

# Amélioration des performances et de la fiabilité des unités de génération d'hydrogène par électrolyse

Projet ELHySE — Chaire Régionale d'application Pays de la Loire

Thèse CIFRE : Entreprise COMECA, Le Mans — laboratoire IREENA, Saint-Nazaire

Démarrage : 1<sup>er</sup> Septembre 2022

## Contacts :

COMECA, Jérôme Deniaud, directeur de site : [j.deniaud@comeca-group.com](mailto:j.deniaud@comeca-group.com)

IREENA, Jean-Christophe Olivier, maître de conférences HDR, [jean-christophe.olivier@univ-nantes.fr](mailto:jean-christophe.olivier@univ-nantes.fr)

**Résumé** — Pour répondre à l'échelle mondiale aux prochaines échéances de transition vers une société décarbonée, l'hydrogène s'avère être un vecteur d'avenir prometteur. Les engagements pris par la commission européenne vont d'ailleurs dans ce sens en visant une puissance installée de production d'hydrogène d'au moins 6 GW à l'horizon 2024, pour ensuite atteindre plus de 40 GW à l'horizon 2030 [1]. Cette montée en puissance se veut graduelle, en ciblant dans un premier temps de la production d'hydrogène à partir d'énergie électrique issue du réseau européen, sans distinction quant à la provenance de cette énergie afin de permettre la maturation industrielle de l'écosystème H<sub>2</sub>. Une seconde phase consistera ensuite à favoriser la production d'hydrogène totalement décarboné en l'adossant notamment aux solutions de production d'énergies renouvelables, telles que l'éolien, le photovoltaïque ou la production de biogaz.

L'entreprise COMECA, située au Mans, développe depuis plus de 10 ans des solutions de conversion d'énergie électrique de forte puissance. Une grande part des applications visées porte sur la charge et la décharge de batteries électrochimiques stationnaires ou embarquées, les interfaces de puissance allant de quelques dizaines de kW jusqu'au MW. Très récemment, et du fait des nouvelles directives européennes et nationales, le marché autour de la production d'hydrogène est en pleine croissance, et en particulier dans le développement et la mise en œuvre de solutions à base d'électrolyseurs. Il s'avère que l'entreprise COMECA dispose de toutes les compétences nécessaires au développement de solutions opérationnelles pour l'interfaçage de ces Électrolyseurs stationnaires avec le réseau de distribution, sur une large gamme de puissances. Néanmoins, il existe encore aujourd'hui un certain nombre d'inconnues quant au comportement à long terme de ces dispositifs. Il semble donc important pour les fabricants et intégrateurs de telles solutions de disposer de moyens de suivi et de surveillance de l'état de santé et de performances des Électrolyseurs, afin de disposer d'une part d'un réel retour d'expérience, et d'autre part de pouvoir anticiper certains défauts de fonctionnement et ainsi contribuer à la mise en place d'outils de maintenance préventive.

L'objectif visé par le projet de Chaire est de chercher des solutions de surveillance et de suivi d'état de santé des Électrolyseurs de forte puissance, en s'appuyant au maximum sur les degrés de liberté offerts par le convertisseur de puissance lui-même, afin d'être le moins intrusif possible, tout en restant au plus proche du cœur de la réaction électrochimique. L'expertise de l'IREENA dans le domaine de la modélisation et du diagnostic d'organes électrochimiques complexes, associée à la compétence en électronique de puissance et leur intégration système de COMECA, permettront d'aboutir à des solutions nouvelles et originales dans le suivi de l'état de santé de ces dispositifs de forte puissance.

**Mots clés** : diagnostic ; électronique de puissance ; hydrogène ; électrolyseur ; contrôle-commande

## Programme scientifique

### 1) Etude bibliographique (10 mois)

Cette première partie dédiée à l'état de l'art sera décomposée en deux grandes problématiques qui concerneront :

- *Les modèles multi-physiques d'ordre réduit d'électrolyseurs, en vue de leur diagnostic*
- *La synthèse de méthodes de diagnostic de piles à combustible et d'électrolyseurs en ligne*

