

再生可能エネルギー由来水素ステーションの運用方策 に関する検討（その3）

Electrolysis System Operation Strategies for a Hydrogen Refueling Station using Renewable Energy Sources (3)

安芸 裕久*・戸田 雅久*・須貝 徳善*・小林 将大*
Hirohisa Aki Masahisa Toda Tokuyoshi Sugai Masahiro Kobayashi
石田 政義*・杉本 一郎**・谷口 行伸***・藤澤 彰利***
Masayoshi Ishida Ichiro Sugimoto Yukinobu Taniguchi Akitoshi Fujisawa

Commercial hydrogen refueling stations (HRSs) to supply hydrogen to fuel cell vehicles (FCEVs) have been constructed since 2013, and there are 92 HRSs as of March 2018 in Japan. Power-to-Gas (P2G) based on renewable energy resources (RESs), i.e. low-carbon hydrogen contributes to the mitigation of CO₂ emission. We developed a mid-scale polymer electrolyte membrane (PEM) electrolysis system using photovoltaics (PV) cooperated with a HRS. In this paper, modeling of the PEM electrolysis system through measurement of an experimental PEM electrolyzer is introduced. Through computer simulation implemented the model, a relation between generation capacity of PV system and capacity factor of the PEM electrolysis system, and an improvement of the capacity factor compensating electricity through power grid without increasing carbon dioxide emission in the HRS are analyzed quantitatively.

Keywords: Power-to-Gas, PEM electrolysis, renewable energy resource, hydrogen refueling station

1. はじめに

欧州諸国では、2012 年から再生可能エネルギー（RES: Renewable Energy Resource）を活用した、Power-to-Gas (P2G) 実証事業が始まり、2017 年第 1 四半期の時点では、70 プラント（水電解槽の合計容量 = 約 30MW）が稼働・建設されている¹⁾。またその内、40 プラントがドイツに位置している。2017 年 1 月の世界経済フォーラムにおいて、エネルギー・運輸・製造業のリーディングカンパニーにより Hydrogen Council（水素協議会）が発足し²⁾、同年 11 月に、2050 年の世界の水素社会ビジョンを公表した³⁾。この報告書では、2050 年までに世界の最終エネルギー消費の 18 % を水素で賄うことができ、その結果として、CO₂ 排出量を年間 6Gt 削減でき、年間 2.5 兆ドルの市場と 3 千万人の雇用を創出できると推計している³⁾。またドイツ政府は、水素ステーション（HRS）プログラムとして、2023 年に 450 箇所、2030 年に 1,000 箇所の整備計画を公表している⁴⁾。

わが国でも、政府において 2016 年 3 月に水素・燃料電池ロードマップ⁵⁾、2017 年 12 月に水素基本戦略⁶⁾が策定さ

れ、2020 年度までに、100 箇所程度の RES 由来水素ステーション（RES-HRS）の整備が計画されている⁶⁾。また 2018 年 3 月に日本水素ステーションネットワーク合同会社（JHyM）が設立され、官民目標として、2020 年度までに 160 箇所の HRS の整備、燃料電池自動車（FCEV）4 万台の普及が計画されている⁷⁾。

筆者らは、2016–2017 年度に環境省「中規模（1.5kg/h 程度）の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術開発・実証」事業に参画し、太陽光発電（PV）、蓄電池（LiB）および系統電力（Grid）により水電解槽プラント（EL-Plant）により低炭素水素を製造し、併設する HRS に供給する、太陽光・蓄電池・系統-水電解槽連系システム（PV&LiB&Grid-EL 連系システム）のシステム合理化策や運用方策について研究を行ってきた。

これまで、PV&LiB&Grid-EL 連系システム（図 1）の運用方策を立案するための評価指標・制約条件と基本的な考え方、EL-Plant の設備利用率を改善するためのシステム容量設計等について報告した⁸⁾⁹⁾。本稿では、欧米の先行研究事例を示すと共に、実験システム⁸⁾による連系システムを構成する各システム・機器性能の計測とそのモデル化、シミュレーションによる連系システムの合理化策・系統電力補完運用方策等について述べる。

*筑波大学 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
E-mail aki@kz.tsukuba.ac.jp

