

Diagnostic et surveillance des turboalternateurs de centrale nucléaire

P. Geraldo¹ et H. Yahoui²

¹ EDF

² CEGELY

COMMUNICATION DANS LES JOURNEES DU CLUB EEA

« Diagnostic en Electronique, Electrotechnique et Automatique »

17-18 Mars 2005 Lyon

Diagnostic et surveillance des turboalternateurs de centrale nucléaire

Patrick GERALDO (EDF), Hamed YAHOUÏ (CEGELY)

Résumé :

La sûreté de fonctionnement est un enjeu pour nos sociétés actuelles toujours à la recherche d'un plus grand confort de vie et d'une garantie de continuité de service. Electricité de France est une entreprise particulièrement active dans le domaine de la sûreté de fonctionnement des centrales nucléaires, puisque les performances de ces moyens de production sont liées à la disponibilité, la sécurité du personnel et la sûreté. Ainsi la plupart des matériels (machines tournantes, machines statiques, ...) sont surveillés par des systèmes qui contribuent à la sûreté de fonctionnement. Ces derniers doivent être capables de renseigner sur l'état et les contraintes subies par le système/les matériels/les composants pour en garantir la bonne marche. Ces contraintes peuvent être d'ordre électrique, thermique, mécanique nécessitant alors la recherche de signatures préventives, pertinentes et significatives du défaut.

Cette communication s'inscrit dans la thématique surveillance des alternateurs, en particulier thermique des barres statoriques qui vise à assurer la continuité de service des moyens de production électrique. Les points ci-dessous seront successivement abordés.

- Présentation générale des alternateurs (classification, technologie, principaux constructeurs, gammes de puissances et innovation dans le domaine)
- Surveillance thermique des barres statoriques (besoins et enjeux de la surveillance, contexte et principe de la surveillance thermique, outil de surveillance et application)
- Conclusion et perspectives

Mots clé : Alternateur, Echauffement des barres stator, Surveillance, Refroidissement par eau, Maintenance/Diagnostic, Modèles thermiques des barres statoriques

1. Présentation générale des alternateurs

Dans un premier temps, nous allons faire une présentation générale des alternateurs et des évolutions puis des principaux constructeurs et de leurs gammes de puissances.

1.1. Généralités - classification des alternateurs - technologie de fabrication des turboalternateurs

C'est en 1886, que William Stanley démontra pour la première fois l'efficacité de la distribution d'électricité dans le cadre de l'utilisation à des fins d'éclairage de la ville de Great Barrington dans le Massachusetts. Ce système était en alternatif monophasé et utilisait pour la première fois le transformateur comme élément élévateur puis abaisseur pour la distribution de l'énergie [1].

Une machine électrique tournante transforme l'énergie mécanique en énergie électrique (génératrice ou alternateur) ou inversement (moteur). L'essentielle de la production d'électricité est issue d'alternateurs de type synchrone, c'est-à-dire de machines dont la vitesse de rotation est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Cette machine se compose de deux parties : l'une fixe est le stator et l'autre pouvant tourner autour de son axe est le rotor. Ces deux parties cylindriques sont séparées par un entrefer de faible dimension. La machine nécessite également des systèmes annexes tels que les systèmes d'excitation, les circuits de refroidissement, ... pour assurer le bon fonctionnement de celle-ci.

Ces alternateurs se répartissent en grandes catégories liées :

- à la turbine (à vapeur ou eau)
 - centrales : nucléaires, thermiques et hydrauliques
 - au système de refroidissement stator
 - fluide de refroidissement : air, hydrogène, hydrogène et/ou eau
 - mode de refroidissement des parties actives : direct/indirect
 - ventilation axiale, axially-radiale, ...
 - au système d'excitation
 - systèmes à diodes tournantes ou systèmes à bague-balais dits statiques
- etc.

Les alternateurs se différencient également par les choix technologiques tels que :

- le nombre de paires de pôles : 1 ou 2 pôles pour les turboalternateurs,
 - la conception du stator (circuit magnétique, bobinage statorique, développantes, ...)
 - la conception du rotor (pôles lisses/pôles saillants, enroulement rotorique, frettes, ...)
- etc.

