

PhD topic

Intelligent control and estimation for floating wind turbines

Host laboratory: FEMTO-ST Research Institute

Thesis director (contact) : Dr. salah LAGHROUCHE – salah.laghrouche@utbm.fr

Co-advisors: Dr. Daniel DEPERNET

Funding: National Agency for Research (ANR)

Doctoral School: SPIM (Engineering Sciences and Microtechnologies), speciality Automation

Keywords: floating wind turbines, robust and adaptive control, deep learning, learning-based estimation, marine renewable energy

Scientific context:

One of the main challenges of floating wind turbines is the development of specific robust and adaptive control systems [McK_16]. Indeed, floating wind turbine systems are multivariable underactuated systems where the number of degrees of freedom (DOF) exceeds the number of control inputs (blade pitch, generator torque). Thus, the limited number of actuators makes it difficult to minimize structure motion while ensuring maximum power extraction without issuing conflicting commands to actuators or affecting other DOFs due to couplings. This particularity of the floating wind turbine implies to bring nontrivial answers to obtain the best compromise that guarantees the stability of the wind turbine and the maximization of the extracted power. In this context, very few viable control solutions exist, i.e., with an optimal production making the wind turbine economically profitable and structurally sustainable. It should be noted that the problem of control of floating wind turbines has been addressed by the automation community only for a few years and mainly by linear approaches, the use of nonlinear control approaches under realistic conditions, with consideration of the various couplings of the system, is very recent and not yet completed. Indeed, if we consider a model that represents the floating wind turbine with fidelity, it will necessarily be nonlinear and uncertain. In this case, the solution is much more complex. Hence the need to synthesize intelligent, robust and optimal control techniques for these systems in order to achieve good levels of performance in all operating areas.

The PhD thesis is part of the ANR CREATIF (Control and REAL Time simulation of Floating wind turbines and integration to grid) project which aims to implement a new "real-time" simulation tool of the "Hardware-In-The-Loop" type offering complete interaction models between the various components of a floating wind turbine, in order to: 1) develop new control and estimation architectures based on non-linear and deep learning approaches, which are efficient over a large operational domain for both energy production and wind turbine stabilization, and relatively simple to tune; 2) optimize the architectures and sizing of the energy conversion chains and their integration into the grid on technical-economic criteria. The project partners cover all the components and systems involved in the floating wind turbine process: wind turbine dynamics under the combined action of swell and wind; energy conversion chain and grid; control strategies; hardware simulation and Power-hardware-in-the-Loop.

Description of the thesis:

The first objective of the thesis is to synthesize novel robust, adaptive control and estimation solutions valid over the three operating zones of the floating wind turbine with a particular interest in the 1.5 and 2.5 transition zones. We plan to use adaptive control based on deep learning [Beno14, Shi19, Fuen20]. The effectiveness of this approach lies in the fact that these controllers use a basic, albeit partially known, physical model of the system and add a learning layer to compensate for the unknown part of the model. Through this combination, one could take advantage of the model-based design with its stability characteristics and add the advantages of the free learning model with its fast convergence and robustness to uncertainties.

Wind field reconstruction from LiDAR (Light Detection And Ranging) data has been extensively addressed in the context of fixed wind turbines [Towe14, Schli16]. However, very little work exists for floating wind turbines. To our knowledge, the only work that exists is that of EDF Energy R&D UK Center. To obtain a valid measurement on a moving support (float), stabilization gyroscopes are used to limit the movements of the LiDAR. The motions and displacements of the array are captured with accelerometers to compensate the effects on the wind measurement using post-processing. The second objective of the thesis is to develop learning-based state estimators to predict the effects of wind. The novelty of this work lies in the fact that the LiDAR motions will be reconstructed and compensated based on the wave field prediction (work done by the LHEEA, ECN) and an adequate modeling of the floating structure response. This will make it possible to get rid of the use of gyroscopes and accelerometers and thus reduce the costs while increasing the reliability of the device.

The third objective of the thesis will be to test and validate experimentally the control, estimation and optimization techniques on two experimental platforms:

- A "Power hardware in the loop" test bench at FEMTO-ST, Belfort. This system will allow the integrated and real time simulation of the complete system with the dynamics of the floating wind turbine numerically simulated and the energy conversion chain part using real power devices.
- A device evolving in a wave tank located at the LHEEA (ECN Nantes) emulating the operation of a floating wind turbine.

