du rotor, puis assemblées pour former les spires inductrices. Les têtes de bobines sont cales entre elles au moyen des pièces isolantes de façon à éviter tout déplacement inadmissible des bobines.

Amortisseur

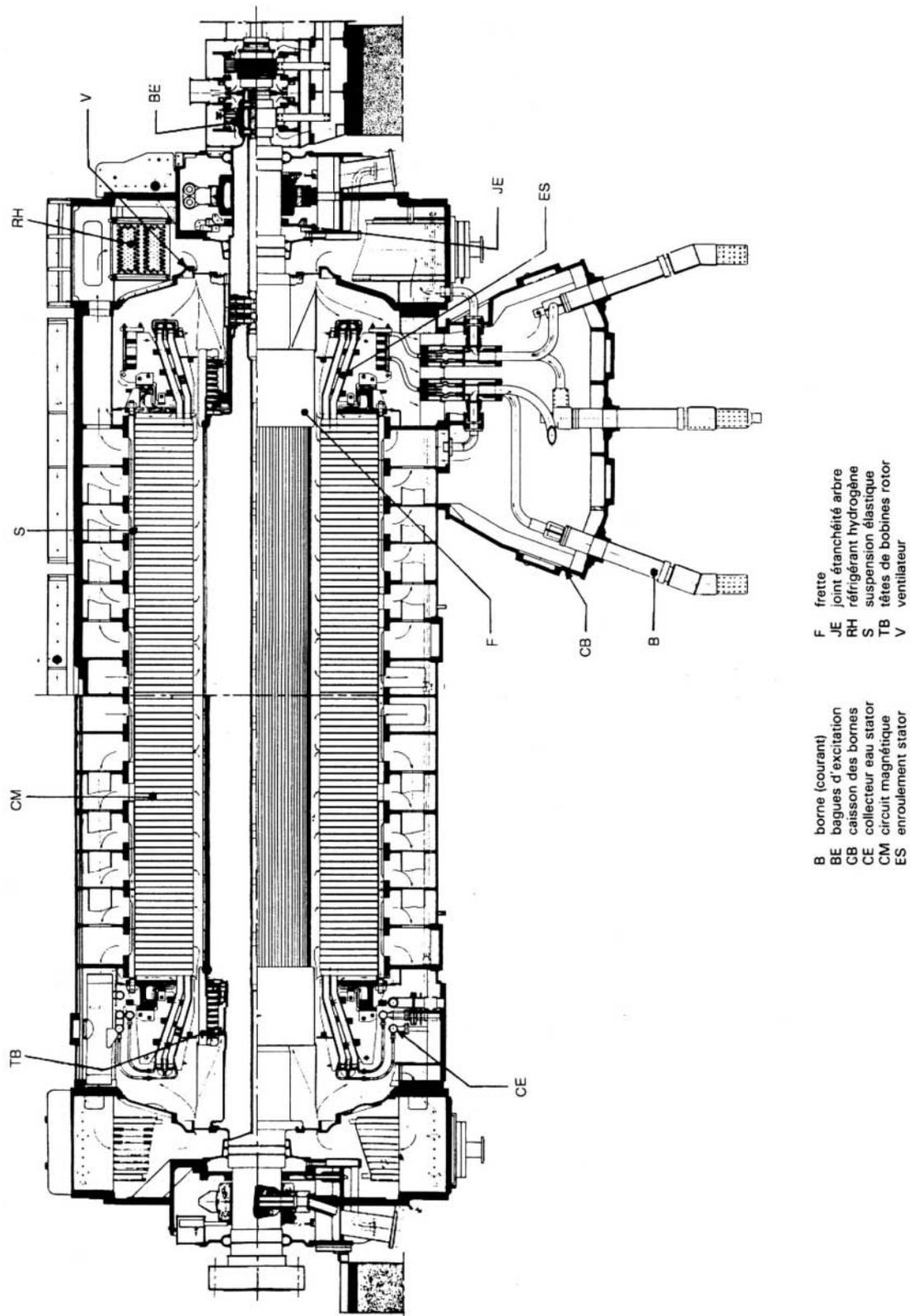
L'amortisseur est un organe qui n'a pas d'utilité en service normal il n'intervient qu'au cours de certains fonctionnements anormaux tels que la marche asynchrone temporaire après rupture de synchronisme, le fonctionnement permanent sur charge non équilibrée sur les trois phases, les oscillations, les courts-circuits biphasés ou le réenclenchement monophasé après défaut. Pendant ces fonctionnements, l'amortisseur permet la circulation des courants induits au rotor par les champs magnétiques non synchrones, assurant la protection du rotor en évitant de faire passer ces courants par des contacts mécaniques délicats tels que celui entre frettes et fût. Il permet, ainsi, de mieux supporter ces régimes anormaux. L'amortisseur est constitué d'une cage formée par des conducteurs en cuivre à l'argent écroui, disposés sous les cales d'encoches du rotor. Il est fermé aux extrémités par un anneau de court-circuit, le contact électrique entre les différents éléments de l'amortisseur est assuré par la force centrifuge s'exerçant sur des surfaces préalablement argentées.

Frette :

Le contenu électrique du rotor (c'est-à-dire les bobinages de l'inducteur et l'amortisseur, leur isolation et leur calage) n'a évidemment aucune capacité d'auto résistance à la force d'éclatement centrifuge et doit donc être accroché sur le rotor par un ensemble de pièces de maintien, les cales de fermeture d'encoche et les frettes d'extrémité, doivent pouvoir supporter les efforts de cet force. Ces frettes sont amagnétiques et sont fixées (**figure IV.2**) en porte à faux sur le bord du fût du rotor, une fixation double sur le fût d'un côté et sur l'arbre de l'autre étant déconseillée pour les grands rotors à cause de la déformation de flexion alternée de l'arbre entre ces deux appuis.

Cale :

Les cales sont constituées d'un métal de haute limite d'élasticité et amagnétique (bronze, alliages d'aluminium, etc.) pour ne pas créer une dérivation de flux nuisible, ces cales assurent aussi d'autres fonctions, elles assistent généralement la cage d'amortisseurs en portant une partie des courants induits, la déchargeant ainsi partiellement. Le métal qui les constitue doit donc posséder une résistivité électrique de préférence faible. Outre ces fonctions, les cales d'encoches doivent permettre le passage du gaz de refroidissement du rotor ; elles sont donc perforées dans les zones d'évacuation de gaz. Dans le cas des systèmes de refroidissement *pick-up* (ou à prise de gaz dans l'entrefer). Les connexions frontales des enroulements de l'inducteur et de l'amortisseur sont frettées par des cylindres en acier à très haute résistance constitua le métal le plus noble employé.



- | | | | |
|----|-----------------------|----|------------------------|
| B | borne (courant) | F | frette |
| BE | bagues d'excitation | JE | joint étanchéité arbre |
| CB | caisson des bornes | RH | réfrigérant hydrogène |
| CE | collecteur eau stator | S | suspension élastique |
| CM | circuit magnétique | TB | têtes de bobines rotor |
| ES | enroulement stator | V | ventilateur |

Figure IV.1 : Plan coupe d'un turboalternateur.

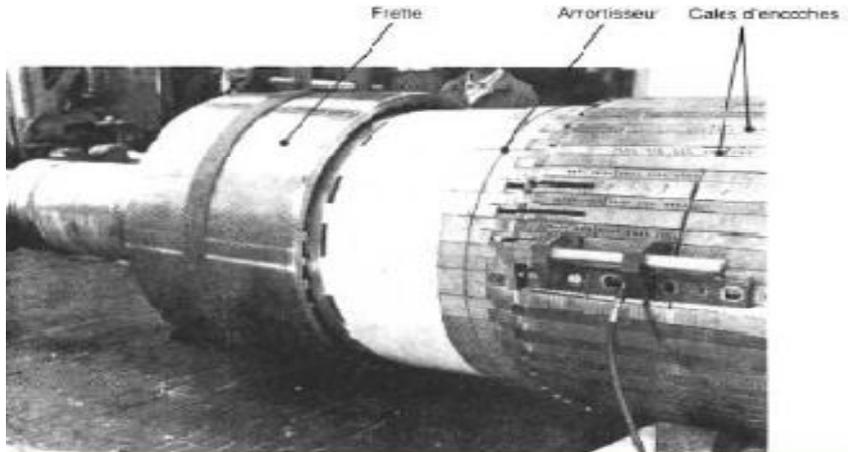


Figure IV.2 : Amortisseur, Frette et cale d'encoche.

4

Paliers et étanchéités :

Les paliers des turboalternateurs sont, généralement du type palier-flasque, qui conduit à l'entre axe minimal entre paliers, les coussinets sont du type à patins séparés permettant de réduire un peu les pertes et assurant une stabilité accrue aux grandes vitesses périphériques. Les joints d'étanchéité à l'hydrogène de l'arbre sont intégrés dans le corps du palier et utilisent la même huile, soit en un seul circuit. Pour les démarrages et les arrêts, une injection d'huile sous une pression est utilisée pour assurer le soulèvement et la formation du film aux basses vitesses. Un des coussinets est électriquement isolé de la carcasse pour éviter la circulation de courants parasites, entre arbre et carcasse, risquant de détériorer les coussinets et les soies d'arbre (ou portées d'arbre).

IV.4. Refroidissement de l'alternateur :

L'alternateur est le siège de différentes pertes importantes, dont on distingue les pertes joules, les pertes par courant de Foucault, les pertes par hystérésis et les pertes par frottement de l'arbre du rotor dans les paliers. Cela nous impose la mise en œuvre d'un système de refroidissement efficace pour limiter l'échauffement, qui, sans cela, sera détruit.

IV.4.1. Refroidissement direct de l'enroulement stator :

Le refroidissement direct du cuivre de l'enroulement stator s'opère par liquide (eau). Il utilise une circulation d'eau dans certains conducteurs creux des barres du stator.

Les qualités de refroidissement à l'eau 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). 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/mm², qui pourraient être accrues si nécessaire mais qui sont limitées à ces valeurs afin de maintenir le rendement de l'alternateur.

L'enroulement du stator de turboalternateur est actuellement à refroidissement par eau. Cette eau est traitée pour que sa résistivité soit suffisamment élevée pour éviter tout risque d'amorçage et les pertes par conduction dans les connexions hydrauliques sous tension. La **(figure IV.3)** indique un schéma de circulation d'eau où une fraction du débit est dérivée dans un désioniseur à lits de résines anioniques et cationiques pour maintenir la résistivité de l'eau supérieure à environ 2 MΩ·cm, le circuit comprend naturellement des pompes (principale et de secours), des filtres, des échangeurs de chaleur, la robinetterie et les appareils de contrôle indispensables.

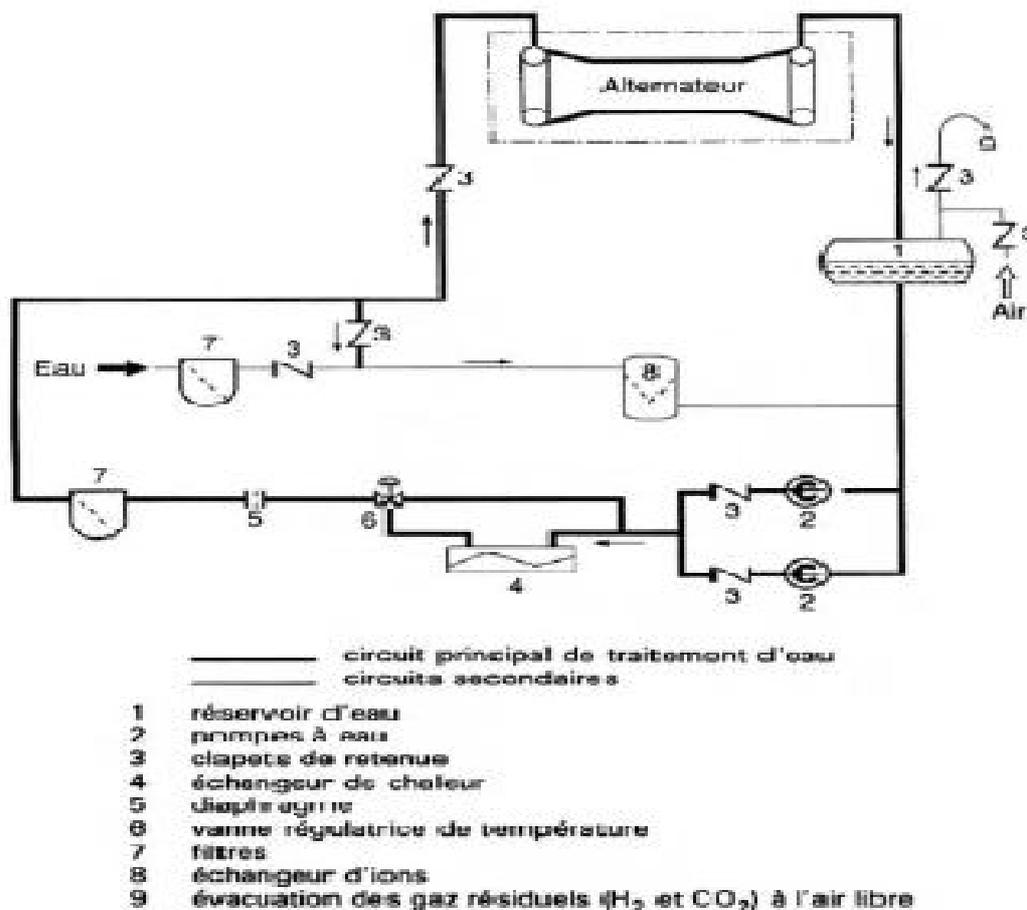


Figure IV.3 – Circuit de l'eau de refroidissement du stator.

IV.4.2. Refroidissement direct de l'enroulement rotor :

L'isolation de l'enroulement inducteur, est plus mince que l'isolation de l'enroulement stator, donc un refroidissement direct présente encore plus d'intérêt pour l'enroulement inducteur que pour l'enroulement stator, la raison en est qu'un accroissement de densité de courant est plus nécessaire au rotor qu'au stator afin de suivre l'accroissement de puissance unitaire demandé. Le refroidissement direct de l'inducteur est assuré par de l'hydrogène comprimé circulant en circuit fermé à l'intérieur de l'alternateur (**Figure IV.4**). 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.

Ce gaz a été choisi pour sa faible densité, 14 fois plus faible que celle de l'air, ce qui réduit dans le même rapport les pertes par frottement du fluide, ainsi que pour ses propriétés thermiques, son coefficient de transmission thermique de surface à vitesse et pression égales étant

de 50 % supérieur à celui de l'air et sa conductivité thermique étant 7 fois plus forte. En augmentant la pression de l'hydrogène, on accroît naturellement encore les possibilités d'échange thermique.

L'hydrogène est refoulé par deux ventilateurs axiaux montés aux deux extrémités de l'arbre de rotor. Ces ventilateurs aspirent l'hydrogène des réfrigérants, le flux d'hydrogène se divise en trois parties au refoulement de chaque ventilateur comme le montre le schéma de circulation du gaz de refroidissement dans l'alternateur. (**Figure IV.4**)

La première partie de flux, passe dans l'entrefer pour pénétrer directement dans l'enroulement rotorique à travers les trous dans les clavettes, puis pénètre dans les canaux de refroidissement rotorique jusqu'au fond d'encoche, au retour, il remonte par un autre canal.

La deuxième partie, le flux passe au dessus des têtes de bobine du stator. L'hydrogène se dirige vers l'entrefer à travers les canaux de ventilations des tôles du stator, et absorbe au passage la chaleur de l'empilage de tôles de l'enroulement.

La troisième partie du flux pénètre dans l'entrefer en passant au dessus des frettes du rotor pour les refroidir, ainsi que les extrémités des parties actives du rotor et de circuit magnétique.

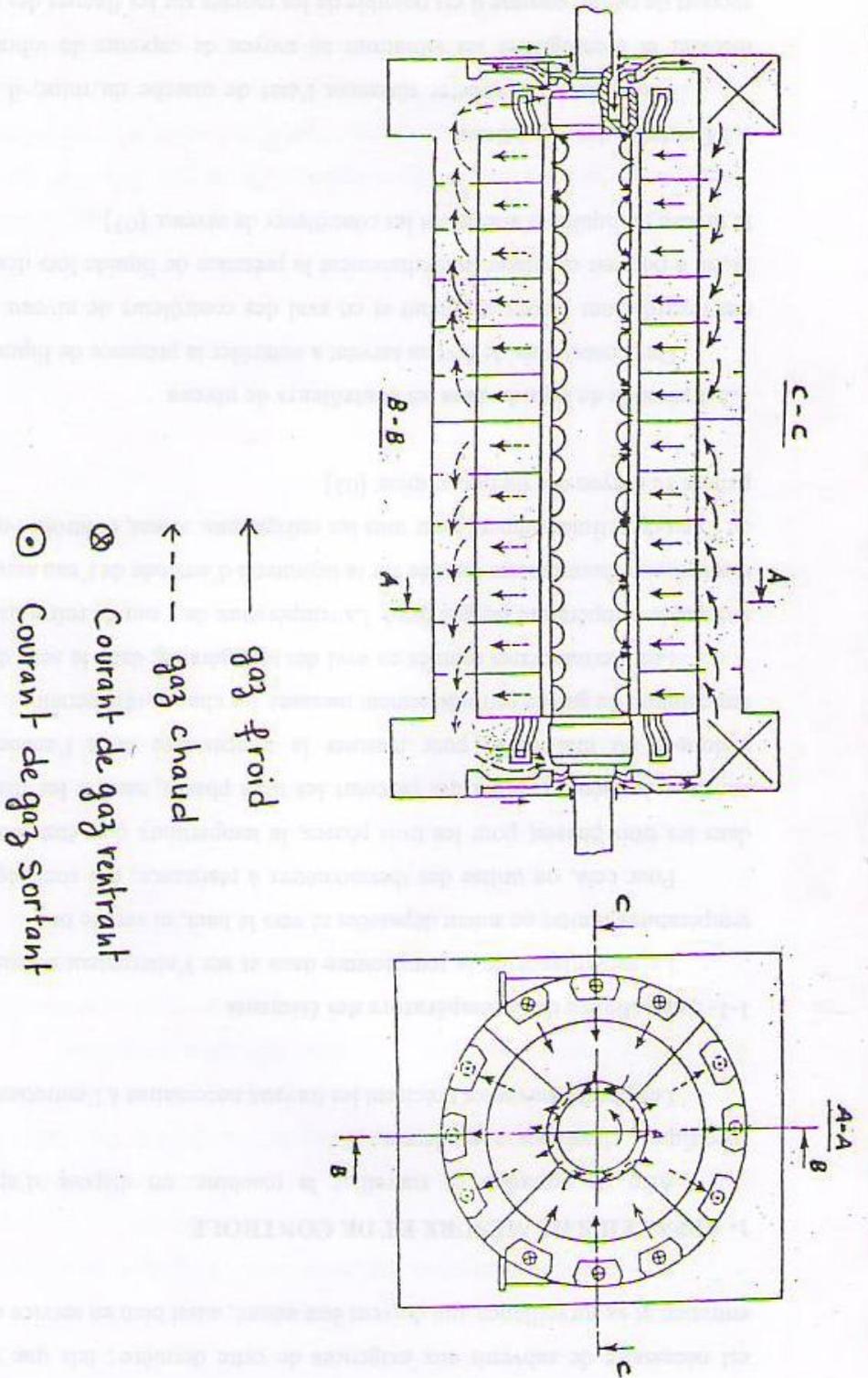
Tandis que le quatrième flux est mené par l'eau dans les conducteurs creux de l'enroulement statorique.

L'hydrogène chaud est dirigé, suivant un système de cloisonnement, vers les réfrigérants qui sont le plus souvent placés à la partie supérieure de l'alternateur. Le réfrigérant est assuré par une circulation d'eau provenant des pompes d'extraction du condenseur principal. [6]

IV.5. Alimentation en gaz et étanchéité de l'arbre

IV.5.1. Alimentation en hydrogène :

Le turboalternateur tourne dans l'hydrogène. Donc le remplissage et la vidange de l'hydrogène ne s'opèrent pas directement, ce qui créerait temporairement un mélange explosif. Une chasse de l'air par du gaz carbonique CO_2 précède le remplissage et une chasse de l'hydrogène par du gaz carbonique, précède la vidange (**figure IV.5**). La pureté de l'hydrogène est contrôlée en permanence pour la maintenir à un niveau élevé (96 % en volume) afin d'être très éloigné des conditions du mélange explosif. L'alimentation en hydrogène est utilisée pour évacuer les pertes de chaleur de l'alternateur, parce que sa conductibilité thermique est 8 fois plus grande que celle de l'air. [6]



Figure(III-) : Circulation du gaz de refroidissement (Hydrogène) dans l'alternateur .

Figure IV.4 : Circulation du gaz de refroidissement (hydrogène) dans l'alternateur.

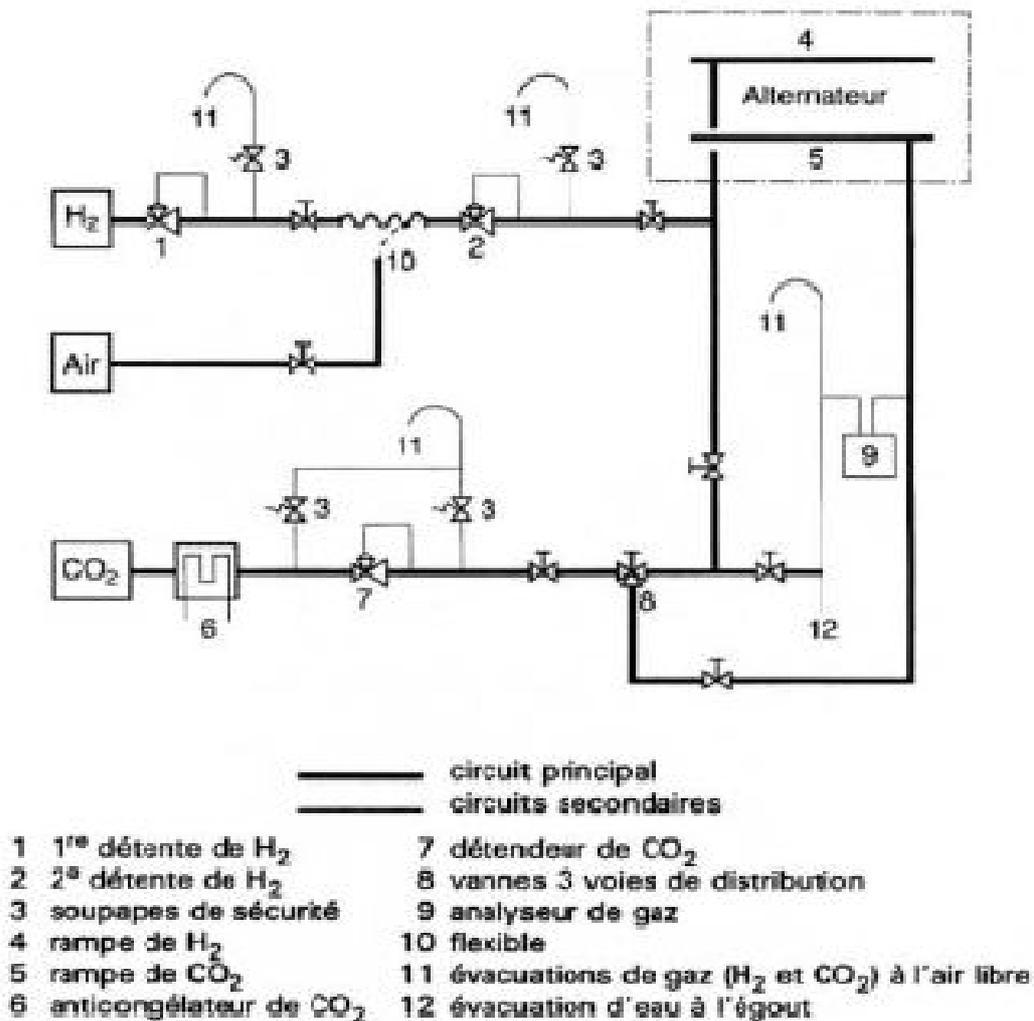
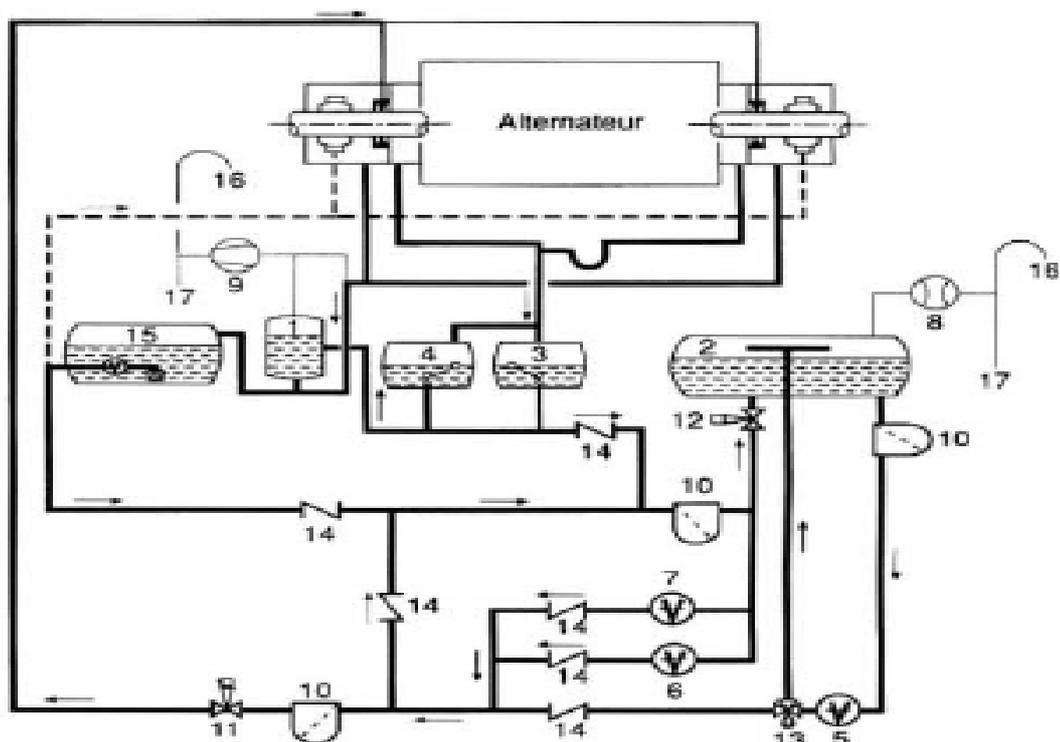


Figure IV.5 : Circuit d'alimentation en H₂ et CO₂

IV.5.2. Alimentation en huile d'étanchéité :

Les problèmes d'installation, de contrôle et de sécurité posés par l'hydrogène sont maintenant réalisés par l'étanchéité aux bouts d'arbre est assurée par des joints radiaux à fuite d'huile (**figure IV.6**) 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.



——— circuit d'huile des joints d'étanchéité
 - - - - - circuit principal de graissage (commun avec la turbine)
 ——— circuits secondaires

- 1 dégazeur de retour d'huile
- 2 réservoir sous vide
- 3 réservoir principal d'huile côté alternateur (dégazage d' H_2)
- 4 réservoir de secours d'huile côté alternateur (dégazage d' H_2)
- 5 pompe principale courant alternatif
- 6 pompe de secours courant alternatif
- 7 pompe de secours courant continu
- 8 pompe à vide
- 9 extracteur de gaz
- 10 filtres
- 11 vanne régulatrice de pression différentielle
- 12 vanne régulatrice de niveau
- 13 soupape de décharge
- 14 clapets de retenues
- 15 réservoir d'huile de graissage
- 16 évacuation des gaz résiduels (CO_2 et H_2) à l'air libre
- 17 évacuation d'eau à l'égout

Figure IV.6 : Circuit d'huile des joints d'étanchéité.

PARTIE II

CAHIER DES CHARGES

Pour le cahier des charges, nous avons pris les caractéristiques suivantes de l'alternateur :

–Puissance nominale	200MW
–Tension nominale	15,75kV
–Facteur de puissance	$\cos(\phi_n) = 0.85$
–Nombre de phase	3
–Nombre de paires de pôles	p=1
–Fréquence des courant statorique	f=50Hz
–Classe d'isolation	F

Systeme de refroidissement

- Refroidissement direct du stator par eau.
- Refroidissement direct du rotor par hydrogène.

Connexion des phases statorique Y

I.1. INTRODUCTION

En étudiant le projet de l'alternateur dont la puissance et la vitesse de rotation sont données, on cherche à choisir ces dimensions de telle sorte qu'elles occupent un espace aussi réduit que possible et que sa masse et son coût de fabrication soient minimaux. Or les pertes d'énergies relatives augmentent quant les dimensions de la machine diminuent.

Aussi considère-t-on comme optimales les dimensions et la construction de la machine pour lequel son coût global représente la somme du coût de fabrication et d'entretien. Compte tenu des pertes d'énergie (minimales), on suppose aussi que les matériaux et les dimensions des parties actives et constructives sont choisis de telles sortes que les intensités du champ électrique dans les isolants, les contraintes mécaniques et les températures se situent dans les limites admissibles.

I.2. CALCUL DES DIMENSIONS PRINCIPALES

La construction d'une machine synchrone et particulièrement par son stator, diffère beaucoup selon la puissance, pour les alternateurs ayant un diamètre extérieur du stator supérieur à un mètre, chaque couche de l'alternateur magnétique (tôle) est constitué de plusieurs plaques appelées segments qui sont ensuite assemblées pour constituer une tôle magnétique circulaire.

I.2.1. DIMENSIONNEMENT DU STATOR

1. Puissance apparente nominale

Elle est donnée par la formule suivante :

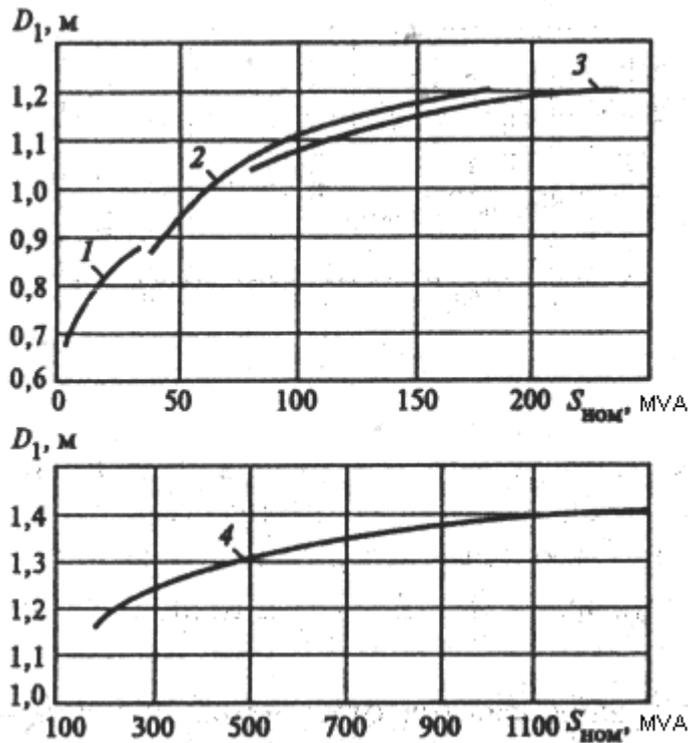
$$S_n = \frac{P_n}{\cos(\Psi_n)} MVA \quad (I.1)$$

– P_n : Puissance nominale.

– $\cos(\Psi_n)$: Facteur de puissance.

2. Diamètre intérieur du stator

Le diamètre intérieur du stator D_1 peut être déterminé à partir de la **figure I-1**, et en fonction de la puissance apparente nominale de la machine.



Graphe I.1 : le diamètre intérieur du stator en fonction de la puissance apparente nominale.

D'après le **Graphe I.1** on déduit : $D_{1n} = 1.21m$

3. Charge linéaire des courants statorique

La charge linéaire A_1 à une influence directe sur les pertes frontales et les pertes supplémentaires dans la zone active de la machine, par conséquent, sur son rendement.

Selon le type de système de refroidissement et la puissance nominale totale, on détermine à partir du **tableau I.1**, la charge linéaire préliminaire A_1 .

Paramètres	Puissance apparente nominale S_n [MVA]								
	Refroidissement indirect par hydrogène des enroulements du stator.				Refroidissement direct par l'eau distillé des enroulements du stator, de l'eau et d'hydrogène du noyau statorique.				
	80	125- 180	190		235- 280	350- 375	590	890	1110- 1330
Charge linéaire $A_1 10^4$, [A/m]	9.6-11	11-12	12.8- 13.8		13- 14.5	14-16	18-20	22-24.5	25-28
Induction magnétique B_δ , [T]	0.82- 0.86	0.83- 0.87	0.82- 0.85		0.84- 0.86	0.85- 0.865	0.86- 0.88	0.9-0.94	0.94- 0.98

Tableau I.1 : Valeur approximative de la charge linéaire et de l'induction magnétique dans l'entrefer du turboalternateur, pour refroidissement direct par hydrogène du stator.