1.2. Principaux constructeurs d'alternateur et leur gamme de puissances

Les principaux acteurs (constructeurs d'alternateurs) sont les suivants [2], [3] et [4] :

- General Electric Power Systems (USA),
 - Alstom Power : né de la mise en commun des activités dans la production d'électricité des groupes ABB (Suisse, Allemagne, Finlande) et Alstom (France et Grande Bretagne),
 - Siemens (Allemagne)/Westinghouse (USA),
 - Mitsubishi Heavy Industries Power Systems (Japon),
 - Toshiba Corporation Power Systems & Services Company (Japon),
 - Hitachi Power & Industrial Systems Group (Japon),
 - Ansaldo Energia (Italie) sous licence d'autres fabricants,
 - VA Tech Elin (Autriche),
- etc.

Nota : des regroupements de constructeurs ont eu lieu, notamment Alstom et ABB (Alstom Power), ainsi que le rachat de la filiale de construction électrique de Westinghouse par Siemens. Il existe également des licences de fabrications et des accords ponctuels entre les différents constructeurs.

L'analyse du parc de production installé (centrales : hydrauliques, thermiques classiques et nucléaires, turbines à gaz) par les constructeurs montre la prédominance de trois constructeurs Alstom Power, General Electric Power Systems et Siemens KWU.

Les gammes de puissance annoncées par les constructeurs ainsi que le (ou les) fluide(s) de refroidissement des structures de la machine sont données dans le tableau ci-dessous :

Mode de refroidissement	Gamme de puissance en S(MVA)
Air	40 - 500
Hydrogène (H ₂)	300 - 550
Hydrogène (H ₂) et eau (H ₂ O)	400 - 1715

Tableau 1a : Gamme de puissances des alternateurs du constructeur Alstom Power

Mode de refroidissement	Gamme de puissance en S(MVA)
Air	35 - 190
Hydrogène (H ₂)	240 - 530
Hydrogène (H ₂) et eau (H ₂ O)	500 - 1540

Tableau 1b : Gamme de puissances des alternateurs du constructeur General Electric

Mode de refroidissement	Gamme de puissance en S(MVA)
Air	25 - 325
Hydrogène (H ₂)	200 - 1000
Hydrogène (H ₂) et eau (H ₂ O)	450 - 2000

Tableau 1c : Gamme de puissances des alternateurs du constructeur Siemens-Westinghouse

Nota : pour le refroidissement mixte (hydrogène et eau), l'eau est utilisée pour le refroidissement des barres statoriques (voir fig. 2, § 2.2), le reste de la machine est refroidie par hydrogène sous pression.

Globalement, la gamme de puissances des alternateurs se décline en fonction du mode de refroidissement (fluide et système) de la manière suivante :

- machine refroidie à air de l'ordre de 25 à 300 MVA,
- machine refroidie à hydrogène de l'ordre de 300 à 550 MVA,
- machine refroidie à hydrogène/eau pour des puissances de l'ordre de 300 à 12000 MVA (2 pôles) et jusqu'à 2000 MVA pour une machine 4 pôles.

1.3. Evolution des puissances des alternateurs et progrès actuels

Les années 70 ont été marquées par le développement d'alternateurs de forte puissance dû à l'accroissement de la demande, à la capacité des réseaux électriques et à l'intérêt économique des grands groupes de production (alternateurs de forte puissance). En effet, l'emploi de turboalternateur de grande puissance est plus économique au niveau capitalisation des pertes (rendement global plus élevé) et le prix d'investissement au kilowatt est plus faible. En 1970, des alternateurs de centrales nucléaires, de puissance unitaire 1200 MVA, ont été installés aux USA et en 1977, la première mise en service d'alternateur de 1000 MVA à 1500 tr/mn (Fessenheim) en France, etc. La réalisation de machines de forte puissance n'a été possible que par des développements dans le domaine des matériaux (diélectriques, aciers, techniques de forge,...) et des procédés de refroidissement des structures internes des machines afin de ne pas diminuer les marges de sécurité thermique et mécanique des organes.

La déréglementation récente du marché (marché très concurrentiel et nouvelles lois) de l'électricité a profondément bouleversé le marché des machines électriques tournantes (alternateurs). En effet, l'évolution mondiale du marché des machines électriques tournantes est passée d'unités de forte ou très forte puissance (> 600 MW) pour des turbines à vapeur (thermique et nucléaire) à des alternateurs de moyenne puissance de l'ordre de 250 à 400 MW pour des applications de turbine à gaz et des unités à cycle combiné. Ces turbines à combustion fossile sont utilisées pour fournir un complément de puissance (répondre à des pointes hivernales de consommation, participer à la reconstitution du réseau) et alimenter des sites isolés [5]. Par conséquent, les principales activités de recherche dans la production d'électricité se font dans le domaine des turbines à gaz, notamment des alternateurs de puissances < 500 MVA refroidis par air pour bénéficier des avantages techniques et économiques liés à ce fluide refroidissement (construction simple, pas d'auxiliaires : H₂, CO₂, huile, ..., coûts d'exploitation réduits). A titre d'exemple, le constructeur Alstom Power propose sous l'appellation TOPAIR, toute une gamme de machines allant de quelques MVA à

