



UCL

Projet du cours ELEC2311
Physique interne des convertisseurs électromécaniques
2007-2008

Modélisation et optimisation d'une génératrice
électrique intégrée au moteur d'un avion

B. Dehez
E. Matagne
V. Kluyskens
A. Schouleur

1. Introduction

L'objectif de l'étude est d'optimiser une génératrice à aimants permanents en fonction d'une utilisation particulière, à savoir alimenter un avion de ligne en énergie électrique en prélevant de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de l'étage basse pression des moteurs à réaction (Fig. 1).

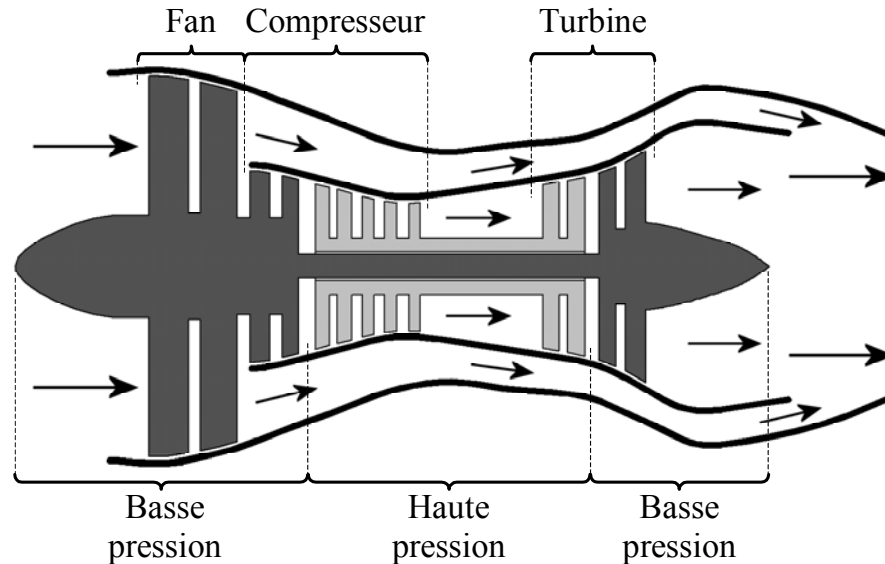


Fig. 1. Vue schématique d'un turboréacteur à double flux

Vu la complexité du système à étudier et le nombre de paramètres en jeu, il n'est pas imaginable de recourir à des outils de calcul numérique pour mener une optimisation globale du système. Afin de savoir vers quelle partie de l'espace des paramètres se situe cet optimum global, il est donc nécessaire de passer par des modèles analytiques, beaucoup moins gourmands en temps de calcul.

Le modèle analytique du système complet est composé de différents modules physiques. On retrouve évidemment les modèles magnétique et thermique propre à la génératrice mais aussi le modèle thermique du système de refroidissement de la génératrice ainsi que le modèle de la charge, ou en tout cas, de l'électronique de puissance à laquelle la génératrice sera connectée.

Afin de simplifier le modèle global, et par la même, simplifier la recherche de l'optimum, des hypothèses simplificatrices devront être posées pour chacun des modules physiques du système. La validité de ces hypothèses devra être vérifiée a posteriori.

L'étude concernant essentiellement la génératrice, ce document fournit des modèles simplifiés de son environnement, et en particulier, le modèle thermique du système de refroidissement de la génératrice ainsi que le modèle du convertisseur électronique de puissance qui y est associé.

2. Présentation du problème

2.1. Description de l'installation

La génératrice doit être entièrement comprise dans un volume ayant la forme d'un manchon, d'une longueur de 213 mm, d'un rayon extérieur de 181 mm et d'un rayon intérieur de 87 mm (Fig. 2).

