

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4）

A scheme for operating electrolysis system powered by a photovoltaic generation at a hydrogen refueling station

杉本 一郎 *・安芸 裕久 **・小林 将大 **・宮崎 佑亮 **
Ichiro Sugimoto Hirohisa Aki Masahiro Kobayashi Yusuke Miyazaki
・岩本 淳宏 **・古藤 雅史 **・石田 政義 **
Atsuhiko Iwamoto Masahumi Koto Masayoshi Ishida

Commercial hydrogen refueling stations (HRSs) to supply hydrogen to fuel cell vehicles (FCEVs) have been constructed since 2013, and there are one hundred HRSs launched as of September 2018 in Japan. Power-to-Gas (P2G) based on renewable energy sources (RESs), i.e. low-carbon hydrogen contributes to mitigate carbon dioxide (CO₂) emissions. We have developed a mid-scale polymer electrolyte membrane (PEM) typed electrolysis system (EL-Plant) using a photovoltaics (PV) generation cooperated with a HRS since 2016.

In this paper, we show a framework of operation control for renewable P2G system, and designs a scheme for operating the EL-Plant inter-connected with a PV generation and the power grid using different types of weather forecast data. This scheme includes several operation scenarios which are based on operation strategies, operation plans with solar prediction data, and review & revise mechanisms.

Keywords : Renewable Power-to-Gas, PEM electrolysis, operation control, hydrogen refueling station

1. まえがき

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3月末時点では、70プロジェクト（水電解槽の合計容量 = 約30MW）が稼働・建設されている¹⁾。その内、33%のプロジェクトが製造ガスを既設の天然ガスネットワークに混入して活用し、25%のプロジェクトが運輸・発電への利用を意図している¹⁾。その中心となるドイツでは、2017年末時点で、30以上のプロジェクト（水電解槽の合計容量 = 20MW以上）が稼働し、43箇所の水素ステーション（HRS: Hydrogen Refueling Station）が開所されている²⁾。またドイツは2017年6月の“P2Gロードマップ³⁾”において、2030年にHRSを1,000箇所まで展開する計画を発表し、Power-to-Methane（P2M）がEU全体で「2050年までに二酸化炭素排出量を80 - 95%削減（1990年比）」するポテンシャルを有すると試算している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、2020年度までの官民目標として、HRSを91箇所（2018年3月末時点）から160箇所まで拡大、燃料電池自動車（FCEV）を4万台まで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）と系統電力（Grid）を入力電力源として、水電解槽プラント（EL-Plant）により低炭素の水素を製造し、併設するHRSに供給する、太陽光・系統-水電解槽-水素ステーション連系システム（PV&Grid - EL-Plant - HRS連系システム）の開発を行った。その後もシステム合理化策や運用方策について研究を継続している。これまで、PV&Grid - EL-Plant - HRS連系システム（**図1**参照）の各システムを計測・モデル化して、EL-Plantの設備利用率を改善することを目的に、PV発電電力の変動に応じて系統電力を補完する運用方策を提案し、その効果を定量化した⁸⁾。

*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
E-mail ichiro@energy-and-humanlife.com

**筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域
〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1

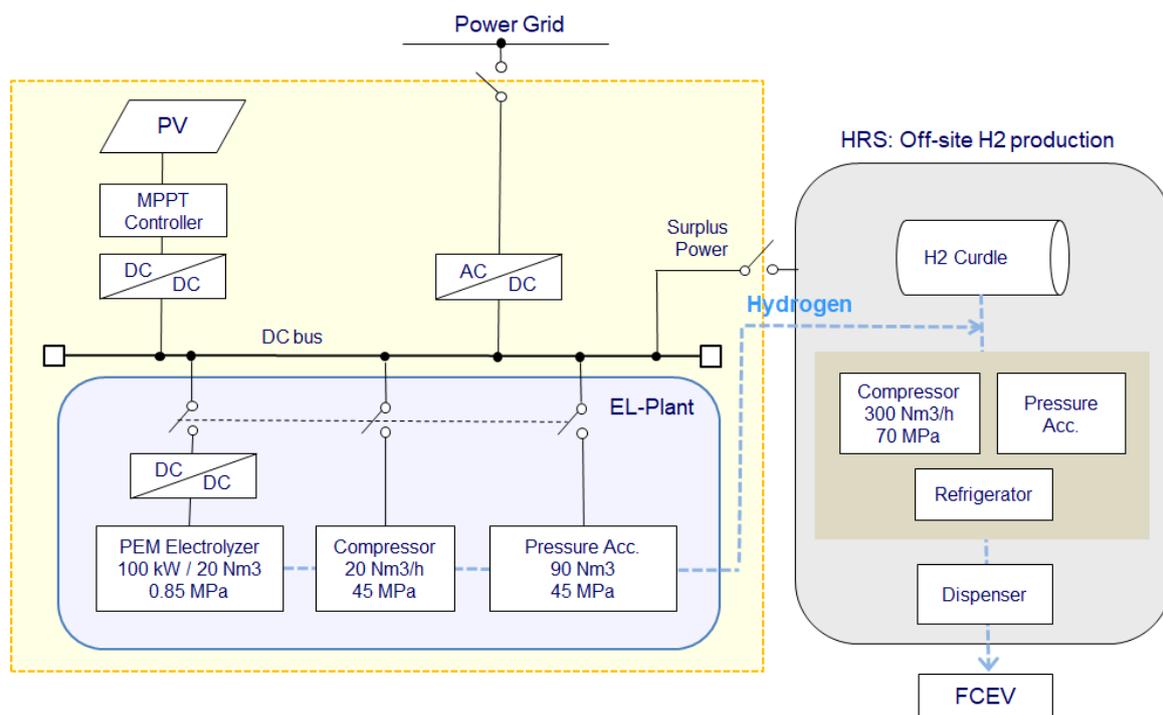


図1 PV&Grid - EL-Plant - HRS 連系システムの構成⁸⁾

本稿では、PV&Grid - EL-Plant - HRS 連系システムの“運転戦略”に沿った運用方を設計するに当たり、主として欧米の先行研究事例を示し、運転制御に係るフレームワークを提示して本研究で採用した選択項目の内容を概括すると共に、天気・日射量等の予測情報に基づく運転計画の策定・評価・改訂等について述べる。

2. 先行研究事例

欧州諸国 (EU) では、RES の導入を促進するために EU 指令が 2001 年 9 月 (2001/77/EC)⁹⁾、2009 年 4 月 (2009/28/EC)¹⁰⁾、2016 年 11 月¹¹⁾に発効・改訂され、2016 年末時点で、電源構成における RES 割合は 29.6% (EU 28 ヶ国)、最終エネルギー消費構成における RES 割合は 17.0% (同上) と、年率 1.0 - 1.5% の割合で増加している¹²⁾。また EU では、第 1 章で述べたとおり、RES を活用した P2G 実証プロジェクトが 70 以上稼働し、その一部は商用運転に移行している¹³⁾。

RES を活用した P2G 連系システムの運用方策および運転制御に関する研究は、現時点では以下の 3 つに分類される。

- RES (e.g. PV, Wind) の自然変動電源 (VRE: Variable Renewable Energy) としての特性を P2G により補償する、パワープラントとしての運転制御¹⁴⁾
- 電力調達および供給を電力市場 (e.g. スポット市場、予備力市場) との経済合理性を評価尺度として、安価な水素を製造する、水素プラントとしての運用方策¹³⁾
- P2G のシステム効率、均等化コスト (LCOE: Levelized Cost of Energy)、CO2 排出量などを評価指標として、

低炭素の水素を HRS 等に供給する、水素プラントとしての運用方策¹⁵⁾¹⁶⁾。

上記の研究はいずれも、実際に RES と連系して P2G システムの運転制御を検証したわけではなく、水電解槽・付帯設備に係る運転上の制約・条件等を軽減 (除外) したシミュレーション・ラボ実験を通じて、“最適な運用方策・運転制御”を提案するに留まっている。

3. 運転制御に係るフレームワーク

表 1 に、RES&Grid - EL-Plant 連系システムの運転制御に係るフレームワークを示す。以下に、各項目 (レイヤ) について選択肢の概要を下位のレイヤから述べる。

「入力エネルギー」は、EL-Plant に入力される電力ソース (源) を表し、通常は RES (Wind or PV) と系統 (Grid) の組み合わせで構成される。本研究では PV を主電源とし、補完的に Grid を追加した。よって、PV の VRE 特性を補償する仕組みが上位のレイヤに必要となる。

「エネルギー変換」は、Power-to-Hydrogen の場合は水電解槽の電解質の種類を指し、本研究では固体高分子形の電解質膜 (PEM) を採用している。

「運転モード」は“運転時間帯”と“運転負荷”に分けられ、電解質の特性や運用上・法令上の基準による運転時間の制約と、負荷率 (部分負荷) による運転制約を表す。本研究では、HRS との協調稼働の観点から DSS (Daily Start and Stop) 運転、水電解槽に PEM を搭載することから部分負荷運転 (負荷追従運転) を行うものとする。