500 MVA [8] et [9]. Ces alternateurs ont nécessité un mode de construction plus élaboré, en particulier le système de refroidissement du rotor et du stator. Par ailleurs, l'utilisation d'isolation de classe H (180°C) développé par Alstom Power permet l'exploitation des alternateurs avec des échauffements de base en classe F (155°C), soit une marge d'échauffement par rapport aux systèmes d'isolation classe B/F actuels ou une augmentation de puissance de l'ordre de 10% sans modification des dimensions de la machine.

1.4. Innovation dans le domaine des alternateurs

Le développement des outils de simulation a permis un meilleur dimensionnement par l'estimation des grandeurs mécaniques, thermiques et électromagnétiques. Ainsi des simulations réalisées en 2D, voire même en 3D permettent de connaître le couple sur l'arbre en cas de court-circuit, l'élévation de température des têtes de bobines, la saturation du circuit magnétique, Pour les constructeurs, la connaissance de ces contraintes (efforts électromagnétiques, échauffements des structures, ...) permet une standardisation de leurs gammes de produit en fonction de la fréquence du réseau (50 ou 60 Hz) et de la puissance de la machine S(MVA) ou P(MW).

La recherche et le développement menés dans le domaine des alternateurs par les constructeurs ont permis l'émergence de nouveaux produits, dont les principaux sont les suivants :

- Powerformer (40 à 200 MW) d'Alstom Power : turboalternateur à liaison directe au réseau haute tension

Il s'agit d'un alternateur connecté directement au réseau haute tension, sans l'intermédiaire d'un transformateur élévateur. Dans cette technologie proposée par Alstom Power (initialement développé par ABB en 1998), les barres conductrices statoriques sont remplacées par des câbles à haute tension (voir figure 1 ci-dessous) [6]. Le rotor est de conception conventionnelle, refroidi par air.

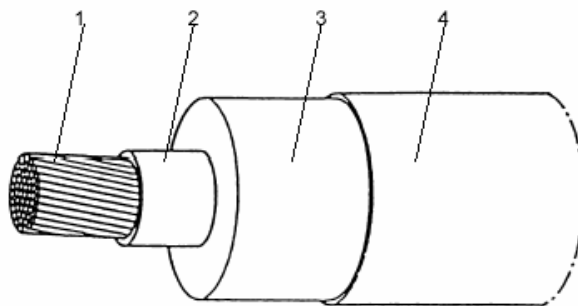


Figure 1 : Câble cylindrique utilisé dans le Powerformer

Nota : câble cylindrique : conducteur (1), couche semi-conductrice intérieure (2), isolant (3), couche semi-conductrice extérieure (4). Ce type de câble peut être utilisé à des tensions de l'ordre de la centaine de kV supprimant ainsi le transformateur élévateur de connexion au réseau [7].

- Alternateur supraconducteur

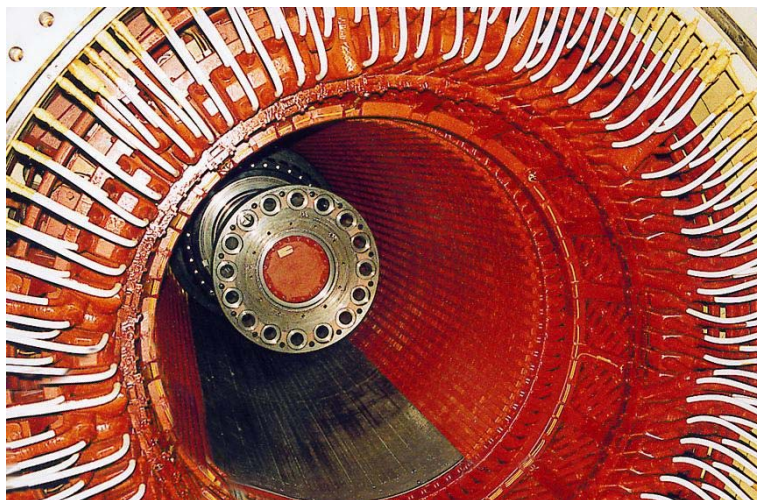
Dans cette technologie, l'enroulement rotorique est un supraconducteur, l'enroulement statorique restant de conception conventionnelle.