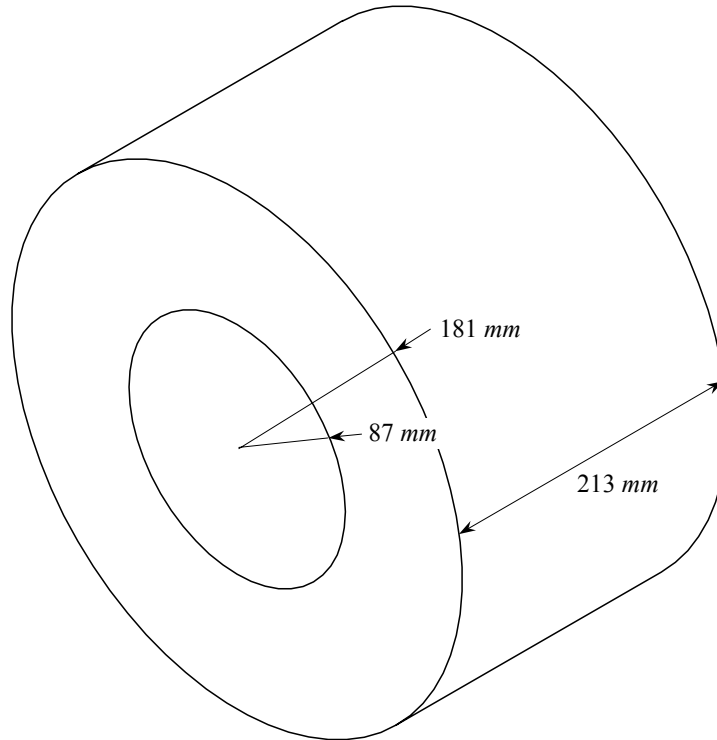


Fig. 2. Vue schématique de l'espace disponible pour placer la génératrice

Au terme d'une pré-étude, on a déjà décidé que la machine étudiée sera une génératrice à aimants permanents. Ce type de génératrice a en effet l'avantage d'offrir un très bon rendement (pertes Joule limitées au stator). De plus, il n'y a que peu de dégagement de chaleur au rotor, ce qui est heureux car il s'agit d'une partie spécialement difficile à refroidir.

Le rotor est directement fixé à l'arbre du moteur : il tourne à la même vitesse que cet arbre (pas de boîte à engrenages !). En outre, il ne dispose pas de système de suspension propre (ni paliers, ni roulements).

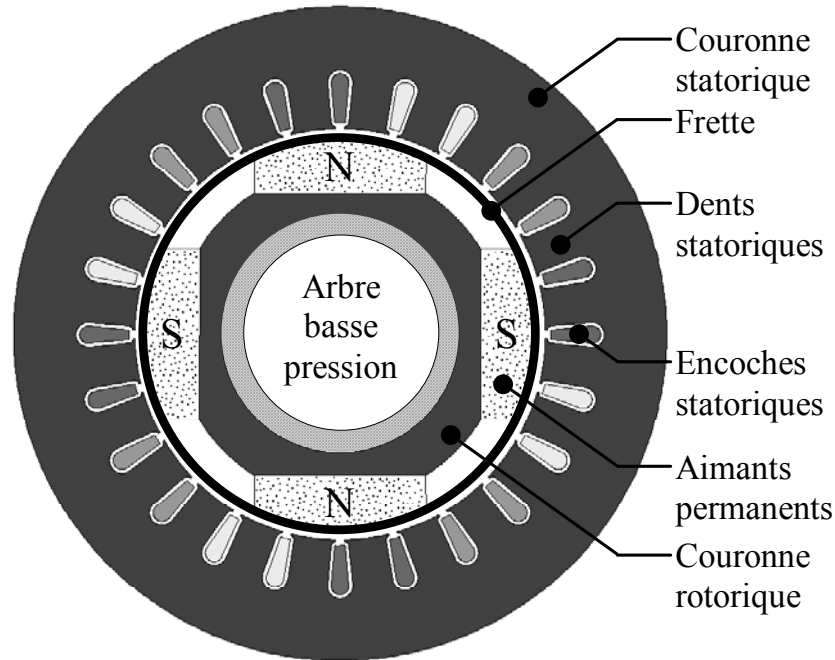
Le stator est muni d'un système triphasé d'enroulements.

L'énergie produite sera fournie à un réseau local à courant continu. La génératrice n'ayant pas de collecteur, elle produit un courant alternatif. Un convertisseur électronique de puissance AC/DC est donc nécessaire.

