
THESE CIFRE portée par EDF

Sujet de thèse

Modélisation thermique d'un turbo-alternateur de 900MW

Contexte :

L'un des moyens de lutter contre le réchauffement climatique actuel est la production d'énergie décarbonée, ce à quoi contribue l'énergie nucléaire, puisqu'elle ne génère quasiment pas de CO₂, l'un des gaz à effet de serre.

Cependant, ce changement climatique, avec ses canicules devenues régulières, contraint EDF à adapter son parc nucléaire puisqu'il peut avoir plusieurs impacts sur ses installations :

- Sur la source froide : elle peut être constituée par le captage de l'eau d'une rivière et l'augmentation d'un ou deux degrés de cette eau peut entraîner des conséquences néfastes sur le refroidissement de plusieurs composants d'un site nucléaire.
- Sur les rejets thermiques : les contraintes législatives environnementales imposent de ne pas rejeter dans les rivières, une eau de réfrigération trop chaude. Ce cas s'avère d'autant plus problématique lorsque quand le cours d'eau atteint son étiage ;
- Sur les besoins en eau : ces mêmes contraintes législatives environnementales imposent également un prélèvement maximal à ne pas dépasser pour éviter l'étiage du cours d'eau mais également la destruction de la faune et la flore. De même, le partage de la ressource en eau avec d'autres acteurs économiques s'exacerbe avec sa raréfaction (*agriculture, tourisme, etc.*) ;
- Sur l'accessibilité de certains sites : le réchauffement climatique provoque la fonte des glaces polaires qui libère du méthane (*jusqu'alors piégé dans le permafrost*) aggravant à son tour le changement climatique. L'autre conséquence de cette fonte des glaces est l'augmentation du niveau de la mer. Ainsi, l'accès à certains sites EDF s'avèreront difficiles.

Ce changement climatique et toutes ses conséquences actuelles et futures impactent fortement l'un des principaux composants du parc nucléaire, le turbo-alternateur. Cela nous conduit à mener des études sur la modélisation thermique de cette machine.

Objet de la thèse :

Le turbo-alternateur est un composant important dans le fonctionnement des parcs de production nucléaire puisqu'il permet la transformation de la puissance mécanique de la vapeur, produite par le réacteur, en puissance électrique.

Ce turbo-alternateur est soumis à de multiples contraintes dont, notamment, les contraintes thermiques. Elles ont pour origine des causes internes à l'alternateur (*par exemple, les échauffements dus au passage du courant électrique*) mais également des causes externes (*par exemple, la température ambiante de la salle des machines, l'encrassement des réfrigérants, etc.*) qui gênent l'évacuation des calories.

A ces contraintes, s'en ajoutent d'autres, comme celles liées au réseau électrique avec l'insertion des énergies renouvelables (ENR), celles liées à l'augmentation de production demandée à chaque site nucléaire (*par exemple, fortes sollicitations durant les saisons de chauffage ou de climatisation*) mais également celles liées au changement climatique (*par exemple, source froide dégradée, ressource en eau moindre*).

Pour éviter des aléas thermiques pouvant conduire à des indisponibilités du turbo-alternateur, une surveillance des températures des différentes parties de cette machine est nécessaire et elle est effectuée par l'exploitant. Cependant, certaines zones ne sont pas suivies par manque de capteurs (*zones difficiles d'accès, pièces en rotation, etc.*).

Le défi de la thèse consiste donc à créer des modèles thermiques localisés permettant de situer les points chauds et d'exploiter au plus juste l'alternateur (*production maximale vs durée de vie*).

Enjeux industriels et valeur créée :

Pourquoi la thèse ?

Constat :

Il est difficile techniquement et financièrement de rajouter de l'instrumentation sur une machine existante. De plus, il convient de connaître l'endroit pertinent où placer les capteurs, notamment les capteurs de température. Ainsi, récemment, par manque d'information, il a été impossible de se prémunir d'un aléa sur un alternateur qui a conduit une fissuration sur une pièce en cuivre. La réparation de cette pièce sera très onéreuse, sans compter la perte de production occasionnée.

Proposition :

Estimer l'échauffement des principaux composants de l'alternateur (*isolation rotorique, extrémités du circuit magnétique, plateau amortisseur de flux, plateau de serrage, etc.*) dans un contexte de changement climatique, de contraintes réseau (*normes de l'ENTSOE pour l'insertion des ENR*) ou d'augmentation de puissance saisonnière.

Enjeux industriels :

Cette thèse tend à répondre à deux enjeux pour le parc nucléaire d'EDF :

- Une prolongation au-delà de 40 ans voire jusqu'à 80 ans (*production maximale vs durée de vie*) ;
- Une disponibilité de ces machines dans un contexte de changement climatique.

Valorisation attendue :

A titre d'exemple, les pertes de production totales associées au respect de la réglementation concernant les températures et débit des fleuves sur le parc nucléaire en 2020 s'élèvent à 3,0 TWh. Si ces pertes peuvent sembler mineures actuellement, elles ne feront que croître au fil du changement climatique. Il est donc essentiel d'estimer les marges de manœuvre sur le fonctionnement de l'alternateur pour limiter ces pertes financières tout en préservant les machines.