2. Surveillance thermique des barres statoriques d'alternateurs

L'alternateur de centrale nucléaire ($P \geq 900$ MW) est considéré comme un matériel (ou composant) critique de part sa disponibilité et ses coûts de maintenance. De ce fait, il est surveillé afin de garantir la sûreté de fonctionnement des installations, d'améliorer leur disponibilité et de réduire les coûts d'exploitation (planification des opérations de maintenance). De manière générale, la surveillance des alternateurs (électrique, vibratoire, thermique, ...) fait partie intégrante de la politique de maintenance. Les apports fonctionnels de celle-ci sont très importants et de natures diverses : prévention des risques majeurs, aide à la maintenance conditionnelle et à l'exploitation (indicateurs d'états des matériels).

2.1. Contexte de la surveillance thermique des barres

Les alternateurs de grande puissance équipant les centrales nucléaires comportent un circuit de refroidissement direct du bobinage statorique, par circulation d'eau déminéralisée à l'intérieur de conducteurs creux en cuivre insérés dans l'enroulement stator (dans la technologie Alstom et GE). Le but de ce mode de refroidissement est l'évacuation des pertes dissipées dans les barres statoriques de l'ordre de 4,5 MW pour un alternateur de 1000 MW et ceci dans un volume restreint. Ce mode d'évacuation des pertes Joules au sein même des barres stator a donné satisfaction, jusque dans les années 90, où des bouchages des conducteurs creux ont été constatés sur des alternateurs. Ces phénomènes de bouchage de conducteurs creux entraînent des échauffements anormaux des barres (conducteurs creux) et de l'isolation entre barres pouvant dépasser la classe thermique des constituants des barres statoriques. Ces points chauds conduisent à un vieillissement prématuré des diélectriques, pouvant nuire à la durée de vie du stator de la machine. Par ailleurs, ces contraintes thermiques affectent l'exploitation de la centrale, nécessitant parfois des baisses de charge [Q(MVAR) et/ou P(MW)], des indisponibilités pour maintenance (lessivage ou changement de barres), voire des arrêts fortuits ayant de lourdes conséquences technique et économique. A la suite de plusieurs bouchages des conducteurs creux ayant conduit à des pertes de productivité, Electricité de France a décidé de suivre l'évolution du comportement thermique des barres stator, c'est-à-dire l'échauffement de chaque barre du stator (voir figure ci-après) en améliorant la surveillance thermique de base équipant les alternateurs de forte puissance.



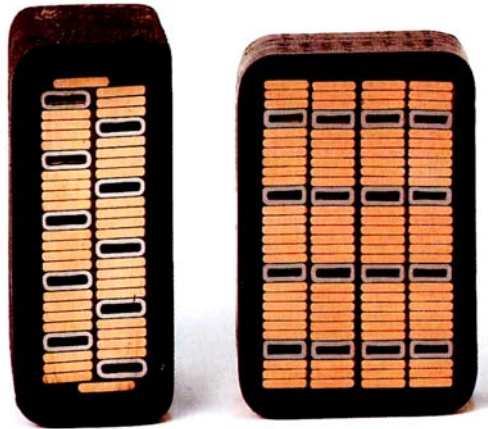


Figure 2 : Structure du stator et des barres statoriques refroidies par eau

2.2. Principe de la surveillance

Les méthodologies de surveillance peuvent être divisées en deux groupes : surveillances sans ou avec modèle. La première méthode sans modèle se résume à une reconnaissance de forme en faisant appel aux outils statistiques (tests : de moyenne, de variance, de franchissement de seuil, ...) et à l'intelligence artificielle comme par exemple les réseaux neuronaux, logique floue, La seconde méthode repose sur un modèle formel, mathématique, ... qui permet de comparer l'état réel du système/matériels/composants (observations) par rapport à l'état théorique fourni par le modèle.