D'après le **Tableau I.1**, la valeur de la puissance apparente varie entre 235 et 280MVA, se qui implique la charge linéaire préliminaire :

$$A_1 = (13 \div 14.5)10^4 [A/m]$$

4. Induction magnétique dans l'entrefer

L'induction magnétique dans l'entrefer est un paramètre essentiel dans la construction de la machine électrique tournante, car elle caractérise la magnétisation de la machine. Elle est limitée par les propriétés magnétiques des matériaux actifs utilisés.

L'induction magnétique dans l'entrefer est tirée du **Tableau I.1** en fonction de la puissance apparente nominale.

5. Le rapport de court-circuit

Le rapport de court-circuit r_{cc} caractérise surtout l'influence de réaction d'induit sur le système de la machine, plus est faible, plus la réaction est forte. C'est le quotient du courant

d'excitation donnant à vide la tension nominale, par le courant d'excitation donnant en court-circuit le courant nominale.

Le rapport de court-circuit r_{cc} est déterminé à partir de la formule ci-dessous:

$$r_{cc} = \frac{k_{no}}{x_d^*} \quad (I.2)$$

– k_{no} : Coefficient de saturation du circuit magnétique de l'écoulement de la marche à vide. Pour les turboalternateurs à refroidissement direct de la partie active, $k_{no} = 1.05 \div 1.12$

On a pour la plus petite valeur significative de k_{no} correspond la plus grande valeur de la puissance de la machine.

– x_d^* : La réactance inductive synchrone en unité relative. $x_d^* = 2$

6. Détermination de l'épaisseur de l'entrefer

Le choix de l'entrefer est déterminant, car un faible entrefer peut accentuer l'effet de la réaction d'induit et un grand entrefer augmente le nombre d'ampères-tours consommés par celui-ci.

La valeur de l'entrefer est donnée par la formule ci-dessous :

$$\delta = 6.95.r_{cc} \frac{A_1 D_1^{1.5}}{\beta_\delta} [m] \quad (I.3)$$

Le choix de la valeur normalisée du diamètre extérieur du rotor **Tableau I.2** et la valeur d'entrefer calculée, nous amènes à recalculer le diamètre intérieur du stator et le pas polaire par la suite :

$$D_1 = D_2 + 2\delta [m] \quad (I.4)$$

$D_2 [m]$	0.475	0.575	0.664	0.728	0.814	0.930	1.000	1.075	1.125	1.200	1.250
-----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tableau I.2 : Diamètres normalisés du rotor.

7. Longueur active préliminaire du stator

La longueur active préliminaire du stator est déterminée par la formule ci-dessous :

$$l_{1n} = \frac{0.9.S_{nom}}{k_{01}\Omega D_1^2 A_1 \beta_\delta} [m] \quad (I.5)$$

– k_{01} : Coefficient de bobinage du stator.

Pour des valeurs de coefficient de raccourcissement, $y = (0.78 \div 0.83)\tau$ on prend le coefficient d'enroulement préliminaire $k_{01} = 0.92$, tandis que pour les turboalternateurs qui ont un coefficient de raccourcissement $y = (0.5 \div 0.6)\tau$ et de petite puissance ($P_n < 6[MW]$), $k_{01} \approx 0.68$

– Ω : vitesse de rotation angulaire nominale.

$$\Omega = \frac{2pN_n}{60} [rad / s] \quad (I.6)$$

– N_n : Vitesse de rotation de turboalternateur qui vaut $N_n = 3000[tr / min]$, pour le nombre de paire de pôle $p=1$, qui est déterminé comme suit :

$$p = \frac{60f_n}{N_n} \quad (I.7)$$

– f_n : Fréquence des courant statorique, telle que : $f_n = 50[Hz]$

8. Longueur active préliminaire du rotor

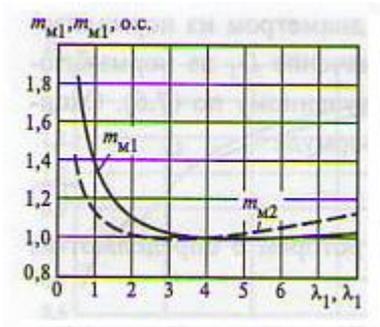
Pour diminuer la saturation magnétique du rotor, la longueur du rotor assume (50 à 150) millimètres de plus que la longueur du noyau du stator, donc la longueur du rotor est donnée par la relation suivante :

$$l_2 = l_1 + (0.05 \div 0.15)[m] \quad (I.8)$$

9. Coefficient de longueur

Par nécessité de calcul, on ramène à définir deux coefficients de longueurs λ_1 et λ_2 qui représentent le rapport de la longueur active du stator l_1 et du rotor l_2 par le diamètre intérieur du stator D_1 et le diamètre extérieur du rotor D_2 respectivement.

Les deux coefficients λ_1 et λ_2 doivent avoir des valeurs de façon que la masse de l'enroulement statorique m_{M1} et la masse de l'enroulement rotorique m_{M2} soient minimales dans le **Graphe I-2**



Graphe I-2 : la masse des enroulements du stator m_{M1} et du rotor m_{M2} en unité relative en fonction de λ_1 et λ_2 .

$$\lambda_1 = \frac{l_{1n}}{D_1} = 3.24 \quad \lambda_1 = (2 \div 6)$$

$$\lambda_2 = \frac{l_{2n}}{D_2} = 3.86$$

D'après le **Graphe I-2** pour des valeurs de deux coefficients λ_1 et λ_2 , on constate qu'elles se situent dans la plage où la masse des enroulements statorique et rotorique est minimale.

10. Tension et courant nominaux d'une phase du stator

L'enroulement statorique de turboalternateur est connecté en étoile, d'où la formule de calcul de la tension dans une phase qui est donnée comme suite :

$$U_{1n\phi} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} [V] \quad (I.9)$$

L'enroulement statorique de turboalternateur est connecté en étoile, d'où la formule de calcul de courant dans une phase qui est donnée comme suite :

$$I_{1n\phi} = \frac{S_n}{3U_{1n\phi}} [A] \quad (I.10)$$

11. Courant total dans l'encoche statorique

Dans la plupart des cas, l'enroulement statorique de turboalternateur est un enroulement imbriqué à deux voies parallèles. $a_1 = 2$

Compte tenue de la répartition inégale du courant dans l'encoche, et afin de réduire les pertes thermiques et la résistance effective des conducteurs d'une phases de l'induit on a recours, dans les grandes machines, à des conducteurs élémentaires transposés horizontalement et verticalement suivant l'encoche de façon à constituer de barres, ces dernières constituent les couches de l'enroulement du stator. Et dans notre cas on à un enroulement imbriqué à deux couches.

On notera $U_{n1} = 2$: le nombre de barres dans une encoche du stator. Le courant total dans l'encoche est donné par la formule ci-dessous :

$$I_n = I_{1n\phi} \frac{U_{n1}}{a_1} [A] \quad (\text{I.11})$$

12. Pas dentaire préliminaire au stator

Le pas dentaire est la distance entre les axes de deux encoches voisines qui est donné par la formule suivante :

$$t_1' = \frac{I_n}{A} [m] \quad (\text{II.12})$$

13. Nombre d'encoches au stator

Le nombre d'encoches préliminaires est donné par la relation suivante :

$$Z_1' = \frac{\pi D_1}{t_1'} [\text{encoches}] \quad (\text{I.13})$$

Le choix de la valeur normalisée du nombre d'encoches au stator Z_1 du **tableau I.3**, nous amène à recalculer le pas dentaire définitif comme suit :

Z_1	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tableau I.3 : nombre d'encoches normalisées au stator.

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{Z_1} [m] \quad (\text{I.14})$$

Pour le système de refroidissement direct du stator le pas dentaire, doit être compris dans cet intervalle $t_1 = 0.045 \div 0.12[m]$

14. Nombre d'encoches par pôle et par phase au stator

Il est donné par la relation suivante :

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm_1} [\text{encoches}] \quad (\text{I.15})$$

– m_1 : Le nombre de phases au stator.

15. vérification

Pour diminuer les pertes, par accroissement des puissances électriques dans les barres du rotor par la pulsation de flux magnétique, et après détermination de pas dentaire du stator, il est recommandé de prendre le rapport entre l'épaisseur de l'entrefer et le pas dentaire :

$$\frac{\delta}{t_1} > 0.5$$

16. Nombre de spires en séries dans une phase W_1 :

Il est calculé par la relation suivante :

$$W_1 = \frac{pq_1U_{n1}}{a_1} \quad (\text{I.16})$$

17. le pas polaire

C'est la distance entre deux pôles voisins distincts, il est déterminé par la relation suivante :

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} [\text{encoches}] \quad (\text{I.17})$$

18. Coefficient d'enroulement

Il est donné par la relation suivante :

$$k_{01} = k_{r1}k_{d1} \quad (\text{I.18})$$

➤ Coefficient de raccourcissement de l'enroulement

Il est donné par la relation suivante :

$$k_{r1} = \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta\right) \quad (\text{I.19})$$

$-\beta$: Rapport de raccourcissement qui est compris entre 0.833 et 0.78, pour des valeurs de coefficient de raccourcissement $k_{r1} = 0.966 \div 0.97$.

➤ Coefficient de distribution k_{d1}

Il est donné par la relation suivante :

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\pi}{2m_1q_1}\right)} \quad (\text{I.20})$$

Après avoir déterminé le nombre de spires en séries dans une phase, et le coefficient d'enroulement, on recalcule les valeurs de la charge linéaire définitive et le flux magnétique de fonctionnement à vide. Ces valeurs ne doivent pas dépasser (7 à 10%) des valeurs préliminaires.

19. Charge linéaire définitive A

Elle est donnée par la relation suivante :

$$A = \frac{6W_1 I_{1n\phi}}{\pi D_1} [A/m] \quad (\text{I.21})$$

20. Flux magnétique total pour l'harmonique principale du fonctionnement à vide Φ_0

Il est donné par la relation suivante :

$$\phi_0 = \frac{U_{1n\phi}}{4.44 f_n W_1 k_{01}} [Wb] \quad (\text{I.22})$$

$-f_n$: Fréquence des courants statorique.

21. Longueur active préliminaire du stator

Elle est donnée par la relation suivante :

$$l_{1n} = \frac{\Phi_0}{D_1 \beta_\delta} [m] \quad (\text{I.23})$$

22. Nombre de canaux de ventilations dans le paquet statorique

Il est donné par la relation suivante :

$$n_p = \frac{l_{1n}}{l_p + b_k} \quad (\text{I.24})$$

$-l_p$: Longueur axiale des paquets de tôles, elle est entre 40 et 75mm.

$-b_k$: Largeur axiale des canaux de ventilations qui est comprise entre 5 et 10mm.

Pour des raisons d'échauffement nous prenons : $l_p = 0.04m$
 $b_k = 0.005m$

n_p : Doit être un nombre entier.

23. Longueur du stator sans canaux de ventilation

Elle est donnée par la relation suivante :

$$l_s = (n_p - 2)l_p + 2l_{pkr} [m] \quad (\text{I.25})$$

Ou :

$-l_{pkr}$: Longueur d'extrémité des paquets des tôles, qu'on prend : $l_{pkr} = 0.0275m$

D'où la longueur active définitive du stator :

$$l_1 = l_s + b_k (n_p - 1) [m] \quad (\text{I.26})$$

24. Largeur préliminaire de la dent du stator

Pour le choix expérimental de la largeur de la dent du stator, il est possible d'employer les valeurs recommandées de l'induction magnétique B_{z1} au bout de la dent statorique, qui est déterminée par le **tableau I.4**, avec le noyau du stator laminé à froid.

Largeur préliminaire de la dent du stator peut être déterminée par la relation suivante :

$$b'_{z1} = \frac{\phi_0}{\left(\frac{2}{\pi}\right)3q_1 B_{z1} l_s k_c} [m] \quad (I.27)$$

On prend la valeur de : $B_{z1} = 1.85T$

$-k_c = 0.93$: Coefficient de remplissage des tôles magnétiques d'épaisseur 0.5mm.

Les différentes parties du circuit magnétique.		Induction, [T]	
		acier laminé à chaud et laminé à froid	acier laminé à froid
L'entrefer	B_δ	0.65 - 0.98	0.65 - 0.98
Dos du stator	B_{a1}	1.30 - 1.40	1.40 - 1.55
dents du stator dans l'endroit le plus étroit.	B_{z1}	1.55 - 1.95	1.70 - 2.15
les dents du rotor dans la section transversale calculée	$S_{z0.2}, B_{z0.2}$	1.7 - 2.15	
Dos du rotor	B_{a2}	1.40 - 1.6	

Tableau I-4 : Les valeurs recommandées des inductions magnétiques dans les différentes parties du circuit magnétique de turboalternateur en marche à vide.

25. Largeur préliminaire de l'encoche du stator

Elle est donnée par la relation suivante :

$$b'_{p1} = t_1 - b'_{z1} [m] \quad (I.28)$$

26. Largeur préliminaire du conducteur élémentaire dans l'encoche statorique

Les barres de l'enroulement du stator sont constituées de conducteurs élémentaires de section rectangulaire, placés deux à deux horizontalement. Voir **figure I.5** Soit n_1 le nombre de conducteurs élémentaires placés horizontalement, qu'en prend $n_1=2$.

La largeur préliminaire du conducteur élémentaire est donnée par la formule suivante :

$$b'_e = \frac{b'_p - \delta_w}{n_1} - \delta_e [m] \quad (I.29)$$

$-\delta_e$: Doubles épaisseurs d'isollements du conducteur élémentaire en largeur, selon le **Tableau I.6** :

$$\delta_e = 0.27 [mm]$$

L'épaisseur Bilatérale totale de l'isolation de l'encoche statorique suivant sa largeur est prise δ_w pour une tension nominale de 15.75kV, et qui vaut $\delta_w = 0.013 [m]$ (voir **Tableau I.5**).

$U_n [kV]$	3.15	6.3	10.5	13.8	15.75	18- 20	24
$\delta_w [mm]$, en largeur.	4.6	6.6	10.2	12	13	15	16.
$\delta_h [mm]$, en hauteur.	13.6	18.1	29.1	32.7	34.7	40.7	43.7
$\delta_{sTh} [mm]$, en largeur	5.4	7.4	10.8*	12.8*	13.6*	16.6*	18.1*
$\delta_{np} [mm]$, en hauteur	1, ne pas moins						

Tableau I.5 : Dimensions des isolations de l'encoche statorique suivant la hauteur et la largeur en fonction de la tension nominale.

Après avoir déterminé la valeur préliminaire de la largeur du conducteur élémentaire plein b'_e , on choisit du **Tableau I.2** et **Tableau I.3** (annexe) les dimensions de conducteur élémentaire plein non isolé b_e et creux b_{ep} , ces dimensions doivent être le plus possible étroites.

la taille du conducteur non isolé à travers le côté plus petit a_e [mm]		la taille du conducteur non isolé à travers le côté plus grand b_e [mm]		
0.9-2	2.12-3.75	3.55-7.1	7.5-8	8.5-10.6
l'épaisseur de l'isolement $b_n - b_e$		l'épaisseur de l'isolement $a_n - a_e$		
0.27	0.33	0.36	0.43	0.45

Tableau I.6 : l'épaisseur double de l'isolation du conducteur rectangulaire de la section transversale.

27. Largeur définitive de l'encoche du stator

Est donnée par la relation suivante :

$$b_{p1} = 2(b_e + \delta_e) + \delta_w [m] \quad (I.30)$$

28. Largeur définitive de la dent du stator

Est déterminée par la relation suivante :

$$b_{z1} = t_1 - b_{p1} [m] \quad (I.31)$$

Après avoir calculé la largeur définitive de la dent du stator, on calcule la valeur de l'induction magnétique dans les dents du stator comme suite :

$$B_{z1} = \frac{\phi}{\left(\frac{2}{\pi}\right)3q_1 b_{z1} l_s k_c} [T] \quad (I.32)$$

L'induction magnétique doit être dans les limites des valeurs recommandées dans le **tableau I.4**

29. Densité du courant préliminaire pour refroidissement direct à l'eau

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\Delta_1 = 14.10^6 \sqrt{\frac{\Theta_B V s_{k1}}{l_k k_\phi s_1}} [A/m^2] \quad (I.33)$$

– l_k : Longueur des canaux d'eau connectés en série pour deux barres, qui est calculée par la formule suivante :

$$l_k = 2(l_1 + 2.5D_1) [m] \quad (I.34)$$

– Θ_B : Température de préchauffage de l'eau avec l'écoulement à travers les canaux :

$$\Theta_B = (15 \div 30)^\circ C$$

– v : La vitesse du mouvement de l'eau $v = (0.8 \div 2) m/s$

– k_ϕ : Le coefficient de déplacement de courant (coefficient du champ) $k_\phi = (1.5 \div 2)$

$\frac{s_{k1}}{s_1}$: Le rapport de section de tous les canaux de la barre et de son cuivre, telle que

$$\frac{s_{k1}}{s_1} = (0.12 \div 0.3)$$

30. Section préliminaire de cuivre de conducteur élémentaire

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_1' = \frac{I_{ln\phi}}{a_1 \Delta_1} [m^2] \quad (I.35)$$

31. Hauteur préliminaire de conducteur creux

Elle est calculée par la relation suivante :

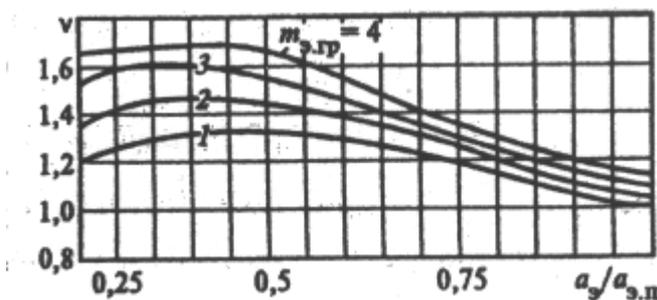
$$a_{ep} = 0.153 * 10^{-3} \frac{b_{p1}}{s_1} v \sqrt{(1 - s_{k1})(k_\phi - 1)} [m] \quad (I.35)$$

Pour $v = 1.45$ (coefficient déterminé du **Graphe I.3**), nous déterminons le rapport entre la hauteur

de conducteur élémentaire plein et la hauteur préliminaire du conducteur creux $\frac{a_e}{a_{ep}}$, et le nombre

de conducteurs élémentaires pour deux pleins et un creux m_{erp} ;

$$\frac{a_e}{a_{ep}} = 0.4 \quad m_{erp} = 2 \quad \text{et} \quad s_{k1} = (0.15 \div 0.4)$$



Graphe I.3 : Nombre de conducteurs pour deux pleins et un creux en fonction du rapport $\frac{a_e}{a_{ep}}$ et v .

32. Dimensions du conducteur creux de l'encoche statorique

Après avoir calculé la valeur préliminaire de la hauteur de conducteur creux a_{ep} , on choisie du **Tableau 1.3** (annexe), la valeur normalisée a_{ep} qui sera proche de la valeur calculée.

Les dimensions du canal sont : $a_k = 0.002[m]$; $b_k = 0.0044[m]$; $s_{ep} = 28.2 * 10^{-6} [m^2]$

En détermine la hauteur définitive de conducteur élémentaire plein comme suite :

$$a_e = a_{ep} \left(\frac{a_e}{a_{ep}} \right) [m] \quad (I.36)$$

Du **Tableau 1.2** (annexe), nous déterminons les dimensions du conducteur élémentaire plein :
 $a_e = 0.002[m]$; $b_e = 0.0075[m]$ et $s_e = 14.64 * 10^{-6} [m^2]$

33. Section de tous les conducteurs de groupe

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_{rp} = m_{erp} s_e + s_{ep} [m^2] \quad (I.37)$$

34. Nombre de groupes en hauteur

Il est déterminé par la relation suivante :

$$n_{rp} = \frac{s_1}{2s_{rp}} \quad (I.38)$$

Tous les conducteurs élémentaires, sont arrangés à travers la largeur de l'encoche par deux.

35. Section réelle du cuivre de la barre

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_1 = 2n_{rp} s_{rp} [m^2] \quad (I.39)$$

36. Densité de courant définitive dans la barre de l'encoche statorique :

Elle est calculée par la relation suivante :

$$\Delta_1 = \frac{I_{1n\phi}}{a_1 s_1} [A / m^2] \quad (I.40)$$

37. Hauteurs des conducteurs élémentaires isolés pleins et creux

➤ Conducteur plein

Elle est donnée par la relation suivante :

$$a_n = a_e + \delta_e [m] \quad (\text{I.41})$$

δ_e : Epaisseur bilatérale de l'isolant de conducteur en hauteur pris du **tableau I.6**. $\delta_e = 0.43[m]$

➤ Conducteur creux

Elle est donnée par la relation suivante :

$$a_{np} = a_{ep} + \delta_{ep} [m] \quad (\text{I.42})$$

$-\delta_{ep}$: Epaisseur bilatérale de l'isolant de conducteur en hauteur. $\delta_{ep} = 0.2[m]$

38. Nombre de conducteurs élémentaires dans une barre

Elle est donnée par la relation suivante :

$$m_{eB} = n_{rp} (1 + m_{erp}) \quad (\text{I.43})$$

39. Hauteur des conducteurs élémentaires isolée dans une barre

Elle est donnée par la relation suivante :

$$h_n = n_{rp} (a_n m_{erp} + a_{np}) + a_{np} [m] \quad (\text{I.44})$$

40. Hauteur du l'encoche statorique

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$h_{p1} = 2h_n + \delta_h + 2 * 0.2m_{eB} + h_{kr1} [m] \quad (\text{I.45})$$

$-\delta_h$: Epaisseur totale de l'isolation suivant sa hauteur, est prise du **Tableau I.5**

Pour une tension nominale de 15.75kV, $\delta_h = 34.7mm$

$-\delta_{kr1}$: Hauteur de la clavette de l'encoche statorique, est qui vaut $h_{kr1} = (0.6 \div 1.1)h_{p1}$.

Après avoir calculé les différentes dimensions de l'encoche statorique, celles-ci doivent satisfaire deux conditions telle que :

$$\frac{h_{p1}}{b_{p1}} = (5 \div 9) \quad \text{et} \quad \frac{h_{p1}}{D_1} = (0.16 \div 0.21)$$

En correspondance avec le **Tableau I.5** et par rapport aux calculs réalisés, on représente le schéma de l'encoche statorique, comme le montre la **Figure I.5** avec toutes les dimensions nécessaires.

41. Hauteur du dos de stator

Elle est donnée par la relation suivante :

$$h_{a1} = \frac{\phi_0}{2B_{a1}l_s k_c} [m] \quad (I.46)$$

– B_{a1} : Induction magnétique dans le dos du stator, que l'on prend du **tableau I.5**.

42. Diamètre extérieur du stator D_a

Elle est donnée par la formule suivante :

$$D_a = D_1 + 2(h_{p1} + h_{a1}) [m] \quad (I.47)$$

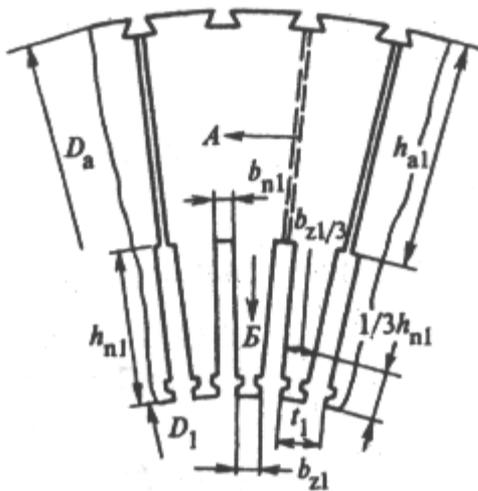


Figure I.4 : Coupe du stator.

Pour les turboalternateurs bipolaires, le rapport entre les diamètres doit être compris entre:

$$\frac{D_a}{D_1} = (2 \div 2,1)$$

II.2. PARAMETRE DE L'ENROULEMENT STATORIQUE

43. Longueur frontale d'une spire d'un seul côté de l'enroulement du stator l_{s1}

Elle est calculée par la formule suivante :

$$l_{s1} = 2.5 \frac{D_1}{p} [m] \quad (I.48)$$

44. Longueur totale d'une spire de l'enroulement du stator l_{B1}

Elle est donnée par la formule suivante :

$$l_{B1} = 2(l_1 + l_{s1})[m] \quad (I.49)$$

45. Résistance de l'enroulement du stator d'une phase à une température donnée $\theta^\circ\text{C}$

On prend comme référence de température ambiante $\theta_0 = 15^\circ\text{C}$ pour le calcul de la résistance de l'enroulement du stator, qui est donnée par la formule suivante :

$$r_{1(15)} = \frac{W_1 l_{B1}}{\gamma_e a_1 s_1} [\Omega] \quad (I.50)$$

–La conductivité électrique de cuivre à la température θ_0 : $\gamma_e = 57.10^6 [1/\Omega.m]$;

Pour n'importe quelle autre température θ , on calcule la résistance de l'enroulement du stator par la relation suivante :

$$r_{1(\theta)} = r_{1(15)} [1 + 0.004(\theta - 15)] [\Omega] \quad (I.51)$$

En unité relative :

$$r_{1(\phi)^*} = r_{1(\theta)} \frac{I_{1n\phi}}{U_{1n\phi}}$$

Où cette condition doit être satisfaite : $r_{1(\theta)^*} = 0.003 \div 0.001$

On peut calculer la résistance de l'enroulement statorique à la température de 75°C par la formule suivante :

$$r_{1(75)} = \frac{W_1 l_{B1}}{\gamma_e s_1 a_1} [\Omega] \quad (I.52)$$

– γ_e : Conductivité électrique de cuivre à la température de 75°C .

$$\gamma_e = 4610^6 [1/\Omega.m]$$

46. Réactance inductive de dispersion d'encoche avec prise en compte de la dispersion des courants des dents en unité relative

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{1p^*} = 0.47 \left(\frac{W_1}{10} \right)^2 \frac{l_{\sigma 1} I_{1n\phi}}{Z_1 U_{1n\phi}} \frac{3\beta + 1}{4} \left(\frac{h_{11} + 3h_4}{3b_{p1}} + \frac{\delta}{2t_1 + \frac{\delta}{2}} + 0.2 \right) \quad (\text{I.53})$$

– $l_{\sigma 1}$: Longueur calculée du champ dans la cannelure, est calculée en tenant compte des canaux de ventilation

$$l_{\sigma 1} = l_1 - 0.2b_k (n_p - 1) [m] \quad (\text{I.54})$$

– h_{11} : Distance entre les deux enroulements d'une même encoche

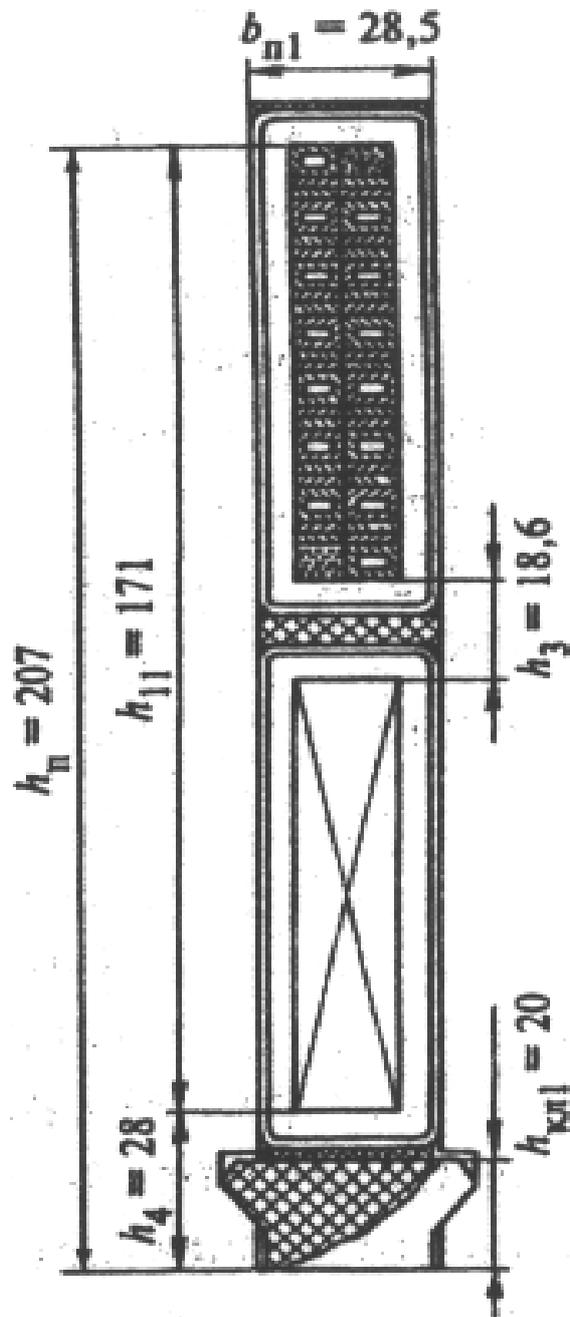


Figure I.5 : Encoche du stator.

47. Réactance inductive de dispersion des parties frontales de l'enroulement du stator pour raffûtage amagnétique du rotor en unité relative

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{r1*} = 3.23 \left(\frac{W_1 k_{01}}{10} \right)^2 \frac{I_{1n\phi}}{U_{1n\phi}} l_{r1} 10^{-2} \quad (\text{I.57})$$

– $l_{r1} \approx 2.5D_2$: Longueur de la partie frontale d'une demi-spire de l'enroulement.

48. Réactance inductive d'induction mutuelle en unité relative

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{ad*} = \frac{\sqrt{2}\mu_0}{\pi} \frac{k_{01}}{k'_\delta} \frac{\tau}{\delta} \frac{A}{B_\delta} \quad (\text{I.58})$$

– τ : Pas polaire, calculée par la relation suivante :

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} [m] \quad (\text{I.59})$$

– μ_0 : Perméabilité de vide qui vaut : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [H / m]$

– k'_δ : Valeur préliminaire du coefficient d'air (la plus petite valeur correspond aux grandes puissances): $k'_\delta = (1.07 \div 1.15)$

49. Réactance inductive différentielle de dispersion de l'enroulement statorique en unité relative

Dans les turboalternateurs modernes de large entrefer entre le rotor et le stator, la réactance inductive différentielle de dispersion $x_{m\phi 1}$, est petite en comparaison avec la réactance inductive générale et on la considère parfois approximative.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{m\phi 1*} = 0.375 \frac{\delta.t_1}{q_1 b_{M1} \tau} x_{ad*} \quad (\text{I.60})$$

Où :

$$b_{M1} = 2.b_e [m] \quad (\text{I.61})$$

50. Réactance inductive de dispersion en unité relative

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$x_{\sigma 1^*} = x_{p1^*} + x_{r1^*} + x_{m\phi 1^*} \quad (\text{I.62})$$

II.3 .DIMENSIONNEMENT DU ROTOR

Dans les machines synchrones bipolaires de grandes puissances fonctionnant à la vitesse de 3000tr/min, on utilise des rotors à pôle lisse, car ceux à pôle saillant ne convient pas pour de telles machines à cause des difficultés que présente la fixation des enroulements d'excitations. Pour assurer une solidité mécanique qui supporte les forces centrifuges, on les construit en acier hautement magnétique pour éliminer les contraintes mécaniques dangereuses.

51. Longueur du corps rotorique

Elle est donnée par la relation suivante :

$$l_2 = l_1 + (0.05 \div 0.15)[m] \quad (\text{I.63})$$

52. Détermination du nombre total d'intervalles d'encoches

Dans les turboalternateurs modernes, à pôle lisse, on fraise les 2/3 de la périphérie du rotor d'encoche radiales, et environ 1/3 de l'intervalle polaire reste libre d'encoche est forme ainsi les grandes dents, par les quelles passent la plus grande partie de flux magnétique.

On détermine le nombre d'intervalle d'encoche par la relation suivante :

$$Z_2' = (45 \div 55)D_2$$

On prend : $Z_2' = 48D_2$

D'après le tableau ci-dessous des valeurs normalisées d'intervalles d'encoches nous choisissons la valeur proche de la valeur calculée.

Z_2'	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
--------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tableau I-7 : valeurs normalisées d'intervalles d'encoches.