表 1 RES&Grid - EL-Plant 連系システムの運転制御に係るフレームワーク (項目・選択肢)

項目 (レイヤ)		選択肢 (オプション)
運転戦略		設備利用率 最大化 / 二酸化炭素排出量 最小化 / 均等化コスト最小化 / etc.
運転計画の 策定・評価・改訂	運転開始前	予測情報なしに計画策定 / 日射量予測を基に計画策定 / 天気予報を基に計画策定
	運転中	南中時刻にそれまでの日射量 (実績) を基に当初計画を評価 / 当初計画を改訂 / 計画の改訂なし
	運転終了後	日の出 - 日の入の日射量 (実績) を基に, 当初計画 or 改訂計画を 評価, 累積目的関数 & 重み係数を算定, 翌日の計画に反映 / etc.
系統連系		一方向 (買電のみ) / 双方向 (逆潮流あり) / etc.
運転モード	運転時間帯	24h 連続運転 / DSS 運転 (冷機始動)
	運転負荷	全負荷 (ON / OFF) 運転 / 部分負荷運転 (暖機状態)
エネルギー変換		Power-to-Hydrogen (水電解槽) [アルカリ / PEM / SOEC]
入力エネルギー		太陽光発電 (PV) / 風力発電 (Wind) / … / 系統電力 (Grid)

「系統連系」は、系統との一方向または双方向といった流通方向と共に、系統との連系手法も含み、本研究では一方向 (流入のみ) のパワーレベリング⁸⁾を提案している。

「運転計画の策定・評価・改訂」は、天気・日射量等の予測情報に基づき、一日の運転開始前の計画策定、運転中の計画評価・改訂、および運転終了後の実績評価・翌日の計画への反映が対象となる。本研究ではパワーレベリングを組み込んだ運転計画を開発し、この詳細は次章に述べる。

「運転戦略」は、運転制御に反映される運用主体のポリシーであり、運用方策の“評価指標¹⁶⁾”の様式で定量的に表される。本研究では一例として、“CO₂ 排出量 (係数) 低減の制約下での設備利用率の最大化”を提案する。

4. 天候等の予測情報に基づく運転計画の策定

PV&Grid - EL-Plant 連系システムの運転戦略を「設備利用率の最大化」と設定することは、“水素製造量の最大化”と等価であり、また「CO₂ 排出量の低減」の制約は系統電力の CO₂ 排出係数の観点から、“系統電力使用量の抑制”と等価である。よって、系統によるパワーレベリングを効果的に運転計画に組み込むことが、戦略実現の最良の手段となり、そのため計画策定の時点で、翌日の日射量 (PV 発電量) を一定レベル以上の精度で予測することが必要となる。

4.1. 系統によるパワーレベリングと運転計画

系統によるパワーレベリングとは、EL-Plant への入力電力 ($EL_{in}(t)$; kW) を、PV 発電電力 ($PV_{out}(t)$; kW) が小さくレベリング閾値 (X_{day} ; %) に達しない場合には、系統電力 ($Grid(t)$; kW) によって補償を行い、設定したレベル値を維持する仕組みであり、式 (1) のように表される。

$$EL_{in}(t, X_{day}) = X_{day} \cdot EL_{in,max} = PV_{out}(t) + Grid(t) \quad (1)$$

$EL_{in,max}$ (kW): EL-Plant 定格入力電力

ここで運転計画とは、運転戦略 (i.e. 評価指標) を充足させるレベリング閾値 (X_{day} ; 一日単位の変数) を、一日の運転開始前に設定すること、と捉える。これによって EL-Plant は、計画した時間帯において効率良く稼働できるようになり、そのためには、翌日の日射量 (PV 発電量) の予測がキーポイントとなる。

4.2. 予測情報の種別と運転計画の策定

本研究では、予測情報として以下の 3 つのケースを挙げ、それぞれに準拠した精度・解像度で運転計画を策定する。

- 商用の日射量予測情報 (日本気象協会: SYNPOS-solar¹⁷⁾) の適用: 地点 = つくば, 予測時間 = 72h 先まで, 予測間隔 = 30min (翌日の 30min 単位の日射プロファイル)。
- 天気予報 (気象庁: 地域時系列予報¹⁸⁾) の適用: 地点 = 土浦, 予測時間 = 24h 先まで, 予測間隔 = 3h (翌日の 1h/3h 単位の天気プロファイル)。
- 予測情報なし (or 情報欠落) の場合: 参照できる情報は、過去の天気 (計測間隔 = 3h) ・日射量 (計測間隔 = 10min) 等の実績データに限定される。