Un autre aspect de la valorisation attendue peut être l'optimisation des coûts de maintenance par le remplacement à l'optimum technico-économique de certaines pièces de la machine (*permutations de stator et/ou rotor*). Par exemple, cumuler une révision décennale combinée avec une révision type T3 ainsi qu'une permutation du stator pour mutualiser le coût de maintenance courante et celui d'une maintenance exceptionnelle et ceci au bon moment.

Etat de l'art et ses limitations :

Etat de l'art :

En 2018, il a été réalisé une cartographie des points chauds dans le rotor d'un alternateur du parc hydraulique (*rotor à pôles saillants*).

A l'issue de l'étude, les mesures sont, en grande partie, comparables avec les résultats issus de la modélisation thermo-fluidique de la machine et elles confirment le caractère complexe de la ventilation et de la répartition des températures.

Les grandes tendances d'échauffement fluide d'une part et solide d'autre part, sont en bonne concordance entre essais et simulations. L'objectif principal d'établissement d'une cartographie des points chauds au rotor de l'alternateur est considéré atteint.

Limitations :

Plusieurs contraintes ont été constatées durant cette étude et notamment :

- L'étude a duré trois ans pour un seul point de fonctionnement étudié (*machine à vide*). Cette durée est inconcevable pour l'exploitant qui souhaite pouvoir gérer sa machine au quotidien ;
- Le calage du modèle a été permis par une sur-instrumentation lors des essais, situation qui ne sera pas possible sur les machines du parc nucléaire. Seule l'instrumentation « d'origine » sera accessible ;
- La ventilation engendre des forts gradients de températures à certains endroits. Il est donc délicat de pouvoir donner des valeurs locales précises de températures ;
- Les pertes sont appliquées de manière volumique et réparties de façon homogène dans le rotor (*Pertes Joules*) et dans les pôles (*Pertes Fer*). Il est donc impossible de localiser les points chauds ;
- Les simplifications du modèle pour que les calculs convergent, engendrent des erreurs et des imprécisions.

Verrous scientifiques :

Trois verrous scientifiques ont été identifiés, qu'il conviendrait de lever durant cette thèse. Il s'agit de :

La cartographie 3D :

L'étude nécessitera une représentation fine et correcte de la géométrie en 3D, avec des rapports de dimension locales de quelques millimètres sur un modèle global de plusieurs mètres, ceci quels que soient les alternateurs. Il conviendra donc de s'affranchir des difficultés de raffinement du maillage.

Les calculs nécessiteront de prendre en compte la rotation du rotor ainsi que les conditions aux limites du modèle.

Il ne sera pas possible de simplifier le modèle par une symétrie 2D puisque les échauffements sont très localisés.

Le recalage (assimilation de données) :

Le recalage du modèle nécessitera plusieurs variables d'entrée (*par exemple, la tension statorique, le courant statorique, la fréquence du réseau, les différentes températures, les débits d'hydrogène, d'eau, etc.*). Ces dernières ont des précisions et des fréquences d'échantillonnage différentes les

unes des autres, issues de différentes sources d'information (*Data Lake, relevés manuels, calculs, etc.*) et horodatées de manière différente.

Le temps de calcul à réduire :

Les outils, qui seront mis à la disposition des Exploitants, devront pouvoir fonctionner sur des ordinateurs de bureautique (*i.e., non boostés*). Cela implique que les temps de recalage ne soient pas trop prohibitifs, même si le modèle 3D est volumineux ;

Outils mis à disposition :

Plusieurs outils informatiques seront mis à disposition du candidat par la R&D d'EDF, à savoir :

- Le logiciel EMTP pour les calculs thermiques nodaux ;
- Le logiciel code_Saturne pour les aspects mécanique des fluides ;
- Le logiciel Syrthès pour les aspects thermiques ;
- Le logiciel code_Carmel pour les calculs EF électromagnétiques.

Calendrier de la thèse :

Le souhait est de démarrer cette thèse CIFRE en septembre 2024.

Année 1	<ul style="list-style-type: none">• Etude bibliographique ;• Construction du modèle thermique ;• Recalage de mesures (<i>assimilation de données</i>).
Année 2	<ul style="list-style-type: none">• Choix des capteurs et de leurs localisations ;• Estimation de la durée de vie « consommée » et de son coût en cas de fonctionnement « hors norme » ;• Publications.
Année 3	<ul style="list-style-type: none">• Détermination du point de fonctionnement optimal en fonction de la température de la source froide ;• Publications ;• Rédaction du mémoire de thèse ;• Soutenance de la thèse.

Informations complémentaires :

Ecole doctorale :	Université de Valenciennes
Laboratoire d'encadrement	Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'informatique Industrielles et Humaines (LAMIH) de l'Université de Valenciennes
Encadrement industriel :	EDF Recherche & Développement

Pour candidater :

Contacts :

- Thierry JACQ - EDF Lab. Paris-Saclay, thierry.jacq@edf.fr ;
- Jean-Pierre DUCREUX - EDF Lab. Paris-Saclay, jean-pierre.ducreux@edf.fr .

Eléments à fournir :

- Lettre de motivation + Curriculum Vitae ;
- Relevés de notes de l'année scolaire N et N-1 ;
- Lettre de recommandation (si possible).