D'où : $Z_2' = 52$

53. Détermination du nombre d'encoches comportant l'enroulement rotorique

Le rapport entre le nombre d'encoches comportant l'enroulement rotorique par le nombre d'intervalles d'encoches $\gamma = \frac{Z_2}{Z'_2}$, est généralement compris entre 0.667 et 0.75. on prend

$$\gamma = 0.692$$

Le nombre d'encoches comportant l'enroulement rotorique est donné par la relation suivante :

$$Z_2 = \gamma \cdot Z'_2$$

Qui donne : $Z_2 = 35.984$

D'après le **Tableau I-8** des valeurs normalisées d'encoches au rotor, nous choisissons la valeur proche de la valeur calculée.

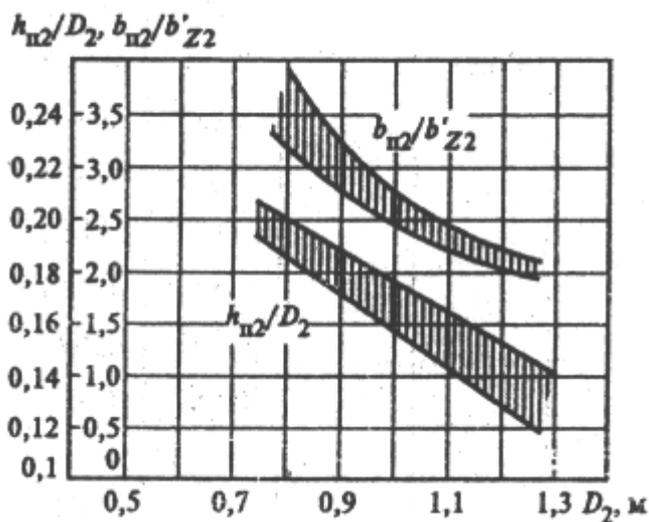
Z_2	12	16	20	24	28	32	36	40	44
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tableau I.8 : Valeurs normalisées de nombre d'encoches au rotor.

D'où : $Z_2 = 36$ encoches.

54. Détermination de la profondeur de l'encoche rotorique

De **Graphe I-6** nous obtenons le rapport de la profondeur de l'encoche rotorique h_{p2} par le diamètre extérieur du rotor D_2 , et le rapport de la largeur de l'encoche rotorique b_{p2} par la largeur préliminaire de la dent rotorique b'_{z2} , en fonction de diamètre extérieur du rotor D_2 .



Graphe I-6 : Le rapport $\frac{h_{p2}}{D_2}, \frac{b_{p2}}{b'_{z2}} = f(D_2)$, pour le refroidissement direct des enroulements du

rotor.

$$\frac{h_{p2}}{D_2} = 0.15 \text{ Et } \frac{b_{p2}}{b'_{z2}} = 2.3$$

La valeur de la profondeur de l'encoche rotorique est déterminée comme suite :

$$h_{p2} = \left(\frac{h_{p2}}{D_2}\right) D_2 [m] \quad (\text{I.64})$$

55. Pas dentaire préliminaire au rotor

D'après la **figure I-7**, le pas dentaire préliminaire du rotor est donné par la relation suivante :

$$t'_2 = b_{p2} + b'_{z2} \quad (\text{I.65})$$

Ou :

$$t'_2 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{p2})}{Z'_2} \quad (\text{I.66})$$

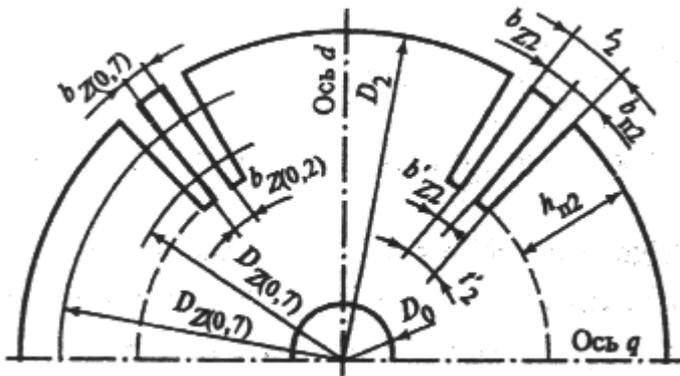


Figure I-7 : coupe rotorique

56. Largeur préliminaire de l'encoche rotorique

Après avoir déterminé la profondeur de l'encoche rotorique h_{p2} et le pas dentaire préliminaire du rotor, on calcule la largeur préliminaire de l'encoche rotorique, d'après ces deux relations :

$$\frac{b_{p2}}{b'_{z2}} = 2.3 \text{ Et } t'_2 = b_{p2} + b'_{z2}$$

D'où :

$$b'_{p2} = \frac{2.3t'_2}{3.3} [m] \quad (\text{I.67})$$

57. Largeur de la dent de la partie la plus étroite (base de l'encoche)

Pour la technologie de la production des rotors, on juge, pour les rotors de $D_2 \geq 0.8[m]$, que la largeur préliminaire de la base de la dent doit être : $b'_{z2} \geq (12 \div 13)[mm]$ et sa valeur est déterminée par la formule suivante :

$$b'_{z2} = t'_2 - b'_{p2} [m] \quad (I.68)$$

58. Largeur du conducteur de l'enroulement d'excitation

Après avoir choisi l'épaisseur totale de l'isolation δ_{w2} suivant la largeur de l'encoche, fixée par le **Tableau I.6**, telle que l'on prend : $\delta_{w2} = 0.0045m$ on détermine la largeur préliminaire de conducteur de l'enroulement d'excitation suivant la relation suivante :

$$b'_2 := b_{p2} - \delta_{w2} \quad (I.69)$$

En prenant la valeur normalisée de la largeur de conducteur de l'enroulement d'excitation **Tableau 1.4** (annexe), qui sera proche de la valeur calculée. On recalcule la largeur de l'encoche rotorique b_{p2} .

Telle que :

$$b_{p2} = b'_2 + \delta_{w2} [m] \quad (I.70)$$

D'où la largeur de la dent de la partie la plus étroite.

$$b'_{z2} = t'_2 - b_{p2} [m] \quad (I.71)$$

position selon la figure I.8	la désignation	l'épaisseur de l'isolement, mm	
		En hauteur	En largeur
1	Cale au dessous de la clavette remplie de stratifier ou de micanite de fibre de verre h_y	7-15	-
2	L'isolement entre spires (remplissage du stratifié de fibre de verre) δ_{nB}	0.3-1,0	-
3	l'isolement du conducteur élémentaire (cas du stratifié de fibre de verre) l'épaisseur unilatérale	1,6-2,0	1,6-2,0
4	remplissage sur le fond d'encoche du stratifié de fibre de verre (au-dessus de la cale et sous la cale)	0,5-0,6	-
-	dégagement pour l'empilage le long de la largeur de deux côtés	-	0,5
-	l'épaisseur à côté double globale de l'isolement sur la largeur de l'encoche δ_{w2}	-	3,5-4,5
-	l'épaisseur globale en cas de remplissage sur le fond de l'encoche $\Sigma\delta_b$	2,6-3,2	-

Tableau I.9 : Les dimensions de l'isolement de l'encoche des enroulements rotatorique pendant le refroidissement direct par l'hydrogène.

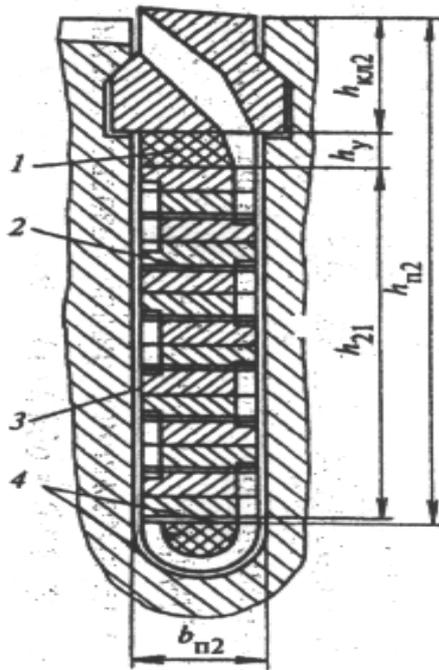


Figure I.8 : Schéma de l'encoche rotorique.

59. Réalisation de l'enroulement d'excitation

L'enroulement du rotor est un enroulement concentrique à pas total, avec une paire de pôle ($p=1$) à une seule couche et une voie parallèle ($a_2=1$), parcourue par un courant continu, qui est le courant d'excitation.

Après avoir déterminé le nombre d'encoches du rotor Z_2 , le nombre de phases du rotor m_2 , et le pas polaire.

$$Z_2 = 36$$

$$m_2 = 1$$

$$p = 1$$

Le pas polaire :

$$\tau_2 = \frac{Z_2}{2p} \quad (\text{II.72})$$

Pour réaliser l'enroulement d'excitation, on doit enrouler d'une manière à avoir un pôle nord et un pôle sud. Ce qui nous ramène à exécuté sur chaque pôle un enroulement avec 9 pas d'enroulements.

Le schéma de cet enroulement est donné par la **figure I.9**

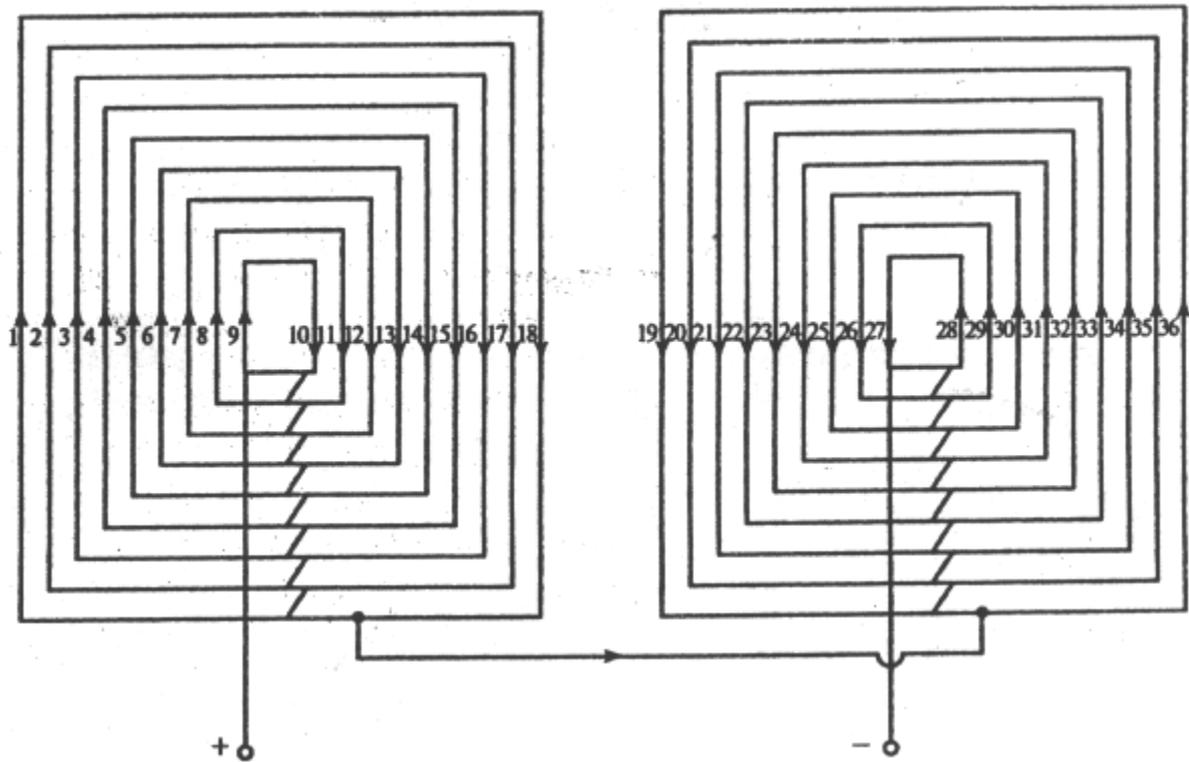


Figure I.9 : Schéma de l'enroulement d'excitation de turboalternateur.

II.3 .Calcul de circuit magnétique

Les circuits magnétiques du rotor, du stator et de l'entrefer composent le circuit magnétique de turboalternateur. Le calcul du circuit magnétique peut être exécuté avec la marche à vide de la machine ou avec la charge nominale. Le calcul du circuit magnétique avec la charge nominale est suffisamment une tâche difficile et l'avantage actuel n'est pas donné, et encore on indique le calcul du circuit magnétique avec la marche à vide, dont le but est la détermination du courant d'excitation I_2 (de l'enroulement rotorique) en fonction de la force électromotrice $E_{10} = f(I_2)$.

En utilisant le principe de la circulation du champ magnétique $F = \oint H \cdot dl$, et on subdivisant le circuit magnétique du turboalternateur en cinq tronçons, on détermine la force

magnétomotrice F_2 qui est égale à la somme des force magnétomotrice de chaque tronçon :
 l'entrefer F_δ , dent du stator F_{Z1} , dos du stator F_{a1} , dent du rotor F_{Z2} et dos du rotor F_{a2} :

$$F_2 = \frac{1}{2} \oint H_l dl = F_\delta + F_{Z1} + F_{a1} + F_{Z2} + F_{a2} \quad (I.73)$$

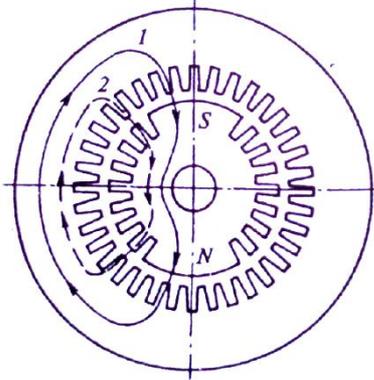


Figure I.10 : circuit magnétique de turboalternateur.

60. Section des dents du rotor correspondant à une distance de $0.2h_{p2}$ et $0.7h_{p2}$, à partir de la base des dents rotorique

Les dents du rotor en hauteur ont différentes épaisseurs, respectivement avec différentes sections, avec l'intégration numérique, le calcul magnétique des dents du rotor n'est pas possible. Cela est recommandé à la mise en oeuvre du calcul magnétique en deux sections. On a calculé la section sur 0.2 et 0.7 de la profondeur de l'encoche de son fond (voir Figure I.7).

➤ Section des dents du rotor correspondant à une distance de $0.2h_{p2}$, à partir de la base des dents

Elle est donnée par la formule suivante :

$$s_{z(0.2)} = (D_{z(0.2)} - b_{p(0.2)}k_{wp})l_2 [m^2] \quad (I.74)$$

$D_{z(0.2)}$: Le diamètre du rotor correspondant à une distance de $0.2h_{p2}$ de la base des dents, il est donné par la formule suivante :

$$D_{z(0.2)} = D_2 - 1.6h_{p2} [m] \quad (I.75)$$

k_{wp} Est un coefficient qui est calculé comme suit :

$$k_{wp} = \frac{1 - \cos(\gamma \frac{\pi}{2})}{\sin(\frac{\pi}{Z_2})} \quad (I.76)$$

$b_{p(0.2)}$: La largeur de l'encoche du rotor à une distance de $0.2h_{p2}$ de la base des dents et qui égale à b_{p2} .

$$b_{p(0.2)} = b_{p2} [m] \quad (I.77)$$

➤ **Section des dents du rotor correspondant à une distance de $0.7h_{p2}$, à partir de la base des dents**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$s_{z(0.7)} = (D_{z(0.7)} - b_{p(0.7)}k_{wp})l_2 [m^2] \quad (I.78)$$

$D_{z(0.7)}$ Est le diamètre du rotor correspondant à une distance de $0.7h_{p2}$ de la base des dents, il est calculé par la formule suivante :

$$D_{z(0.7)} = D_2 - 0.6h_{p2} [m] \quad (I.79)$$

$b_{p(0.7)}$ Est la largeur de l'encoche du rotor à une distance de $0.7h_{p2}$ de la base des dents et qui égale à b_{p2} .

$$b_{p(0.7)} = b_{p2} [m] \quad (I.80)$$

61. Section des dents du stator

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_{z13} = \frac{Z_1}{\pi} b_{z13} l_s k_c [m^2] \quad (I.81)$$

b_{z13} : Largeur de la dent du stator correspondant à une distance de $1/3 h_{a1}$ à partir de la base de la dent, qui est calculée comme suit :

$$b_{z13} = \frac{\pi D_{z13}}{Z_1} - b_{p1} [m] \quad (I.82)$$

D_{z13} : Le diamètre intérieur du stator qui correspondant à une distance de $1/3 h_{a1}$, à partir de la base des dents, calculé comme suit :

$$D_{z13} = D_1 + \left(\frac{2}{3}\right)b_{p1} [m] \quad (I.83)$$

62. La section de l'entrefer

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_{\delta} = (D_2 + \delta)(l_1 + 2\delta)k_{\gamma} [m^2] \quad (\text{I.84})$$

k_{γ} : Le facteur de correction, qui considère dans les calculs de l'induction magnétique, que le champ magnétique est sous forme de trapèze équilatéral. Si nous considérons que le flux magnétique de la 1^{ère} harmonique du champ est sous la forme de trapèze équilatéral, alors il est possible de prendre k_{γ} telle que:

$$k_{\gamma} = (1 - 0.5\gamma)\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{I.85})$$

63. La surface de l'acier de la culasse statorique

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_{a1} = l_s k_c h_{a1} [m^2] \quad (\text{I.86})$$

64. La section du dos rotorique

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$s_{a2} = \frac{D_2 - 2h_{p2} - D_0}{2} l_2 [m^2] \quad (\text{I.87})$$

Telle que :

$-D_0$: Est le diamètre du trou central du rotor, sous forme d'un canal cylindrique dans le rotor, lorsqu'on le remplit avec un matériau magnétique, la valeur de D_0 dans la formule précédente sera égale à zéro. le diamètre de l'ouverture supposé habituellement est : $D_0 = (0.1 \div 0.12)D_2 [m]$

CARACTERISTIQUES A VIDE

Après la détermination des cinq sections de circuit magnétique, on retrouve les inductions magnétiques, et les forces magnétomotrices des sections en marche à vide sous une tension nominale.

$$E_{10} = U_{1n\phi} [V]$$

En unité relative :

$$\frac{E_{10}}{U_{1n\phi}} = 1 = E_{10}^*$$

65. Flux magnétique dans l'entrefer amagnétique à vide et sous tension nominale

La valeur de flux magnétique à vide, pour une tension nominale à vide, est donnée par la relation suivante :

$$\phi = C_1 E_{10} [Wb] \quad (I.88)$$

Ou :

$-E_{10}$: la force magnétomotrice à vide.

$$C_1 = \frac{1}{4.44 f_n W_1 k_{en1}} \quad (I.89)$$

66. Induction magnétique dans l'entrefer amagnétique

Elle est donnée par la relation suivante :

$$B_\delta = \frac{\phi}{s_\delta} [T] \quad (I.90)$$

67. Induction magnétique dans les dents du stator

Elle est calculée par la relation suivante :

$$B_{z13} = \frac{\phi_0}{s_{z13}} [T] \quad (I.91)$$

Le champ magnétique de dents du stator H_{z13} avec $B_{z13} \leq 1.8[T]$, pour l'acier laminé à froid est déterminé selon le **Tableau 2.2** (annexe). Pour le cas de forte induction magnétique dans les dents du stator dépassant $B_{z13} > 1.8[T]$, il faut tenir compte de la partie du flux qui se devise. Pour cela, on prendra la valeur du champ magnétique dans les dents du stator H_{z13} correspondant à l'induction B_{z13} de la **Graphie 2.2** (annexe) en introduisant à cet effet, le coefficient, qui considère le flux près de l'encoche :

$$k_{p13} = \frac{(b_{p1} + b_{z13})}{b_{z13} l_s k_c} l_1 - 1 \quad (I.92)$$

68. Induction magnétique dans le dos du stator

Elle est donnée par la relation suivante :

$$B'_{a1} = C_3 \phi [T] \quad (I.93)$$

Avec :

$-C_3$: Est un coefficient multiplicateur pour rectifier l'induction dans le dos du stator, parce que l'induction dans le dos de stator à une distribution non uniforme dans le sens de la courbe de ce dernier. Pour cela, on a recours à ce coefficient est qui vaut :

$$C_3 = \frac{18 - 10\gamma}{18 - 9\gamma} \frac{1}{2s_{a1}} \quad (\text{I.94})$$

Selon le **tableau 2.1 (annexe)**, et pour la valeur calculée de l'induction magnétique dans le dos du stator, on détermine la valeur du champ magnétique H'_{a1} .

69. Force magnétomotrice de l'entrefer

En calculant la force magnétomotrice de l'entrefer F_δ , on doit tenir compte de l'influence de l'irrégularité de l'entrefer sur l'induction, qui est caractérisé par le coefficient d'entrefer k_δ . elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta * k_\delta = C_2 B_\delta [A] \quad (\text{I.95})$$

Ou :

$$C_2 = \frac{\delta * k_\delta}{\mu_0}$$

Le coefficient de l'entrefer est donné par la relation suivante :

$$k_\delta = 1 + (k_{\delta c1} - 1) + (k_{\delta c2} - 1) + (k_{\delta B} - 1) + (k_{\delta r} - 1) + (k_{\delta st} - 1) + (k_{\delta sr} - 1) \quad (\text{I.96})$$

$-k_{\delta c1}$: Est le coefficient qui tient compte de l'influence des encoches du stator.

$$k_{\delta c1} = 1 + \frac{b_{p1}^2}{t_1(5\delta + b_{p1}) - b_{p1}^2} \quad (\text{I.97})$$

$-k_{\delta c2}$: Est le coefficient qui tient compte de l'influence des encoches du rotor.

$$k_{\delta c2} = 1 + \frac{b_{p2}^2}{t_2(5\delta + b_{p2}) - b_{p2}^2} \frac{\gamma}{2} \quad (\text{I.98})$$

$-t_2$: est le pas dentaire du rotor.

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} [m] \quad (\text{I.99})$$

$-k_{\delta B}$: Est le coefficient qui tient compte de l'influence des canaux de refroidissement des paquets de tôles statorique, il est exprimé par la relation suivante :

$$k_{\delta B} = 1 + \frac{b_k^2}{(l_p + b_k)(5\delta + b_k) - b_k^2} \quad (\text{I.100})$$

$k_{\delta r}$: Est le coefficient qui tient compte de l'influence des canulars sur le corps du rotor.

Les canulars représentent un système de canaux sur la surface en forme d'anneaux sur la surface du rotor, elles ont pour but de diminuer les pertes supplémentaires sur la surface du rotor et d'augmenter la surface de refroidissement, tel que t_p est le pas de canulars et b_p est la largeur des canulars.

Ou :

$$\begin{aligned} t_p &\approx (0.025 \div 0.03)[m] \\ b_p &= 0.5t_p [m] \end{aligned} \quad (\text{I.101})$$

On prend $t_p = 0.028[m]$ et $b_p = 0.014[m]$

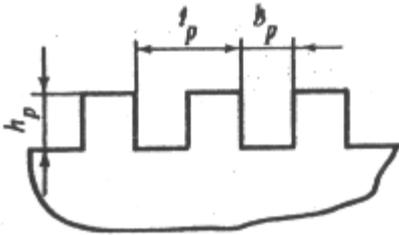


Figure I.11 : Canulars du rotor.

$-k_{\delta st}$: est le coefficient qui prend en considération les bouts de paquets en gradient.

$$k_{\delta st} = 1 + \frac{7 * 10^{-3}}{\sqrt{\delta}(l_1 + l_2)} \quad (\text{I.102})$$

$-k_{\delta sp}$: est le coefficient qui prend en considération une surface non lisse.

$$k_{\delta sp} = 1 + 0.25 \frac{\gamma}{\delta} 10^{-3} \quad (\text{I.103})$$

Remarque : la disposition des segments des tôles magnétique laminées à froid de type 3413 est de telle sorte, que les lignes du champ magnétique sont perpendiculaires au sens du laminage dans les dents statorique et dans le même sens que dans le dos statorique.

70. Force magnétomotrice des dents du stator

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{z1} = h_{p1} H_{z13} [A] \quad (I.104)$$

71. Force magnétomotrice du dos de stator

Elle est calculée par la relation suivante :

$$F_{a1} = L_{a1} H'_{a1} [A] \quad (I.105)$$

– L_{a1} : Est la longueur moyenne des lignes de champ dans le dos du stator, déterminée à partir de la relation suivante :

$$L_{a1} = \gamma \frac{\pi(D_a - h_{a1})}{4p} [m] \quad (I.106)$$

72. Force magnétomotrice dans les dents, dos du stator et de l'entrefer

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{\delta s} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{a1} [A] \quad (I.107)$$

73. Coefficient de conductibilité magnétique pour le flux de dispersion de l'encoche rotorique pour une forme rectangulaire

Soit la **Figure I.12**, est la forme de l'encoche rotorique :

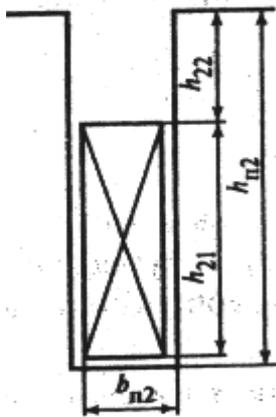


Figure I.12: Encoche rectangulaire de l'enroulement du rotor.

La valeur de ce coefficient est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{p2} = \frac{h_{21}}{2b_{p1}} + \frac{h_{22}}{b_{p2}} \quad (I.108)$$

$$h_{22} = h_{kr2} + h_y [m] \quad (I.109)$$

h_{kr2} : Hauteur de la clavette de l'encoche rotorique, que l'on prend $h_{kr2} = b_{p2} = 0.033[m]$

$-h_y$: l'épaisseur de la garniture sous clavette. Sa valeur est déterminée suivant la tension d'excitation telle que :

$$h_y \geq 6[mm]; \text{ si } U_{2h} \leq 160[V];$$

$$h_y \geq 6 + 0.02(U_{2h} - 160)[mm]; \text{ si } U_{2h} > 160[V];$$

Ou du **tableau I.9** : $h_y = (0.007 \div 0.015)[mm]$; on prend $h_y = 0.01[m]$

$$h_{21} = h_{p2} - h_{22} - \sum \delta_p [m] \quad (I.110)$$

$-\sum \delta_p$: Est la cale de fond d'encoche rotorique, que l'on prend du **tableau I.9**.

EMBED Equation.3

74. Coefficient de conductibilité magnétique de dispersion de flux magnétique des cornes des dents rotorique

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\text{EMBED Equation} \quad (I.111)$$

75. Flux magnétique de dispersion d'encoches et des dents rotorique

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\phi_{\sigma p k 2} = C_4 F_{\delta_{zs}} [Wb] \quad (I.112)$$

Où :

$$C_4 = \frac{8\mu_0 l_2}{Z_2} (\lambda_{p2} + \lambda_{k2}) \approx \frac{l_2}{Z_2} (\lambda_{p2} + \lambda_{k2}) 10^{-5} \quad (I.113)$$

76. Flux magnétique total de dispersion de rotor

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\phi_{\sigma 2} = \phi_{\sigma k 2} + \phi_{\sigma r 2} [Wb] \quad (I.114)$$

$-\phi_{\sigma r 2}$: Le flux magnétique de la dispersion frontale du rotor qu'on néglige dans les calculs

$$\phi_{\sigma r 2} = 0 [Wb]$$

Nous négligeons le flux de la dispersion frontale, puisque des excitations de bande seront faites à partir de l'acier amagnétique.

77. Flux magnétique total de rotor à vide

Il est donné par la relation suivante :

$$\phi_2 = \phi + \phi_{\sigma 2} [Wb] \quad (I.115)$$

78. Induction magnétique dans les dents du rotor correspondant à une distance de $0.2h_{p2}$, à partir de la base des dents

Elle est calculée par la relation suivante :

$$B_{z(0.2)} = \frac{\phi_2}{S_{z(0.2)}} [T] \quad (I.116)$$

79. Induction magnétique dans les dents du rotor correspondant à une distance de $0.7h_{p2}$, à partir de la base des dents

Elle est donnée par la relation suivante :

$$B_{z(0.7)} = \frac{\phi_2}{S_{z(0.7)}} [T] \quad (I.117)$$

L'induction magnétique dans les dents du rotor correspondant à une distance de $0.7h_{p2}$, à partir de la base des dents, ne doit pas dépasser les valeurs, recommandées sur le **Tableau I.4**

Avec des inductions magnétiques dans les dents du rotor correspondant à une distance de $0.7h_{p2}$, à partir de la base des dents $B_{z(0.2)} \leq 1.8[T]$ ou $B_{z(0.7)} = 1.8[T]$ correspondance des champs magnétiques $H_{z(0.2)}$ et $H_{z(0.7)}$ qui sont déterminés des **courbes 2.5** (annexe), de la magnétisation des pièces forgées de rotor.

Si les inductions magnétiques de $B_{z(0.2)}$ ou $B_{z(0.7)}$ dépassent 1.8T, alors il est nécessaire de considérer les parties du flux près de l'encoche en parallèle à la dent. Les coefficients trouvent pour ceci :

$$k_{p(0.2)} = \frac{b_{p(0.2)}}{b_{z(0.2)}} \quad (\text{I.118})$$

$$k_{p(0.7)} = \frac{b_{p(0.7)}}{b_{z(0.7)}} \quad (\text{I.119})$$

Ou :

$$b_{z(0.2)} = \frac{\pi D_{z(0.2)}}{Z_2} - b_{p(0.2)} [m] \quad (\text{I.120})$$

$$b_{z(0.7)} = \frac{\pi D_{z(0.7)}}{Z_2} - b_{p(0.7)} [m] \quad (\text{I.121})$$

Pour les coefficients calculés de $k_{p(0.2)}$ et $k_{p(0.7)}$, nous prendrons les valeurs des champs magnétiques $H_{z(0.2)}$ et $H_{z(0.7)}$ correspondant respectivement aux inductions $B_{z(0.2)}$ et $B_{z(0.7)}$ sur les courbes 2.5 de la magnétisation des dents des pièces forgées de rotor.

80. Induction dans le dos du rotor

Elle est donnée par la relation suivante :

$$B_{a2} = \frac{\phi_2}{2s_{a2}} [T] \quad (\text{I.122})$$

Si la valeur trouvée de l'induction magnétique dans le dos du rotor B_{a2} dépasse les valeurs admissibles dans le **Tableau I.4**, cela nous ramène à redimensionner la section du dos rotorique, pour cela on agit sur le diamètre de trou central du rotor, nous le remplissons par du matériaux magnétique (tige en acier), donc D_0 deviendra nul. $D_0 = 0[m]$

Donc la nouvelle section du dos rotorique est donnée comme suite :

$$s'_{a1} = \frac{D_2 - 2h_{p2}}{2} l_2 [m^2] \quad (\text{I.123})$$

Se qui nous donne une nouvelle induction dans le dos du rotor, qui est donnée comme suit :

$$B'_{a2} = \frac{\phi_2}{2s'_{a1}} [T] \quad (\text{I.124})$$

Du **Tableau 2.5** (annexe), et pour la valeur de l'induction dans le dos du rotor B'_{a2} , correspond le champ magnétique H_{a2} .

81. Force magnétomotrice des dents du rotor

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{z2} = h_{p1} \frac{H_{z(0.2)} + H_{z(0.7)}}{2} [A] \quad (\text{I.125})$$

82. Force magnétomotrice du dos du rotor

Elle est calculée par la relation suivante :

$$F_{a2} = L_{a2} H_{a2} [A] \quad (\text{I.126})$$

– L_{a2} : est la longueur moyenne des lignes du champ dans le dos du rotor.

$$L_{a2} = \frac{D_2 - 2h_{p2}}{2} [m] \quad (\text{I.127})$$

83. Force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation à vide pour une tension nominale

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$F_2 = F_{20} = F_{\delta_{cs}} + F_{z2} + F_{a2} [A] \quad (\text{I.128})$$

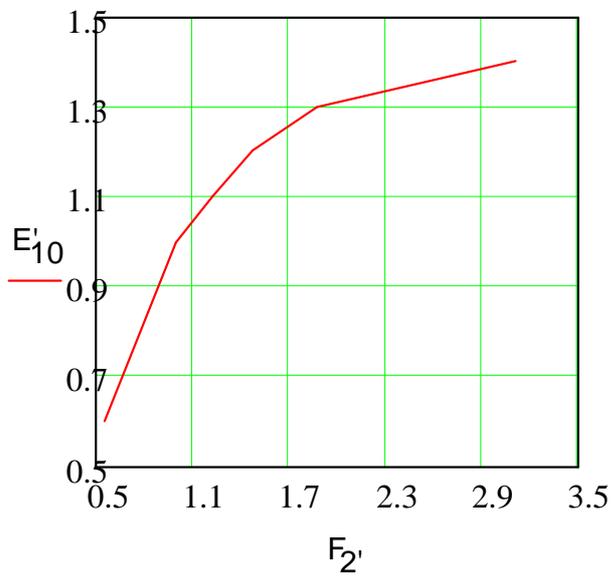
En unité relative :

$$F_{2^*} = \frac{F_2}{F_{20}} \quad (\text{I.129})$$

Pour déterminer la caractéristique à vide de la machine, on doit calculer pour différentes valeurs de la force électromotrice à vide telle que :

$$E_{10^*} = \frac{E_{10}}{U_{1n\phi}} = 0.6, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$$

La caractéristique à vide de la machine est donnée dans le **Grphe I.13** suivant les valeurs du **Tableau I.10** (annexe).