Afin de détecter le plus tôt possible les prémisses d'une dégradation par échauffements, une surveillance thermique des barres statoriques des alternateurs à partir de modèle thermique a été développée pour calculer la température des barres et détecter très tôt un comportement anormal de celles-ci (surveillance prédictive). Cette approche à base de modèle permet d'évaluer les températures attendues pour les barres en fonction du mode d'exploitation (régimes d'actif et de réactif). Cette surveillance permet également de suivre l'état de santé (conduite de la machine en situation dégradée) et d'aider à la planification des opérations de maintenance préventive et corrective ainsi qu'à l'analyse après incident.

Les différentes phases de cette surveillance thermique sont les suivantes :

- l'acquisition et le traitement des données,
- l'élaboration et la validation du modèle thermique d'échauffement des barres,
- le diagnostic, qui passe par la détermination d'un seuil d'alarme significatif de l'état de bouchage des barres statoriques.

La méthode de surveillance avec modèle a pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle. Un écart entre le système réel et le modèle est alors synonyme d'un comportement anormal (voir organigramme ci-dessous).

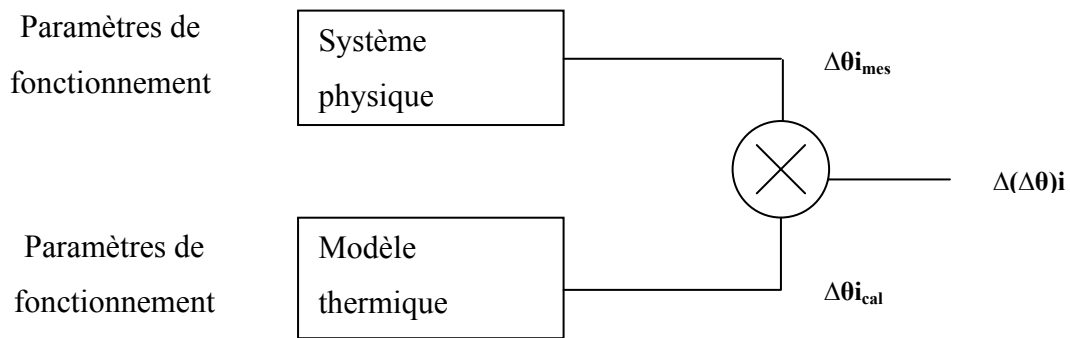


Figure 3 : Surveillance thermique basée sur un modèle

où :

$\Delta\theta_{i_mes}$: échauffement réel de la barre i

$\Delta\theta_{i_cal}$: échauffement calculé de la barre i

$\Delta(\Delta\theta)_i$: suréchauffement de la barre i

2.2.1. Paramètres de fonctionnement

Pour la surveillance thermique des barres stator de la machine, les paramètres de fonctionnement à considérer sont ceux ayant une influence sur les températures et donc sur le refroidissement des barres statoriques. Ces paramètres d'influence sont principalement d'ordre électrique, thermique et hydraulique. Ceux-ci sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Grandeurs	unité
Date de l'acquisition	JJ/MM/AAAA
Puissance active	P (MW)
Puissance réactive	Q (MVAR)
Tension entre phases	U_s (kV)
Courant statorique	I (kA)
Température d'entrée (eau froide) de la barre i	θ_e (°C)
Débit eau du circuit de de refroidissement	D (m ³ /h)
Température de sortie (eau chaude) de la barre i	θ_i (°C)

Tableau 2 : Paramètres caractérisant le refroidissement des barres

L'échauffement mesuré de la barre i est la différence entre la température eau chaude de la barre θ_i et la température de l'eau froide du circuit de refroidissement θ_e .

$$\text{Echauffement mesuré de la barre } i \quad \Delta\theta_{i_mes} = \theta_i - \theta_e$$

2.2.2. Paramètres de fonctionnement de référence

A partir des mesures de températures des barres stator de l'alternateur et de ses systèmes réfrigérants, un modèle thermique est élaboré pour évaluer le comportement thermique des enroulements statoriques.

Echauffement de la barre i

L'échauffement théorique d'une barre i est déterminé à l'aide du modèle thermique ($\Delta\theta_{i \text{ cal}}$). Celui-ci est fonction des pertes Joules en I^2 et des pertes supplémentaires en I dans la barre i et des caractéristiques du circuit de refroidissement (débit et températures).

Le modèle thermique de barre stator peut être de la forme $\Delta\theta_{i \text{ cal}} = a_i * I^2 + b_i * I$ où :

I : courant statorique, déterminé à partir de P(MW), Q(MVAR) et U(kV),

a_i, b_i : coefficients du modèle définissant la signature de la barre.