**株式会社エネルギー・生活科学研究所
〒563-0022 大阪府池田市旭丘 3-6-2

***株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所
〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5

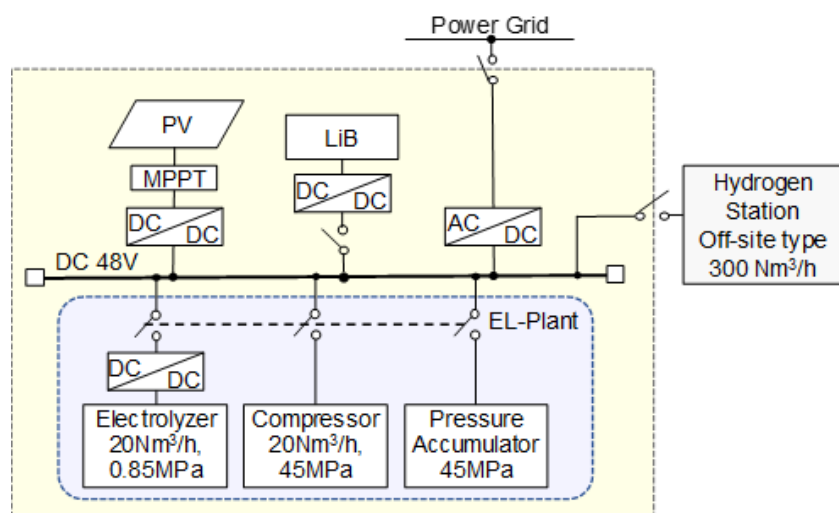


図1 太陽光発電(PV)と蓄電池(LiB)と系統(Grid)-水電解槽プラント(EL-Plant)連系システムの構成（電力系統）⁸⁾

2. 欧米の先行研究事例

欧州では、風力発電 (WT) や PV といった自然変動電源 (VRE : Variable Renewable Energy) の増加による電力系統への対策として、P2G に着目がなされている。2007–2016 年の 10 年間に於いて、RES が電源構成で 13.5% (EU 28 カ国では 16.1-29.6%), 最終エネルギー消費構成で 6.5% (同 10.5-17.0%) 増加した¹⁰⁾。VRE の増加により電力余剰等の問題が生じるが、V2G は、余剰電力を水素に変換し、天然ガスパイプラインに注入して長期的な電力貯蔵¹²⁾を行う仕組みであり、VRE 普及を支える技術として確立しつつある¹¹⁾。

固体高分子形水電解槽 (PEM-EL: Proton Exchange Membrane Electrolyzer), PV および電力系統を連系する方式として、直流連系を用いる場合が、交流連系の構成に比べてシステム効率が 7–8%高いとの報告があり¹³⁾、本研究でも同様のシステム構成を採用している (図 1)。

また、P2G の中核となる PEM-EL (スタック) のエネルギー変換効率については、125A(85°C)の定常状態で 71.0–72.5%¹⁴⁾、および 60A(70°C)で 73%¹⁵⁾の報告、商用のエネルギープラント (6MW, 1,006Nm³/h) の計測の報告¹⁶⁾はあるが、商用 HRS に併設して連携稼働する、PV を主たる電源とする水電解槽プラント (EL-Plant) の計測・モデル化の事例はない。

3. 実験システムによるシステム・機器の計測とモデル化

EL-Plant の実運用上の制約の把握には、水素製造特性や動特性等の取得が必要であるが、実機では詳細な計測は困難なため、PV&LiB&Grid-EL 連系システムの小規模実験システムを構築して実験を行った。この実験システムを用いて、

- PV&LiB&Grid-EL 連系システムを構成するシステム・機器の特性計測とモデル化

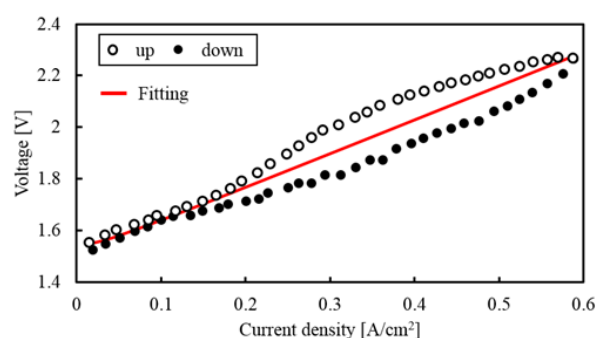


図2 実験システムにより取得した水電解スタックの電流-電圧特性

- EL-Plant のエネルギー変換効率 (部分負荷特性) の推定とモデル化
- PV 発電出力の変動に対応した水電解スタック (PEM-EL) の動特性の計測

等を行い、後段のシミュレーションモデルに反映した。一例として、図 2 に水電解スタック (PEM-EL) の電流-電圧特性の実測値と、それをもとに一次近似したフィッティング式を示す。