Grphe I.13 : Caractéristique à vide du turboalternateur.

II.5. FORCES MAGNETOMOTRICES DE L'ENROULEMENT D'EXCITATION EN CHARGE NOMINALE

84. Force magnétomotrice de l'enroulement de stator par pôle pour un courant nominal d'induit

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{1n} = 1.35 I_{1n} \frac{W_1 k_{01}}{p} [A] \quad (I.130)$$

85. Réduction de La force magnétomotrice de l'enroulement d'induit pour une charge nominale

Pour réduire la force magnétomotrice de l'enroulement d'induit pour une charge nominale, nous allons prendre en considération les conditions de l'enroulement d'excitation, pour laquelle nous tenons compte du coefficient de réduction de la première harmonique du champ magnétique d'induit, ce dernier est déterminé par la relation suivante :

$$k_a = \frac{\pi^2 \gamma}{8 \sin\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right)} \quad (I.131)$$

D'où la relation de la réduction de la force magnétomotrice de l'enroulement d'induit en tenant compte de l'enroulement d'excitation :

$$F'_{1n} = F_{1n} k_a [A] \quad (I.132)$$

En unité relative :

$$F'_{1n*} = \frac{F'_{1n}}{F_{20}} [u.r] \quad (I.133)$$

86. Détermination du la force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation

Pour déterminer la force magnétomotrice en charge de l'enroulement d'excitation de turboalternateur, il convient de se servir de la caractéristique de magnétisation de la machine à vide, et du diagramme vectoriel de potier en unité relative.

Pour construire le diagramme vectoriel, il est nécessaire de connaître la valeur de la réactance inductive de dispersion de potier, cette dernière est déterminée par la relation suivante en unité relative :

$$x_p^* = x_{\sigma 1^*} + 0.025 [u.r] \quad (I.134)$$

En construisant ce diagramme, on prendra sur l'axe des ordonnées oy (axe de imaginaires) dans le sens positif, le vecteur tension nominale en unité relative $\vec{U}_{1n\phi^*} = 1$, ensuite on trace le vecteur courant nominal qui, lui aussi en unité relative $\vec{I}_{1n\phi^*} = 1$ en retard sur le vecteur tension $\vec{U}_{1n\phi^*}$ d'un angle φ_n . En ajoutant le vecteur de tension en unité relative $-j(x_{p^*})\vec{I}_{1n\phi^*}$ au vecteur $\vec{U}_{1n\phi^*}$, on obtient le vecteur de la force électromotrice résultante $\vec{E}_{1n\phi^*}$. Traçant un arc de cercle de centre o de rayon $\vec{E}_{1n\phi^*}$ et qui coupe oy au point e, ensuite, on projette le point e sur la courbe de la caractéristique suivant l'axe des abscisses ox (axe des réelles), au point a, qui est a son tour projeté sur l'axe ox suivant l'axe oy au point m. la distance \overline{om} représente la force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation \vec{F}_{pn^*} , correspondant à la force électromotrice $\vec{E}_{1n\phi^*}$ selon l'échelle donnée sur la **Figure I.14**. Du point o, on trace le vecteur, \vec{F}_{pn^*} qui est perpendiculaire à $\vec{E}_{1n\phi^*}$ est à pour module \vec{F}_{pn^*} . de l'extrémité de ce dernier on trace le vecteur de la force magnétomotrice en unité relative, \vec{F}'_{1n^*} qui est parallèle au vecteur $\vec{I}_{1n\phi^*}$.

La somme des deux vecteurs \vec{F}_{pn^*} et \vec{F}'_{1n^*} nous donne le vecteur de la force magnétomotrice d'excitation nominale \vec{F}_{2n^*} en unité relative. Pour connaître sa valeur, on trace un arc de cercle de centre o et de rayon \vec{F}_{2n^*} , et qui coupe ox au point f, telle que la distance \overline{of} représente la valeur nominale de la force magnétomotrice de l'excitation en unité relative F_{2n^*} . est qui vaut $F_{2n^*} = 2.6[u.r]$

La valeur nominale de la force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation est donnée par la formule suivante :

$$F_{2n} = F_{2n^*} \cdot F_{20} [A] \quad (I.135)$$

Pour déterminer la force électromotrice de l'enroulement statorique, correspondant à la valeur nominale de la force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation, telle que $F_2 = F_{2n}$, on trace du point f un parallèle à oy, qui coupera la courbe de magnétisation au point d, de ce dernier on mène une parallèle à ox, qui va coupé la droite oy en L, la distance oL correspond à la force électromotrice de l'enroulement du stator en unité relative E_{10^*} , et qui vaut d'après la **Figure I.14** et suivant l'échelle utilisée : $E_{10^*} = 1.41[u.r]$.

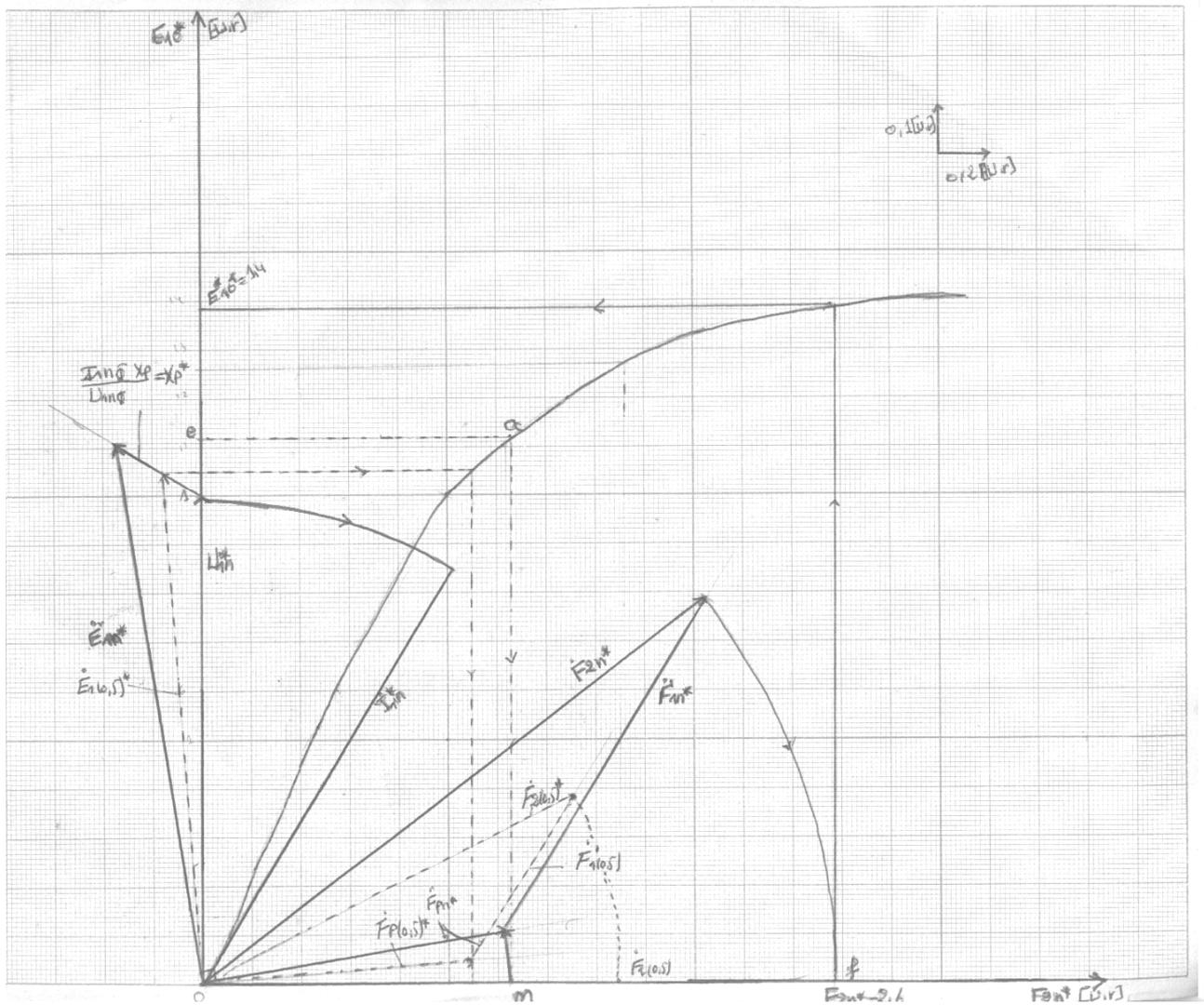


Figure I.14 : détermination de la force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation pour une charge donnée.

87. Détermination de la variation de la tension pour un changement de la charge, de régime nominal et en régime à vide

Dans les machines modernes à grande puissance, la variation de la tension ΔU ne doit pas dépasser 50%.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\Delta U = \frac{E_{10} - U_{1n\phi}}{U_{1n\phi}} 100 = (E_{10^*} - 1)100[\%] \quad (\text{I.136})$$

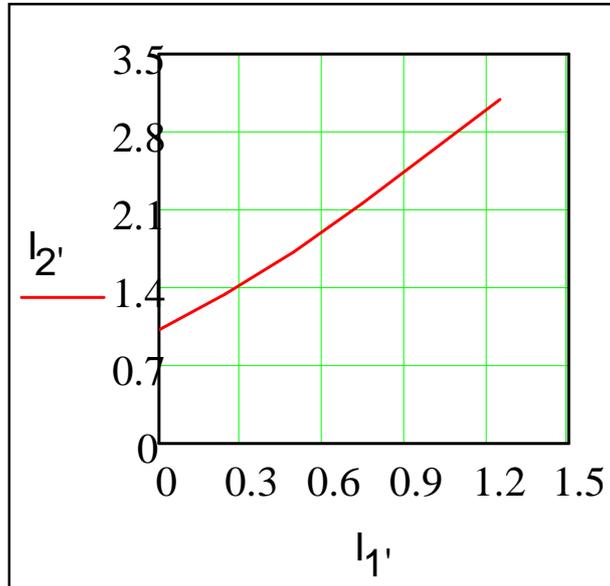
88. Caractéristiques de réglage

Lors de calcul initial de la machine, on détermine la valeur requise de la force magnétomotrice en unité relative, pour les différents régimes de fonctionnement, c'est-à-dire, déterminé la force magnétomotrice F_2 , en fonction du coefficient de charge $I_1^* = (0;0.25;0.5;0.75;1.0;1.25)$.

Pour déterminer le courant d'excitation pour chaque valeur de coefficient de charge, nous procédons de la même manière, que pour la détermination de la force magnétomotrice de l'excitation nominale, et ceci tout en maintenant la tension nominale constante $U_{1n\phi^*} = 1$, on recalcule la tension $-j(x_{p^*})\vec{I}_1^*$, ainsi que la force magnétomotrice F_2 , pour différentes valeurs de coefficient de charge comme sur la **Graphes I.14**. On détermine le courant d'excitation, dans laquelle $F_2 = I_2^*$.et on obtient le **Tableau I.11** qui exprime le courant d'excitation en fonction de coefficient de charge en unité relative : $I_2^* = f(I_1^*)$

$I_1^* [u.r]$	0	0.25	0.5	0.75	1	1.25
$I_2^* [u.r]$	1	1.32	1.7	2.13	2.6	3.08

Tableau I.11 : Caractéristiques de réglage de turboalternateur.



Grphe I.15 : La courbe de la caractéristique de réglage de turboalternateur en unité relative.

89. Longueur totale préliminaire de la section effective de conducteur de l'enroulement d'excitation

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$l_{B2} = 2(l_2 + l_{r2})[m] \quad (\text{I.137})$$

$-l_{r2}$: est la valeur moyenne de la longueur frontale d'une demi spire de l'enroulement d'excitation, qui est déterminée par la relation suivante :

$$l_{r2} = 2C_2 + b_2q_2 + C_2'(q_2 - 1) + k_\gamma D_{Bsr} - 0.86(R_B + \frac{b_2}{2})[m] \quad (\text{I.138})$$

Les valeurs des coefficients C_2 , C'_2 et R_B peuvent être déterminées du tableau ci-dessous en fonction de la valeur de diamètre extérieur du rotor D_2 .

$D_2 [m]$	C_2	C'_2	R_B	d
0.5	0.045	0.010	0.025	0.010
0.5 ÷ 0.7	0.05	0.012	0.030	0.015
0.7 ÷ 0.8	0.06	0.015	0.035	0.020
0.8 ÷ 0.9	0.08	0.020	0.035	0.025
0.9 ÷ 1.1	0.08	0.025	0.035	0.030
	0.10			

Tableau I.12 : détermination des dimensions de la partie frontale de l'enroulement d'excitation.

(Voir **figure I-16**)

D'après la valeur de $D_2 = 1.075 [m]$; on prend $C_2 = 0.1$, $C'_2 = 0.025$ et $R_B = 0.035$;

– D_{Bsr} : est la distance moyenne de la circonférence des conducteurs de la partie latérale (**voir figure I-16**) qui est donnée par la relation suivante :

$$D_{Bsr} = D_2 - 2h_{22} - h_{21} [m] \quad (I.139)$$

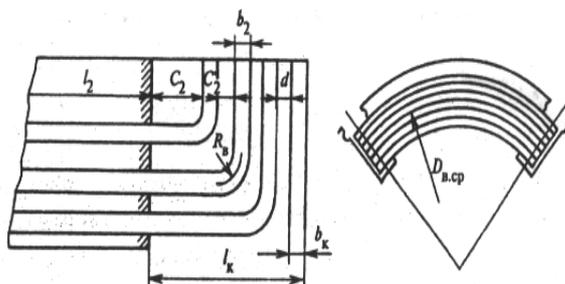


Figure I.16: détermination des dimensions de la partie frontale de l'enroulement d'excitation.

90. Section préliminaire de conducteur effectif de l'enroulement d'excitation

Elle est calculée par la relation suivante :

$$s'_2 = \rho_{M(120)} \frac{2.2 F_{2n} l_{B2}}{U_{2n}} [m^2] \quad (I.140)$$

Pour calculer la résistivité électrique de l'enroulement rotorique à la température de 120°C, il faut tenir compte du coefficient k_t , tel que :

$$k_t = \frac{235 + \theta}{235 + \theta_0} \quad (I.141)$$

– θ : La température pour laquelle on veut calculer la résistivité électrique.

– $\rho_{M(120)}$: La résistivité électrique de l'enroulement rotorique à la température de 120°C, qui est déterminée par la relation suivante :

$$\rho_{M(120)} = \rho_{M(15)} * k_t$$

– $\rho_{M(15)} = \frac{1}{55 * 10^6} [\Omega.m]$: Résistivité électrique de l'enroulement rotorique à la température ambiante de 15°C.

– U_{2n} : Tension nominale préliminaire de l'enroulement d'excitation prise du **Tableau I.13** en fonction de la puissance nominale P_n .

$P_n [MW]$	2.5 ÷ 6	12 ÷ 60	100 ÷ 200	300 ÷ 800	1200
$U_{2n} [V]$	75 ÷ 150	200 ÷ 250	250 ÷ 300(350)	400 ÷ 500	600

Tableau I.13 : Détermination de la tension préliminaire d'excitation de l'enroulement rotorique en fonction de la puissance nominale P_n .

On prend $U_{2n} = 300[V]$, qui correspond à une puissance nominale $P_n = 200[MW]$

Auparavant, nous avons choisi dans l'encoche rotorique des conducteurs **Tableau 1.4** avec une largeur $b_2 = 0.028[m]$, de ce même tableau on choisi la hauteur du conducteur élémentaire de telle sorte à avoir la section déterminée auparavant du conducteur élémentaire s_2' , selon les conducteurs du tableau 1.4 avec cette largeur on à des petites sections, donc on devrait prendre deux conducteurs élémentaires qui auront une somme de section proche de s_2' .

D'ou : $a_{2e} = 0.007[m]$ qui correspond à une section de ce conducteur élémentaire de $s_{2e} = 195.14 * 10^{-6} [m^2]$

On remarque que : $s_2' \approx 2s_{2e}$

Donc les dimensions principales du conducteur élémentaire sont :

$$b_2 = 0.028[m]$$

$$a_2 = 0.014[m]$$

91. Nombre de conducteurs élémentaires préliminaires en hauteur dans l'encoche du rotor

Il est donné par la relation suivante :

$$u_{p2}' = \frac{h_{21}}{a_2 + \delta_{nB}} \quad (\text{I.142})$$

$-\delta_{nB}$: L'épaisseur de l'isolation entre spires suivant la hauteur de l'encoche, elle est donnée par le **Tableau I.9**. $\delta_{nB} = 0.001[m]$

Le nombre de conducteurs effectifs u_{p2} en hauteur dans l'encoche rotorique doit être un nombre entier, et mieux vaut arrondir dans les sens décroissant. $u_{p2} = 7$

92. Calcule définitive de la hauteur de l'encoche rotorique

La hauteur définitive de l'encoche rotorique est donnée par la relation suivante :

$$h_{p2} = u_{p2} a_2 + (u_{p2} - 1) \delta_{nB} + \sum \delta_p + h_y + h_{kr} [m] \quad (\text{I.143})$$

Elément de l'encoche	Dimension en [m]
	Suivant la hauteur de l'encoche
Conducteur élémentaire.	7*0.014
Somme de l'isolation entre spire	6*0.001
Cale de fond d'encoche.	0.003
Cale au dessous de clavette.	0.01
Clavette.	0.033
Résultats	$h_{p2} = 0.15$

Tableau I.14 : différents éléments de l'encoche rotorique en hauteur.

93. Calcul définitive des dimensions de l'encoche du rotor

➤ **Hauteur de l'enroulement de l'encoche rotorique**

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$h_{21} = u_{p2} a_2 + (u_{p2} - 1) \delta_{nB} [m] \quad (I.144)$$

➤ **Hauteur (clavette +cale au dessous de clavette)**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$h_{22} = h_y + h_{kr} [m] \quad (I.145)$$

94. Nombre de spires de l'enroulement d'excitation par pôle

Il est calculé par la relation suivante :

$$W_2 = \frac{u_{p2} Z_2}{4p * a_2} \quad (I.146)$$

95. Courant nominal d'excitation

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{2n} = \frac{F_{2n}}{W_2} [A] \quad (I.147)$$

96. Courant nominal d'excitation à vide

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{20} = \frac{F_{20}}{W_2} [A] \quad (I.148)$$

97. Nombre de compartiments du rotor avec leur longueur identique :

Si les longueurs des sections sont identiques, alors le nombre d'éléments est préliminaire

$$n'_0 = l_2 (0.4 \div 0.6) \approx (11 \div 7) \quad (I.149)$$

Les machines du type [TB ϕ] ou [TBB] avec une puissance allant jusqu'à 320 MW, les compartiments extrêmes sont deux fois plus longue que la moyenne, donc le nombre de compartiments sans tenir compte des parties extrêmes est :

$$n_0 = n'_0 - 2$$

On prend : $n'_0 = 11$

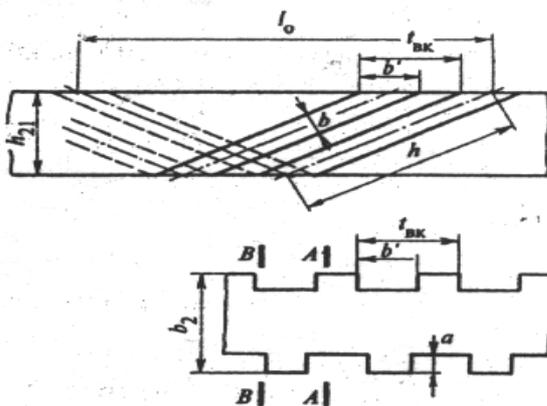


Figure I.18 : Parcours du gaz de refroidissement dans l'enroulement du rotor.

$$-l_0 = \frac{l_2}{n_0} [m] : \text{Longueur moyenne du compartiment.} \quad (I.150)$$

Pour les machines du type [TBφ] ou [TBB], la longueur moyenne de compartiment :

$$l_0 = 0.4 - 0.6[m]$$

$-l_{okp} = 2l_0[m]$: Longueur des compartiments extrêmes (pour des $P_n < 320[MW]$).

D'ailleurs, le nombre de compartiments de sorties est :

$$n_{oB} = n_{oe} + 1 \quad (I.151)$$

n_{oe} : Nombre de compartiments d'entrés.

98. La distance entre les centres des canaux de ventilations

Elle est donnée par la relation suivante :

$$t_{Bk} = \frac{l_0}{n_k}[m] \quad (I.152)$$

Le nombre de canaux de ventilations d'une seule côte de l'encoche n_k doit être, $n_k = (7 \div 8)$

99. La longueur de passage de l'air dans un conducteur

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$h = \sqrt{(0.5l_0)^2 + h_{21}^2}[m] \quad (I.153)$$

100. Largeur du canal de ventilation

Elle est donnée par la relation suivante :

$$b' = b \frac{h}{h_{21}}[m] \quad (I.154)$$

101. Section effective de conducteur en ligne A-A et Ligne B-B

➤ En ligne A-A

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_{M2A} = a_2(b_2 - a)[m^2] \quad (I.155)$$

➤ En ligne B-B

Se calcule par la relation suivante :

$$s_{M2B} = a_2(b_2 - 2a_2)[m^2] \quad (I.156)$$

102. Section équivalente de cuivre de conducteur élémentaire dans l'enroulement rotorique

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_{M2p} = s_2 k_p [m^2] \quad (I.157)$$

Telle que :

– k_p : est coefficient de réduction de la surface de conducteur effectif dans la partie d'encoche rotorique, qui est donnée par la relation suivante :

$$k_p = \frac{1}{\left(2 - \frac{2b'}{t_{Bk}}\right) \frac{s_2}{s_{M2A}} + \left(\frac{2b'}{t_{Bk}} - 1\right) \frac{s_2}{s_{M2B}}} \quad (I.158)$$

103. Section de cuivre de conducteur creux dans la partie frontale

Elle est donnée par la relation suivante :

$$s_{M2r} = s_2 - s_{k2} [m^2] \quad (I.159)$$

Telle que :

– s_{k2} : est la section de conducteur élémentaire creux (voir figure), qui est déterminée par la relation suivante :

$$s_{k2} = (b_k - 2R_k)2R_k + \pi R_k^2 [m^2] \quad (I.160)$$

Ou :

– b_k : est la largeur de conducteur creux. $b_k = (13 \div 14)[mm]$.

– R_k : est le rayon des extrémités du conducteur creux. $R_k = (3 \div 4.5)[mm]$.

Le rapport entre la section de conducteur creux dans la partie frontale et la section équivalente de cuivre de conducteur effectif dans la partie d'encoche doit vérifier :

$$\frac{s_{k2}}{s_{M2r}} = (0.2 \div 0.4)$$

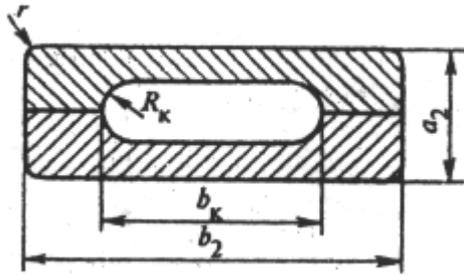


Figure I.19 : Coupe du conducteur rotorique.

104. Densité de courant dans la partie d'encoche de l'enroulement du rotor pour une excitation nominale

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\Delta_{2p} = \frac{I_{2n}}{S_{M2p}} [A/m^2] \quad (I.161)$$

105. Densité de courant dans la partie frontale de rotor pour une excitation nominale

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\Delta_{2r} = \frac{I_{2n}}{S_{M2r}} [A/m^2] \quad (I.162)$$

106. Résistance de l'enroulement d'excitation pour des températures de 15°C, 75°C et 120°C

Elle se calcule par la relation suivante :

$$r_{1(15)} = 4\rho_{M(15)} W_2 \left(\frac{l_2}{S_{M2p}} + \frac{l_{r2}}{S_{M2r}} \right) [\Omega] \quad (I.163)$$

107. Tension nominale de l'enroulement d'excitation

Elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{2n} = I_{2n} r_{2(130)} [V] \quad (I.164)$$

108. Tension nominale d'excitation

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$U_{2n} = U_{2n} + 2[V] \quad (\text{I.165})$$

109. Puissance nominale d'excitation

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_{2n} = U_{2n} I_{2n} [W] \quad (\text{I.166})$$

110. Réactance inductive longitudinale mutuelle de réaction d'induit en unité relative

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{ad^*} = \frac{k_a F_{1n}}{F_{\delta_0}} \quad (\text{I.167})$$

– F_{δ_0} : Force magnétomotrice d'induction dans l'entrefer à vide sous tension nominale. telle que, $F_{\delta_0} = F_{\delta}$ Pour $E_{10^*} = 1$ du **Tableau I.10** (annexe)

111. Réactance inductive transversale de réaction d'induit en unité relative

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{aq^*} = \frac{x_{ad^*}}{1 + (k_{\delta_2} - 1) \frac{2}{\gamma}} \quad (\text{I.168})$$

112. Réactance inductive synchrone longitudinale en unité relative

Elle est calculée par la relation suivante :

$$x_{d^*} = x_{ad^*} + x_{\sigma^*} \quad (\text{I.169})$$

113. Réactance inductive synchrone transversale en unité relative

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$x_{q^*} = x_{aq^*} + x_{\sigma^*} \quad (\text{I.170})$$

114. résistance inductive du champ de courant alternatif dans de l'enroulement ou des contours de quadrature d'absence sur l'unité de stator rotor

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{2f}^* = \sigma_{2f} x_{ad}^* \quad (\text{I.171})$$

115. Réactance inductive de dispersion de l'enroulement d'excitation

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$x_{\sigma 2}^* = x_{2f}^* - x_{ad}^* \quad (\text{I.172})$$

116. Réactance inductive synchrone longitudinale transitoire

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{d'}^* = x_{\sigma 1}^* + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}^*} + \frac{1}{x_{\sigma 2}^*}} \quad (\text{I.173})$$

Ou :

$$\sigma_{f2} = 1 + \frac{4\pi k_a F_{\delta\omega} l_2}{\phi_o Z_2} \lambda_{p2\varphi} 10^{-6} \quad (\text{I.174})$$

$-\sigma_{f2}$: Est un coefficient de dispersion qui prend en considération la réduction de $x_{d'}^*$ à l'enroulement statorique.

$$\lambda_{p2\varphi} = \frac{h_{21} + 3h_{22}}{3b_{p2}} \quad (\text{I.175})$$

$-\lambda_{p2\varphi}$: Est le coefficient de conductibilité magnétique de flux d'excitation.

117. Réactance inductive synchrone longitudinale élémentaire

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_{d''}^* = x_{\sigma 1}^* + 0.025 \quad (\text{I.176})$$

118. Réactance inductive synchrone transversale élémentaire

Elle est donnée par la relation suivante :

$$x_q'' \approx 1.5x_d'' \quad (\text{I.177})$$

119. Réactance inverse

Elle se calcul par la relation suivante :

$$x_{c2} = \sqrt{x_d'' x_q''} \quad x_{c2} \approx 1.225x_d'' \quad (\text{I.178})$$

120. Réactance homopolaire

Elle est donnée par la relation suivante :

On à $\frac{y}{\tau} > \frac{2}{3}$

$$x_{co} = 0.47 \left(\frac{W_1}{10} \right)^2 \frac{I_{1n\phi} l_1}{U_{1n\phi} Z_1 b_{p1}} \left[(3\beta - 2)h_4 + (9\beta - 5) \frac{h_{11}}{12} - (9\beta - 8) \frac{h_3}{12} \right] + 157x_{ad} \left(\beta - \frac{2}{3} \right) \frac{1}{k_a k_{01}^2} \left[\left(\frac{2}{Z_1} \right)^2 + 0.037 + 0.39 \left(\beta - \frac{2}{3} \right) - \left(\beta - \frac{2}{3} \right)^2 \right] \quad (\text{I.179})$$

$$h_3 = \delta_{sth} + \delta_{np} [m] \text{ Tirées du tableau I.5}$$

121. la constante de temps de l'enroulement d'excitation avec l'enroulement à circuit ouvert du stator tenant compte de l'action des courants de Foucault sur le feuilletage du rotor

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$T_{do} = \frac{2W_2^2 k_{02} \sigma_{2f} \phi_0}{0.75 r_{2(75)} F_{\delta o}} [s] \quad (\text{I.180})$$

122. Constante de temps transitoire du courant d'induit en court-circuit triphasé brusque du stator

Elle est calculée par la relation suivante :

$$T'_{d3} = T_{do} \frac{x_d'}{x_d''} [s] \quad (\text{I.181})$$

123. Constante de temps élémentaire du courant d'induit

Elle est donnée par la relation suivante :

$$T_{d3}'' \approx \frac{1}{8} T_{d3}' [s] \quad (\text{I.182})$$

124. Constante de temps d'excitation de la composante aperiodique du courant induit

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$T_{d3} = \frac{x_{s2}'}{wr_{1(75)}} [s] \quad (\text{II.183})$$

125. Rapport de court-circuit

Il est donné par la relation suivante :

$$r_{cc} = \frac{E'_{10}}{x_{d'}} \quad (\text{I.184})$$

Où :

$$E'_{10} = 1.1 \text{ Du Graphe I.14}$$

126. Courant établi en court-circuit 3~ pour une excitation nominale

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{kn} = r_{cc} F_{2n} \quad (\text{I.185})$$

127. Composante inverse élémentaire du courant de court-circuit triphasé de l'induit

Elle est déterminée par la relation suivante :

Pour $F_{2^*} = F_{20^*} = 1$

$$I_{k(1)^*} = \frac{\sqrt{3} E'_{10^*}}{x_{d^*} + x_{s2^*}} \quad (\text{I.186})$$

Pour $F_{2^*} = F_{20^*} = 2.6$

$$I_{k(1)n^*} = I_{k(1)^*} F_{2n^*}$$

128. Composante homopolaire élémentaire du courant de court-circuit monophasé de l'induit

Elle est calculée par la relation suivante :

$$I_{k(1)^*} = \frac{3E'_{10^*}}{x_{d^*} + x_{s2^*} + x_{so^*}} \quad (\text{I.187})$$

Pour $F_{2^*} = F_{20^*} = 1$

$$I_{k(1)n^*} = I_{k(1)^*} F_{2n^*} \quad (\text{II.188})$$

129. courant du choc

Il est donné par la relation suivante :

$$i_{yr} = 1.8 \frac{1.05}{x_{d^*}} \quad (\text{II.189})$$

-1.05 : représente l'accroissement de la tension nominale, quand on passe du régime à vide au régime de court-circuit.

130. Capacité de surcharge statique de la machine

Elle est donnée par la relation suivante :

$$W_p = r_{cc} \frac{F_{2n^*}}{\cos(\phi_n)} \quad (\text{I.190})$$

LA MASSE DES MATERIAUX UTILISER

Les masses du dos des dents, d'enroulements du stator et du rotor sont nécessaires au calcul des pertes.

131. Masse du cuivre de l'enroulement statorique

Elle est donnée par la relation suivante :

$$m_{M1} = 3\gamma_M a_1 W_1 l_{B1} s_1 [kg] \quad (\text{I.191})$$

Avec :

$-\gamma_M$: est la masse volumique de cuivre. $\gamma_M = 8900 [kg / m^3]$

132.Masse du cuivre de l'enroulement rotorique

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$m_{M2} = 4\gamma_M W_2 (l_2 s_{M2p} + l_{r2} s_{M2r}) [kg] \quad (I.192)$$

133.Masse totale des enroulements du rotor et du stator

Elle est donnée par la relation suivante :

$$m_M = m_{M1} + m_{M2} [kg] \quad (I.193)$$

134.Masse du dos de stator

Elle est calculée par la relation suivante :

$$m_{a1} = \frac{\pi}{4} \gamma_a l_s k_c [\pi(D_1 + h_{p1}) - Z_1 b_{p1}] [kg] \quad (I.194)$$

Avec :

– γ_a : Est la masse volumique de l'acier des tôles magnétiques du stator. $\gamma_a = 7600 [kg / m^3]$

135.Masse de fer des dents du stator

Elle est calculée par la relation suivante :

$$m_{z1} = \gamma_a h_{p1} l_s k_c [\pi(D_1 + h_{p1}) - Z_1 b_{p1}] [kg] \quad (I.195)$$

136.Masse totale de l'acier du stator

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$m_s = m_{a1} + m_{z1} [kg] \quad (I.196)$$

137.Dépense des matériaux actifs

Pour le cuivre, elle est donnée par la relation suivante :

$$g_M = \frac{m_M}{s_n} [kg / MVA] \quad (I.197)$$

Et pour les tôles électrotechniques, elle se calcule par la relation suivante :

$$g_s = \frac{m_s}{s_n} [kg / MVA] \quad (I.198)$$

I.6. CALCUL DU PERTES DE PUISSANCES

Pour toutes machines électriques, une fraction de l'énergie reçue sera dissipée dans la machine sous forme de pertes d'énergies thermiques, qui seront appelées pertes.