Dans un premier temps, nous chercherons à identifier les principaux phénomènes physiques en jeu dans le fonctionnement des piles et électrolyseurs. En effet, la littérature est beaucoup plus dense concernant les outils de diagnostic de piles comparé aux électrolyseurs. Ces deux dispositifs étant très similaires dans leur structure et leur fonctionnement, il sera envisagé de s'appuyer dans un premier temps sur les travaux portant sur ces deux organes. Entre autres, nous nous intéresserons au problème de la détection de défauts dus au vieillissement des différents composants formant le cœur des cellules d'électrolyseurs (membrane, catalyseur, collecteurs, ...). Nous essayerons autant que possible de retenir des modèles suffisamment réduits pour nous permettre d'envisager leur intégration en temps réel sur des systèmes de calcul embarqués standard. Nous pourrons dans cette partie nous appuyer sur le modèle multi-physique développé dans le cadre de précédents travaux du laboratoire IREENA avec le LTEN [7-9]. Dans un second temps, nous regarderons les différentes méthodes de diagnostic des électrolyseurs de type PEM et Alcalin. Nous identifierons dans la littérature les outils existants permettant de faire ce diagnostic dans des conditions de fonctionnement instationnaires. Nous dégagerons ainsi leurs éventuelles limites vis à vis de la capacité de ces outils à être appliqués en ligne et en temps réel. De plus, nous rechercherons des structures d'algorithme compatibles avec la nature de modèle multi-physique, qui sera dynamique en temps et pourra reposer sur une modélisation spatiale 1D ou 2D.

### 2) Modélisation des électrolyseurs et mise en œuvre de l'outil de diagnostic (12 mois)

Cette deuxième partie traitera de la mise œuvre du modèle multi-physique des électrolyseurs, et de la réduction éventuelle de ce modèle, en vue de l'implanter en temps réel sur un système de calcul embarqué. Nous partirons ainsi des modèles identifiés dans la littérature et déjà développés lors de nos précédents travaux, pour les adapter à l'outil de diagnostic retenu. Compte tenu de la nature multi-physique et fortement nonlinéaire des phénomènes en jeu en cœur de cellule, nous privilégierons un algorithme à erreur de sortie. Il sera également envisagé de comparer cette approche de diagnostic avec un algorithme à erreur d'équation de type filtre de Kalman, qui reposera sur un modèle très simplifié d'électrolyseur. Nous nous référerons cette fois encore aux précédents travaux développés par l'équipe d'encadrement de ce travail [7-9]. Dès cette phase de mise en place de l'outil de diagnostic, nous chercherons à intégrer les spécificités de l'interface d'électronique de puissance, pour que cette dernière puisse être utilisée comme organe de pilotage et de mesure. En particulier, nous chercherons à intégrer la bande passante des différents canaux de mesure, les impédances des filtres passifs et des lignes de raccordement, ainsi que l'influence de l'étage de puissance fonctionnant en commutation sur les capacités de détection de certains des paramètres physiques diagnostiqués.

### 3) Mise en œuvre et validation expérimentale (8 mois)

Cette troisième partie sera dédiée à la mise en œuvre de l'outil de diagnostic. Cette validation expérimentale s'appuiera sur les ressources matérielles et logicielles de l'IREENA et de COMECA. L'originalité reposera sur l'utilisation de convertisseurs de puissance conçus par la société COMECA et dédiés aux électrolyseurs. Nous chercherons ainsi à être le moins intrusif possible en s'appuyant sur les boucles de régulation et sur les chaînes de mesures existantes. L'outil de diagnostic sera alors intégré directement au cœur de l'unité de calcul de régulation. La validation expérimentale sur un électrolyseur réel de forte puissance sera envisagée, en fonction des moyens disponibles au moment des essais.

#### 4) Rédaction et Valorisation (6 mois)

Un travail de valorisation sera mené en parallèle des trois parties citées précédemment, au travers de la participation à des colloques nationaux et internationaux, à la participation à des GdR et à la publication des travaux dans des revues internationales avec comité de lecture. Les 6 derniers mois seront pleinement consacrés à la rédaction du manuscrit de thèse et à la préparation de la soutenance.