4. シミュレーションによるシステム合理化策と運用方策

研究の第 1 段階として、PV&LiB&Grid-EL 連系システムのうち、LiB を除いた PV&Grid-EL 連系システムを対象としたシミュレーションを行った。システム設計・運用のための評価指標を EL-Plant 設備利用率とし、EL-Plant 製造水素の CO₂ 排出係数がナフサ改質水素の CO₂ 排出係数 (= 1.13kg-CO₂/Nm³-H₂) 以下となるようにした。以下にシミュレーション結果を示す。なお、日射量と気温データは、つくば市の 2012 年度 (1 年間)、10 分間隔のデータを用いた。

4.1 PV 発電容量と EL-Plant 定格容量のシステム合理化策

はじめに、機器容量のうち、PV 容量について、EL-Plant 設備利用率 ($CF_{EL-Plant}$, 式 (1)) との関係調べるため、PV 定格発

電容量を変化させてシミュレーションを行った。EL-Plant の容量(定格入力電力($C_{EL-Plant}$),実測結果に基づく)は110Kw で一定とし,EL-Plant は PV 発電電力に応じて部分負荷運転を行うものとした。

$$CF_{EL-Plant} = \frac{H2_{EL-Plant}}{H2_{Max_EL-Plant} \times T_{Period}} \quad (1)$$

ここで, $H2_{EL-Plant}$: EL-Plant の水素製造量 (Nm³/h), $H2_{Max_EL-Plant}$: EL-Plant の定格水素製造量 (=20Nm³/h), T_{Period} : 1 年の累計時間 (=8,760 h) とする。

図 3 にシミュレーション結果として, PV 発電容量と EL-Plant 設備利用率の関係を示す。この結果から,

- ・PV 発電容量と EL-Plant 定格入力電力の比率($C_{PV}/C_{EL-Plant}$) が 50-150% 付近の範囲では,EL-Plant 設備利用率はほぼ線形に増加する
- ・150%以上の範囲では設備利用率の増加割合が減少し, EL-Plant 定格入力に対して PV 発電容量が過剰となることがわかった。

つまり, PV 発電容量と EL-Plant の定格入力電力を同程度にする ($C_{PV}/C_{EL-Plant}=100\%$) よりも, PV 発電容量を 1.3-1.5 倍程度にすることで, PV 発電電力が増加して設備利用率の増加に寄与する。例えば, $C_{PV}/C_{EL-Plant}$ が 0.5 の時, $CF_{EL-Plant}$ が 6%であるのに対して, $C_{PV}/C_{EL-Plant}$ を 1.5 とすると, $CF_{EL-Plant}$ が 21%にまで増加する。

4.2 PV 発電電力に応じた系統電力補完の運用方策

次に,EL-Plant の設備利用率を向上させる方法として, PV 発電電力 (EL-Plant の入力電力) が小さい場合に, 系統電力により補完することにより,EL-Plant をエネルギー変換効率が高い範囲で稼働させることを検討した。

系統電力による補完に際し, HRS 供給水素の環境性を低下させないように,系統電力による補完量を制限することとした。系統電力の CO₂ 排出係数 (0.525kg-CO₂/kWh,東京電力 2012 年) は PV 発電電力と比べて大きく,系統電力による補完への依存が大きくなると, HRS 供給水素の CO₂ 排出係数も大きくなってしまふ。そこで, EL-Plant の入力電力に対して補完閾値 (X kW) を設定し, PV 発電電力が補完閾値以下の場合に限って, その差分を系統電力で補完するという制限を課した。

図 4 にシミュレーション結果として, PV と EL-Plant の定格容量の割合および EL-Plant 設備利用率と系統電力による補完閾値の関係を示す。この結果から,

- ・PV 定格発電容量が増加するにつれて, 系統電力の補完量 (補完閾値) も増加する
- ・PV 発電電力を系統電力で補完することによって, EL-Plant の設備利用率が 7-10%増加することがわかった。