Toutes les pertes qui se produisent dans une machine synchrone peuvent être divisées en pertes principales et pertes supplémentaires. Les pertes principales sont celles qui sont dues aux principaux phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui se manifestent lors du fonctionnement de la machine, par contre les pertes supplémentaires sont celles qui sont dues aux phénomènes électromagnétiques secondaires.

I.6.1. Pertes électriques

138. Pertes de puissances électriques principales dans l'enroulement statorique à une température de 75°C

Elle est donnée par la relation suivante :

$$p_{eo} = 3I_{ln\phi}^2 r_{1(75)} [W] \quad (I.199)$$

139. Pertes de puissances électriques supplémentaires dans l'enroulement d'induit

Elle est calculée par la relation suivante :

$$p_{es} = (k_{\phi k} - 1) p_{eo} [W] \quad (I.200)$$

Avec :

$-k_{\phi k}$: Est le coefficient moyen de refoulement de courant dans la barre statorique. Il est donné par la relation suivante :

$$k_{\phi k} = \frac{m_{erp} S_e}{S_{rp}} k_{\phi}' + \frac{S_{ep}}{S_{rp}} k_{\phi p}' \quad (I.201)$$

Telle que :

$-k_{\phi}'$ et $k_{\phi p}'$: Qui représentent respectivement, le coefficient de refoulement de courant et le coefficient de refoulement de courant pour une réalisation des barres seulement pleines ou creuses, peuvent être calculé de la manière suivante :

$$k_{\phi}' = 1 + 10.7 \left(\frac{b_{M1} m_e'}{b_{p1}} \right)^2 a_e^4 10^6 \quad (I.202)$$

– m'_e : est le nombre de conducteurs élémentaires pleins qui il faut arrondir et prendre un nombre pair, sa valeur est déterminée par la relation suivante :

$$m'_e = m_{erp} \frac{h_{M1}}{a_e} \quad (\text{I.203})$$

– h_{M1} : est la hauteur de tous les groupes en hauteur de l'encoche statorique, qui est donnée comme suite :

$$h_{M1} = h_{mrp} n_{rp} [m] \quad (\text{I.204})$$

– h_{mrp} : est la hauteur d'un seul groupe en hauteur de l'encoche statorique, qui est déterminée comme suit :

$$h_{mrp} = a_{ep} + m_{erp} a_e [m] \quad (\text{I.205}) \quad k'_{\phi} = 1 + 10.7 \left(\frac{b_{Mp1} m'_{ep}}{b_{p1}} \right)^2 a_{ep}^4 \left(1 - \frac{a_k^3 b_k}{a_{ep}^3 b_{ep}} \right) \left(1 - \frac{a_k b_k}{a_{ep} b_{ep}} \right) 10^6$$

(I.206)

– m'_{ep} : est le nombre de conducteurs élémentaires creux qui il faut arrondir et prendre un nombre pair, sa valeur est déterminée par la relation suivante :

$$m'_{ep} = m_{erp} \frac{h_{M1}}{a_{ep}} \quad (\text{I.207})$$

140. Pertes de puissances supplémentaires dans les dents P_{zv} et dans le dos P_{av} dues aux harmoniques supérieures des f.m.m déterminées dans l'enroulement d'excitation en court-circuit

Elles sont données par les relations suivantes :

$$P_{zv} = (1.3 \varphi_1 p_{r1/50} + 1.5 \varphi_2 p_{B1/50}) \left(\frac{B_{z13}}{r_{cc}} \right)^2 m_{z1} [W] \quad (\text{I.208})$$

$$P_{av} = 1.7 k' (1.2 \varphi_1 p_{r1/50} + 1.7 \varphi_2 p_{B1/50}) \left(\frac{B_{a1}}{r_{cc}} \right)^2 m_{a1} [W] \quad (\text{I.209})$$

– k' : Pour l'acier laminé à froid, on a, $k' = 1.1$

– $p_{r1/50}$ et $p_{B1/50}$: pertes spécifiques de l'acier par hystérésis et par courants de Foucault respectivement, pour une induction magnétique de 1 tesla, et de fréquence de 50 Hz, qui sont

déterminées du **Tableau 10.1**, suivant le type d'acier utilisé. Dans notre cas c'est l'acier de type 3413.

Type d'acier	$p_{r1/50} [W/kg]$	$p_{B1/50} [W/kg]$
1512	0.94	0.44
1513	0.72	0.46
3413	0.23	0.62

Tableau 10.1 : Pertes spécifiques par hystérésis $p_{r1/50}$ et par courant de Foucault $p_{B1/50}$.

Les valeurs des facteurs de corrections φ_1 et φ_2 sont déterminées du **Tableau 10.2**, suivant la valeur du rapport γ .

γ	φ_1	φ_2	γ	φ_1	φ_2
0.65	0.01415	0.209	0.74	0.0125	0.122
0.667	0.0127	0.19	0.75	0.0131	0.122
0.68	0.0119	0.175	0.76	0.01368	0.108
0.69	0.0117	0.168	0.77	0.0147	0.103
0.7	0.01148	0.156	0.78	0.015	0.195
0.71	0.01133	0.148	0.79	---	0.089
0.72	0.0117	0.139	0.8	---	0.082
0.73	0.012	0.132	0.81	---	0.076

Tableau 10.2 : coefficients correcteurs d'hystérésis φ_1 , et courants de Foucault φ_2 .

141. Pertes supplémentaires de puissances dans les dents du stator dues aux harmoniques des dentures des f.m.m déterminées dans l'enroulement d'excitation en court-circuit

Elles sont déterminées par les relations suivantes :

$$P'_{zv} = \frac{0.5}{\sqrt{(Z_2')^5}} \left(\frac{F_{2k}}{\delta \cdot k_\delta} \right)^2 D_1^3 l_s k_{rv}^2 10^{-4} [W] \quad (I.210)$$

– F_{2k} est la force magnétomotrice d'enroulement d'excitation avec le court-circuit triphasé et le courant de l'induit, qui est calculé par la formule suivante :

$$F_{2k} = k_a F_a + x_{\sigma 1'} F_{\delta 0} [A] \quad (I.211)$$

$-k_v$: Le coefficient, qui envisage d'atténuer les plus hautes harmoniques du champ magnétique de l'entrefer, qui est déterminé du **Tableau 10.3**

$\frac{2\pi k_\delta \delta}{t_1}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	1	0.995	0.989	0.97	0.95	0.932	0.88	0.852	0.81	0.766
1	0.724	0.679	0.624	0.587	0.541				0.364	0.337
2	0.304	0.273	0.243	0.217	0.193					0.103
3	0.0895	0.0785	0.0682	0.0595	0.0516					0.025
4	0.0215	0.0168	0.0159	0.0135	0.0117					0.00533
5	0.00455	0.00387	0.00328	0.0028	0.00239					0.00104
6	0.000881	0.000746	0.00063	0.000534	0.000454					0.000193

Tableau 10.3 : Valeur de coefficient k_v^2 pour calculer les pertes tenant compte de réduction des harmoniques avant le dégagement.

Ces pertes seront négligeables si : $\frac{\delta.k_\delta}{t_1} > 0.7$

De même que les pertes précédentes et les pertes supplémentaires de puissances dans les dents du stator causées par les dents du rotor en court-circuit, elles sont soumises à la même condition, et elles sont déterminées par la relation suivante :

$$P_{zvk} = \varphi_3 \left(\frac{F_{2k}}{\delta.k_\delta 10^6} \right)^2 (p_{r1/50} + p_{B1/50}) m_{z1} k_v^2 [W] \quad (I.212)$$

$-\varphi_3$: Coefficient qui est déterminé par la relation suivant :

$$\varphi_3 = 0.435 \left[\frac{t_2}{b_{z13}} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi b_{z13}}{t_2} \right) \right) \right]^2 \quad (I.213)$$

142. Pertes de puissances supplémentaires sur la surface du rotor causées par les harmoniques supérieures des f.m.m, déterminées du stator en court-circuit

Elles sont déterminées par les relations suivantes :

$$P_{2vk} = \varphi_4 \left(\frac{A}{\delta.k_\delta 10^6} \right)^2 D_1^5 l_2 10^3 [W] \quad (I.214)$$

– φ_4 : Coefficient de pertes de puissances sur la surface continue du rotor causé par les harmoniques supérieures de l'enroulement du stator, sa Valeur est déterminée du **Tableau 10.4**, suivant la valeur du rapport de raccourcissement β :

β	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	2.8	3.2	3.8	4.4	5.2	6.2	7.2	8.6	9.8	11.1
0.5	12.2	13.2	15.1	16.3	17.2	18.6	19.6	20.1	20.3	20.4
0.6	21.5	21.6	21.3	21.2	20.9	20.5	19.8	17.7	16.8	14.9
0.7	13.4	11.8	10.2	8.6	7.2	5.7	4.4	3.1	2.1	1.6
0.8	1.4	1.4	1.6	2.1	2.8	4.0	5.2	6.4	7.8	9.4
0.9	11.8	14.1	16.5	18.2	20.4	22.2	23.3	24.0	24.5	24.8
1.0	25.0									

Tableau 10.4 : dépendance de coefficient de perte φ_4 sur la surface continue du rotor pour l'harmonique supérieure des f.m.m déterminée du stator, en fonction de la valeur du rapport β .

143. Pertes de puissances supplémentaires sur la surface du rotor causée par les harmoniques de dentures, déterminées de l'enroulement du stator en court-circuit

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{2zk} = \varphi_5 \left(\frac{A}{10^4} \right) \frac{D_1^3 l_2}{\sqrt{Z_1}} 10^3 [W] \quad (I.215)$$

– φ_5 : Coefficient de pertes de puissances sur la surface continue du rotor et les dents causées par les harmoniques de l'enroulement du stator en court-circuit, sa valeur est déterminée du **Tableau 10.5**, selon le rapport de raccourcissement β .

$\frac{\delta k_\delta}{t_1}$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0		13330	3310	1460	213	514	352	254	192	148
0.1	117	94	76.7	63.5	52.7	44.3	37.5	32.0	27.3	23.4
0.2	20.15	17.37	15.05	13.05	11.4	9.92	8.66	7.56	6.72	5.77
0.3	5.17	4.45	3.91	3.44	3.16	2.65	2.34	2.05	1.81	1.6
0.4	1.39	1.23	1.08	0.955	0.84	0.74	0.656	0.578	0.57	0.457
0.5	0.394	0.347	0.307	0.27	0.239	0.21	0.185	0.163	0.144	0.1265
0.6	0.112	0.0987	0.0872	0.0767	0.0683	0.0598	0.0525	0.0462	0.0409	0.0362
0.7	0.032	0.0263	0.0247	0.0221	0.0194	0.0173	0.0152	0.0131	0.0115	0.0105
0.8	0.00257	0.00798	0.00704	0.0062	0.00546	0.00463	0.00426	0.00378	0.0033	0.00294
0.9		0.00231	0.002	0.00179	0.00158	0.00136	0.00121	0.00105	0.0009	0.0008

Tableau 10.5 : dépendance de coefficient de pertes φ_5 au delà de la surface continue du rotor, pour les harmoniques supérieures du stator.

Pour les turboalternateurs avec de grand entrefer avec $\frac{\delta k_\delta}{t_1} > 1$, et en raison de l'atténuation forte des harmoniques supérieures, elles sont petites et il est possible de ne pas les considérées.

144. Pertes de puissances dans les parties extrêmes de turboalternateur en court-circuit

Le champ de dispersion des parties frontales de l'enroulement statorique créé des pertes supplémentaires dans les deux extrémités de la partie active du stator.

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{ik} \approx 50A^2 D_1^2 10^{-7} [W] \quad (I.216)$$

145. Pertes totales des puissances en court-circuit et courant nominal du stator

Elles sont déterminées par la relation suivante :

$$P_{kn} = P_{eo} + P_{er} + P_{zv} + P_{avk} + P'_{zv} + P_{zvk} + P_{2vk} + P_{2zk} + P_{Tk} [W] \quad (I.217)$$

146. Les pertes de puissances dans l'acier du dos et des dents statorique

➤ les pertes de puissances dans l'acier du dos statorique

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{sa} = k_{sa} k'_{p_{1/50}} (B'_{a1})^2 m_{a1} [W] \quad (I.218)$$

– k_{sa} : Est le coefficient total de majoration des pertes en tenant compte de l'imperfection de la technologie, il est pris pour le dos du stator $k_{sa} = 1.3$

– $p_{1/50}$: Sont les pertes spécifiques dues aux pertes par courant de déterminé et les pertes par hystérésis dans les armatures magnétiques, qui sont ramenées aux kilogrammes de tôles d'acier à la fréquence de 50Hz pour une induction de 1[T], ces pertes sont déterminées du **Tableau 10.6** suivant le type d'acier utilisé.

Pertes spécifiques	1512	1513	Acier 3413	
			En longueur de l'acier	A travers l'acier
$p_{1/50} [kg / W]$	1.39	1.25	0.8	1.45 ÷ 1.5

Tableau 10.6 : Pertes spécifiques dans le fer à $\beta = 1[T]$, et $f = 50[Hz]$

➤ **les pertes de puissances dans l'acier des dents statorique**

Elles sont calculées par la relation suivante :

$$P_{z1} = k_{z1} k' p_{1/50} B_{z13}^2 m_{z1} [W] \quad (I.219)$$

– k_{z1} : Est le coefficient total de majoration des pertes en tenant compte de l'imperfection de la technologie, il est pris pour les dents du stator $k_{z1} = 1.5$

147.principales pertes de puissances dans l'acier en marche à vide

Les pertes de puissances supplémentaires dans l'acier pour la marche à vide sont déterminées pour l'harmonique supérieure du champ magnétique du rotor, jusqu'à les pulsations du champ magnétique, en raison des encoches du circuit magnétique du stator et du rotor, jusqu'à au flux de fuite dans les extrémités des pièces du turboalternateur. Elles sont calculées par la relation suivante :

$$P_{so} = P_{sa} + P_{z1} [W] \quad (I.220)$$

148. Pertes de puissances supplémentaires dans le circuit magnétique du stator pour l'harmonique supérieure des f.m.m, déterminées de l'enroulement d'excitation en marche à vide :

Ces pertes de puissances supplémentaires dans le circuit magnétique statorique, sont données par la relation suivante :

$$P_{1vo} = r_{cc}^2 (P_{zv} + P_{av}) [W] \quad (I.221)$$

149. Pertes de puissance supplémentaires dans le circuit magnétique du stator et dentures pour l'harmonique déterminé de l'enroulement d'excitation en marche à vide

Ces pertes de puissance supplémentaires dans le circuit magnétiques du stator, elles sont déterminées par la relation suivante :

$$P'_{zvo} = r_{cc}^2 P_{zv} [W] \quad (I.222)$$

150. Pertes de puissances supplémentaires par pulsation dans les dents du stator causées par les dentures du rotor en marche à vide

Pertes de puissances supplémentaires par pulsation dans les dents du stator, elles sont données par la relation suivante :

$$P_{zvo} = p_{1/50} \gamma \left[\frac{0.5 \left(\frac{b_{p2}}{\delta} \right)^2}{t_1 \left(5 + \frac{p^2}{\delta} \right)} B_{z13} \right] (Z_2')^2 m_{z1} + r_{cc}^2 P_{zv} [W] \quad (I.223)$$

151. Pertes de puissances supplémentaires sur la surface du rotor causées par les dentures du stator en marche à vide

Pertes de puissances supplémentaires sur la surface du rotor en marche à vide, elles sont calculées par la relation suivante :

$$P_{2zo} = \frac{5}{\sqrt{Z_1}} (B_{\delta} k_{\delta} \beta_s)^2 D_1^3 l_1 10^7 [W] \quad (I.224)$$

Ou :

$$\beta_s = \frac{1 + u^2 - 2u}{2(1 + u^2)} \quad (I.225)$$

$$u = \frac{b_{p1}}{2\delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_{p1}}{2\delta}\right)^2} \quad (\text{I.226})$$

Pour, $\frac{b_{p1}}{\delta} \geq 1$ le coefficient β_s est déterminé par la formule suivante :

$$\beta_s \approx (k_{\delta 1} - 1) \quad (\text{I.227})$$

152. Pertes de puissances supplémentaires sur les parties extrêmes en marche à vide

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{To} = r_{cc}^2 P_{Tk} [W] \quad (\text{I.228})$$

153. Somme des pertes de puissances en marche à vide

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_s = P_{so} + P_{1vo} + P'_{zvo} + P_{zzo} + P_{2zo} + P_{To} [W] \quad (\text{I.229})$$

I.6.2. PERTES DE PUISSANCE PAR EXCITATION.

154. Pertes de puissances dans l'enroulement d'excitation en charge nominale à une température de 75°C

Elles sont déterminées par la relation suivante :

$$P_{2n(75)} = \frac{I_{2n}^2 r_{2(75)} + \Delta U_{\omega} I_{2n}}{\eta_B} \quad (\text{I.230})$$

– ΔU_{ω} : La chute de tension en contact avec les balais, $\Delta U_{\omega} = 2[V]$

– η_B : Rendement des conducteurs, connecté directement en bas de l'axe du turboalternateur,

$$\eta_B = (0.85 \div 0.95)$$

I.6.3. PERTES DE PUISSANCE MECANIQUE.

Elles sont le résultat des pertes par frottements dans les paliers du rotor, les pertes par frottement du rotor lors de sa rotation dans l'hydrogène, et les pertes par ventilations.

155. Pertes de puissances par frottements dans les paliers

Elles croissent avec l'augmentation de la vitesse de rotation du rotor. Elles peuvent être calculées par la formule suivante :

$$p_p = 8.06 * 10^3 . d_u^2 \sqrt{\frac{m_p l_u}{2d_u}} [W] \quad (I.231)$$

– m_p : est la masse du rotor qui peut être exprimée par la relation suivante :

$$m_p = (1.3 \div 1.5) \frac{\pi}{4} D_2^2 l_2 7850 [kg] \quad (I.232)$$

– d_μ Et l_μ sont respectivement le diamètre et la longueur de l'axe de la clavette, qui est déterminée comme suite : $l_\mu \approx (1 \div 1.2) d_\mu [m]$

On à :

$$d_\mu l_\mu = \frac{10m_p}{2p_\mu} [m] \quad (I.233)$$

Ou :

– p_μ : Est la pression des paliers sur l'axe du rotor, considérée généralement

$$p_\mu = (1.2 \div 1.6) 10^6 [Pa];$$

– On choisi $l_\mu = 1.2 d_\mu [m]$; $p_\mu = 1.2 * 10^6 [Pa]$, et on les remplace dans la formule précédente, nous obtiendrons le diamètre de la surface d'appuis des paliers comme suite :

$$d_\mu = \sqrt{\frac{10m_p}{1.2 * 1.2 * 2 * 10^6}} [m] \quad (I.234)$$

156. Pertes de puissances du rotor lors de sa rotation dans l'hydrogène

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{pH} = P_p p_H 10^{-6} [W] \quad (I.235)$$

Telle que :

$$P_p = 57.3 * 10^3 D_2^4 l_2 \quad (\text{I.236})$$

– P_p : Pertes de puissance par frottements de la partie lisse du rotor due à l'air.

– p_H : Pour une amélioration des propriétés de refroidissements, la pression de l'hydrogène varie de $p_H = (4 \div 5)10^5 [Pa]$

157. Pertes de puissances par frottement des deux bagues de frettages dues au gaz

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{\sigma k H} = P_{\sigma k} p_H 10^{-6} [W] \quad (\text{I.237})$$

Ou :

$$P_{\sigma k} = 57.3 * 10^3 D_{\sigma k}^4 l_{\sigma k} \quad (\text{I.238})$$

Avec :

$$D_{\sigma k} = C_1 D_2 [m] \quad (\text{I.239})$$

$$l_{\sigma k} = C_2 D_2 [m] \quad (\text{I.240})$$

– C_1 et C_2 : deux coefficients qui sont déterminés du **Tableau 10.7** en fonction du diamètre extérieur du rotor D_2 :

$D_2 [m]$	$D_2 \leq 0.95$	$0.95 < D_2 \leq 1.1$	$1.1 < D_2 \leq 1.2$	$D_2 > 1.2$
C_1	1.035 ÷ 1.04	1.06 ÷ 1.07	1.085 ÷ 1.09	1.0 ÷ 1.1
C_2	0.66 ÷ 0.7			

Tableau 10.7 : Coefficient C_1 et C_2 en fonction du diamètre D_2 .

158. Pertes de puissances des surfaces extrêmes

Elles sont déterminées par la relation suivante :

$$P_{pn\phi H} = P_{pn\phi} p_H 10^{-6} [W] \quad (\text{I.241})$$

Telle que :

$$P_{pn\phi} = 2.7 n_{pn\phi} [D_2^5 - (D_2 - 2h_{pn\phi})^5] \quad (\text{I.242})$$

– $n_{pn\phi} \approx \frac{l_2}{t_{pn\phi}}$: nombre de canulars sur le rotor.

Avec :

$$t_{pn\phi} = t_p$$

– $h_{pn\phi}$: profondeur de canulars, $h_{pn\phi} = (0.005 \div 0.008)[m]$

159. Pertes de puissances dans les balais en contact avec les bagues

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{pw} = 98.1 \mu_T p_w s_w \pi D_k [W] \quad (I.243)$$

Telle que :

– μ_T : Coefficient de frottement avec la glissade des balais à travers la bague, qui prend des valeurs : $\mu_T = (0.1 \div 0.25)$

– p_w : Pression des bagues sur les balais, et qui est donnée comme suite :

$$p_w = (0.2 \div 0.25) 10^5 [Pa]$$

– $s_w = \frac{I_{2n}}{\Delta_w}$: Toute la surface de tous les balais d'une polarité

– Δ_w : Densité de courant moyenne sous les balais, telle que, $\Delta_w (7 \div 10) 10^4 [A/m^2]$

– D_k : Le diamètre extérieur de la bague collectrice, qui est donnée pour un turboalternateur à refroidissement direct des enroulements. $D_k \approx 0.46[m]$.

I.6.4. PERTES DE PUISSANCES PAR VENTILATIONS

Pour détermination les pertes de puissances par ventilations, il faut que l'on sache l'écoulement du gaz de refroidissement et hydraulique du système.

160. Pertes par ventilations

Elles sont calculées par la relation suivante :

$$P' = P_s + (P_{kH} - P_{eo} - P_{er}) + P_{2n} + P_{pH} + P_{\sigma kH} + P_{pn\phi H} [W] \quad (I.244)$$

161. Consommation de gaz d'hydrogène

Elle est donnée par la relation suivante :

$$v_r = \frac{P'}{11(\Theta_r - \Theta_r') p_H 10^{-3}} [m^3 / s] \quad (I.245)$$

$$\Theta_r = (25 \div 30)^\circ C$$

$$\Theta_r' = (2 \div 7) p_H 10^{-6}^\circ C$$

162. Les pertes par ventilations

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{BeHT} = \frac{v_r H_r}{\eta_{BeHT}} \quad (I.246)$$

$H_r = (5 \div 7) p_H 10^{-3} [Pa]$: La pression qui est égale à la résistance hydraulique du système de refroidissement avec l'hydrogène.

$\eta_{BeHT} = 0.5$: Rendement des ventilateurs axiaux.

163. Consommation de l'eau pour refroidissement de l'enroulement du stator

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$v_B = \frac{P_e' 10^{-6}}{4.14 \Theta_B} [m^3 / s] \quad (I.247)$$

$$P_e' = P_{eo} + P_{er} [W] \quad (I.248)$$

$\Theta_B = (25 \div 35)^\circ C$: Préchauffage de l'eau pour l'enroulement statorique.

164. pertes de puissance par refroidissement à l'eau du l'enroulement du stator

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_B = \frac{v_B H_B}{\eta_{Has}} [W] \quad (I.249)$$

$-H_B$: pression de la pompe qui est égal à la résistance hydraulique du système de refroidissement du stator, avec $H_B = (0.15 \div 0.3).10^6 [Pa]$

$-\eta_{Hac}$: rendement de la pompe. $\eta_{Hac} = 0.7 \div 0.8$

165. Somme de pertes de puissances mécaniques

La somme des pertes de puissance mécaniques y compris les pertes par ventilation et les pertes par refroidissement à l'eau, sont données par la relation suivante :

$$P_{Mex} = P_p + P_{pH} + P_{ckH} + P_{pn\phi H} + P_{T\omega} + P_{BeHT} + P_B [W] \quad (I.250)$$

166. Pertes totales dans l'alternateur en régime nominal

Elles sont calculées par la relation suivante :

$$P_{\Sigma n} = P_{kn} + P_s + P_{2n} + P_{Mex} [W] \quad (I.251)$$

167. Détermination du rendement nominal en charge de l'alternateur

Il est donné par la relation suivante :

$$\eta_n = \left(1 - \frac{P_{\Sigma n}}{P_n + P_{\Sigma n}}\right) 100 [\%] \quad (I.252)$$

Pour différentes valeurs de coefficient de charge $P = (0.25; 0.5; 0.75; 1.0; 1.25)p_n$ on calcule le rendement de la machine (voir **Tableau 10.7**).

168. Les pertes constantes indépendantes de la charge

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_o = P_s + P_{Mex} [W] \quad (I.253)$$

169. Les pertes en court-circuit :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_k = P_{kn} \left(\frac{I_1}{I_{1n}}\right)^2 \quad (I.254)$$

Ou :

$$\frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{P}{P_n} = 0.25; 0.5; 0.75; 1.0; 1.25.$$

170. Les pertes par excitation :

Elles sont calculées par la relation suivante :

$$P_2 = P_{2n} \left(\frac{I_2}{I_{2n}}\right)^2 [W] \quad (I.255)$$

171. Calcul du rendement pour n'importe quelles charges :

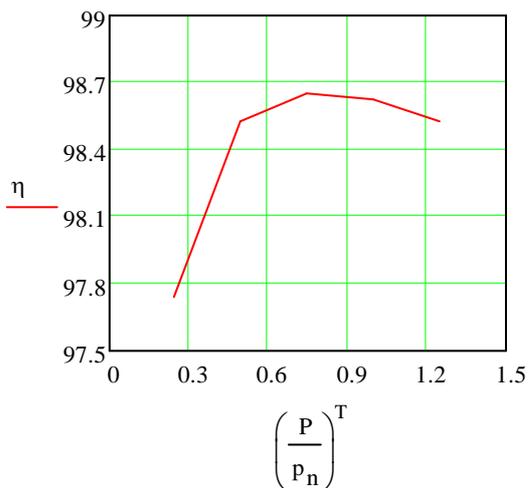
Il est donné par la relation suivante :

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{P + P_{\Sigma}}\right) 100\% \quad (I.256)$$

Les résultats de calcul du rendement pour les différentes valeurs de la charge sont donnés dans le **Tableau 10.7** :

puissance et les composants des pertes	$\frac{P}{P_n}$				
	0.25	0.5	0.75	1	1.25
$P[W]$	$50 \cdot 10^6$	$100 \cdot 10^6$	$150 \cdot 10^6$	$200 \cdot 10^6$	$250 \cdot 10^6$
$P_0[W]$	862019	862019	862019	862019	862019
$P_k[W]$	66020	264081	594182	1056323	1650505
$P_2[W]$	229711	380626	596537	890354	1246495
$P_{\Sigma}[W]$	$1,1578 \cdot 10^6$	$1,5067 \cdot 10^6$	$2,0527 \cdot 10^6$	$2,8087 \cdot 10^6$	$3,759 \cdot 10^6$
$P + P_{\Sigma}[W]$	$51,1578 \cdot 10^6$	$101,5067 \cdot 10^6$	$152,0527 \cdot 10^6$	$202,8087 \cdot 10^6$	$253,759 \cdot 10^6$
$\eta[\%]$	97.74	98.52	98.65	98.62	98.52

Tableau 10.7 : Rendement en fonction de la charge.



Courbe 10.7 : Rendement en fonction de la charge.

Conclusion Générale

A la fin de ce travail, nous pouvons dire que nous sommes parvenus à des résultats assez satisfaisants dès lors que ceux-ci sont compris dans les marges.

Il convient de noter que la construction de machines électriques est un domaine très vaste et souvent confidentiel. Cette situation explique le manque flagrant et quasi inexistant de documents et brochures tant dans les bibliothèques que sur le marché traitant particulièrement sur les turboalternateurs.

Pour répondre au travail qui nous a été confié, un programme de calcul a été élaboré sur un logiciel (MATHCAD 13), englobant toutes les étapes nécessaires et indispensables à la réalisation d'un turboalternateur de moyenne puissance

Ce qui nous n'a pas pour autant découragé pour mener à terme ce modeste travail tout en souhaitant que d'autres promotions en tireront un large profit et puisse permettre de faire l'objet de multiples améliorations.