Presentation of the host laboratory:

The FEMTO-ST Institute (Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies, UMR 6174) is a joint research unit under the quadruple supervision of the University of Franche-Comté (UFC), the National Centre for Scientific Research (CNRS), the École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM) and the University of Technology of Belfort-Montbéliard (UTBM). Today, the FEMTO-ST Institute has 7 scientific departments and more than 700 members. The doctoral thesis will take place within the SHARPAC team of the Energy Department of the FEMTO-ST Institute in the premises the UTBM university site in Belfort. It will start in September 2021 for a period of 3 years.

Thesis funding:

This thesis will be funded by the National Agency for Research (ANR). The doctoral student will be registered at the UBFC (Université de Bourgogne Franche-Comté) and at the SPIM doctoral school (Engineering Sciences and Microtechnologies) in the speciality Automation.

Candidate profile:

The candidate will have to demonstrate a strong motivation for scientific research and very good level of English language skills. He or she will have to demonstrate a great rigour in work, method, autonomy, and ease in experimenting, analysing and presenting data. He or she must have a Master's degree or equivalent with very good academic results and a strong background in control theory and electrical engineering.

List of documents to be provided:

- CV
- A letter of motivation
- Academic transcript and ranking of Master 1 and 2
- Recommendation letter(s)

The application should be sent by e-mail to: salah.laghrouche@utbm.fr

The closing date for application is: 30/05/2021

Bibliography:

- [Beno14] M. Benosman, "Learning-Based Adaptive Control: An Extremum Seeking Approach - Theory and Applications", Elsevier, ISBN: 9780128031360, 2014.
- [Fuen20] R.Q. Fuentes-Aguilar, *et al.* Adaptive Tracking Control of State Constraint Systems Based on Differential Neural Networks: A Barrier Lyapunov Function Approach", IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, DOI: 10.1109/TNNLS.2020.2966914, 2020.
- [Li_16] X. Li, *et al.* Load Mitigation for a Floating Wind Turbine via Generalized H_∞ Structural Control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 63, NO: 1, 2016.
- [McK_16] R.McKennan *et al.*, Key challenges and prospects for large wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53,1212–1221, 2016.
- [Reih19] Reihane Rahimilarki, Zhiwei Gao, Aihua Zhang, and Richard James Binns. Robust neural network fault estimation approach for nonlinear dynamic systems with applications to wind turbine systems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 3203(c) :1-1, 2019.
- [Schli16] D. Schlipf, Lidar-Assisted Control Concepts for Wind Turbines, PhD, Univ. of Stuttgart.
- [Shi19] X. Shi *et al.* Design of adaptive backstepping dynamic surface control method with RBF neural network for uncertain nonlinear system, Neurocomputing 330, 2019.
- [Shi_17] Y. Shi, *et al.* Advanced Control in Marine Mechatronic Systems: A Survey, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol: 22, No: 3, 2017.
- [Towe14] P. Towers, *et al.* Jones, "Real-time wind field reconstruction from LiDAR measurements using a dynamic wind model and state estimation", WIND ENERGY, <https://doi.org/10.1002/we.1824>.

Sujet de thèse

Commande et estimation intelligentes pour les éoliennes flottantes

Laboratoire d'accueil : Institut de Recherche FEMTO-ST

Directeur de thèse (contact) : Salah LAGHROUCHE – salah.laghrouche@utbm.fr

Codirecteur de thèse : Daniel DEPERNET

Financement : Agence Nationale de la Recherche (ANR)

Ecole doctorale : Sciences Pour l'ingénieur et Microtechnique, spécialité Automatique

Mots clés : éoliennes flottantes, contrôle robuste et adaptatif, deep learning, estimation, apprentissage en ligne, énergies marines renouvelables

Contexte scientifique :

