

Sujet de thèse

Détection d'arcs électriques via l'utilisation des réseaux de neurones informés par la physique

(English version below)

Contexte

Un arc électrique est une décharge disruptive fort courant capable de s'auto-entretenir à faible tension. Son étude appartient au domaine de la physique des plasmas.

Si les réseaux « Legacy » ont appris à vivre avec la probabilité non nulle d'apparition de ce défaut, les causes et conséquences d'apparition de ce défaut étant connues, il n'en est plus de même pour les réseaux dédiés à la propulsion qu'elle soit tout électrique ou hybride. La criticité des dégâts étant souvent assimilée à l'énergie déployée par le défaut face à la susceptibilité aux dommages des matériaux en contact direct ou indirect avec l'arc. On peut ainsi imaginer l'impact que pourrait avoir un arc de forte puissance dans un tel réseau (KV/MW) si sa durée devait excéder quelques millisecondes ! Fort de l'augmentation de tension ainsi envisagée et de la forme d'onde DC, le risque et les conséquences des défauts d'arcs électriques sont accrus. Ce constat combiné à un environnement contraint (zones confinées, zones à risques tel que FFLZ par exemple, zones en environnement sévère, ...) a poussé les ingénieurs du système EWIS à réaliser des essais d'arc électriques forte puissances et ont abouti aux conclusions suivantes :

Lorsque l'on génère un arc électrique dont la puissance dépasse plusieurs centaines de kW et dont la durée de vie n'est pas contrôlable, il n'est plus possible d'en mitiger les conséquences sur les seuls choix de matériaux « arc-résistant » et de design guides dans l'environnement confiné et les contraintes safety inhérentes à l'aéronautique civile.

C'est pourquoi, la détection et la suppression de ce défaut deviennent inévitables. Les systèmes de détection d'arc électriques qui n'étaient alors pas obligatoires sur les réseaux « legacy » le seront alors très certainement sur les réseaux propulsifs envisagés.

La détection d'arcs électriques est importante pour la sécurité électrique, car les arcs peuvent provoquer des incendies, endommager l'équipement électrique et représenter un risque pour les personnes. Pour détecter les arcs électriques, plusieurs technologies et méthodes sont utilisées, notamment : la surveillance par les capteurs de courant, les capteurs de lumière, l'analyse des signaux électriques, les caméras thermiques, etc.

Objectifs

L'objectif de la thèse proposée sera de coupler IA et physique pour la modélisation et la détection précoce d'arcs électriques. Les outils IA visés sont les Physics-Informed Neural Networks (PINNs). Des données expérimentales seront disponibles pour alimenter ces modèles. D'autre part, les équations physiques pour décrire l'évolutions des arcs à prendre en compte sont bien connues (Maxwell, Faraday, Navier-Stokes, etc).

Les enjeux importants de la thèse seront comme suit:

- **Modélisation des arcs électriques** : Développer des modèles PINNs pour décrire de manière précise les arcs électriques en prenant en compte les équations physiques qui les régissent. Comme vérification des calculs (ou en besoin d'apprentissage), des simulations physiques

appelées MHD (Magnéto-Hydro-Dynamique) pourront être réalisées pour toutes les géométries envisagées et ceci dans l'équipe de SafranTech E&E

- **Entraînement des réseaux** : Entraîner les réseaux neuronaux pour prédire la présence d'arcs électriques en utilisant des données d'observation et les équations physiques pertinentes.
- **Détection précoce** : Mettre au point des techniques de détection précoce des arcs électriques en se basant sur les modèles PINNs
- **Validation expérimentale** : Tester les modèles PINNs et les méthodes de détection sur des données expérimentales réelles provenant de systèmes électriques de Safran. Ces données seront disponibles pour plusieurs géométries « type » et permettront d'éprouver les modèles PINNs sur des cas reproductibles et contrôlables.

PhD Proposal

Detection of electric arcs using physics-informed neural networks

Context

An electric arc is a high-current disruptive discharge capable of self-sustaining at low voltage. Its study belongs to the field of plasma physics.

While legacy networks have learned to live with the non-zero probability of this fault occurring, since the causes and consequences are known, the same cannot be said for networks dedicated to propulsion, whether all-electric or hybrid. The criticality of the damage is often equated with the energy deployed by the fault compared with the susceptibility to damage of the materials in direct or indirect contact with the arc. We can therefore imagine the impact that a high-power arc could have in such a network (KV/MW) if its duration were to exceed a few milliseconds! Given the increase in voltage and the DC waveform, the risk and consequences of arc faults are increased. This observation, combined with a constrained environment (confined areas, high-risk zones such as FFLZ, severe environment zones, etc.), prompted the EWIS engineers to carry out high-power electric arc tests, leading to the following conclusions:

When an electric arc is generated whose power exceeds several hundred kW and whose lifetime is not controllable, it is no longer possible to control it.