PARTIE III

Calcul d'un turboalternateur

Cahier de charge :

Puissance active nominale : $p_n := 200 \cdot 10^6$ W

Tension nominale : $U_{In} := 15750$ V

Fréquence de réseaux : $f_n := 50$ Hz

Facteur de puissance : $\cos(\Psi_n) := 0.85$ rad $\arccos(0.85) = 0.555$ $\Psi_n := 0.555$

Nombre de phases : $m_1 := 3$

Vitesse de rotation : $N_n := 3000$ tr/min $n := 314.159$ rad/s

Nombre de pôles : $p := 1$

1. Puissance apparente nominale S_n :

$$S_n := \frac{P_n}{\cos(\Psi_n)} \qquad S_n = 2.35 \times 10^8 \text{ VA}$$

2. Nombre de paires de poles p :

$$p := \frac{f_n \cdot 60}{N_n} \qquad p = 1$$

3. L'entrefer :

$K'_{no} :=$

$$K_{no} := \frac{K'_{no}}{100}$$

Rapport de court-circuit r_{cc} :

K_{no} : Coefficient de saturation.

$$K_{no} = 1.06$$

x_d : Reactance synchrone longitudinale.

$$x_d := 2$$

r_{cc} : Rapport de court-circuit.

$$r_{cc} := \frac{K_{no}}{x_d}$$

$$r_{cc} = 0.53$$

Plage de variation de A'_1 :

$A'_1 :=$	140000
-----------	--------

$$A'_1 = 1.4 \times 10^5$$

Plage de variation de B_δ :

$B'_\delta :=$	85
----------------	----

$$B_\delta := \frac{B'_\delta}{100}$$

4. Charge linéaire et induction magnétique préliminaires A'_1 et B_δ :

A'_1 : Charge linéaire préliminaire des courants statoriques. $A'_1 = 1.4 \times 10^5$ A/m

B_δ : Induction dans l'entrefer.

$$B_\delta = 0.85 \text{ T}$$

5. Détermination du diamètre intérieur du stator D_{1n} :

$$D_{1n} := 1.21 \text{ m}$$

6. L'épaisseur de l'entrefer δ :

$$\delta_{mm} := \text{round} \left(6.95 r_{cc} \cdot \frac{A'_1 \cdot D_{1n}^{1.5}}{B_\delta} \cdot 10^{-7}, 2 \right)$$

$$\delta = 0.08 \text{ m}$$

7. Diamètre préliminaire extérieur du rotor D_{2n} :

k_{01} : Coefficient d'enroulement.

$$k_{01} := 0.92$$

$$D_{2n} := D_{1n} - 2 \cdot \delta$$

$$D_{2n} = 1.05 \text{ m}$$

D

8. Diamètre définitif extérieur du rotor D_2 :

D'après le tableau des valeurs normalisées :

$$D_2 = 1.075 \text{ m}$$

9. Diamètre définitif intérieur du stator D_1 :

$$D_1 := D_2 + 2 \cdot \delta$$

$$D_1 = 1.235 \text{ m}$$

10. Longueur active préliminaire du stator l_{1p} :

$$l_{1p} := \frac{0.9 S_n}{k_{01} \cdot n \cdot D_1^2 \cdot A'_1 \cdot B_\delta}$$

$$l_{1p} = 4.037 \text{ m}$$

$$l_{1pv} := \text{round}(l_{1p}, 0)$$

$$l_{1p} = 4 \text{ m}$$

11. Longueur active préliminaire du rotor l_{2p} :

Plage de variation de Δl :

$$\Delta l := \boxed{15}$$

$$\Delta l := \frac{\Delta l}{100}$$

$$\Delta l = 0.15$$

$$l_{2p} := l_{1p} + \Delta l$$

$$l_{2p} = 4.15 \text{ m}$$

12. Coefficients de longueur λ_1 et λ_2 :

$$\lambda_1 := \frac{l_{1p}}{D_1}$$

$$\lambda_1 = 3.24$$

$$\lambda_2 := \frac{l_{2p}}{D_2}$$

$$\lambda_2 = 3.86$$

12. Tension nominale d'une phase au stator $U_{1n\Phi}$:

U_{1n} : Tension composée nominale. $U_{1n} := 15750 \text{ V}$

$U_{1n\phi}$: Tension simple nominale.

$$U_{1n\phi} := \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} \quad U_{1n\phi} = 9093 \text{ V}$$

13. Courant nominal d'une phase de l'enroulement du stator $I_{1n\Phi}$:

$$I_{1n\phi} := \frac{S_n}{3 \cdot U_{1n\phi}} \quad I_{1n\phi} = 8626 \text{ A}$$

14. Nombre de voies parallèles a_1 :

$$a_1 := 2$$

15. Nombre de barres dans une encoche du stator U_{en1} :

$$U_{en1} := 2$$

16. Courant total dans l'encoche statorique I_{en1} :

$$I_{en1} := I_{1n\phi} \cdot \frac{U_{en1}}{a_1} \quad I_{en1} = 8626 \text{ A}$$

17. Pas dentaire préliminaire du stator t'_1 :

$$t'_1 := \frac{I_{en1}}{A'_1} \quad t'_1 = 0.061616 \text{ m}$$

18. Nombre d'encoche par pole et par phase q_1 :

Z'_1 : Nombre d'encoche préliminaire.

$$Z'_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{t'_1} \quad Z'_1 = 62.97$$

Automatisation

Z_1 : Nombre d'encoche définitif. $Z_1 = 60$

m : Nombre de phase statorique.

$$m := 3$$

$$q_1 := \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m}$$

$$q_1 = 10$$

19. Pas dentaire définitif du stator t_1 :

$$t_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1}$$

$$t_1 = 0.0647 \text{ m}$$

20. Vérification de rapport :

Verification

$$\frac{\delta}{t_1} = 1.237$$

$$\text{verification} = 1$$

21. Nombre de spire en série dans une phase w_1 :

$$w_1 := \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{en1}}{a_1}$$

$$w_1 = 10$$

22. Pas polaire τ :

$$\tau := \frac{Z_1}{2p}$$

$$\tau = 30 \text{ encoches.}$$

23. Rapport de raccourcissement β :

Plage de variation de β' :

$$\beta' := \boxed{833}$$

$$\beta := \frac{\beta'}{1000}$$

β : Rapport de raccourcissement.

$$\beta = 0.833$$

24. Coefficient de raccourcissement k_{r1} :

$$k_{r1} := \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right)$$

$$k_{r1} = 0.966$$

25. Coefficient de déformation k_{d1} :

$$k_{d1} := \frac{0.5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6q_1}\right)}$$

$$k_{d1} = 0.955$$

26. Coefficient d'enroulement k_{01} :

$$k_{01} := k_{r1} \cdot k_{d1}$$

$$k_{01} = 0.923$$

27. Charge linéaire définitive A :

$$A := \frac{6 \cdot w_1 \cdot I_{1n\phi}}{\pi D_1}$$

$$A = 1.334 \times 10^5 \text{ A/m}$$

28. Flux magnétique d'excitation nominale Φ :

$$\Phi := \frac{U_{1n\phi}}{4.44 f_n \cdot w_1 \cdot k_{01}}$$

$$\Phi = 4.439 \text{ Wb}$$

29. Longueur active définitive du stator l_{1n} :

$$l_{1n} := \frac{\Phi}{D_1 \cdot B_\delta}$$

$$l_{1n} = 4.23 \text{ m}$$

$$l_{1nw} := \text{round}\left(\frac{\Phi}{D_1 \cdot B_\delta}, 1\right)$$

$$l_{1n} = 4.2 \text{ m}$$

30. Nombre de canaux de ventilations préliminaires dans le paquet de tôle statorique n_p :

l_p : Longueur axiale des paquets de tôles.

$$l_p := 0.04 \text{ m}$$

b_k : Largeur axiale des canaux de ventilation.

$$b_k := 0.004 \text{ m}$$

$$n'_p := \frac{l_{1n}}{l_p + b_k}$$

$$n'_p = 93.33$$

$$n_p := \text{ceil}\left(\frac{l_{1n}}{l_p + b_k}\right)$$

$$n_p = 94$$

31. Longueur de l'acier de noyau statorique l_s :

l_{nkp} : Largeur des paquets extrêmes du stator. $l_{pkr} := 0.027$ m

l_s : Longueur de l'acier de noyau statorique.

$$l_s := (n_p - 2)l_p + 2 \cdot l_{pkr} \quad l_s = 3.735 \text{ m}$$

32. Longueur active définitive du stator l_1 :

l_1 : Longueur active du stator.

$$l_1 := l_s + b_k \cdot (n_p - 1) \quad l_1 = 4.2 \text{ m}$$

33. Largeur préliminaire de la dent statorique b'_{z1} :

Plage de variation de B'_{z1} (1,7..2.1) :

$B'_{z1} :=$	185
--------------	-----

$$B_{z1} := \frac{B'_{z1}}{100}$$

B_{z1} : Induction dans les dents statorique. $B_{z1} = 1.85$ T

k_c : Coefficient de remplissage. $k_c := 0.9$

b'_{z1} : Largeur de la dent statorique préliminaire.

$$b'_{z1} := \frac{\Phi}{\left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot 3q_1 \cdot B_{z1} \cdot l_s \cdot k_c} \quad b'_{z1} = 0.0362 \text{ m}$$

34. Largeur de l'encoche statorique préliminaire b'_{p1} :

$$b'_{p1} := t_1 - b'_{z1} \quad b'_{p1} = 0.028 \text{ m}$$

35. Dimension générale de l'épaisseur de l'isolement en largeur dans l'encoche δ_w :

Automatisation

δ_w : Epaisseur de l'isolation de l'encoche. $\delta_w = 0.013$ m

36. Largeur préliminaire d'un conducteur isolée dans l'encoche b'_n :

$$b'_n := \frac{b'_{p1} - \delta_w}{2} \qquad b'_n = 0.0077 \text{ m}$$

37. Largeur préliminaire du conducteur élémentaire non isolé b'_e :

δ_e : Double couche d'isolation en a. tiré dans le tableau 1.2 $\delta_e := 0.00027 \text{ m}$

$$b'_e := b'_n - \delta_e \qquad b'_e = 0.0075 \text{ m}$$

38. Dimensions généraux du conducteur élémentaire :

$$b_e := 0.0075 \text{ m}$$

D'après le tableau 1.1 et 1.2

$$b_{ep} := 0.0074 \text{ m}$$

39. Valeur définitive de la largeur de l'encoche du stator b_{p1} :

$$b_{p1} := 2 \cdot (b_e + \delta_e) + \delta_w \qquad b_{p1} = 0.0285 \text{ m}$$

40. Largeur définitive de la dent statorique b_{z1} :

b_{z1} : Valeur définitive de la largeur de la dent statorique.

$$b_{z1} := t_1 - b_{p1} \qquad b_{z1} = 0.0361 \text{ m}$$

Vérification :

B_{z1} : Induction magnétique dans l'encoche statorique.

$$B_{z1} := \frac{\Phi}{\left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot 3q_1 \cdot b_{z1} \cdot l_s \cdot k_c} \qquad B_{z1} = 1.85 \text{ T}$$

41. Densité de courant préliminaire dans une barre de l'encoche du stator Δ_1 :

Plage de variation de Θ_B (15..30°C) :

$\Theta_B :=$

$\Theta_B = 22^\circ\text{C}$

Θ_B : Température de réchauffement de l'eau chaude. $\Theta_B = 22^\circ\text{C}$

Plage de variation de v (0,8..2) :

$v' :=$

$v := \frac{v'}{10}$

v : Vitesse de mouvement de l'eau. $v = 1 \text{ m/s}$

l_k : Longueur des canaux d'eau connectés en séries pour deux barres.

$l_k := 2(l_1 + 2.5D_1)$ $l_k = 14.6 \text{ m}$

Plage de variation de k_Φ (1,5..2) :

$k'_\Phi :=$

$k_\Phi := \frac{k'_\Phi}{10}$

k_Φ : coefficient du déplacement de courant. $k_\Phi = 1.6$

S_{k1} : surface de tous les canaux de ventilation de la barre. $S_{k1} := 0.25 \text{ m}^2$

S_1 : Surface de cuivre dans la barre de stator. $S_1 := 1.56 \text{ m}^2$

$\frac{S_{k1}}{S_1} = 0.16$

$\Delta_1 := 14 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{\Theta_B \cdot v}{l_k \cdot k_\Phi} \cdot \frac{S_{k1}}{S_1}}$ $\Delta_1 = 5.438 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

42. Section du cuivre de conducteur élémentaire préliminaire S'_1 :

$$S'_1 := \frac{I_{1n\phi}}{a_1 \cdot \Delta_1} \quad S'_1 = 7.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

43. Hauteur préliminaire de conducteur creux a_{ep} :

Plage de variation de a'_{ep} (6,6..8,75) :

$$a'_{ep} := \boxed{875}$$

$$a_{ep} := \frac{a'_{ep}}{100}$$

Plage de variation de a_e (1,25..1,35) :

$$a'_e := \boxed{350}$$

$$a_e := \frac{a'_e}{100}$$

m_{erp} : nombre de conducteurs pour un creux et deux pleins. := 2

$$\frac{a_e}{a_{ep}} = 0.4$$

Du graphe 8.2 on prend :

$$v := 1.45$$

$$a_{ep} := 0.153 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{b_{p1}}{S'_1} \cdot v \cdot \sqrt{(1 - S_{k1}) \cdot (k_{\Phi} - 1)}$$

$$a_{ep} = 0.00536 \text{ m}$$

44. Dimensions du conducteur creux :

De tableau 1.3

$$a_{ep} := 0.005 \text{ m}$$

$$b_{ep} := 0.007 \text{ m}$$

a_k : Dimension du conducteur creux.

$$a_k := 0.005 \text{ m}$$

$$b_k := 0.004 \text{ m}$$

S_{ep} : Section préliminaire de cuivre.

$$S_{ep} := 28.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

a_e : La hauteur de conducteur plein élémentaire.

$$a_e := a_{ep} \cdot \left(\frac{a'_e}{a'_{ep}} \right)$$

$$a_e = 0.002 \text{ m}$$

Dans le tableau II.1.1:

$$b_e = 0.0075 \text{ m}$$

S_e : La section de conducteur plein.

$$S_e := 14.64 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

45. Section de tous les conducteurs de groupes :

$$S_{rp} := m_{erp} \cdot S_e + S_{ep}$$

$$S_{rp} = 5.75 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

46. Nombre de groupes en hauteur de la barre (les groupes sont disposés en deux longueurs) n_{rp} :

$$n_{rp} := \frac{S'_1}{2S_{rp}}$$

$$n_{rp} = 6.9$$

$$n_{rp} := \text{round}(n_{rp}, 0)$$

$$n_{rp} = 7$$

47. Section réelle du cuivre de la barre :

$$S_1 := 2n_{rp} \cdot S_{rp}$$

$$S_1 = 8.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

48. Densité définitive du courant dans la barre de l'encoche du stator Δ_1 :

$$\Delta_1 := \frac{I_{1n\phi}}{a_1 \cdot S_1}$$

$$\Delta_1 = 5.36 \times 10^6 \text{ A/m}^2$$

49. Nombre totaux des conducteurs pleins et creux en hauteur de la barre m_{eB} :

$$m_{eB} := n_{rp} \cdot (1 + m_{erp})$$

$$m_{eB} = 21$$

50. Hauteur des conducteurs élémentaires isolés de la barre(pleins et creux) :

Hauteur isolée de conducteur plein a_N :

δ_e : épaisseur d'isolation du conducteur plein.

$$\delta_e := 0.0004 \text{ m}$$

$$a_N := a_e + \delta_e$$

$$a_N = 0.00243 \text{ m}$$

Hauteur isolée de conducteur creux a_{Np} :

δ_{ep} : épaisseur d'isolation du conducteur creux.

$$\delta_{ep} := 0.000 \text{ m}$$

$$a_{Np} := a_{ep} + \delta_{ep}$$

$$a_{Np} = 5.2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

51. Hauteur de conducteur élémentaire isolé dans une barre h_N :

$$h_N := n_{rp} \cdot (a_N \cdot m_{erp} + a_{Np}) + a_{Np} \quad h_N = 0.076 \text{ m}$$

52. Hauteur de l'encoche du stator h_{p1} :

$$h_{kr1} : \text{la hauteur de la clavette du stator.} \quad h_{kr1} := 0.02 \text{ m}$$

δ_B : Dimension générale de l'isolation dans l'encoche, les l'entrefer. $\delta_B := 0.034 \text{ m}$ tableau 8.2

$$h_{p1} := 2 \cdot h_N + \delta_B + 2 \cdot 0.02 \cdot m_{eB} \cdot 10^{-3} + h_{kr1} \quad h_{p1} = 0.207 \text{ m}$$

53. Vérification des rapports :

$$\frac{h_{p1}}{b_{p1}} = 7.25 \quad (5 - 9)$$

$$\frac{h_{p1}}{D_1} = 0.167 \quad (0.16 - 0.21)$$

54.

Le noyau du stator est réalisé avec une tôle électrotechnique marque 3413 épaisseur 0.5 mm, la direction de laminage coïncide avec la direction de flux magnétique dans le dos du stator.

55. Hauteur de la carcasse statorique h_{a1} :

Plage de variation de B_{a1} (1,4..1,55) :

$B'_{a1} :=$	1465
--------------	------

$$B_{a1} := \frac{B'_{a1}}{1000}$$

$$B_{a1} : \text{Induction dans le dos du stator.} \quad B_{a1} = 1.465 \text{ T}$$

$$h_{a1} := \frac{\Phi}{2 \cdot l_s \cdot k_c \cdot B_{a1}} \quad h_{a1} = 0.436 \text{ m}$$

56. Diamètre extérieur du stator D_a :

$$D_a := D_1 + 2 \cdot (h_{a1} + h_{p1}) \quad D_a = 2.52 \text{ m}$$

$$D_a := \text{round}[D_1 + 2 \cdot (h_{a1} + h_{p1}), 1] \quad D_a = 2.5 \text{ m}$$

Valeur définitive :

$$h_{a1} := \frac{D_a - D_1 - 2 \cdot h_{p1}}{2} \quad h_{a1} = 0.426 \text{ m}$$

$$\frac{D_a}{D_1} = 2.02 \quad (2 - 2.1)$$

57. Longueur d'une spire de l'enroulement statorique l_{B1} :

l_{s1} : Longueur totale d'une spire d'une seule coté de l'enroulement du stator.

$$l_{s1} := 2.5 \cdot D_1 \quad l_{s1} = 3.09 \text{ m}$$

l_{B1} : Longueur totale d'une spire de l'enroulement du stator.

$$l_{B1} := 2(l_1 + l_{s1}) \quad l_{B1} = 14.575 \text{ m}$$

$$l_{B1} := \text{round}[2 \cdot (l_1 + l_{s1}), 1] \quad l_{B1} = 14.6 \text{ m}$$

58. Résistance de l'enroulement du stator d'une phase a 75°C pour un courant continu en unité relative $r_{1.75}$:

γ_e : Conductivité électrique du cuivre à la température θ_0 . $\gamma_e := 4e \text{ 1}/\Omega \cdot \text{m}$

$$\theta_0 := 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$r_{1.75} := \frac{w_1 \cdot l_{B1} \cdot 10^{-6}}{\gamma_e \cdot a_1 \cdot S_1} \quad r_{1.75} = 1.972 \times 10^{-3} \Omega$$

$$r'_{1.75} := r_{1.75} \frac{I_{1n\phi}}{U_{1n\phi}} \quad r'_{1.75} = 0.00187 \Omega$$

59. Résistance inductive de dispersion d'encoche avec prise en compte de la dispersion des courants des dents statorique en unité relative x_{1n} :

n_k : Nombre de canaux de ventilation.

$$n_k := n_p - 1 \quad n_k = 93$$

$l_{\sigma 1}$: Longueur virtuelle de la machine.

$$l_{\sigma 1} := l_1 - 0.2 \cdot b_k \cdot n_k \quad l_{\sigma 1} = 4.118 \text{ m}$$

h_{11} : Distance entre deux enroulements de même encoche $h_{11} := 0.171 \text{ m}$

h_4 :Hauteur

$$h_4 := 0.028 \quad \text{m}$$

$$x_{1n} := 0.47 \left(\frac{w_1}{10} \right)^2 \cdot \frac{l_{\sigma 1} \cdot I_{1n\phi}}{Z_1 \cdot U_{1n\phi}} \cdot \frac{3 \cdot \beta + 1}{4} \cdot \left(\frac{h_{11} + 3h_4}{3b_{p1}} + \frac{\delta}{2 \cdot t_1 + \frac{\delta}{2}} + 0.2 \right) \quad x_{1n} = 0.09773 \quad \Omega^{-1}$$

60. Résistance inductive de dispersion des parties frontales de l'enroulement pour afrittage amagnétique de rotor en unité relative x_{p1} :

$$x_{p1} := 3.23 \left(\frac{w_1 \cdot k_{01}}{10} \right)^2 \cdot \frac{I_{1n\phi}}{U_{1n\phi}} \cdot l_{s1} \cdot 10^{-2} \quad x_{p1} = 0.08054 \quad \Omega^{-1}$$

61. Résistance inductive d'induction mutuelle x_{ad} :

$$\tau := \frac{\pi \cdot D_1}{2} \quad \tau = 1.94 \quad \text{m}$$

k'_δ : Coefficient de l'entrefer préliminaire.

$$k'_\delta := 1.07$$

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \text{H/m}$$

$$x_{ad} := \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot k_{01} \cdot \tau \cdot A}{\pi \cdot k'_\delta \cdot \delta \cdot B_\delta} \quad x_{ad} = 1.85 \quad \Omega^{-1}$$

62. Résistance inductive différentielle de dispersion de l'enroulement statorique $x_{rn\phi 1}$:

b_{m1} : Largeur double de conducteur

$$b_{m1} := 2 \cdot b_e \quad b_{m1} = 0.015 \quad \text{m}$$

$$x_{rn\phi 1} := 0.375 \frac{\delta \cdot t_1}{q_1 \cdot b_{m1} \cdot \tau} \cdot x_{ad} \quad x_{rn\phi 1} = 0.0123 \quad \Omega^{-1}$$

63. Résistance inductive de dispersion $x_{\sigma 1}$:

$$x_{\sigma 1} := x_{1n} + x_{p1} + x_{rn\phi 1} \quad x_{\sigma 1} = 0.191 \quad \Omega^{-1}$$

64. Longueur de corps statorique l_2 :

Plage du variation de Δl (0,05..0,15)m :

$\Delta l :=$

$$\Delta l := \frac{\Delta}{100}$$
$$\Delta l = 0.15$$

$$l_2 := l_1 + \Delta l$$

$$l_2 = 4.35 \text{ m}$$

65. Nombre possibles des intervalles d'encoches rotorique préliminaires :

Plage du variation de Δ_Z (45..55)

$\Delta_Z :=$

$$\Delta_Z = 48$$

Z'_2 : Nombre d'encoches

$$Z'_2 := \Delta_Z \cdot D_2$$

$$Z'_2 = 51.6$$

$$Z'_2 := \text{ceil}(Z'_2)$$

$$Z'_2 = 52$$

66. Nombre d'encoches dans le rotor Z_2 :

Plage du variation de γ (0,667..0,75) :

$\gamma :=$

$$\gamma := \frac{\gamma'}{1000}$$

γ : L'intervalle d'encoche.

$$\gamma = 0.692$$

Matrice

Z_2' : Le nombre d'encoche comportant l'enroulement rotorique calculé.

$$Z_2' := \gamma \cdot Z'_2$$

$$Z_2' = 35.984$$

Z_2 : Nombre d'encoches comportant l'enroulement rotorique normalisé.

$$Z_2 = 36$$

67. Rapport préliminaire :

Plage du variation de h_{p2} (0..0,161)m :

$h'_{p2} :=$

$$h_{p2} := \frac{h'_{p2}}{1000}$$

Plage du variation de b_{p2} (0..100) :

$b_{p2} :=$

$$b_{p2} = 23$$

Plage du variation de b'_{z2} (0..100) :

$b'_{z2} :=$

$$b'_{z2} = 10$$

h_{p2} : Hauteur de l'encoche du rotor.

$$\frac{h_{p2}}{D_2} = 0.149$$

$$\frac{b_{p2}}{b'_{z2}} = 2.3$$

68. Profondeur de l'encoche de rotor préliminaire h_{p2} :

$$h_{p2} := \left(\frac{h_{p2}}{D_2} \right) \cdot D_2$$

$$h_{p2} = 0.16 \text{ m}$$

69. Pas dentaire sur la base des dents rotoriques t'_2 :

$$t'_2 := \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{p2}}{Z'_2}$$

$$t'_2 = 0.0456 \text{ m}$$

70. Largeur préliminaire de l'encoche rotorique b_{p2} :

$$b_{p2} := \frac{2.3 \cdot t'_2}{3.3}$$

$$b_{p2} = 0.0318 \text{ m}$$

71. Largeur de la dent de la partie la plus étroite (base de l'encoche) b'_{z2} :

$$b'_{z2} := t'_2 - b_{p2}$$

$$b'_{z2} = 0.0138 \text{ m}$$

72. Largeur d'orientation de conducteur de l'enroulement d'excitation préliminaire b'_2 :

Plage de variation de δ_{w2} (0,0035..0,0045) m :

$\delta_{w2} :=$	45
------------------	----

$$\delta_{w2} := \frac{\delta_{w2}}{10000}$$

δ_{w2} : Double épaisseur de l'isolation en largeur du rotor $\delta_{w2} = 0.0045$ m

$$b'_2 := b_{p2} - \delta_{w2} \qquad b'_2 = 0.0273 \text{ m}$$

73. Largeur du conducteur de l'enroulement d'excitation normalisée b_2 :

D'après le tableau II.1.4 nous choisissons un conducteur rectangulaire avec :

$$b_2 := 0.028 \text{ m}$$

74. Largeur définitive de l'encoche de rotor b_{p2} :

$$b_{p2} := b_2 + \delta_{w2} \qquad b_{p2} = 0.0325 \text{ m}$$

75. Largeur définitive de la dent rotorique de la partie la plus étroite b'_{z2} :

$$b'_{z2} := t'_2 - b_{p2} \qquad b'_{z2} = 0.013 \text{ m}$$

9.5 / Calcul de circuit magnétique

77. Section des dents du rotor correspondant à une distance de 0.2 h_{2p} et 0.7 h_{2p} à partir de la base des dents :

77.1. Section des dents du rotor correspondant à une distance de 0.2 h_{2p} :

$$D_{z0.2} := D_2 - 1.6h_{p2} \qquad D_{z0.2} = 0.819 \quad \text{m}$$

$$b_{p0.2} := 0.032 \quad \text{m}$$

$k_{wp} :$

$$k_{wp} := \frac{1 - \cos\left(\gamma \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{Z_2}\right)} \qquad k_{wp} = 8.86$$

$$s_{z0.2} := (D_{z0.2} - b_{p0.2} \cdot k_{wp}) \cdot l_2 \qquad s_{z0.2} = 2.31 \quad \text{m}^2$$

77.2. Section des dents du rotor correspondant à une distance de 0.7 h₂ à partir de la base des dents s_{z0.7} :

$$D_{z0.7} := D_2 - 0.6h_{p2} \qquad D_{z0.7} = 0.979 \quad \text{m}$$

$$b_{p0.7} := 0.032 \quad \text{m}$$

$$s_{z0.7} := (D_{z0.7} - b_{p0.7} \cdot k_{wp}) \cdot l_2 \qquad s_{z0.7} = 3 \quad \text{m}^2$$

78. Largeur de la dent du stator correspondant à une distance de 1/3 h_{p1} à partir de la base de la dent b_{z13} :

D_{z13} : Diamètre intérieur du stator correspondant à une distance de 1/3 h à partir de la base de la dent.

$$D_{z13} := D_1 + \left(\frac{2}{3}\right) \cdot h_{p1} \qquad D_{z13} = 1.373 \quad \text{m}$$

$$b_{z13} := \pi \cdot \frac{D_{z13}}{Z_1} - b_{p1} \qquad b_{z13} = 0.0433 \quad \text{m}$$

79. Surface calculée de la section de l'acier des dents statoriques sur un pas polaire équivalent à une machine à pole saillant s_{z13} :

$$s_{z13} := \frac{Z_1}{\pi} \cdot b_{z13} \cdot l_s \cdot k_c \quad s_{z13} = 2.875 \text{ m}^2$$

80. Section de l'entrefer amagnétique par pas polaire équivalent à une machine à pole saillant s_δ :

k_γ : Coefficient de rectification.

$$k_\gamma := (1 - 0.5 \cdot \gamma) \cdot \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad k_\gamma = 1.0273$$

$$s_\delta := (D_2 + \delta) \cdot (l_1 + 2 \cdot \delta) \cdot k_\gamma \quad s_\delta = 5.173 \text{ m}^2$$

81. Section du dos de stator s_{a1} :

$$s_{a1} := l_s \cdot h_{a1} \cdot k_c \quad s_{a1} = 1.479 \text{ m}^2$$

82. Section du dos de rotor s_{a2} :

Plage du variation de α (0,1..0,12) :

$$\alpha' := \boxed{120}$$

$$\alpha := \frac{\alpha'}{1000}$$

$$\alpha = 0.12$$

D_0 : Diamètre de trou central de rotor.

$$D_0 := \alpha \cdot D_2 \quad D_0 = 0.129 \text{ m}$$

$$s_{a2} := \frac{D_2 - 2 \cdot h_{p2} - D_0}{2} \cdot l_2 \quad s_{a2} = 1.362 \text{ m}^2$$

$$E_{10} := U_{1nd} \quad E_{10} = 9093 \text{ V}$$

83. Flux magnétique dans l'entrefer amagnétique à vide et sous une tension nominale Φ :

$$C_1 := \frac{1}{4.44 f_n \cdot w_1 \cdot k_{01}} \quad C_1 = 4.882 \times 10^{-4}$$

$$\Phi := C_1 \cdot E_{10} \quad \Phi = 4.439 \text{ Wb}$$

84. Induction magnétique dans l'entrefer amagnétique B_δ :

$$B_\delta := \frac{\Phi}{s_\delta} \quad B_\delta = 0.858 \text{ T}$$

85. Induction magnétique dans la section calculée des dents du stator B_{z13} :

$$B_{z13} := \frac{\Phi}{s_{z13}} \quad B_{z13} = 1.544 \text{ T}$$

86. Valeur calculée de l'induction magnétique dans le dos du stator B'_{a1} :

C_3 : Coefficient de rectification de l'induction dans le dos du stator.

$$C_3 := \frac{18 - 10 \cdot \gamma}{18 - 9 \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{2 \cdot s_{a1}} \quad C_3 = 0.318$$

$$B'_{a1} := C_3 \cdot \Phi \quad B'_{a1} = 1.413 \text{ T}$$

87. Coefficient de déviation des lignes de champs magnétique à travers l'encoche statorique k_{p13} :

$$k_{p13} := \frac{(b_{p1} + b_{z13}) \cdot l_1}{b_{z13} \cdot l_s \cdot k_c} - 1 \quad k_{p13} = 1$$

88. Tableau des caractéristiques à vide de la machine :

Automatisation de circuit magnétique

Tableau 9.4 :

	0	1	2	3	4	5	6
0	""E""	0.6	1	1.1	1.2	1.3	1.4
1	0	5.456·10 ³	9.093·10 ³	1·10 ⁴	1.091·10 ⁴	1.182·10 ⁴	1.273·10 ⁴
2	0	2.663	4.438	4.882	5.326	5.769	6.213
3	0	0.515	0.858	0.944	1.03	1.115	1.201
4	0	0.93	1.54	1.7	1.85	2	2.16
5	0	0.85	1.411	1.55	1.693	1.834	1.975
6	0	225	5.1·10 ³	1.11·10 ⁴	2·10 ⁴	4.5·10 ⁴	9·10 ⁴
7	0	140	326	450	770	2·10 ³	1.01·10 ⁴
8	0	3.516·10 ⁴	5.86·10 ⁴	6.446·10 ⁴	7.032·10 ⁴	7.618·10 ⁴	8.204·10 ⁴
9	0	47	1.056·10 ³	2.298·10 ³	4.14·10 ³	9.315·10 ³	1.863·10 ⁴
10	0	158	367	507	868	2.254·10 ³	1.139·10 ⁴
11	0	3.537·10 ⁴	6.003·10 ⁴	6.727·10 ⁴	7.533·10 ⁴	8.775·10 ⁴	1.121·10 ⁵
12	0	0.169	0.287	0.322	0.36	0.419	0.536
13	0	2.832	4.725	5.2	5.686	6.215	6.749
14	0	1.23	2.05	2.26	2.47	2.7	2.93
15	0	0.944	1.575	1.73	1.895	2.07	2.25
16	0	0.86	1.44	1.585	1.733	1.895	2.06
17	0	1.584·10 ³	4.4·10 ⁴	1.15·10 ⁵	1.75·10 ⁵	2.25·10 ⁵	2.75·10 ⁵

89. Force magnétomotrice de l'entrefer amagnétique F_{δ} :

$k_{\delta z1}$: Coefficient qui considère la denture de la dent de stator.

$$k_{\delta z1} := 1 + \frac{b_{p1}^2}{t_1 \cdot (5 \cdot \delta + b_{p1}) - b_{p1}^2} \quad k_{\delta z1} = 1.03$$

t_2 : pas dentaire de rotor.