#### Références

- [1] Powering a climate-neutral economy: Commission sets out plans for the energy system of the future and clean hydrogen, European Commission, Press release, 8 juillet 2020.
- [2] C. Rakousky, U. Reimer, K. Wippermann, S. Kuhri, M. Carmo, W. Lueke, D. Stolten, Polymer electrolyte membrane water electrolysis: Restraining degradation in the presence of fluctuating power, *Journal of Power Sources*, Volume 342, 2017.
- [3] U. Babic, M. Tarik, T. J. Schmidt, L. Gubler, Understanding the effects of material properties and operating conditions on component aging in polymer electrolyte water electrolyzers, *Journal of Power Sources*, Volume 451, 2020.
- [4] L. Vichard, F. Harel, A. Ravey, P. Venet, D. Hissel, Degradation prediction of PEM fuel cell based on artificial intelligence, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, 2020.
- [5] M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 146, 2021.
- [6] H. Liu, J. Chen, D. Hissel, J. Lu, M. Hou, Z. Shao, Prognostics methods and degradation indexes of proton exchange membrane fuel cells: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 123, 2020.
- [7] S. Chevalier, B. Auvity, J.C. Olivier, C. Josset, D. Trichet, M. Machmoum, *Detection of Cells State-of-Health in PEM Fuel Cell Stack Using EIS Measurements Coupled with Multiphysics Modeling. Fuel Cells*, volume 14, 2014.
- [8] S. Chevalier, J.-C. Olivier, C. Josset, B. Auvity, Polymer electrolyte membrane fuel cell operating in stoichiometric regime, *Journal of Power Sources*, Volume 440, 2019.
- [9] E. Schaeffer, F. Auger, Z. Shi, P. Guillemet, L. Loron. *Comparative Analysis of Some Parametric Model Structures Dedicated to EDLC Diagnosis. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), 387-396, 2016.

# Improved performance and reliability of hydrogen electrolysers

ELHySE project — Pays de la Loire

**CIFRE thesis:** Company COMECA, Le Mans — IREENA lab, Saint-Nazaire  
**Démarrage :** 09/01/2022

## Contacts :

COMECA, Jérôme Deniaud, head manager : [j.deniaud@comeca-group.com](mailto:j.deniaud@comeca-group.com)

IREENA, Jean-Christophe Olivier, associate professor, [jean-christophe.olivier@univ-nantes.fr](mailto:jean-christophe.olivier@univ-nantes.fr)

**Subject** — To answer the upcoming global transition to a carbon-free society, hydrogen is proving to be a promising vector for the future. The commitments made by the European Commission go in this direction by targeting an installed hydrogen production capacity of at least 6 GW by 2024, and then reach more than 40 GW by 2030. This ramp-up is intended to be gradual, initially targeting the production of hydrogen from electrical energy from the European grid, without distinction as to the origin of this energy in order to allow the industrial maturation of the H<sub>2</sub> ecosystem. A second phase will then consist in promoting the production of fully decarbonized hydrogen by backing it up in particular with renewable energy production solutions, such as wind, photovoltaics or biogas production.

COMECA, located in Le Mans, has been developing high-power electrical energy conversion solutions for more than 10 years. A large part of the targeted applications concerns the charging and discharging of stationary or on-board electrochemical batteries, with power interfaces ranging from a few tens of kW to MW. Very recently, and due to the new European and national directives, the market around hydrogen production is growing, and in particular in the development and implementation of electrolyzer-based solutions. It turns out that COMECA has all the necessary skills to develop operational solutions for the interfacing of these stationary electrolysers with the distribution network, on a wide range of powers. Nevertheless, there are still a number of unknowns about the long-term behavior of these devices. It therefore seems important for manufacturers and integrators of such solutions to have means of monitoring the state of health and performance of electrolysers, in order to have on the one hand real feedback of experience, and on the other hand to be able to anticipate certain defaults and thus contribute to the implementation of preventive maintenance tools.

The objective of the project is to seek solutions for monitoring and monitoring the health status of high-power electrolysers, relying as much as possible on the degrees of freedom offered by the power converter itself, in order to be as intrusive as possible, while remaining as close as possible to the heart of the electrochemical reaction. IREENA's expertise in the field of modeling and diagnosis of complex electrochemical organs, combined with COMECA's competence in power electronics and their system integration, will lead to new and original solutions in monitoring the state of health of these high-power devices.

**keywords:** diagnostics, power electronics, hydrogen, electrolyzer, control

## Références

[1] Powering a climate-neutral economy: Commission sets out plans for the energy system of the future and clean hydrogen, European Commission, Press release, 8 juillet 2020.

[2] C. Rakousky, U. Reimer, K. Wippermann, S. Kuhri, M. Carmo, W. Lueke, D. Stolten, Polymer electrolyte membrane water electrolysis: Restraining degradation in the presence of fluctuating power, Journal of Power Sources, Volume 342, 2017.