Suréchauffement de la barre statorique

Le suréchauffement d'une barre i est la différence entre l'échauffement mesuré et l'échauffement calculé à l'aide du modèle thermique de la barre.

$$\text{Suréchauffement de la barre i : } \Delta(\Delta\theta)_i = \Delta\theta_{i \text{ cal}} - \Delta\theta_{i \text{ mes}}$$

3. Outil de suivi thermique des barres statoriques

Dans le cadre d'une collaboration entre EDF/R&D et le laboratoire du CEGELY, un outil logiciel de suivi thermique des barres statoriques a été développé. Cet outil permet le traitement et la restitution automatique des grandeurs physiques définissant l'état de fonctionnement de l'alternateur et de son circuit de refroidissement statorique par eau. Il permet également l'élaboration du modèle d'échauffement des barres statoriques et le suivi temporel de l'ensemble des grandeurs électriques, hydrauliques et thermiques qui caractérise le comportement thermique des enroulements statoriques de l'alternateur.

3.1. Application

Dans un premier temps, les modèles ont été validés à partir de plusieurs régimes de fonctionnement (puissance active P, puissance réactive Q, tension stator U et courant I). Quelques résultats de l'outil de suivi thermique des barres statoriques sont présentés ci-après.

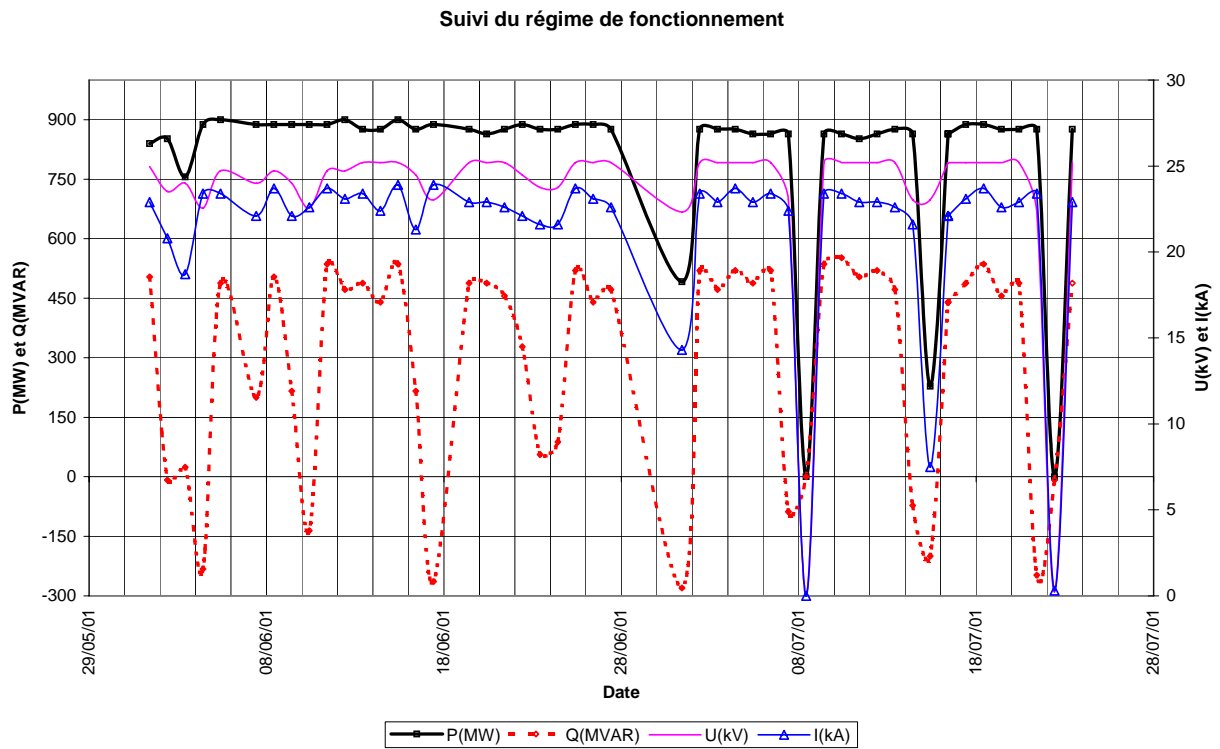


Figure 4 : Paramètres de fonctionnement (P, Q, U et I)