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad t_2 = 0.0649 \text{ m}$$

$k_{\delta z2}$: Coefficient qui considère la denture de la dent rotorique.

$$k_{\delta z2} := 1 + \frac{b_{p2}^2}{t_2 \cdot (5 \cdot \delta + b_{p2}) - b_{p2}^2} \cdot \frac{\gamma}{2} \quad k_{\delta z2} = 1.0135$$

$k_{\delta B}$: Coefficient qui considère l'influence des canaux de refroidissement des paquets des tôles statorique.

$$k_{\delta B} := 1 + \frac{b_k^2}{(l_p + b_k) \cdot (5\delta + b_k) - b_k^2} \quad k_{\delta B} = 1.0011$$

Plage du variation de t_p (0,025..0,03) m :

$$t'_p := \boxed{28}$$

$$t_p := \frac{t'_p}{1000}$$

t_p : pas dentaire polaire. $t_p = 0.028$ m

b_p : Largeur des canulars.

$$b_p := 0.5 \cdot t_p \quad b_p = 0.014 \text{ m}$$

$k_{\delta p}$: Coefficient qui prend en considération une surface non lisse.

$$k_{\delta p} := 1 + \frac{b_p^2}{t_p \cdot (5 \cdot \delta + b_p) - b_p^2} \quad k_{\delta p} = 1.0172$$

$k_{\delta sT}$: Coefficient qui prend en considération les bouts paquets en gradation.

$$k_{\delta sT} := 1 + \frac{7 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\delta \cdot (l_1 + l_2)}} \quad k_{\delta sT} = 1.0085$$

$k_{\delta sp}$: Coefficient qui prend en considération la coupe comme des dents pour des raisons de refroidissement.

$$k_{\delta sp} := 1 + 0.25 \cdot \frac{\gamma}{\delta} \cdot 10^{-3} \quad k_{\delta sp} = 1.0022$$

k_{δ} : Coefficient de l'entrefer amagnétique.

$$k_{\delta} := 1 + (k_{\delta z1} - 1) + (k_{\delta z2} - 1) + (k_{\delta B} - 1) + (k_{\delta p} - 1) + (k_{\delta sT} - 1) + (k_{\delta sp} - 1) \quad k_{\delta} = 1.073$$

$$C_2 := \frac{\delta \cdot k_{\delta}}{\mu_0} \quad C_2 = 68291$$

$$F_{\delta} := C_2 \cdot B_{\delta 0,1} \quad F_{\delta} = 58602 \text{ A}$$

90. Force magnétomotrice des dents du stator F_{z1} :

$$H_{z13} := H_{z13_{0,1}} \quad H_{z13} = 5100 \text{ A/m}$$

$$F_{z1} := h_{p1} \cdot H_{z13} \quad F_{z1} = 1055 \text{ A}$$

91. Force magnétomotrice du dos du stator F_{a1} :

L_{a1} : Longueur moyenne des lignes de champ dans le dos du stator.

$$L_{a1} := \gamma \cdot \frac{\pi(D_a - h_{a1})}{4p} \quad L_{a1} = 1.127 \text{ m}$$

$$H'_{a1} := H'_{a1_{0,1}} \quad H'_{a1} = 326 \text{ A/m}$$

$$F_{a1} := L_{a1} \cdot H'_{a1} \quad F_{a1} = 367.52 \text{ A}$$

$$\text{floor}(F_{a1}) = 367 \text{ A}$$

92. Force magnétomotrice du stator et de l'entrefer $F_{\delta zc}$:

$$F_{\delta zc} := F_{\delta} + F_{z1} + F_{a1} \quad F_{\delta zc} = 60024 \text{ A}$$

93. Coefficient de conductibilité magnétique pour le flux de la dispersion de l'encoche forme rectangulaire rotorique λ_{p2} :

h_{kr2} : Hauteur de la clavette.

$$h_{kr2} := b_{p2} \quad h_{kr2} = 0.033 \text{ m}$$

h_y : Hauteur de la cale au dessous de la clavette.

$$h_y := 0.01 \text{ m}$$

h_{22} : Hauteur (clavette+cale sous clavette).

$$h_{22} := h_{kr2} + h_y \quad h_{22} = 0.043 \text{ m}$$

Plage du variation de $\Sigma\delta'_p$ (0,0026..0,0032) m :

$$\Sigma\delta'_p := \boxed{30}$$

$$\Sigma\delta_p := \frac{\Sigma\delta'_p}{10000}$$

$\Sigma\delta_p$: Cale de fond de l'encoche. $\Sigma\delta_p = 0.003$ m

h_{21} : Hauteur de l'enroulement d'excitation.

$$h_{21} := h_{p2} - h_{22} - \Sigma\delta_p \quad h_{21} = 0.115 \text{ m}$$

λ_{p2} : Coefficient de conductibilité magnétique.

$$\lambda_{p2} := \frac{h_{21}}{2 \cdot b_{p2}} + \frac{h_{22}}{b_{p2}} \quad \lambda_{p2} = 3.07$$

94. Coefficient de conductibilité magnétique dispersion du flux magnétique des cornes des dents rotorique λ_{k2} :

$$\lambda_{k2} := \frac{\delta}{2 \cdot t_2} + 0.2 \quad \lambda_{k2} = 0.816$$

95. Flux magnétique de dispersion d'encoches et des dents cornes rotoriques $\Phi_{\sigma p.k2}$:

$$C_4 := \frac{l_2}{Z_2} \cdot (\lambda_{p2} + \lambda_{k2}) 10^{-5} \quad C_4 = 4.695 \times 10^{-6}$$

$$\Phi_{\sigma p.k2} := C_4 \cdot F_{\delta zc} \quad \Phi_{\sigma p.k2} = 0.282 \text{ Wb}$$

96. Flux magnétique total de la dispersion de rotor $\Phi_{\sigma 2}$:

$$\Phi_{\sigma p2} := 0 \text{ Wb}$$

$$\Phi_{\sigma 2} := \Phi_{\sigma p.k2} + \Phi_{\sigma p2} \quad \Phi_{\sigma 2} = 0.282 \text{ Wb}$$

97. Flux magnétique total du rotor par pole à vide Φ_2 :

$$\Phi := \Phi_{0,1}$$

$$\Phi_2 := \Phi + \Phi_{\sigma 2} \quad \Phi_2 = 4.721 \text{ Wb}$$

98. Induction magnétique dans les dents du rotor correspondant à une distance $0.2 h_{p2}$ et $0.7 h_{p2}$ à partir de la base des dents $B_{z0.2}$ et $B_{z0.7}$:

$$B_{z0.2} := \frac{\Phi_2}{s_{z0.2}} \quad B_{z0.2} = 2.04 \text{ T}$$

$$B_{z0.7} := \frac{\Phi_2}{s_{z0.7}} \quad B_{z0.7} = 1.57 \text{ T}$$

99. Induction magnétique dans le dos rotorique B_{a2} :

$$B_{a2} := \frac{\Phi_2}{2 \cdot s_{a2}} \quad B_{a2} = 1.73 \text{ T}$$

Section du dos du rotor s'_{a2} :

$$D_1 := 0$$

$$s'_{a2} := \frac{D_2 - 2h_{p2}}{2} \cdot l_2 \quad s'_{a2} = 1.64 \text{ m}^2$$

Induction magnétique calculée dans le dos de rotor B'_{a2} :

$$B'_{a2} := \frac{\Phi_2}{2 \cdot s'_{a2}} \quad B'_{a2} = 1.44 \text{ T}$$

100. Intensité magnétique :

$b_{z0.2}$: Largeur de la dent distant de $0.2h_{p2}$ de la base des dents.

$$b_{z0.2} := \frac{\pi \cdot D_{z0.2}}{Z'_2} - b_{p0.2} \quad b_{z0.2} = 0.017 \text{ m}$$

$k_{p0.2}$: Coefficient de déviation de champ à travers l'encoche à une hauteur de $0.2h_{p2}$ de la base des dents.

$$k_{p0.2} := \frac{b_{p0.2}}{b_{z0.2}} \quad k_{p0.2} = 1.9$$

$b_{z0.7}$: Largeur de la dent distant de $0.7h_{p2}$ de la base des dents.

$$b_{z0.7} := \frac{\pi \cdot D_{z0.7}}{Z'_2} - b_{p0.2} \quad b_{z0.7} = 0.0266 \text{ m}$$

$k_{p0.7}$: Coefficient de déviation de champ à travers l'encoche à une hauteur de $0.7h_{p2}$ de la base des dents.

$$k_{p0.7} := \frac{b_{p0.7}}{b_{z0.7}} \quad k_{p0.7} = 1.2$$

101. Force magnétomotrice des dents du rotor F_{z2} :

$$H_{z0.2} := 4400 \text{ A/m} \quad \text{Dans le tableau 9.4}$$

$$H_{z0.7} := 450 \text{ A/m}$$

$$F_{z2} := h_{p2} \cdot \frac{H_{z0.2} + H_{z0.7}}{2} \quad F_{z2} = 3880 \text{ A}$$

102. Force magnétomotrice du dos du rotor F_{a2} :

L_{a2} : Longueur moyenne des lignes du champ dans le dos du rotor.

$$L_{a2} := \frac{D_2 - 2h_{p2}}{2} \quad L_{a2} = 0.3775 \text{ m}$$

$$H_{a2} := 270 \text{ A/m} \quad \text{Tableau 9.4}$$

$$F_{a2} := L_{a2} \cdot H_{a2} \quad F_{a2} = 1019 \text{ A}$$

103. Force magnétomotrice d'excitation à vide F_{20} :

$$F_2 := F_{\alpha zc} + F_{z2} + F_{a2} \quad F_2 = 64923 \text{ A}$$

$$F_{20} := F_2$$

104. Force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation en unité relative :

$$F'_2 := \frac{F_2}{F_{20}} \quad F'_2 = 1 \text{ U.R}$$

105. Force magnétomotrice de l'enroulement de stator par pôle pour un courant nominal d'induit F_{1n} :

$$F_{1n} := 1.35 I_{1n\phi} \frac{w_1 \cdot k_{01}}{p} \quad F_{1n} = 107450 \text{ A}$$

106. Coefficient de réduction de la première harmonique de champ de l'induit par rapport aux conditions de l'enroulement d'excitation k_a :

$$k_a := \frac{\pi^2 \cdot \gamma}{8 \cdot \sin\left(\gamma \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \quad k_a = 0.9644$$

107. Force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation F'_{1n} :

$$F'_{1n} := F_{1n} \cdot k_a \quad F'_{1n} = 103625 \text{ A}$$

$$F'_{1n'} := \frac{F'_{1n}}{F_{20}} \quad F'_{1n'} = 1.596 \text{ U.R}$$

108. Reactance de potier en unité relative $x_{p'}$:

$$x_{\delta 1'} : \text{Réactance de dispersion en unité relative.} \quad x_{\sigma 1'} := 0.15 \text{ U.R}$$

$$x_{p'} := x_{\sigma 1'} + 0.025 \quad x_{p'} = 0.215 \text{ U.R}$$

109. Force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation pour une charge nominale en unité relative puis la calculée en unité physique F_{2n} :

$$F_{2n'} := 2 \cdot \epsilon$$

$$F_{2n} := F_{2n'} \cdot F_{20} \quad F_{2n} = 168800 \text{ A}$$

110. Force magnétomotrice de l'enroulement de stator $E_{10'}$:

$$E_{20'} := F_{2n}$$

$$E_{10'} := 1.41 \text{ V}$$

111. Variation de la tension pour changement de la charge de régime nominal jusqu'à un régime nul ΔU :

$$\Delta U := \frac{E_{10'} - U_{1n\phi}}{U_{1n\phi}} \cdot 100 \quad \blacksquare$$

$$\Delta U := (E_{10'} - 1) \cdot 100 \quad \Delta U = 41 \%$$

112. Les caractéristiques de réglages recommandent de la construire pour les valeurs I_1/I_{1n} :

Matrices

$$0.5 \frac{I_{1n\phi} x_p}{U_{1n\phi}} := 0.5 x_p \quad \blacksquare$$

$$0.5 \cdot x_p = 0.1075$$

$$F'_{1.0.5} := 0.5 F'_{1n}$$

$$F'_{1.0.5} = 0.798$$

$$F'_{2.0.5} := I_{2,0,2}$$

$$F'_{2.0.5} = 1.7$$

113. Résistivité électrique de l'enroulement rotorique a la température 15°C et 120°C :

$$\rho_{M15} := \frac{10^{-6}}{55} \quad \Omega.m$$

$$\rho_{M120} := 1.42 \frac{10^{-6}}{55}$$

$$\rho_{M120} = 2.58 \times 10^{-8} \quad \Omega.m$$

114. Longueur totale préliminaire de la section effective de conducteur de l'enroulement d'excitation :

Dans le tableau 9.3

$$C_2 := 0.1$$

$$C'_2 := 0.02$$

$$q_2 := \frac{Z_2}{4}$$

$$q_2 = 9$$

$$D_{B,cp} := D_2 - 2 \cdot h_{22} - h_{21}$$

$$D_{B,cp} = 0.875 \quad m$$

R_B :

$$R_B := 0.03$$

l_{r2} : Valeur moyenne de la longueur frontale d'une demie spire de l'enroulement d'excitation.

$$l_{r2} := 2 \cdot C_2 + b_2 \cdot q_2 + C'_2 \cdot (q_2 - 1) + k_\gamma \cdot D_{B,cp} - 0.86 \left(R_B + \frac{b_2}{2} \right)$$

$$l_{r2} = 1.509 \quad m$$

$$l_{B2} := 2 \cdot (l_2 + l_{r2})$$

$$l_{B2} = 11.72 \quad m$$

115. Section préliminaire de conducteur effectif de l'enroulement d'excitation s'_2 :

$U_{2n} := 300 \text{ v}$ Dans le tableau 9.1

$$s'_2 := \rho_{M120} \frac{2.2F_{2n} \cdot l_{B2}}{U_{2n}} \qquad s'_2 = 3.75 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

116. Hauteur de conducteur effectif a_2 :

$a_{23} := 0.007 \text{ m}$

$s_{23} := 195.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

$s_2 := 2 \cdot s_{23} \qquad s_2 = 3.902 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

$s_2 := \text{round}(s_2, 5) \qquad s_2 = 3.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

$a_2 := 2 \cdot a_{23} \qquad a_2 = 0.014 \text{ m}$

117. Nombre de conducteurs effectifs en hauteur de l'encoche rotorique u_{p2} :

Plage du variation de δ'_{NB} (0,001..0,004) m :

$\delta'_{NB} :=$	10	$\delta_{NB} := \frac{\delta'_{NB}}{10000}$
-------------------	----	---

δ_{NB} : Hauteur de l'isolations entre les spires en hauteur. $\delta_{NB} = 0.001 \text{ m}$

$u'_{p2} := \frac{h_{21}}{a_2 + \delta_{NB}} \qquad u'_{p2} = 7.633$

$u_{p2} := \text{floor}(u'_{p2}) \qquad u_{p2} = 7$

118. Calcul définitive de la hauteur de l'encoche rotorique h_{p2} :

h_{kr2} : Hauteur de la clavette de l'encoche rotorique.

$h_{kr2} := 0.03$

$h_{p2} := u_{p2} \cdot a_2 + (u_{p2} - 1) \cdot \delta_{NB} + \Sigma \delta_p + h_y + h_{kr2} \qquad h_{p2} = 0.15 \text{ m}$

119. Calculs définitifs des dimensions :

$$h_{21} := u_{p2} \cdot a_2 + (u_{p2} - 1) \cdot \delta_{NB} \quad h_{21} = 0.104 \text{ m}$$

$$h_{22} := h_y + h_{kr2} \quad h_{22} = 0.043 \text{ m}$$

120. Nombre de spires de l'enroulement d'excitation dans un pôle w_2 :

$$w_2 := \frac{Z_2}{4} \cdot u_{p2} \quad w_2 = 63$$

121. Courant préliminaire nominal d'excitation du rotor I_{2n} :

$$I_{2n} := \frac{F_{2n}}{w_2} \quad I_{2n} = 2679 \text{ A}$$

122. Courant d'excitation à vide I_{20} :

$$I_{20} := \frac{F_{20}}{w_2} \quad I_{20} = 1031 \text{ A}$$

123. Nombres d'éléments de rotor avec leur longueur identique (pendant l'individu ventilation multi jet) :

Plage du variation de θ' (0,4..0,6) :

$\theta' :=$

$$\theta := \frac{\theta'}{100}$$

$$\theta = 0.4$$

n'_o :

$$n''_o := \frac{l_2}{\theta} \quad n''_o = 10.875$$

$$n'_o := \text{round}(n''_o, 0) \quad n'_o = 11$$

l_o :

$$l_o := \frac{l_2}{n'_o} \quad l_o = 0.395 \text{ m}$$

$l_{o.kp}$:

$$l_{o.kp} := 2 \cdot l_o \quad l_{o.kp} = 0.79 \text{ m}$$

n_o :

$$n_o := n'_o - 2$$

$$n_o = 9$$

$$n_{o,B} := 5$$

$$n_{o,5} := 4$$

124. Distance entre les centres des canaux de ventilations $t_{B,k}$:

Plage du variation de n_K (7..8) :

$n'_K :=$	76
-----------	----

$$n_K := \frac{n'_K}{10}$$

n_K : Nombre de canaux de ventilations d'une seule coté de $n_K = 7.6$ l'encoche.

$$t_{B,k} := \frac{l_o}{n_K}$$

$$t_{B,k} = 0.052 \text{ m}$$

125. Longueur des canaux de ventilations :

Plage du variation de a (0,005..0,006) m :

$a' :=$	50
---------	----

$$a := \frac{a'}{1000}$$

a :

$$a = 0.005 \text{ m}$$

b :

$$b := 0.01 \text{ m}$$

h :

$$h := \sqrt{(0.5l_o)^2 + h_{21}^2}$$

$$h = 0.223 \text{ m}$$

126.

$$b' := b \cdot \frac{h}{h_{21}}$$

$$b' = 0.0344 \text{ m}$$

127. Section effective de conducteur en ligne A-A et B-B s_{M2A} et s_{M2B} :

$$s_{M2A} := a_2 \cdot (b_2 - a) \quad s_{M2A} = 3.22 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$s_{M2B} := a_2 \cdot (b_2 - 2 \cdot a) \quad s_{M2B} = 2.52 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

128. Coefficient de réduction de la surface de conducteur de la partie frontale k_p :

$$k_p := \frac{1}{\left(2 - \frac{2 \cdot b'}{t_{B.k}}\right) \cdot \frac{s_2}{s_{M2A}} + \left(\frac{2 \cdot b'}{t_{B.k}} - 1\right) \cdot \frac{s_2}{s_{M2B}}} \quad k_p = 0.758$$

129. Section équivalente de cuivre des conducteurs effectifs dans la partie d'encoche rotorique s_{M2p} :

$$s_{M2p} := s_2 \cdot k_p \quad s_{M2p} = 2.956 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

130. Section de cuivre de conducteur creux dans la partie frontale s_{M2r} :

b_k : Largeur de conducteur creux. $b_k := 0.014 \text{ m}$

R_k : Rayon des extrémités de conducteur creux. $R_k := 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

s_{k2} : Section de conducteur élémentaire creux.

$$s_{k2} := (b_k - 2 \cdot R_k) \cdot 2 \cdot R_k + \pi \cdot R_k^2 \quad s_{k2} = 8.748 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$s_{M2r} := s_2 - s_{k2} \quad s_{M2r} = 3.025 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\frac{s_{k2}}{s_{M2p}} = 0.3$$

131. Densité de courant dans la partie d'encoche de l'enroulement de rotor pour une excitation nominale Δ_{2p} :

$$\Delta_{2p} := \frac{I_{2n}}{s_{M2p}} \quad \Delta_{2p} = 9.063 \times 10^6 \text{ A/m}$$

132. Densité de courant dans la partie frontale de rotor pour une excitation nominale Δ_{2r} :

$$\Delta_{2r} := \frac{I_{2n}}{s_{M2r}} \quad \Delta_{2r} = 8.857 \times 10^6 \text{ A/m}^2$$

133. Résistance du cuivre de l'enroulement du rotor :

$$r_{2.15} := 4 \rho_{M15} \cdot w_2 \cdot \left(\frac{l_2}{s_{M2p}} + \frac{l_{r2}}{s_{M2r}} \right) \quad r_{2.15} = 0.090277 \text{ } \Omega$$

• **Résistance du cuivre de l'enroulement rotorique d'une phase à 75°C :**

$$r_{2.75} := 1.24 r_{2.15} \quad r_{2.75} = 0.1119 \text{ } \Omega$$

• **Résistance du cuivre de l'enroulement rotorique d'une phase à 120°C :**

$$r_{2.120} := 1.42 r_{2.15} \quad r_{2.120} = 0.1282 \text{ } \Omega$$

134. Tension préliminaire d'excitation nominale U_{2n} :

$$U_{2n} := I_{2n} \cdot r_{2.120} \quad U_{2n} = 343.476 \text{ V}$$

$$U_{2n} := \text{round}(U_{2n}, 0) \quad U_{2n} = 343 \text{ V}$$

135. Tension nominale d'excitateur U_{2n} :

$$U_{2n} := U_{2n} + 2 \quad U_{2n} = 345 \text{ V}$$

136. Puissance d'excitateur nominale P_{2n} :

$$P_{2n} := U_{2n} \cdot I_{2n} \quad P_{2n} = 9 \times 10^5 \text{ W}$$

Calcul des paramètres de la machine

137. Réactance inductive longitudinale de réaction d'induit x_{ad}' :

$F_{\delta 0}$: Force magnétomotrice dans l'entrefer à vide. $F_{\delta 0} := F_{\delta}$

$$x_{ad}' := \frac{k_a \cdot F_{1n}}{F_{\delta 0}} \quad x_{ad}' = 1.7683 \quad \Omega^{-1}$$

138. Réactance inductive transversale de réaction d'induit x_{aq}' :

$$x_{aq}' := \frac{x_{ad}'}{1 + (k_{\delta z 2} - 1) \cdot \frac{2}{\gamma}} \quad x_{aq}' = 1.7 \quad \Omega^{-1}$$

139. Réactance inductive synchrone longitudinale x_d' :

$$x_d' := x_{ad}' + x_{\sigma 1} \quad x_d' = 1.9583 \quad \Omega^{-1}$$

140. Réactance inductive synchrone transversale x_q' :

$$x_q' := x_{aq}' + x_{\sigma 1} \quad x_q' = 1.89 \quad \Omega^{-1}$$

Avec :

$\lambda_{p2\psi}$: Coefficient de conductibilité magnétique de flux d'excitation.

$$\lambda_{p2\psi} := \frac{h_{21} + 3 \cdot h_{22}}{3 \cdot b_{p2}} \quad \lambda_{p2\psi} = 2.39$$

σ_{2f} : Coefficient de dispersion qui prend en considération la réduction de x_d' de l'enroulement statorique.

$$\sigma_{2f} := 1 + \frac{4 \cdot \pi k_a \cdot F_{\delta 0} \cdot l_2}{\Phi \cdot Z_2} \cdot \lambda_{p2\psi} \cdot 10^{-6} + 0.02 \quad \sigma_{2f} = 1.066$$

141. Réactance inductive de dispersion de l'enroulement d'excitation x_{2f} :

$$x_{2f} := \sigma_{2f} x_{ad'} \quad x_{2f} = 1.885 \quad \Omega^{-1}$$

142. Réactance inductive de dispersion de l'enroulement d'excitation :

$$x_{\sigma 2'} := x_{2f} - x_{ad'} \quad x_{\sigma 2'} = 0.12 \quad \Omega^{-1}$$

143. Réactance inductive synchrone longitudinale transitoire $x'_{d'}$:

$$x'_{d'} := x_{\sigma 1'} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad'}} + \frac{1}{x_{\sigma 2'}}} \quad x'_{d'} = 0.3 \quad \Omega^{-1}$$

144. Réactance inductive synchrone longitudinale subtransitoire $x''_{d'}$:

$$x''_{d'} := x_{\sigma 1'} + 0.02' \quad x''_{d'} = 0.215 \quad \Omega^{-1}$$

144.1. Réactance inductive synchrone transversale subtransitoire $x''_{q'}$:

$$x''_{q'} := 1.5 x''_{d'} \quad x''_{q'} = 0.323 \quad \Omega^{-1}$$

145. Réactance inverse $x_{c2'}$:

$$x_{c2'} := 1.225 x''_{d'} \quad x_{c2'} = 0.263 \quad \Omega^{-1}$$

146. Réactance homopolaire $x_{c0'}$:

Dans le tableau 8.6 on a :

$$\delta_{ctB} := 0.013' \quad \text{m}$$

$$\delta_{np} := 0.00' \quad \text{m}$$

h_3 : Hauteur entre les deux enroulements.

$$h_3 := \delta_{ctB} + \delta_{np} \quad h_3 = 0.019 \quad \text{m}$$

$$x_{c0'} := 0.47 \left(\frac{w_1}{10} \right)^2 \cdot \frac{I_{1mp} l_1}{U_{1mp} Z_1 b_{p1}} \left[(3\beta - 2) \cdot h_4 + (9\beta - 5) \cdot \frac{h_{11}}{12} - (9\beta - 8) \cdot \frac{h_3}{12} \right] + 1.57 x_{ad'} \left(\beta - \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{1}{k_a \cdot k_{01}^2} \left[\left(\frac{2}{Z_1} \right)^2 + 0.037 \cdot 0.39 \left(\beta - \frac{2}{3} \right) - \left(\beta - \frac{2}{3} \right)^2 \right]$$

147. Constante du temps du courant d'excitation en essai de court-circuit T_{d0} :

k_{02} : Coefficient de l'enroulement de l'harmonique
fondamentale de la f.m.m de rotor. tiré de tableau 8.8 $k_{02} := 0.81\epsilon$

$F_{\delta} := 5860$ tiré de tableau 9.4

$$T_{d0} := \frac{2 \cdot w_2^2 \cdot k_{02}^2 \cdot \sigma_2 \Gamma \Phi}{0.75 r_{2.75} F_{\delta}} \quad T_{d0} = 6.23 \text{ s}$$

148. Constante de temps transitoire du courant d'induit en court-circuit triphasé brusque du stator T'_{d3} :

$$T'_{d3} := T_{d0} \cdot \frac{x'_d}{x_d} \quad T'_{d3} = 0.954 \text{ s}$$

149. Constante de temps subtransitoire du courant d'induit en court-circuit triphasé brusque du stator T''_{d3} :

$$T''_{d3} := \frac{1}{8} \cdot T'_{d3} \quad T''_{d3} = 0.119 \text{ s}$$

150. Constante de temps d'excitation de la composante apériodique du courant induit T_{a3} :

ω : Pulsation des courants $\omega := 314 \text{ rd/s}$

$$T_{a3} := \frac{x_{c2'}}{\omega \cdot r'_{1.75}} \quad T_{a3} = 0.448 \text{ s}$$

151. Calcul de rapport de court-circuit r_{cc} :

$E'_{10'} := 1.1$ tiré de tableau 9.4

$$r_{cc} := \frac{E'_{10'}}{x'_d} \quad r_{cc} = 0.562$$

152. Courant triphasé établi en court-circuit $I_{Kn'}$:

$$I_{Kn'} := r_{cc} \cdot F_{2n'} \quad I_{Kn'} = 1.46 \text{ A}$$

153. Courant biphasé établi en court-circuit $I_{K.2n'}$:

$$I_{K.2'} := \frac{\sqrt{3} \cdot E'_{10'}}{x_{d'} + x_{c2'}} \quad I_{K.2'} = 0.858 \text{ A}$$

$$I_{K.2n'} := I_{K.2'} \cdot F_{2n'} \quad I_{K.2n'} = 2.23 \text{ A}$$

154. Courant monophasé établi en court-circuit $I_{K.1n'}$:

$$I_{K.1'} := \frac{3E'_{10'}}{x_{d'} + x_{c2'} + x_{c0'}} \quad I_{K.1'} = 1.42 \text{ A}$$

$$I_{K.1n'} := I_{K.1'} \cdot F_{2n'} \quad I_{K.1n'} = 3.697 \text{ A}$$

155. Courant de choc i_y :

$$i_y := 1.8 \frac{1.05}{x_{d'}} \quad i_y = 8.79 \text{ A}$$

156. Capacité de surcharge statorique de la machine W_n :

$$W_n := r_{cc} \cdot \frac{F_{2n'}}{\cos(\Psi_n)} \quad W_n = 1.72 > 1.7$$

157. Masse du cuivre de l'enroulement du stator m_{M1} :

$$m_{M1} := 3 \cdot 8900 a_1 \cdot w_1 \cdot l_{B1} \cdot S_1 \quad m_{M1} = 6274 \text{ Kg}$$

158. Masse de l'enroulement du rotor m_{M2} :

$$m_{M2} := 4 \cdot 8900 \cdot w_2 \cdot (l_2 \cdot s_{M2p} + l_{r2} \cdot s_{M2r}) \quad m_{M2} = 3908 \text{ Kg}$$

159. Masse totale des enroulements du stator et du rotor m_M :

$$m_M := m_{M1} + m_{M2} \quad m_M = 10182 \text{ Kg}$$

160. Masse de fer du dos statorique m_{a1} :

$$m_{a1} := \frac{\pi}{4} \cdot 7600 l_s \cdot k_c \cdot [D_a^2 - (D_1 + 2 \cdot h_{p1})^2] \quad m_{a1} = 73237 \text{ Kg}$$

161. Masse de fer des dents du stator m_{Z1} :

$$m_{Z1} := 7600 h_{p1} \cdot l_s \cdot k_c \cdot [\pi \cdot (D_1 + h_{p1}) - Z_1 \cdot b_{p1}] \quad m_{Z1} = 15378 \text{ Kg}$$

162. Masse totale de l'acier électrotechnique de stator m_c :

$$m_c := m_{a1} + m_{Z1} \quad m_c = 88614 \text{ Kg}$$

163. Consommation aux matériaux active pour le cuivre et pour l'acier électrotechnique :

$$g_M := \frac{m_M}{S_n} \quad g_M = 4.33 \times 10^{-5} \text{ Kg/V.A}$$

$$g_c := \frac{m_c}{S_n} \quad g_c = 3.766 \times 10^{-4}$$

Calculs des pertes et rendements

Pertes électriques :

164. Pertes électriques principales dans l'enroulement statorique $P_{\acute{e}.0}$:

$$P_{\acute{e}.0} := 3 \cdot I_{1n\phi}^2 \cdot r_{1.7\acute{e}} \quad P_{\acute{e}.0} = 440233 \text{ W}$$

165. Pertes électriques supplémentaires dans l'enroulement d'induit :

$$b_{Mp1} := 0.014\epsilon$$

$h_{M,rp}$: Hauteur d'un seul groupe en hauteur de l'encoche statorique.

$$h_{M,rp} := a_{ep} + m_{erp} \cdot a_e \quad h_{M,rp} = 0.009 \text{ m}$$

h_{M1} : Hauteur de tous les groupes en hauteur de l'encoche statorique.

$$h_{M1} := h_{M,rp} \cdot n_{rp} \quad h_{M1} = 0.063 \text{ m}$$

m'_e : Nombre de conducteurs élémentaires pleins.

$$m'_e := m_{erp} \cdot \frac{h_{M1}}{a_e} \quad m'_e = 63$$

$$m'_{ep} := 64$$

m'_{ep} : Nombre de conducteurs élémentaires creux.

$$m'_{ep} := m_{erp} \cdot \frac{h_{M1}}{a_{ep}} \quad m'_{ep} = 25.2$$

$$m'_{ep} := \text{ceil}(m'_{ep}) \quad m'_{ep} = 26$$

k'_{Φ} : Coefficient de renflouement de courant.

$$k'_{\Phi} := 1 + 10.7 \cdot \left(\frac{b_{m1} \cdot m'_e}{b_{p1}} \right)^2 \cdot a_{ep}^4 \cdot 10^6 \quad k'_{\Phi} = 1.194$$

$$b_k := 0.004$$

$k'_{\Phi p}$: Coefficient de renflouement de courant pour une réalisation des barres seulement pleines ou creux.

$$k'_{\Phi p} := 1 + 10.7 \cdot \left(\frac{b_{Mp1} \cdot m'_{ep}}{b_{p1}} \right)^2 \cdot a_{ep}^4 \cdot \left(1 - \frac{a_k^3 \cdot b_k}{a_{ep}^3 \cdot b_{ep}} \right) \cdot \left(1 - \frac{a_k \cdot b_k}{a_{ep} \cdot b_{ep}} \right) \cdot 10^6 \quad k'_{\Phi p} = 1.891$$

$k_{\Phi K}$: Coefficient moyen de renflouement de courant dans la barre statorique.

$$k_{\Phi K} := \frac{m_{erp} \cdot S_e}{S_{rp}} \cdot k'_{\Phi} + \frac{S_{ep}}{S_{rp}} \cdot k'_{\Phi p} \quad k_{\Phi K} = 1.536$$

166. Pertes électriques supplémentaires dans l'enroulement statorique P_{ϵ} :

$$P_{\epsilon} := (k_{\Phi K} - 1) \cdot P_{\epsilon,0} \quad P_{\epsilon} = 235942 \text{ W}$$

167. Pertes supplémentaires de puissances dans les dents et dans la culasse dues aux harmoniques supérieures de la f.m.m de l'enroulement d'excitation en court-circuit P_{ZvK} et P_{avK} :

Automatisation

$$B_{Z13} := B_{Z13,0,1}$$

$$P_{ZvK} := (1.3 \cdot \phi_1 \cdot P_{r1.50} + 1.5 \cdot \phi_2 \cdot P_{B1.50}) \cdot \left(\frac{B_{Z13}}{r_{cc}} \right)^2 \cdot m_{Z1} \quad P_{ZvK} = 18558 \text{ W}$$

k' : Pour l'acier laminé à froid.

$$k' := 1.1$$

$$P_{avK} := 1.7 \cdot k' \cdot (1.2 \cdot \phi_1 \cdot p_{r1.50} + 1.7 \cdot \phi_2 \cdot p_{B1.50}) \cdot \left(\frac{B_{a1}}{r_{cc}} \right)^2 \cdot m_{a1} \quad P_{avK} = 167965 \text{ W}$$

168. Pertes supplémentaires de puissances dans les dents de stator dues aux harmoniques dentures de la f.m.m de l'enroulement d'excitation en court-circuit :

$$\frac{\delta \cdot k_{\delta}}{t_1} = 1.33 < 0.7$$

169. Pertes supplémentaires sur la surface de rotor causées par les harmoniques supérieures de la f.m.m de stator en court-circuit P_{2vK} :

ϕ_4 : Coefficient de pertes de puissances sur la surface continu de rotor. D'après le tableau 10.4 $\phi_4 := 2.3$

$$P_{2vK} := \phi_4 \cdot \left(\frac{A}{\delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^6} \right)^2 \cdot D_1^5 \cdot l_2 \cdot 10^3 \quad P_{2vK} = 69458 \text{ W}$$