Le convertisseur électronique de puissance est un redresseur MLI. Sa tension nominale côté alternatif est de 250 V_{eff} si sa tension est sinusoïdale, mais il peut fonctionner à une tension plus faible ou même avec une forme d'onde non sinusoïdale pourvu que la valeur de crête de celle-ci reste inférieure à $250 \sqrt{2} = 354 V$. Il peut fournir à la génératrice du courant réactif et on supposera que celui-ci est automatiquement réglé à une valeur telle que le courant (ou la densité de courant) est en phase avec l'induction magnétique sous les pôles : cette situation est en effet, à peu de chose près, celle qui minimise les pertes de la génératrice.

2.2. Description de la génératrice

On a choisi une géométrie cylindrique et une configuration normale (rotor au centre), ce qui facilite le refroidissement par conduction thermique vers la surface extérieure de la machine. Les aimants permanents seront montés à la surface du rotor. Ils ont la forme indiquée à la figure ci-dessous. On notera qu'ils sont fixés sur un épaulement usiné sur la couronne rotorique. Leur aimantation est uniforme et orientée selon leur axe de symétrie.



Le stator est constitué d'un empilement de tôles magnétiques ayant la forme décrite à la figure ci-dessous. On notera que la partie centrale des dents est normalement de largeur constante et donc que les encoches ont une forme trapézoïdale.

Le nombre de paires de pôles, le nombre d'encoches du stator et les différentes dimensions géométriques sont laissées libres. Leur détermination optimale fait partie du but de ce projet.

2.3. Objectif du dimensionnement et contrainte

Le but de l'optimisation, à proprement parler, est de maximiser la puissance fournie par la génératrice tant qu'une puissance de **100 kW** n'est pas atteinte pour toutes les vitesses de rotation possibles du moteur, c'est-à-dire de **1200 à 4500 rpm**. Si cette puissance est atteinte, l'optimisation portera sur la masse de la génératrice.

La puissance perdue à différents régimes sera aussi calculée.

Différentes contraintes devront également être respectées, à savoir une température inférieure à **240 °C** à l'intérieur des enroulements, afin d'obtenir une durée de vie suffisante sans devoir utiliser des isolants minéraux.

Un jeu mécanique de **1 mm** minimum sera ménagé entre le rotor et le stator de la génératrice. De plus, le rotor sera entouré d'une frette de **1 mm** d'épaisseur, non magnétique, destinée à protéger les aimants.

L'ensemble de la génératrice sera entouré d'une carcasse de 3 mm d'épaisseur. Entre cette carcasse et le dos de la couronne statorique, on disposera un dispositif de refroidissement alimenté par de l'huile à 140 °C.

3. Modélisation analytique

Le modèle de la génératrice comporte deux parties relativement indépendantes, à savoir :

- Un modèle magnétique
- Un modèle thermique

Ces deux modèles font intervenir les paramètres de la génératrice : dimensions, propriétés magnétiques, thermiques et magnétiques des matériaux, ...

3.1. Modèle magnétique

Le modèle magnétique est basé sur la théorie de Maxwell de l'électromagnétisme. On admettra pour simplifier le problème que la machine est en permanence en régime établi, tant d'un point de vue électrique que d'un point de vue mécanique. On pourra simplifier le calcul du champ magnétique en faisant des hypothèses simplificatrices, **dont la validité devra être vérifiée a posteriori**.

Parmi les hypothèses simplificatrices conseillées, au moins en début d'étude, citons :

- L'hypothèse du premier harmonique : seule la composante fondamentale du champ magnétique d'entrefer (en fonction de la coordonnée azimutale θ) sera considérée.
- L'hypothèse d'une perméabilité magnétique infinie des pièces ferromagnétiques (dents et couronnes), donc d'un champ H nul dans ces pièces. Cependant, afin de vérifier la validité de cette hypothèse, le programme calculera toujours la valeur des champs B et H dans les dents et les couronnes, ainsi que la circulation du champ H dans ces parties. On pourra ainsi vérifier en cours d'étude que cette valeur reste petite par rapport aux autres forces magnétomotrices (des aimants ou des bobinages selon le cas).
- La composante radiale du champ d'entrefer B est constante sur toute l'épaisseur de l'entrefer. On peut ainsi calculer le champ d'entrefer par les méthodes simples décrites dans le livre de référence utilisé lors du cours ELEC1310. Cette hypothèse n'est cependant acceptable que si l'épaisseur effective de l'entrefer (frette et aimants compris) est petite à la fois par rapport au rayon de l'entrefer et par rapport au pas polaire.
- La génératrice est à pôles lisses, ce qui permet d'utiliser des modèles circuit du type vu au cours ELEC 1310 pour les machines synchrones.