上記 a) は商用サービスの提供 (有償) を受けることになるが、直接的に PV 発電プロファイル (推定) を作成でき、“大外れ”の対策を講じる程度で済むメリットがある。上記 b) は無償であるが、「天気推移 ⇒ 日射量変化」に変換するアルゴリズムが別途必要となり、その変換にも誤差が含まれることになる。上記 c) は“過去のデータから翌日の日射量”を予測することが必要となるが、“上記 a), b) との参照ライン”の観点から、簡易な手法を採用する。

5. まとめ

本稿では、PVを主電源として系統連系した「HRSと協調稼働するP2Gシステム」について、実プラントへの実装を見据えた運用方策を設計するに当たり、運転制御に係るフレームワークを示すと共に、PVのVRE特性を補償するために系統によるパワーレベリングを組み込み、天候・日射量等の予測情報を基に運転計画を策定するスキームを示した。さらに、予測情報として「日射量予測」「天気予報」「予測情報なし」の3つのケースを挙げ、それぞれについて運転計画を策定する際の課題を述べた。

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) T. Helbert, D. Head; Deployment of Hydrogen and Fuel Cell Technology in Germany, EHEC 2018, Spain, 15 March 2018.
- 3) German Energy Agency (dena); Roadmap Power to Gas - Baustein einer Integrierten Energiewende, 19 July 2017. (in German)
- 4) H. Blanco, W Nijs, J, Ruf, A. Faaij; Potential of Power-to-Methane in the EU energy transition to a low carbon system using cost optimization, Applied Energy, 232(2018), pp.323-340.
- 5) Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Press; Compilation of the Rev. Version of the Strategic Roadmap for H2 and FCs, 22 March 2016.
- 6) Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues; Basic Hydrogen Strategy, 26 December 2017.
- 7) METI, ANRE, Press Release; Japan H2 Mobility, a Company for Development of Hydrogen Stations, Established, 5 March 2018.
- 8) H. Aki, I. Sugimoto, et al.; Electrolysis System Operation Strategies for a Hydrogen Refueling Station using Renewable Energy Sources, Ground Renewable Energy (GRE) 2018, Proceedings, June, 2018, Yokohama, Japan.
- 9) Directive 2001/77/EC of the Euro. Parliament and of the Council of 27 September 2001
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32001L0077> (アクセス 2018. 11. 20)
- 10) Directive 2009/28/EC of the Euro. Parliament and of the Council of 23 April 2009
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028> (アクセス 2018. 11. 20)
- 11) Proposal for a Directive of the Euro. Parliament and the Council amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016PC0761> (アクセス 2018. 11. 20)
- 12) Eurostat, SHARES (Short Assessment of Renewable Energy Sources) 2016 results,
<http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/share> (アクセス 2018. 11. 13)
- 13) M. Kopp, D. Coleman, et al.; Energiepark Mainz: technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis. Int. J Hydrogen Energy 2017; 42: 13311-20.
- 14) L. Valverde, F. Pino, et al.; Definition, analysis and experimental investigation of operation modes in hydrogen-renewable-based power plants incorporating hybrid energy storage, Energy Conversion and Management, Volume 113, 1 April 2016, Pages 290-311.
- 15) L. Zhao, J. Brouwer; Dynamic operation and feasibility study of a self-sustainable hydrogen fueling station using renewable energy sources, Int. J. Hydrogen Energy Volume 40, Issue 10, 16 March 2015, Pages 3822-3837
- 16) H. Aki, I. Sugimoto, et al.; Optimal operation of a photovoltaic generation-powered hydrogen production system at a hydrogen refueling station, Int. J. Hydrogen Energy Volume 43, Issue 32, 9 August 2018, Pages 14892-14904.
- 17) 日本気象協会 HP; 日射量予測・太陽光発電量予測
<https://www.jwa.or.jp/service-business/service/28.html> (アクセス 2018. 11. 24)
- 18) 気象庁; 天気分布予報・地域時系列予報
<https://www.jma.go.jp/jp/jikei/>
(アクセス 2018. 11. 24)