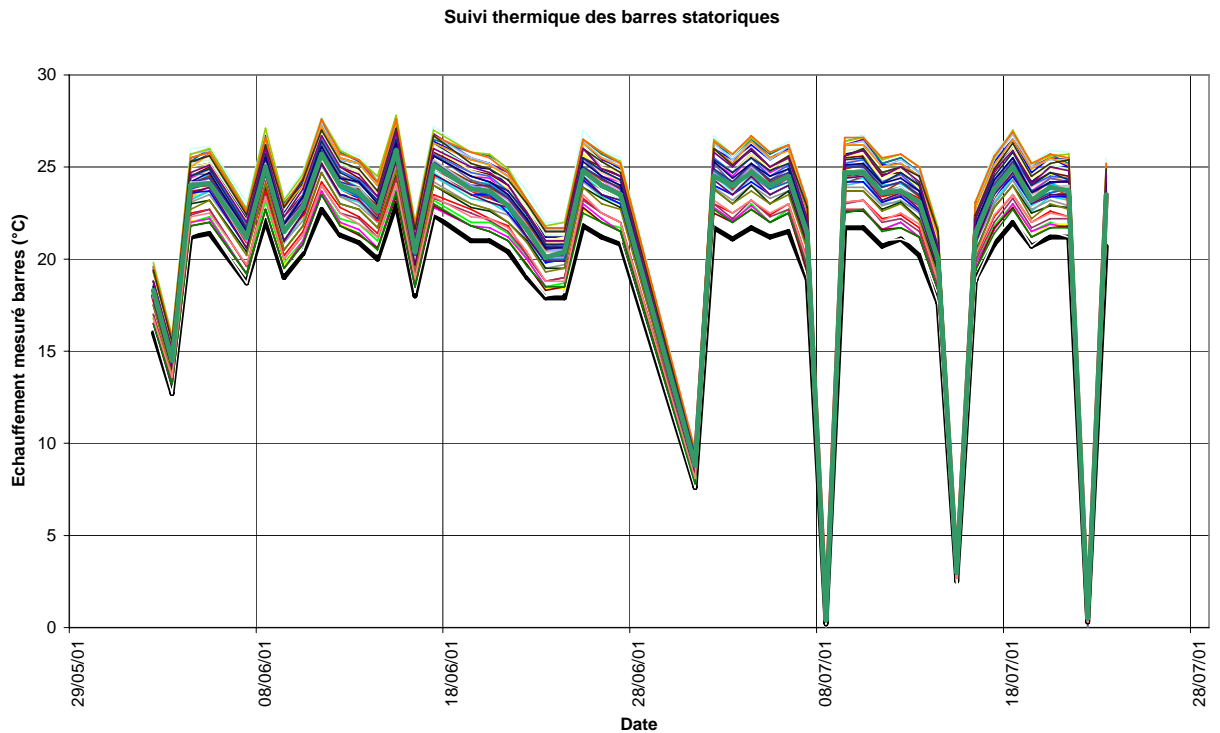


Figure 5 : Echauffement mesuré des barres statorique

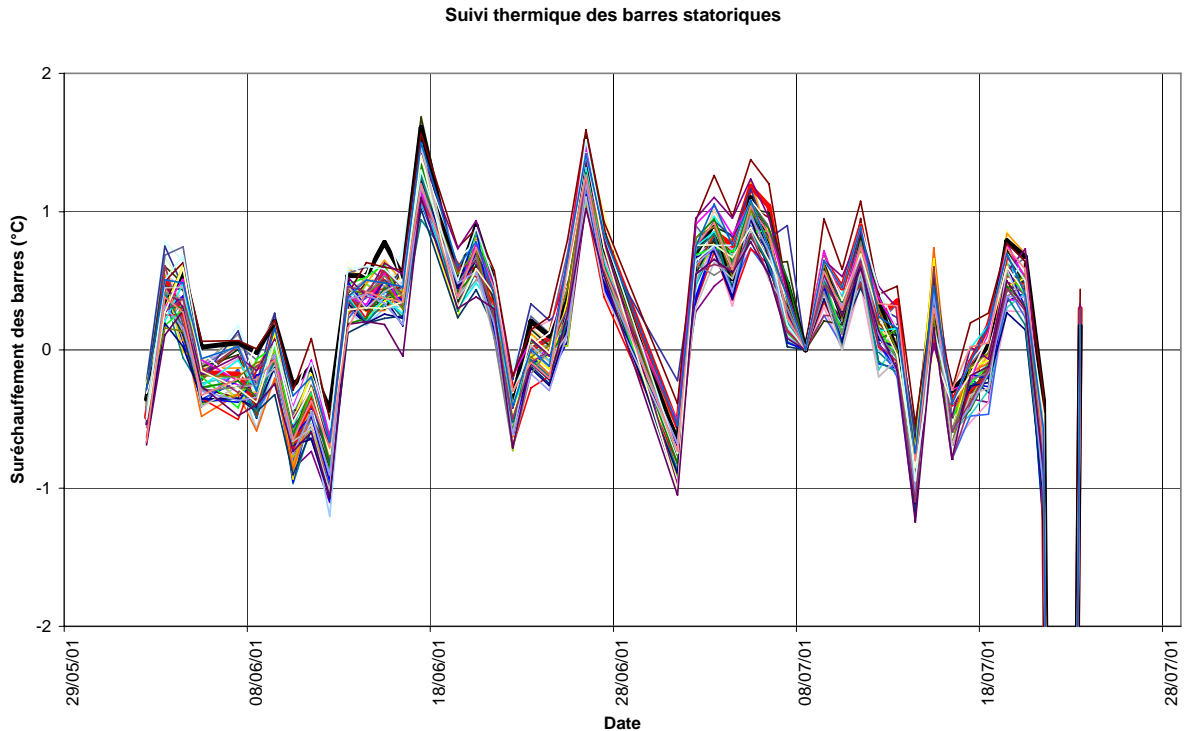


Figure 6 : Ecart suréchauffement (échauffement réel – échauffement calculé) des barres statoriques

Pour les régimes de fonctionnement stable, on obtient une assez bonne concordance entre les températures réelles des barres et le modèle thermique des barres.

4. Conclusion et perspectives

Cette étude a permis d'élaborer et de valider un modèle thermique des barres statoriques d'alternateur. Ce modèle a été implémenté dans un outil logiciel pour automatiser le suivi thermique des barres stator. Actuellement, cette méthode est utilisée lors de suspicion d'échauffement anormal, mais à terme, le modèle sera implanté dans un système de surveillance général des alternateurs du parc. Cette surveillance thermique des barres statoriques aide également à l'exploitation en régime dégradé (connaissance de la marge réelle disponible) et au diagnostic/pronostic d'état de l'enroulement stator.

En perspective de cette surveillance basée sur un modèle statique d'échauffement des barres statoriques, donc valable pour un régime d'exploitation stable (puissances active et surtout réactive données), un modèle dynamique pourrait être développé pour s'affranchir du régime de fonctionnement.

5. Références bibliographiques

- [1] Edward L. Owen, "Rediscovering William Stanley, Jr., Part 1", IEEE Industry Applications Magazine, Novembre-Décembre 2003