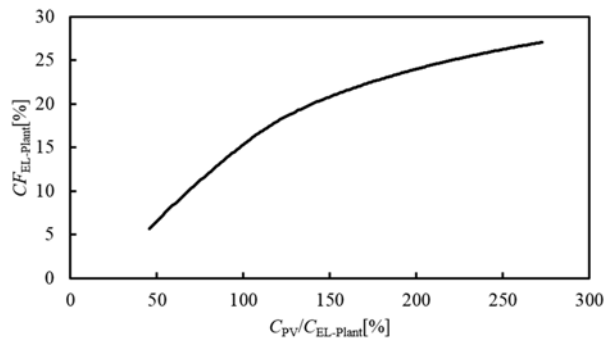


図 3 EL-Plant 定格入力電力に対する PV 定格発電容量の割合と EL-Plant 設備利用率の関係

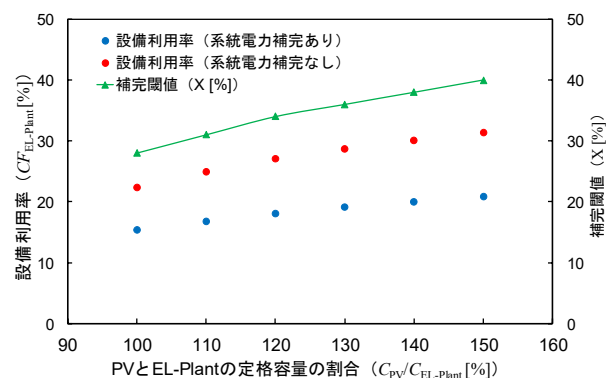


図 4 PV と EL-Plant の定格容量の割合および EL-Plant 設備利用率と系統電力による補完閾値の関係

つまり, EL-Plant の定格入力電力に対して, PV 容量を適正な範囲 (1.3-1.5 倍) とし, PV 発電電力を系統電力で補完 (補完閾値 = 40%程度) することで, EL-Plant の設備利用率を 2 倍以上改善させることが可能となる。例えば, 系統補完がない場合は $CF_{EL-Plant}$ が 21%であるのに対して, 系統補完閾値を 40%とした場合は $CF_{EL-Plant}$ が 31%に増加した。

5. まとめ

本稿では, PV 発電電力を用いて水素を製造する PV&Grid-EL-Plant 連系システムを対象とし, システム設計合理化と運用方策等に関する知見を得ることを目的としたシミュレーションを行った。シミュレーションモデルには, 実験システムと実機を用いたシステム特性計測の結果を反映した。シミュレーションの結果, 以下の知見を得た。

- ・EL-Plant 設備利用率向上のためには, PV 定格発電容量を EL-Plant の定格入力電力に対して 1.3-1.5 倍程度とするべきである。
- ・その上で, 系統電力を用いて, 補完閾値 40%程度まで補完すると, HRS 供給水素の CO₂ 排出係数を低下させることなく, EL-Plant 設備利用率をさらに増加させることができる。

謝辞

本研究は、平成 29 年度環境省委託事業「中規模（1.5hg/h 程度）の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術の開発・実証」の一部として実施された。

参考文献

- 1) European Powertogas; White Paper, Power-to-gas in a Decarbonized European Energy System based on Renewable Energy Sources, 13 September 2017.
- 2) Hydrogen Council HP; The Hydrogen Council – An Introduction, <http://hydrogencouncil.com/> (アクセス 2018.3.25)
- 3) Hydrogen Council; Hydrogen scaling up - A sustainable pathway for the global energy transition, 13 November 2017.
- 4) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Energie für Deutschland, The Mobility and Fuels Strategy of the German Government (MFS), 15 July 2013.
- 5) Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Press; Compilation of the Revised Version of the Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells, 22 March 2016.
- 6) METI, ANRE, Press; Basic Hydrogen Strategy Determined, 26 December 2017.
- 7) METI, ANRE, Press; Japan H2 Mobility, a Company for Development Hydrogen Stations, Established, 5 March 2018.
- 8) 安芸, 他 ; 再生可能エネルギー由来水素ステーションの運用方策に関する検討 (その 1), 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018 年 1 月.
- 9) 須貝, 他 ; 再生可能エネルギー由来水素ステーションの運用方策に関する検討 (その 2), 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018 年 1 月.
- 10) Eurostat, SHARES(Short Assessment of Renewable Energy Sources) 2016 results, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/share> (アクセス 2018.3.30)
- 11) U. Mukherjee, et al.; Optimal sizing of an electrolytic hydrogen production system using an existing natural gas infrastructure, hydrogen energy 40 (2015) pp. 9760-9733.
- 12) H. Blanco, A. Faaij; A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018) 1049–1086
- 13) J. Stansberry, et al.; Experimental analysis of photovoltaic integration with a proton exchange membrane electrolysis system for power-to-gas, hydrogen energy 42 (2017).
- 14) P. Millet, et al.; PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development, hydrogen energy 35 (2010) pp. 5043-5052.
- 15) S. Siracusano, et al.; An electrochemical study of a PEM stack for water electrolysis, hydrogen energy 37 (2012) pp. 1939-1946.
- 16) M. Kopp, et al.; Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis, hydrogen energy 42 (2017) pp. 1311-1320.