

太陽光発電直結水電解槽数制御法の評価

Evaluation of the Control Method of Number of Active Multiple Water Electrolyzer Directly Coupled with Photovoltaic

岩本 淳宏^{*1,2}、前田 哲彦^{*2}、五舛目清剛^{*2}、石田 政義^{*1}

Atsuhiko Iwamoto^{*1,2}, Tetsuhiko Maeda^{*2}, Kiyotaka Goshome^{*2}, Masayoshi Ishida^{*1}

^{*1}筑波大学 大学院 システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{*2}産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

Renewable Energy Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract : The simulation of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) water electrolyzer (WE) directly coupled with photovoltaic (PV) is developed from the real operating results of the 20kW PV-WE system. In order to achieve the high-efficiency hydrogen production, the number of WE cells is controlled to track the maximum power point (MPP) of the direct coupling PV. In this study, the 200kW PV-WE system which is composed of the 20kW WE units (30 cells unit $\times$ 10 units in series) is evaluated with the simulation for the year-round operation. The number of the total active cells is controlled in two ways: On/Off of the WE units and On/Off of the cells in every WE unit. As a result, it is confirmed that more than 98% of MPP efficiency can be achieved in both cases.

Key Words : Photovoltaic, Water Electrolyzer, Hydrogen production, Direct coupling, Maximum power point trucking

1. 序論

近年、地球温暖化などの社会問題を背景に自然エネルギーに頼る低炭素化社会への移行が求められているが、自然エネルギーの大量導入は電力の需給バランスの安定化を困難にする¹⁾。太陽光発電 (PV : Photovoltaic) では、その出力がピークに達する日中に出力の抑制を余儀なくされることがあるため、PV の更なる普及にはその余剰電力の有効活用が求められる。また、環境負荷の小さい自動車として燃料電池自動車が注目され、今後水素需要がより一層高まることが予想される²⁾。そこで、従来技術では活用されていない PV 余剰電力を用いた水電解 (WE : Water Electrolyzer) 水素製造法が検討されている。

PV 電力を有効に活用し、より効率よく水素を製造するため、DC/DC コンバータやパワーコンディショナを用いて、日射強度や PV パネル温度によって変化する PV 最大出力点を追従する MPPT (Maximum Power Point Tracking) 制御を行い、その電力を WE に投入することが可能である。しかし、その際に変換損失が生じ、部分負荷時には効率が著しく低下するため、最高でも PV 最大出力の 94% 程度しか活用されない^{3), 4)}。また、それ自体のコストも無視できない。そこで、本研究ではコンバータを用いず、

WE の通電セル数を切り替えることで、MPPT 制御を行う。

これまで 2.6、20kW 級装置において、本手法を検討してきたが^{5)~7)}、近年多く導入されているメガソーラーでは、数百 kW 級の PV ごとにパワーコンディショナを接続することが多い。したがって、本制御法においても数百 kW 級システムについて検討する必要がある。そこで、本稿では 20kW 級の WE を 10 直列した 200kW 級システムについて、1 年間の運用を想定したシミュレーションを行い、その有効性を評価する。

2. 想定したシステム構成と各機器の特性

2.1 システム構成

本研究では産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所 (FREIA) において、並列に 72 枚が接続された PV パネルと直列に 30 セルの固体高分子型 WE が直接接続された 20kW 級 PV-WE システムの実機運転データをもとにシミュレーションを構築した⁷⁾。実験で使用した電解槽の通電セル数は 18 から 30 の間を 3 セル単位で可変である。通電セル数を変えることで総電解電圧を制御し、日射

強度や PV パネル温度に依存する PV 最大出力点の追従が可能である。この時、電解槽の温度は電解電流によるジュール熱により上昇するが、冷却水の循環により制御される。

200kW 級 PV-WE システムの電解運転シミュレーションは上記の 20kW 級電解槽 10 槽を直列に接続することを想定し構築した。この時、通電セル数が 180 から 300 の間を 30 セル単位で可変であるとする通電セル数の切り替え方は図 1 に示す様に 2 通り考えられる。“一律セル数制御”では 20kW 級システムにおけるセル数制御が 10 槽一律に行われるものとした (図 1 (a))。一例としてシステム全体で通電セル数を 270 セルにする場合、27 セル×10 槽となる。一方で、“槽数制御”では電解槽単位で ON/OFF を行う制御とした (図 1 (b))。則ち、全体で通電セル数を 270 セルにする場合、30 セル×9 槽となる。槽数制御では電解槽内で通電セル数を切り替える特殊な電解槽を必要としないため、MPPT 機能を有しながら、より低コストにシステムを構築することが可能になると考えられる。

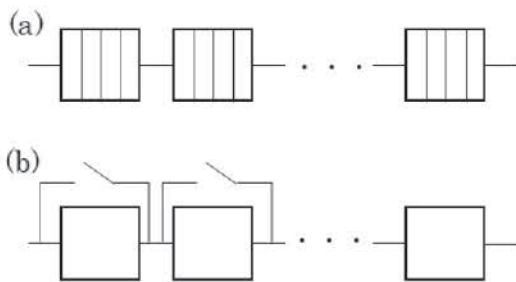


図 1 一律セル数制御 (a) 及び槽数制御 (b) による総通電セル数制御
Fig. 1 The control method of total active cells by on/off of cells in every WE stack (a) and on/off of WE stack (b).