170. Pertes supplémentaires de puissances sur la surface de rotor causées par les harmoniques dentures des f.m.m de l'enroulement de stator en court-circuit :

$$\frac{\delta \cdot k_{\delta}}{t_1} = 1.33 > 1$$

171. Pertes supplémentaires dans les parties extrêmes de turboalternateur en court-circuit P_{TK} :

$$P_{TK} := 50 \cdot A^2 \cdot D_1^2 \cdot 10^{-7} \quad P_{TK} = 135711 \text{ W}$$

172. Somme des pertes en court-circuit P_{Kn} :

$$P'_{ZvK} : \dots\dots\dots P'_{ZvK} := 0 \text{ W}$$

$$P_{ZZK} : \dots\dots\dots P_{ZZK} := 0 \text{ W}$$

$$P_{2ZK} : \dots\dots\dots P_{2ZK} := 0 \text{ W}$$

$$P_{Kn} := P_{\acute{e}.0} + P_{\acute{e}} + P_{ZvK} + P_{avK} + P'_{ZvK} + P_{ZZK} + P_{2vK} + P_{2ZK} + P_{TK} \quad P_{Kn} = 1067867 \text{ W}$$

173. Pertes dans l'acier de dos et des dents de stator P_{ca} et P_{Z1} :

$P_{1.50}$: Pertes spécifiques. Du tableau 10.6. $P_{1.50} := 0.8 \text{ W}$

k_{da} : Coefficient total de majoration des pertes pour le dos de stator. $k_{da} := 1.3$

$$B'_{a1} := B_{a10,1}$$

$$P_{ca} := k_{da} \cdot k' \cdot P_{1.50} B'_{a1}{}^2 \cdot m_{a1} \quad P_{ca} = 166970 \text{ W}$$

$P_{1.50} := 1.5 \text{ W}$ D'après le tableau 10.6

k_{dZ} : Coefficient total de majoration des pertes pour les dents de stator. $k_{dZ} := 1.5$

$$P_{Z1} := k_{dZ} \cdot k' \cdot P_{1.50} B_{z13}{}^2 \cdot m_{Z1} \quad P_{Z1} = 90724 \text{ W}$$

174. Pertes principales dans l'acier à vide $P_{c,0}$:

$$P_{c,0} := P_{ca} + P_{Z1} \quad P_{c,0} = 257694 \text{ W}$$

175. Pertes supplémentaires dans le conducteur magnétique de stator causées par les harmoniques supérieures de la f.m.m de l'enroulement d'excitation à vide P_{1v0} :

$$P_{1v0} := r_{cc}{}^2 \cdot (P_{ZvK} + P_{avK}) \quad P_{1v0} = 58852 \text{ W}$$

176. Pertes supplémentaires de puissances dans le conducteur magnétique de stator causées par les harmoniques supérieures des dents de la f.m.m d'excitation à vide P'_{Zv0} :

$$P'_{Zv0} := r_{cc}{}^2 \cdot P'_{ZvK} \quad P'_{Zv0} = 0 \text{ W}$$

177. Pertes supplémentaires de pulsations dans les dents de stator causées par les harmoniques supérieures en marche à vide P_{ZZ0} :

$$P_{ZZ0} := P_{1.50} \gamma \cdot \left[\frac{0.5 \cdot \delta \cdot \left(\frac{b_{p2}}{\delta} \right)^2}{t_1 \cdot \left(5 + \frac{b_{p2}}{\delta} \right)} \cdot B_{z13} \right]^2 \cdot Z_2{}^2 \cdot m_{Z1} + r_{cc}{}^2 \cdot P_{ZZK} \quad P_{ZZ0} = 36688 \text{ W}$$

178. Pertes supplémentaires sur la surface de rotor à cause des dents de stator à vidé P_{2Z0} :

u :

$$u := \frac{b_{p1}}{2 \cdot \delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_{p1}}{2 \cdot \delta}\right)^2} \quad u = 1.194$$

β_c :

$$\beta_c := \frac{1 + u^2 - 2u}{2 \cdot (1 + u^2)} \quad \beta_c = 0.00777$$

$$B_{\delta} := B_{\delta_{0,1}}$$

$$P_{2Z0} := \frac{5}{\sqrt{Z_1}} \cdot (B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \beta_c)^2 \cdot D_1^3 \cdot l_1 \cdot 10^7 \quad P_{2Z0} = 2612 \text{ W}$$

179. Pertes supplémentaires sur les extrêmes en marche à vide P_{T0} :

$$P_{T0} := r_{cc}^2 \cdot P_{TK} \quad P_{T0} = 42819 \text{ W}$$

180. Somme des pertes dans l'acier à vide P_c :

$$P_c := P_{c,0} + P_{1v0} + P'_{Zv0} + P_{ZZ0} + P_{2Z0} + P_{T0} \quad P_c = 398665 \text{ W}$$

Pertes de puissances par excitations

181. Pertes par excitations pour une charge nominale à la température 75°C $P_{2n.75}$:

ΔU_w : Chute de tension en contact avec les balais

$$\Delta U_w := 2 \text{ V}$$

Plage du variation de η_B (0,85..0,95) :

$$\eta'_B := \boxed{92}$$

$$\eta_B := \frac{\eta'_B}{100}$$

η_B : Rendement du rotor.

$$\eta_B = 0.92$$

$$P_{2n.75} := \frac{I_{2n}^2 \cdot r_{2.75} + \Delta U_w \cdot I_{2n}}{\eta_B}$$

$$P_{2n.75} = 879346 \text{ W}$$

Pertes de puissances mécaniques

182. Pertes par frottements des deux enroulements de glissements (Paliers) :

Plage du variation de χ (1,2..1,4) :

$$\chi' := \boxed{120}$$

$$\chi := \frac{\chi'}{100}$$

$$\chi = 1.2$$

p_{yd} : Pression des paliers sur l'axe de rotor.

$$p_{yd} := \chi \cdot 10^6 \text{ W}$$

Plage du variation de κ (1,3..1,5) :

$$\kappa' := \boxed{140}$$

$$\kappa := \frac{\kappa'}{100}$$

$$\kappa = 1.4$$

m_p : est la masse du rotor

$$m_p := \kappa \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 7850 D_2^2 \cdot l_2 \quad m_p = 43390$$

d_u : Diamètre des sorties de l'arbre de rotor :

$$d_u := \sqrt{\frac{10 \cdot m_p}{1.2 \cdot 2 p_{yd}}} \quad d_u = 0.388 \text{ m}$$

Plage du variation de v (0,1..1,2) :

$v' :=$

$$v := \frac{v'}{100}$$

$$v = 1.2$$

l_u : Longueur des sorties de l'arbre de rotor :

$$l_u := v \cdot d_u \quad l_u = 0.466 \text{ m}$$

$$P_p := 8.06 \cdot 10^3 \cdot d_u^2 \cdot \sqrt{\frac{m_p \cdot l_u}{2 \cdot d_u}} \quad P_p = 195934 \text{ W}$$

183. Pertes de puissances du rotor lors de rotation dans l'hydrogène :

Plage du variation de p'_H (400000..450000) Pa :

$p'_H :=$

$$p_H := \frac{p'_H}{10} \cdot 10^5$$

p_H : Pression de l'hydrogène $p_H = 4 \times 10^5 \text{ Pa}$

P_p :

$$P_p := 57.3 \cdot 10^3 \cdot D_2^4 \cdot l_2 \quad P_p = 332872 \text{ W}$$

$$P_{pH} := P_p \cdot p_H \cdot 10^{-6} \quad P_{pH} = 133149 \text{ W}$$

184. Pertes de puissances par frottements de deux surfaces de frittages dues au gaz d'hydrogène :

Plage du variation de c_1 (1,06..1,07) :

$c'_1 :=$

$$c_1 := \frac{c'_1}{1000}$$

c_1 : Coefficient est déterminé par le tableau 10.7. $c_1 = 1.06$

$D_{b.K}$:

$D_{b.K} := c_1 \cdot D_2$ $D_{b.K} = 1.139 \text{ m}$

c_2 : Coefficient est déterminé par le tableau 10.7. $c_2 := 0.57$

$l_{b.K} := c_2 \cdot D_2$ $l_{b.K} = 0.613 \text{ m}$

$P_{b.K}$:

$P_{b.K} := 57.3 \cdot 10^3 \cdot D_{b.K}^4 \cdot l_{b.K}$ $P_{b.K} = 59196 \text{ W}$

$P_{b.KH} := P_{b.K} \cdot P_H \cdot 10^{-6}$ $P_{b.KH} = 23679 \text{ W}$

185. Pertes par frottements des surfaces extrêmes $P_{pn\phi H}$:

$t_{pn\phi}$: $t_{pn\phi} := 0.028 \text{ m}$

$n_{pn\phi}$: Nombre de cannelures de plissements sur le rotor.

$n_{pn\phi} := \frac{l_2}{t_{pn\phi}}$ $n_{pn\phi} = 155$

Plage du variation de $h'_{pn\phi}$ (0,005..0,008) m :

$h'_{pn\phi} :=$

$$h_{pn\phi} := \frac{h'_{pn\phi}}{1000}$$

$h_{pn\phi}$: Profondeur de la cannelure de plissement. $h_{pn\phi} = 0.006 \text{ m}$

$P_{pn\phi}$:

$$P_{pn\phi} := 2.7 \cdot n_{pn\phi} \cdot \left[D_2^5 - (D_2 - 2 \cdot h_{pn\phi})^5 \right] \cdot 10^3 \quad P_{pn\phi} = 32869 \text{ W}$$

$$P_{pn\phi H} := P_{pn\phi} \cdot P_H \cdot 10^{-6} \quad P_{pn\phi H} = 13148 \text{ W}$$

186. Pertes de puissances dans les balais en contact avec les bagues :

D_K : Diamètre de la bague. $D_K := 0.4\epsilon \text{ m}$

Plage du variation de $\mu_T(0,1..0,25)$:

$\mu'_T :=$	120	$\mu_T := \frac{\mu'_T}{1000}$
-------------	-----	--------------------------------

μ_T : Coefficient de frottement avec la glissade des balais. $\mu_T = 0.12$

Plage du variation de Δ_ω (70000..100000) A/m :

$\Delta_\omega :=$	80000	$\Delta_\omega = 8 \times 10^4 \text{ A/m}^2$
--------------------	-------	---

Δ_ω : Densité de courant dans la bague. $\Delta_\omega = 8 \times 10^4 \text{ A/m}^2$

s_w : Surface de tous les balais du polarité.

$$s_w := \frac{I_{2n}}{\Delta_\omega}$$

Plage du variation de p_w (20000..25000) Pa :

$p_w :=$	24900	$p_w = 2.49 \times 10^4 \text{ Pa}$
----------	-------	-------------------------------------

p_w : Pression des bagues sur les balais. $p_w = 2.49 \times 10^4 \text{ Pa}$

$$P_{T,w} := 98.1 \cdot \mu_T \cdot p_w \cdot s_w \cdot \pi \cdot D_K \quad P_{T,w} = 14187 \text{ W}$$

Pertes de puissances par ventilations

187. Pertes par ventilations P' :

$$P' := P_c + (P_{Kn} - P_{\dot{\epsilon}.0} - P_{\dot{\epsilon}}) + P_{2n} + P_{pH} + P_{b.KH} + P_{pn\phi H} \quad P' = 1884710 \text{ W}$$

188. Consommation de gaz d'hydrogène :

Plage du variation de Θ_r (20..25°C) :

$\Theta_r :=$	25	$\Theta_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
---------------	----	--

Θ_r : Température du gaz de préchauffage avec l'hydrogène. $\Theta_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Plage du variation de ι (2..7) :

$\iota :=$	5	$\iota = 5$
------------	---	-------------

Θ'_r : Température du gaz de préchauffage sur les ventilateurs.

$$\Theta'_r := \iota \cdot p_H \cdot 10^{-6} \quad \Theta'_r = 2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_r := \frac{P'}{11 \cdot (\Theta_r - \Theta'_r) \cdot p_H \cdot 10^{-3}} \quad v_r = 18.624 \text{ m}^3/\text{s}$$

189. Pertes par ventilations P_{BHT} :

H_r : Pression de ventilation a l'hydrogène.

$$H_r := 6 \cdot p_H \cdot 10^{-3} \quad H_r = 2400 \text{ Pa}$$

η_{BHT} : Rendement du système de ventilation. $\eta_{BHT} := 0.5$

$$P_{BHT} := \frac{v_r \cdot H_r}{\eta_{BHT}} \quad P_{BHT} = 89393 \text{ W}$$

190. Consommation de l'eau pour le refroidissement de l'enroulement de stator P'ε :

Θ_B : Température de préchauffage d'eau.

$$\Theta_B := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

P'ε :

$$P'_{\epsilon} := P_{\epsilon,0} + P_{\epsilon}$$

$$P'_{\epsilon} = 676176 \text{ W}$$

$$v_B := \frac{P'_{\epsilon} \cdot 10^{-6}}{4.14 \Theta_B}$$

$$v_B = 0.0065 \text{ m}^3/\text{s}$$

191. Pertes de puissances par refroidissement à l'eau de l'enroulement statorique P_B :

Plage du variation de η_{Hac} (0,7..0,8) :

η'_{Hac} :=

$$\eta_{Hac} := \frac{\eta'_{Hac}}{100}$$

η_{Hac} : Rendement de la pompe.

$$\eta_{Hac} = 0.75$$

Plage du variation de H_B (150000..300000) Pa :

H'_B :=

$$H_B := \frac{H'_B}{100} \cdot 10^6$$

H_B : Pression de la pompe, de système de refroidissement à hydrogène.

$$H_B = 2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_B := \frac{v_B \cdot H_B}{\eta_{Hac}}$$

$$P_B = 2178 \text{ W}$$

192. Pertes mécaniques totales est compris les pertes par ventilation et refroidissement à l'eau P_{mex}:

$$P_{mex} := P_p + P_{pH} + P_{b.KH} + P_{pn\phi H} + P_{T.w} + P_{BHT} + P_B$$

$$P_{mex} = 608606 \text{ W}$$

193. Somme des pertes en régime nominal P_{Σn} :

$$P_{\Sigma n} := P_{Kn} + P_c + P_{2n} + P_{mex}$$

$$P_{\Sigma n} = 2999517 \text{ W}$$

194. Coefficient de rendement en régime nominal η_n :

$$\eta_n := \left(1 - \frac{P_{\Sigma n}}{P_n + P_{\Sigma n}} \right) \cdot 100 \quad \eta_n = 98.522 \%$$

195. Pertes constantes indépendantes de la charge P_0 :

$$P_0 := P_c + P_{me} \quad P_0 = 1007270 \text{ W}$$

196. Pertes en court-circuit P_K :

Automatisation

$$P_K := P_{Kn} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1n\phi}} \right)^2 \quad P_K = 2.67 \times 10^5 \text{ W}$$

197. Pertes par excitations P_2 :

$$P_2 := P_{2n} \cdot I_2^2 \quad P_2 = 2671456.785 \text{ W}$$

198. Rendement pour l'importe quelle charge en % η :

$$\eta := \left(1 - \frac{P_{\Sigma n}}{P_n + P_{\Sigma n}} \right) \cdot 100 \quad \eta = 98.522 \%$$

Annexes

Размер изолированного провода по большей стороне b , мм	Размер неизолированного провода по меньшей стороне a , мм														
	1,40	1,50	1,60	1,7	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,0	3,15
	Расчетная площадь сечения провода s , мм ²														
4,00	5,385	—	6,185	—	6,837	—	7,637	—	8,597	—	9,451	—	10,65	—	—
4,50	6,085	—	6,985	—	7,737	—	8,637	—	9,717	—	10,70	—	12,05	—	13,63
4,75	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—	10,28	—	11,33	—	12,75	—	14,41
5,00	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24	10,84	11,25	11,95	12,7	13,45	14,45	15,20
5,60	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,280	10,84	11,51	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09
6,00	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—	19,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35
6,30	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30
6,70	9,165	—	10,51	—	11,70	—	13,04	—	14,65	—	16,20	—	18,21	—	20,56
7,10	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82
7,50	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—	16,44	—	18,20	—	20,45	—	23,08
8,00	10,29	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65
8,50	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—	18,68	—	20,70	—	23,25	—	26,23
9,00	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72	19,80	20,69	21,95	29,30	—	—	—
9,50	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—	20,92	—	23,20	—	26,05	—	29,38
10,00	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	22,04	23,05	24,45	25,95	27,45	29,45	30,95
10,60	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—	23,38	—	25,95	—	29,13	—	32,84
11,20	15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,28	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73
11,80	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—	26,07	—	28,95	—	32,49	—	36,62
12,50	—	—	19,79	—	22,14	—	24,64	—	27,64	—	30,70	—	34,45	—	38,83

Tableau 1.2 : Largeur b_e et hauteur a_e des valeurs normalisées des conducteurs élémentaires pleins non isolés et leurs surfaces respectives s_e .

a	b			
4,0	5.1	1.0	14.2	-
4,0	7.4	1.0	18.8	-
4,0	8.0	1.0	20.0	178
4,0	8.5	1.0	21.0	186.9
4,0	8.6	1.0	21.2	-
4,0	9.0	1.0	22.0	195.8
4,0	10.0	1.0	24.0	213.6
4,5	5.1	1.25	17.8	-
4,5	7.4	1.25	23.5	-
4,5	8.6	1.25	26.5	-
4,5	10	1.25	30	-
4,5	10	1.0	25.0	222.5
5,0	5	1.3	19.3	171.7
5,0	5.1	1.5	21.3	-
5,0	7.5	1.5	28.5	253.6
5,0	8	1.3	30.0	267.0
5,0	8.5	1.5	28.3	252.2
5,0	8.5	1.5	31.5	280.3
5,0	9	1.5	33.0	293.7
5,0	9.5	1.5	34.5	307.0
5,0	10	1.5	36.0	320.4
5,0	11.2	1.5	39.6	352.4
5,0	11.8	1.5	41.8	372.0
5,0	12.5	1.5	43.5	387.1
6,0	6	1.5	27.0	240.3
22,0	22	5.5	363.0	3230.7

Tableau 1.3 : Conducteur rectangulaire transversale avec l'ouverture rectangulaire de rayon d'arrondissement de extrémités $r=0.9-1.2\text{mm}$

b [m]	a [mm]														
	3.53	3.75	3.8	4.1	4.4	4.7	5.1	5.5	5.6	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10.0
	s [mm ²]														
19.5	68.35	72.26	73.62	79.09	84.94	90.79	98.59								
22	77.18		83.12	89.34	95.94	102.54	111.3		123.1	131.14					
25					109.14	16.4		136.64		149.14					
28							141.94			179.1	193.1	195.14	198.1	223.1	284.1
30										191.1	206.1	208.1	238.1	268.1	298.1
32								191.6		209.1	225.6		278.1		348.1
35								219.1		239.1	258.1	278.1	318.1	358.1	398.1
40															

Tableau 1.4 : Dimension et section des conducteurs pleins d'excitation.

B [T]	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/ m]									
0.6	120	122	124	126	128	130	132	134	136	138
0.7	140	142	144	146	149	152	155	158	161	164
0.8	168	172	175	180	184	188	192	196	200	205
0.9	210	215	220	225	230	235	240	245	250	255
1.0	260	265	270	275	280	290	300	310	320	330
1.1	340	350	360	370	380	395	410	425	440	455
1.2	470	490	510	530	560	590	620	650	690	730
1.3	770	810	860	920	980	1070	1170	1270	1370	1500
1.4	1700	1900	2100	2300	2500	2750	3000	3250	3500	3750
1.5	4000	4250	4500	4800	5100	5400	5700	6000	6300	6600
1.6	6900	7200	7600	8000	8400	8800	9200	9600	10100	10600
1.7	11100	11600	12100	12600	13200	13800	14500	15200	15900	16600
1.8	17800	19000	20200	21400	22600	24500	26400	28300	30200	32100
1.9	34000									

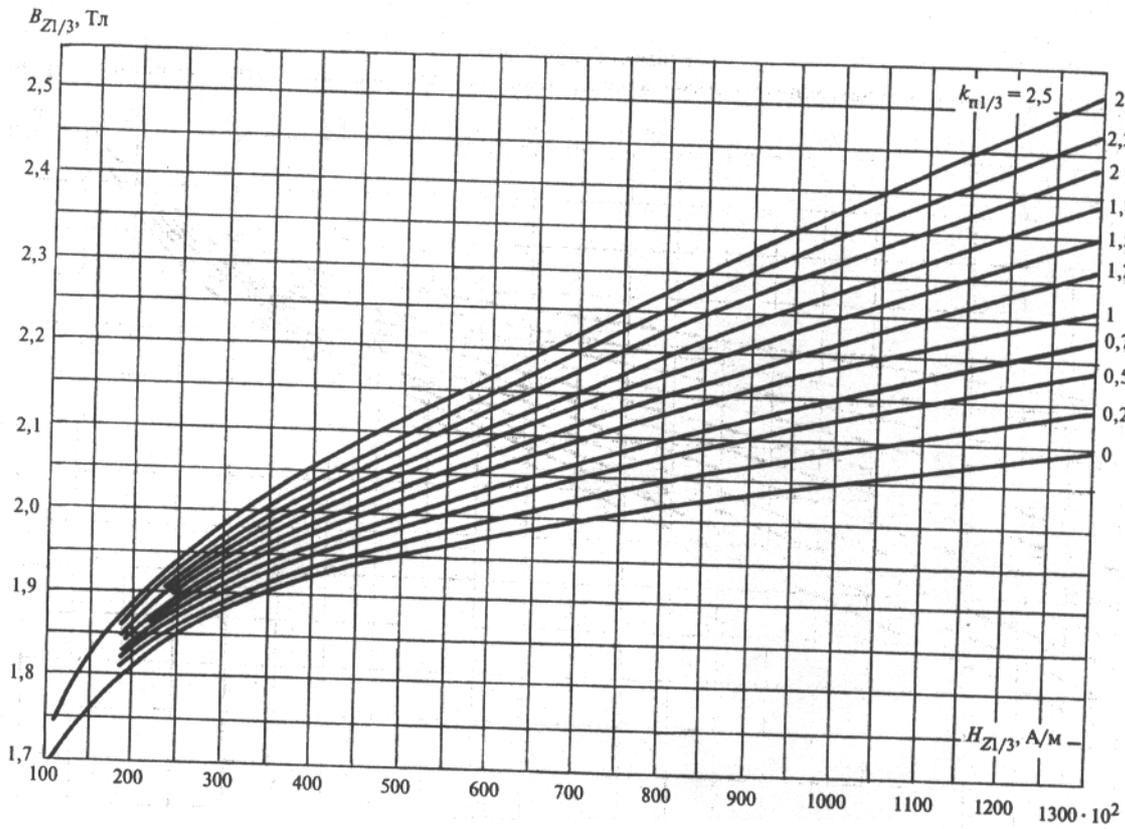
Tableau 2.1 : Magnétisation de l'acier magnétique laminé à froid de type 3413 du Stator (le sens de laminage est perpendiculaire au sens des lignes du champ).

B [T]	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/ m]									
0.4	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111
0.5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0.6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0.7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0.8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317
0.9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1.0	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1.1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1.2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1030
1.3	1080	1140	1200	1270	1340	1410	1490	1590	1600	1720
1.4	1940	2060	2200	2340	2500	2700	2920	3140	3370	3600
1.5	3850	4060	4290	4520	4760	5000	5300	5650	6000	6350
1.6	6700	7100	7600	8100	8650	9300	10000	10700	114000	12200
1.7	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000
1.8	23000	24000	25000	26000	27000	28000	29000	30000	31200	32500
1.9	34000	35500	37000	38500	40500	42500	45000	51000	57000	63000
2.0	70000	77000	84500	92000	100000	108000	116000	124000	138000	140000
2.1	148000	156000	164000	172000	180000	188000	196000	204000	212000	220000
2.2	228000	236000	244000	252000	260000	268000	276000	284000	292000	300000

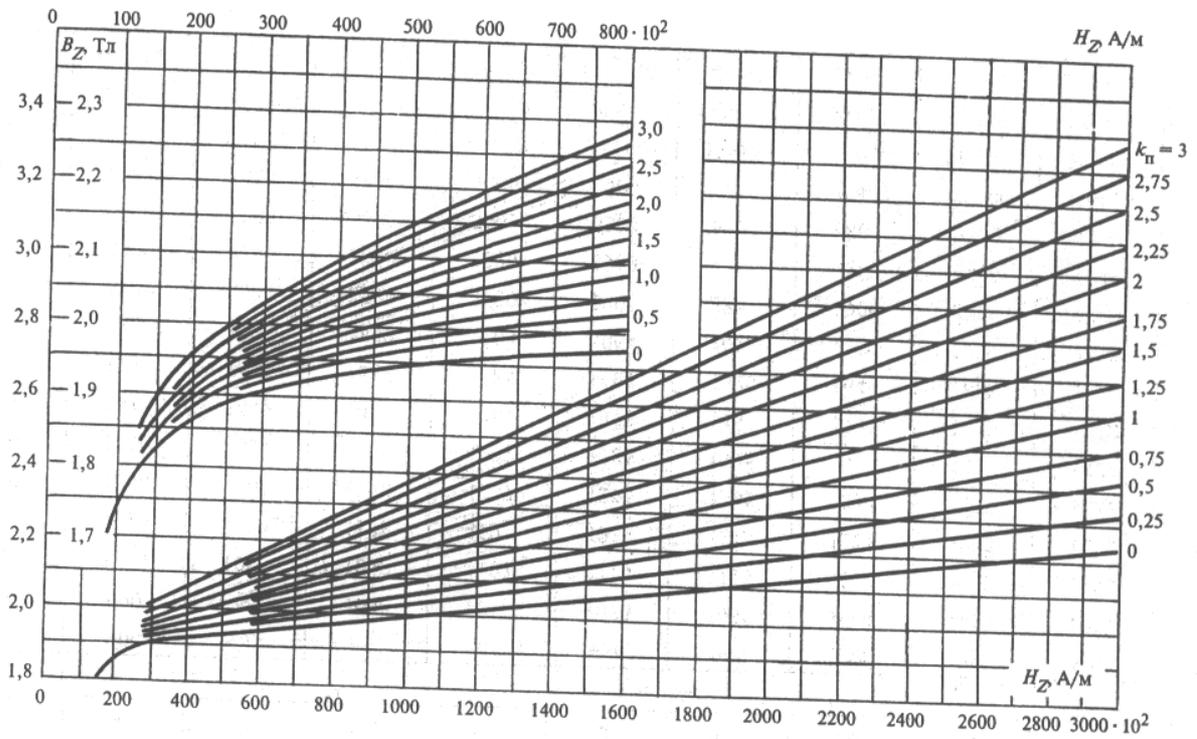
Tableau 2.2 : Tableau 2.2 : Courbe de magnétisation de l'acier électrotechnique laminé à chaud de haut alliage des marques 1511, 1512.1513

B [T]	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H, [A/m]									
0.6	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99
0.7	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
0.8	130	132	134	136	138	140	142	144	146	149
0.9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1.0	182	185	188	192	195	198	201	204	207	210
1.1	213	216	219	222	225	228	231	234	237	240
1.2	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
1.3	275	279	283	287	291	295	300	305	310	315
1.4	320	326	332	338	344	350	358	366	374	382
1.5	390	402	414	426	438	450	464	478	492	506
1.6	520	544	566	588	610	632	665	698	732	766
1.7	800	840	890	940	990	1040	1132	1224	1316	1408
1.8	1500	1542	1700	1922	2144	2366	2588	2820	3080	3450
1.9	3825	4200	4600	5200	5800	7000	8200	9400	10900	134000
2.0	16000	20000	25000	30000	----	----	----	----	----	----

Tableau 2.3 : Magnétisation de l'acier magnétique laminé à froid de type 3413 du Stator (le sens de laminage est le même que le sens des lignes du champ).



Graph 2.2 : Courbe de magnétisation de l'acier 3413 laminés à froid pour les dents du stator.



Graph 2.5 : la courbe de magnétisation des pièces forgées de rotor des turboalternateurs pour des diamètres de rotor $D_2 > 0.814m$

B [T]	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/ m]									
0.5	900	909	918	927	936	945	954	963	972	981
0.6	990	999	1008	1017	1026	1035	1044	1053	1062	1071
0.7	1080	1089	1098	1107	1116	1125	1134	1143	1152	1161
0.8	1170	1179	1188	1197	1206	1215	1224	1233	1242	1251
0.9	1260	1269	1278	1287	1296	1305	1314	1323	1332	1341
1.0	1350	1359	1368	1377	1386	1395	1404	1413	1422	1431
1.1	1440	1449	1458	1467	1476	1485	1494	1503	1512	1521
1.2	1530	1548	1566	1584	1602	1620	1644	1668	1692	1716
1.3	1740	1796	1852	1908	1964	2020	2076	2130	2188	2244
1.4	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3130	3260
1.5	3400	3540	3680	3820	3960	4100	4280	4460	4640	4820
1.6	5000	5300	5600	5900	6200	6500	6800	7100	7400	7700
1.7	8000	8300	8600	9000	9400	9900	10400	10900	11400	12000
1.8	12800	13500	14200	15000	16000	17000	18000	20000	22000	24000
1.9	26000	30500	35000	39500	46300	53000	60000	72700	85400	98000
2.0	106000	114000	122000	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000

Tableau 2.5 : Tableau de magnétisation des pièces forgées de rotor des turboalternateurs pour des diamètres de rotor $D_2 > 0.814\text{m}$

E_{10^*}	0.6	1	1.1	1.2	1.3	1.4
$E_{10}[V]$	5456	9093	10002	10912	11821	12730
$E_{10}[V]\Phi[W]$	2.663	4.438	4.881	5.325	5.769	6.213
$B_{\delta}[T]$	0.51471	0.85785	0.94363	1.02942	1.1152	1.20099
$B_{Z13}[T]$	0.92	1.54	1.7	1.85	2	2.16
$B'_{a1}[T]$	0.85	1.41	1.55	1.69	1.83	1.98
$H_{Z13}[A/m]$	225	5100	11100	20000	45000	90000
$H'_{a1}[A/m]$	140	326	450	770	2000	10100
$F_{\delta}[A]$	35159	58599	64459	70318	76178	82038
$F_{Z1}[A]$	47	1056	2298	4140	9315	18630
$F_{a1}[A]$	158	367	507	868	2254	11383
$F_{\delta Zs}[A]$	35364	60022	67263	75326	87747	112051
$\Phi_{\sigma 2}[Wb]$	0.169	0.287	0.322	0.36	0.419	0.536
$\Phi_2[Wb]$	2.832	4.725	5.203	5.685	6.188	6.748
$B_{Z(0.2)}[T]$	1.23	2.051	2.259	2.469	2.687	2.93
$B_{Z(0.7)}[T]$	0.944	1.575	1.734	1.895	2.063	2.249
$B'_{a2}[T]$	0.863	1.44	1.586	1.733	1.887	2.057
$H_{Z(0.2)}[A/m]$	1584	44000	115000	175000	225000	275000
$H_{Z(0.7)}[A/m]$	1300	4500	18000	45000	85000	130000
$H_{a2}[A/m]$	1224	2700	4740	9100	25000	154000
$F_{Z2}[A]$	232	3904	10707	17710	24955	32603
$F_{a2}[A]$	461	1017	1785	3426	9413	57981
$F_2[A]$	36057	64943	79755	96462	122115	202634
$F_{2^*}[A]$	0.56	1	1.23	1.49	1.88	3.12

Tableau I.10 : Tableau des valeurs de la caractéristique à vide de turbo alternateur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: A-KRIM GUEBLI, K-ZEROUALI, L-SILAM, «Calcul et exploitation d'un turboalternateur », mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou, 1998.
- [2]: M^{elle} T-FEDAOU, M^{elle} N-BEDJA, «Exploitation et élaboration d'un programme de Calcul des turboalternateurs de moyenne puissance », mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou, 1999.
- [3]: M.BELASSEL, « Cours du module Construction des machines électriques », Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou, année 2008/2009.
- [4]: M^{elle} O-NAIMI, M^{elle} F-BOUAM « Calcul et exploitation d'un turboalternateur », mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou, 2008.
- [5]: V.I.IZVEKOV, N.A.SERIKHIN, A.I.ABRAOV, « LA CONCEPTION DES TURBOALTERNATEURS », Moscow maison d'édition 2005
- [6]:M-GILBERT RUELLE, «Turboalternateurs, D 3530 »,
Techniques de l'ingénieur-1990 Paris
- [7]:M-GILBERT RUELLE, « Pertes dans les machines tournantes, D 3450 »,
Techniques de l'ingénieur-1990 Paris
- [8]:M-GILBERT SYBILLE, M-THEODORE WILDI, « ELECTROTECHNIQUE »,
EDITION 4.