La validité de ces hypothèses sera vérifiée. Cette vérification sera faite dès que possible, afin de pouvoir éventuellement corriger le programme en temps utile.

3.2. Modèle thermique de la génératrice

Le modèle thermique devra permettre le calcul de la température au point le plus chaud du bobinage. On supposera pour simplifier le problème que la machine est en permanence en régime thermique établi.

Parmi les hypothèses simplificatrices conseillées, au moins en début d'étude, citons :

- Les pertes de la machine se décomposent en pertes magnétiques dans les pièces ferromagnétiques (par hystérésis et par courant de Foucault) et en pertes Joule dans les conducteurs statoriques. On négligera le dégagement de chaleur par courants de Foucault au rotor, ainsi que les pertes mécaniques telles que celles dues au frottement par l'air présent dans l'entrefer et les pertes dans les roulements.
- La chaleur produite dans les têtes de bobine se répartit instantanément sur toute la longueur de la spire

Une validation de ces hypothèses est souhaitable !

3.3. Modèle thermique du système de refroidissement

On utilisera un modèle « circuit » du système de refroidissement constitué d'une « source de température » d'une valeur égale à la température d'entrée de l'huile de refroidissement (140 °C) et d'une résistance thermique R_{th} , exprimée en °C/W, égale à :

$$R_{th} = 5.37 \cdot 10^{-4} \frac{1}{L} \frac{1}{1 + 27.81 e^{0.65}} R^{0.25}$$

où :

- L , la longueur du dispositif de refroidissement en contact avec la couronne statorique ;
- e , l'épaisseur du dispositif de refroidissement ;
- R , son rayon moyen ;

sont toutes des grandeurs exprimées en mètre.

3.4. Modèle du convertisseur électronique de puissance

Un des buts de l'étude sera de fixer la puissance nominale optimale de ce convertisseur (il s'agira d'une puissance apparente puisque le courant n'est pas purement actif). On supposera que ses pertes sont proportionnelles au courant efficace, et que son rendement en régime nominal et facteur de puissance unitaire est de 97 %.

4. Validations

Afin de valider les principales hypothèses introduites au cours des phases de modélisation, nous mettrons à votre disposition différents outils :

- un logiciel de calcul de champ par éléments finis ;
- un logiciel d'analyse thermique par éléments finis ;
- une maquette possédant une structure identique à celle de la génératrice.

Cette maquette vous permettra également de valider les modèles dans leur ensemble.

5. Optimisation

La phase d'optimisation consistera à exploiter les différents modules physiques intervenant dans le modèle global du système complet au sein d'un logiciel d'optimisation spécifique. Ce logiciel, présenté en début de projet, ne demande pas de programmation à proprement parler puisqu'il suffit de lui fournir les équations de votre modèle. Il se charge ensuite de les analyser avant de vous proposer un environnement d'optimisation où les différents paramètres

de votre modèle, paramètres d'entrée (variables indépendantes) et paramètres de sortie (variables dépendantes) sont accessibles soit :

- pour leur imposer une valeur initiale ;
- pour les proposer comme fonction objectif ;
- pour les contraindre dans un intervalle de valeur ;
- ...

6. Rapports

Le travail sera effectué par groupes de trois étudiants. Des rapports d'avancement seront remis à intervalles réguliers, en fonction de la progression du projet.

Un rapport final, formé d'une compilation des rapports intermédiaires, éventuellement remaniés, sera remis par chaque groupe avant la fin du quadrimestre.

7. Liens utiles

Sites web du cours :

- www.lei.ucl.ac.be/~matagne/ELEC2311/INDEX.HTM
- www.icampus.be