L'un des principaux défis des éoliennes flottantes est le développement de systèmes de contrôle robustes et adaptatifs spécifiques [McK_16]. En effet, les systèmes d'éoliennes flottantes sont des systèmes sous-actionnés multivariés où le nombre de degrés de liberté (DL) dépasse le nombre d'entrées de commande (pas de pale, couple de la génératrice). Ainsi, le nombre limité d'actionneurs rend difficile la minimisation des mouvements de la structure tout en assurant une extraction maximale de la puissance sans émettre des commandes contradictoires aux actionneurs ou sans affecter d'autres DL en raison des couplages. Cette particularité de l'éolien flottant implique donc d'apporter des éléments de réponse non triviaux pour obtenir le meilleur compromis qui garantit la stabilité de l'éolienne et à la maximisation de la puissance extraite. Dans ce contexte, très peu de solutions de contrôle viables, c'est-à-dire avec une production optimale rendant l'éolienne économiquement rentable et structurellement durable, existent. Il faut noter que le problème de la commande d'éoliennes flottantes n'est abordé par la communauté automatique que depuis quelques années et principalement par des approches linéaires, l'utilisation d'approches de commande non linéaires dans des conditions réalistes, avec prise en compte des différents couplages du système, est très récente et pas encore aboutie. En effet, si l'on considère un modèle qui représente l'éolienne flottante avec fidélité, celui-ci sera forcément non linéaire et incertain. Dans ce cas, la solution s'avère beaucoup plus complexe. D'où le besoin de synthétiser des techniques de commande intelligentes, robustes et optimales pour ces systèmes afin d'atteindre de bons niveaux de performances sur toutes les zones de fonctionnement.

La thèse de doctorat s'inscrit dans le contexte du projet ANR CREATIF (Control and REAL Time simulation of Floating wind turbines and integration to grid) qui vise à mettre en œuvre un nouvel outil de simulation « temps réel » de type « Hardware-In-The-Loop » offrant des modèles d'interactions complets entre les différents composants d'une éolienne flottante, et ce afin de : développer de nouvelles architectures de commande et d'estimation basées sur des approches non linéaires et

d'apprentissage, efficaces sur un large domaine opérationnel tant pour la production d'énergie que pour la stabilisation de l'éolienne, et relativement simples à régler ; optimiser les architectures et le dimensionnement des chaînes de conversion de l'énergie et leur intégration au réseau sur des critères technico-économiques. Les partenaires du projet couvrent la totalité des composants et des systèmes concernés par le processus de l'éolienne flottante : dynamique de l'éolienne sous l'action conjuguée de la houle et du vent ; chaîne de conversion de l'énergie et réseau ; stratégies de commande ; simulation hardware et Power-Hardware-in the-Loop.

Descriptif de la thèse :

Le premier objectif de la thèse consiste en la synthèse de solutions novatrices de commande et d'estimation robustes, adaptatives, valables sur les trois zones de fonctionnement de l'éolienne flottante avec un intérêt particulier pour les zones de transition 1.5 et 2.5. Nous envisageons de faire appel à la commande adaptative basée sur l'apprentissage profond [Ben014, Shi19, Fuen20]. L'efficacité de cette approche réside dans le fait que ces contrôleurs utilisent un modèle physique de base du système, bien que partiellement connu, et y ajoutent une couche d'apprentissage pour compenser la partie inconnue du modèle. Par cette combinaison, on pourrait tirer parti de la conception basée sur un modèle, avec ses caractéristiques de stabilité, et y ajouter les avantages du modèle d'apprentissage libre, avec sa convergence rapide et sa robustesse aux incertitudes.

La reconstruction de champs de vent à partir des données LiDAR (Light Detection And Ranging) a été largement traitée dans le cadre des éoliennes fixes [Towe14, Schli16]. Cependant, il existe très peu de travaux pour les éoliennes flottantes. À notre connaissance, les seuls travaux qui existent sont ceux d'EDF Energy R&D UK Center. Pour obtenir une mesure valide sur un support mobile (flotteur) des gyroscopes de stabilisation sont utilisés pour limiter les mouvements du LiDAR. Les mouvements et déplacements de l'ensemble sont captés avec des accéléromètres pour en compenser les effets sur la mesure de vent à l'aide d'un post-traitement. Le second objectif de la thèse est d'élaborer des estimateurs d'état basés sur l'apprentissage en ligne pour prédire les effets du vent. La nouveauté de ces travaux réside dans le fait que les mouvements du LiDAR seront reconstruits et compensés en s'appuyant sur la prédiction du champ de vagues (travaux fait par le LHEEA, ECN) et une modélisation adéquate de la réponse de la structure flottante. Ceci permettra de s'affranchir de l'utilisation des gyroscopes et des accéléromètres et ainsi réduire les coûts tout en augmentant la fiabilité du dispositif.