# Improved performance and reliability of hydrogen electrolysers

ELHySE project — Pays de la Loire

**CIFRE thesis:** Company COMECA, Le Mans — IREENA lab, Saint-Nazaire  
**Démarrage :** 09/01/2022

## Contacts :

COMECA, Jérôme Deniaud, head manager : [j.deniaud@comeca-group.com](mailto:j.deniaud@comeca-group.com)

IREENA, Jean-Christophe Olivier, associate professor, [jean-christophe.olivier@univ-nantes.fr](mailto:jean-christophe.olivier@univ-nantes.fr)

**Subject** — To answer the upcoming global transition to a carbon-free society, hydrogen is proving to be a promising vector for the future. The commitments made by the European Commission go in this direction by targeting an installed hydrogen production capacity of at least 6 GW by 2024, and then reach more than 40 GW by 2030. This ramp-up is intended to be gradual, initially targeting the production of hydrogen from electrical energy from the European grid, without distinction as to the origin of this energy in order to allow the industrial maturation of the H<sub>2</sub> ecosystem. A second phase will then consist in promoting the production of fully decarbonized hydrogen by backing it up in particular with renewable energy production solutions, such as wind, photovoltaics or biogas production.

COMECA, located in Le Mans, has been developing high-power electrical energy conversion solutions for more than 10 years. A large part of the targeted applications concerns the charging and discharging of stationary or on-board electrochemical batteries, with power interfaces ranging from a few tens of kW to MW. Very recently, and due to the new European and national directives, the market around hydrogen production is growing, and in particular in the development and implementation of electrolyzer-based solutions. It turns out that COMECA has all the necessary skills to develop operational solutions for the interfacing of these stationary electrolysers with the distribution network, on a wide range of powers. Nevertheless, there are still a number of unknowns about the long-term behavior of these devices. It therefore seems important for manufacturers and integrators of such solutions to have means of monitoring the state of health and performance of electrolysers, in order to have on the one hand real feedback of experience, and on the other hand to be able to anticipate certain defaults and thus contribute to the implementation of preventive maintenance tools.

The objective of the project is to seek solutions for monitoring and monitoring the health status of high-power electrolysers, relying as much as possible on the degrees of freedom offered by the power converter itself, in order to be as intrusive as possible, while remaining as close as possible to the heart of the electrochemical reaction. IREENA's expertise in the field of modeling and diagnosis of complex electrochemical organs, combined with COMECA's competence in power electronics and their system integration, will lead to new and original solutions in monitoring the state of health of these high-power devices.

**keywords:** diagnostics, power electronics, hydrogen, electrolyzer, control

## Références

[1] Powering a climate-neutral economy: Commission sets out plans for the energy system of the future and clean hydrogen, European Commission, Press release, 8 juillet 2020.

[2] C. Rakousky, U. Reimer, K. Wippermann, S. Kuhri, M. Carmo, W. Lueke, D. Stolten, Polymer electrolyte membrane water electrolysis: Restraining degradation in the presence of fluctuating power, Journal of Power Sources, Volume 342, 2017.

- 
- [3] U. Babic, M. Tarik, T. J. Schmidt, L. Gubler, Understanding the effects of material properties and operating conditions on component aging in polymer electrolyte water electrolyzers, *Journal of Power Sources*, Volume 451, 2020.
- [4] L. Vichard, F. Harel, A. Ravey, P. Venet, D. Hissel, Degradation prediction of PEM fuel cell based on artificial intelligence, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, 2020.
- [5] M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 146, 2021.
- [6] H. Liu, J. Chen, D. Hissel, J. Lu, M. Hou, Z. Shao, Prognostics methods and degradation indexes of proton exchange membrane fuel cells: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 123, 2020.
- [7] S. Chevalier, B. Auvity, J.C. Olivier, C. Josset, D. Trichet, M. Machmoum, *Detection of Cells State-of-Health in PEM Fuel Cell Stack Using EIS Measurements Coupled with Multiphysics Modeling. Fuel Cells*, volume 14, 2014.
- [8] S. Chevalier, J.-C. Olivier, C. Josset, B. Auvity, Polymer electrolyte membrane fuel cell operating in stoichiometric regime, *Journal of Power Sources*, Volume 440, 2019.
- [9] E. Schaeffer, F. Auger, Z. Shi, P. Guillemet, L. Loron. *Comparative Analysis of Some Parametric Model Structures Dedicated to EDLC Diagnosis. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), 387-396, 2016.