When an electric arc is generated, the power of which exceeds several hundred kW and the lifetime of which cannot be controlled, it is no longer possible to mitigate the consequences solely by choosing 'arc-resistant' materials and design guides in the confined environment and safety constraints inherent in civil aeronautics.

This is why the detection and elimination of this fault is inevitable. Arc detection systems, which were not mandatory on legacy networks, will certainly be required on the propulsion networks envisaged.

Arc detection is important for electrical safety, because arcs can cause fires, damage electrical equipment and pose a risk to people. To detect arcs, several technologies and methods are used, including: monitoring by current sensors, light sensors, electrical signal analysis, thermal cameras, etc.

Objectives

The aim of the proposed thesis will be to couple AI and physics for the modeling and early detection of electric arcs. The AI tools targeted are Physics-Informed Neural Networks (PINNs). Experimental data will be available to feed these models. In addition, the physical equations to describe the evolution of arcs to be taken into account are well-known (Maxwell, Faraday, Navier-Stokes, etc).

The major challenges of the thesis will be as follows:

- **Modeling electric arcs:** Developing PINNs models to describe electric arcs accurately, taking into account the physical equations that govern them. As a check on the calculations (or as a learning tool), physical simulations called MHD (Magneto-Hydro-Dynamics) could be carried out for all the geometries envisaged in the SafranTech E&E team.
- **Network training:** Train neural networks to predict the presence of electric arcs using observation data and the relevant physical equations.
- **Early detection:** Develop techniques for the early detection of electric arcs based on PINNs models.

- **Experimental validation:** Test PINN models and detection methods on real experimental data from Safran electrical systems. This data will be available for several "typical" geometries and will enable the PINNs models to be tested on reproducible and controllable cases.

Skills and qualifications

- End of engineering degree / Master's degree in a relevant field (e.g., computer science, ML/AI, Statistics ...)
- Excellent understanding of machine learning and physics basics. Familiar with recent Artificial Intelligence: transformers, diffusion model, auto-encoder...etc.
- Excellent programming skills, especially with Python, Pytorch,
- Autonomous and able to quickly adapt to recent scientific literature / technologies.

This PhD topic is participating to the Université Paris-Saclay EU COFUND DeMythif.AI program : <https://www.dataia.eu/actualites/cofund-demythifai-appel-sujets-de-these>. **It is reserved to international students who have spent less than 12 months in France in the last 3 years.** The candidates will be evaluated by a jury that will select 15 PhD to start in fall 2024. The successful candidates will be fully funded for 3 years, have access to specific scientific and non-scientific training, and be fully part of the Université Paris-Saclay AI community. The aim of this Ph.D. research is to strengthen collaboration with Safran group. The thesis is accompanied by a collaborative contract with Safran, ensuring the environment, interaction with experts, and data availability.

Supervisors

- Mustapha Lebbah, Université Paris-Saclay - UVSQ Versailles Campus - DAVID Lab
- Thierry Lebey, HDR, SAFRAN TECH E&E, Toulouse.
- Hatem Hajri, PHD, SAFRAN TECH, Magny Les Hameux

How to apply

https://adum.fr/as/ed/voirproposition.pl?site=PSaclay&matricule_prop=51640&langue=en

References

-C Abadie, T Billard, T Lebey. Partial discharges in motor fed by inverter: From detection to winding configuration. IEEE Transactions on Industry Applications 55 (2), 1332-1341

-Etienne Goffinet, Mustapha Lebbah, Hanane Azzag, Giraldo Loïc, Anthony Coutant. Functional Non-Parametric Latent Block Model: a Multivariate Time Series Clustering Approach for Autonomous Driving Validation. Computational Statistics and Data Analysis. 2022.

-F Breit, E Dutarde, J Saiz, T Lebey, D Malec, S Dinculescu. Partial discharge detection in power modules 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference.

-Forest, F., Cochard, Q., Noyer, C., Joncour, M., Lacaille, J., Lebbah, M., & Azzag, H. (2020). Large-scale Vibration Monitoring of Aircraft Engines from Operational Data using Self-organized Models. *Annual Conference of the PHM Society*, 12(1), 11.

-Forest, F., Mourer, A., Lebbah, M., Azzag, H., and Lacaille, J. (2021). An Invariance-guided Stability Criterion for Time Series Clustering Validation. In International Conference on Pattern Recognition (ICPR).

-M Raissi, A Yazdani, GE Karniadakis. Hidden fluid mechanics: Learning velocity and pressure fields from flow visualizations *Science* 367 (6481), 1026-1030

-M Raissi, GE Karniadakis. Hidden physics models: Machine learning of nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics* 357, 125-141

-M Raissi, P Perdikaris, GE Karniadakis. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational physics* 378, 686-707

-T Billard, T Lebey, F Fresnet. Partial discharge in electric motor fed by a PWM inverter: off-line and on-line detection. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 21 (3), 1235-124