Le troisième objectif de la thèse sera de tester et de valider expérimentalement les techniques de commande, d'estimation et d'optimisation sur deux plateformes expérimentales :

- Un banc d'essai de type « Power hardware in the loop » à FEMTO-ST, Belfort. Ce système va permettre la simulation intégrée et en temps réel du système complet avec la dynamique de l'éolienne flottante simulée numériquement et la partie chaîne de conversion de l'énergie utilisant des dispositifs de puissance réels.
- Un dispositif évoluant dans un bassin à vagues situé au LHEEA (ECN Nantes) émulant le fonctionnement d'une éolienne flottante.

Présentation du laboratoire d'accueil :

L'institut FEMTO-ST (Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies, UMR 6174), est une unité mixte de recherche, placée sous la quadruple tutelle de l'Université de Franche-Comté (UFC), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM) et de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Aujourd'hui, l'institut FEMTO-ST compte 7 départements scientifiques et plus de 700 membres. La thèse de doctorat se déroulera au sein de l'équipe SHARPAC

du département Energie de l'Institut FEMTO-ST sur le site universitaire de l'UTBM à Belfort. Elle débutera à partir de septembre 2021 pour une durée de 3 ans.

Financement de la thèse :

Cette thèse sera financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Le doctorant ou la doctorante sera inscrit à l'UBFC (Université de Bourgogne Franche-Comté) et à l'école doctorale SPIM (Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechnique) dans la spécialité Automatique.

Profil du candidat :

Attester d'une motivation importante pour la recherche scientifique et d'un très bon niveau en langue anglaise. Il ou elle devra faire preuve d'une grande rigueur de travail, de méthode, d'autonomie, d'aisance dans l'expérimentation, l'analyse et la présentation des données. Il ou elle devra être titulaire d'un Master 2 ou équivalent avec de très bons résultats académiques et avoir de solides connaissances en automatique et en génie électrique.

Documents à fournir :

- CV
- Lettre de motivation
- Relevés de notes avec classements en M1 et M2
- Lettre(s) de recommandation

Le dossier est à envoyer par courrier électronique à : salah.laghrouche@utbm.fr

Date limite de candidature : 30/05/2021

Bibliographie :

- [Beno14] M. Benosman, "Learning-Based Adaptive Control: An Extremum Seeking Approach - Theory and Applications", Elsevier, ISBN: 9780128031360, 2014.
- [Fuen20] R.Q. Fuentes-Aguilar, *et al.* Adaptive Tracking Control of State Constraint Systems Based on Differential Neural Networks: A Barrier Lyapunov Function Approach", IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, DOI: 10.1109/TNNLS.2020.2966914, 2020.
- [Li_16] X. Li, *et al.* Load Mitigation for a Floating Wind Turbine via Generalized H_∞ Structural Control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 63, NO: 1, 2016.
- [McK_16] R.McKenna *et al.*, Key challenges and prospects for large wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53,1212–1221, 2016.
- [Reih19] Reihane Rahimilarki, Zhiwei Gao, Aihua Zhang, and Richard James Binns. Robust neural network fault estimation approach for nonlinear dynamic systems with applications to wind turbine systems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 3203(c) :1-1, 2019.
- [Schli16] D. Schlipf, Lidar-Assisted Control Concepts for Wind Turbines, PhD, Univ. of Stuttgart.
- [Shi19] X. Shi *et al.* Design of adaptive backstepping dynamic surface control method with RBF neural network for uncertain nonlinear system, Neurocomputing 330, 2019.
- [Shi_17] Y. Shi, *et al.* Advanced Control in Marine Mechatronic Systems: A Survey, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol: 22, No: 3, 2017.
- [Towe14] P. Towers, *et al.* Jones, "Real-time wind field reconstruction from LiDAR measurements using a dynamic wind model and state estimation", WIND ENERGY, <https://doi.org/10.1002/we.1824>.