- [2] Plancon J, Guerin.C, Perez. J, "Alternateurs synchrones de grosse puissance - Etat du marché et principales tendances", EDF/R&D, 21 mars 2000
- [3] Geraldo P, "Systèmes de refroidissement des turboalternateurs - Etude bibliographique", EDF/R&D, 09/09/2002
- [4] Site Internet des constructeurs d'alternateurs :
- Alstom : www.alstom.com
 - ABB & Alstom Power : www.abb-alstom-power.com
 - Ansaldo : www.ansaldo.it, www.ansaldo.com
 - General Electric Power Systems : www.gepower.com
 - Hitachi : ww.hitachi.com , www.hitachi.co
 - Mitsubishi : www.mitsubishi-generators.com, www.mhi.co.jp
 - Siemens KWU : www.powergeneration.siemens.com, www.siemenswestinghouse.com
 - Toshiba : www.tic.toshiba.com
 - Va Tech Elin : www.vatech-hydro.at
- [5] IEEE Industry Applications Magazine, juillet 2004.
- [6] S. Hjarne, J. Jamali, G. Lindahl, P. Osterlund, N.-I. Landgren, I Jonas, J. Nordlund, and L. Andersson, "Powerformer standing the test at Eskilstuna combined heat and power plant", in power-Gen Conference Proceeding, Brussels, May 2001.
- [7] Mats Leijon, Alberti Backlund, "High Voltage Cables in a New Class of Generators - Powerformer", NORDIS99, 1999.
- [8] Iseli. M, Mayor. K, Sabatier. Y, Verrier. M, Zimmerli. B, "Air-cooled turbogenerator series for a changing market", CIGRE, Session 2002 11-107
- [9] GOTT. B, "Application of air-cooled generators to modern power plants", IEE 1999