2.2 PV パネルの特性

表 1 に 20kW 級 PV-WE システムの電解実験で使用した PV パネルの仕様を示す。PV の電流電圧特性 (I-V 特性) は以下の式 (1) で表される。また図 2 に PV の I-V 特性に関して照度依存性と温度依存性を示す。PV 最大出力点は日射強度と PV パネル温度によって変化するため、システムの高効率化には最大出力点近傍で発電することが重要となる。

表 1 PV パネルの基本仕様
Table 1 The specification of PV panel.

型式	Panasonic-HIT290 A
最大電力点出力	290 W
短絡電流	5.84 A
最大出力点電流	5.48 A
最大出力点電圧	53.0 V
開放電圧	63.8 V

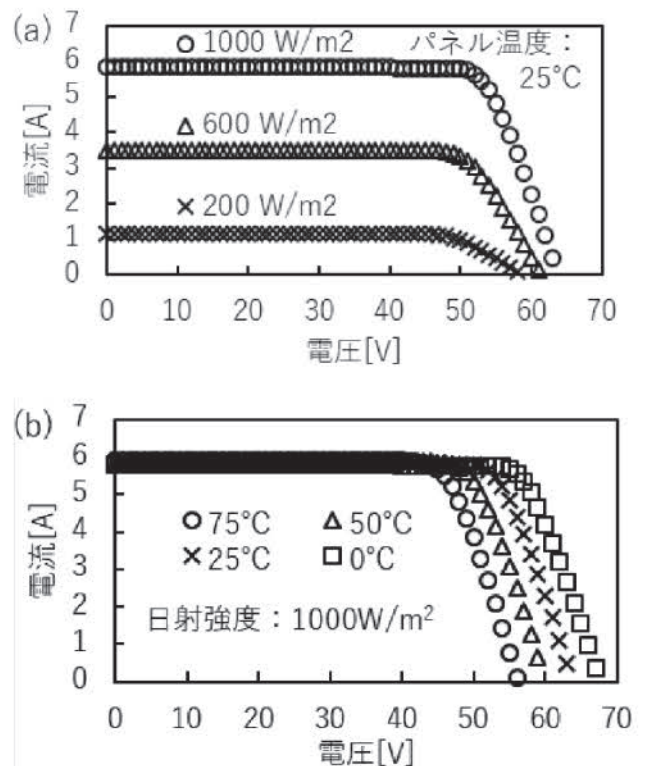


図 2 PV パネルの I-V 特性に関する照度依存性 (a) と温度依存性 (b)
Fig. 2 The illuminance (a) and temperature (b) dependence for I-V characteristics of the PV panel.

$$I(\alpha_G, T) = \alpha_G I_L(T) - I_0(\alpha_G, T) \left(e^{\frac{\alpha_G [V + K I (T - T_{STC}) + I R_s]}{\alpha_G n T}} - 1 \right) - \frac{\alpha_G [V + K I (T - T_{STC}) + I R_s]}{R_{sh}} \quad (1)$$

I: 出力電流, V: 出力電圧, α_G : 日射強度比, T: PV パネル温度, T_{STC} : 25 °C, I_0 : 補正関数, K: 温度変化補正係数, n: ダイオード特性係数, R_s : 直列抵抗, R_{sh} : 並列抵抗

2.3 WE の特性

WE の I-V 特性は以下の式 (2) で表される。また、実機データによる補正係数を用いると図 3 に示す WE の I-V 特性を得られる。

$$V = a - b \times T + c \times T \times \ln(I) + d \times I \times \exp\left(\frac{e}{T}\right) \quad (2)$$

V: 入力電圧, I: 入力電流, T: 電解温度, a-e: 補正係数
電解電圧は電解温度に依存するため、電解温度の時間遷移を数値計算に含める必要がある。電解温度は以下の式 (3) から求めることができる。

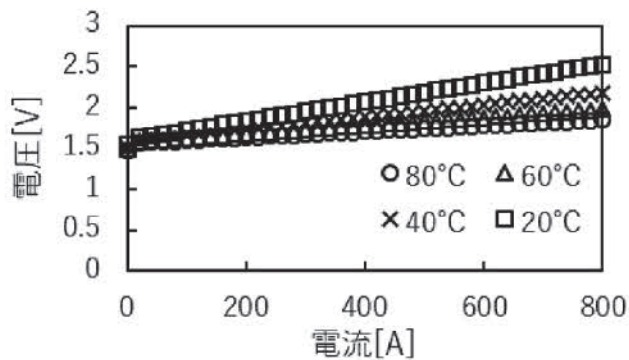


図3 WEのI-V特性に関する温度依存性

Fig. 3 The temperature dependence for I-V characteristics of WE.

$$\begin{aligned}
 & T(t+1) \\
 & = T(t) \\
 & + \left\{ V_{WE} \times I_{WE} \right. \\
 & - \frac{I_{WE} \times V_{mol} \times N_{WE} \times 3.534 \times 3600 \times 1000}{2 \times F \times 1000} \\
 & - \frac{I_{WE} \times C_{pH_2} \times (T(t) - 25) \times N_{WE}}{2 \times F} \\
 & - \frac{I_{WE} \times C_{pO_2} \times (T(t) - 25) \times N_{WE}}{4 \times F} \\
 & - Q \times \left(\frac{\tanh^{-1} \left(\frac{I_{WE} - I_0}{\gamma_I} \right)}{\pi} + 0.5 \right) \\
 & \times \left(\frac{\tanh^{-1} \left(\frac{T(t) - T_0}{\gamma_T} \right)}{\pi} + 0.5 \right) - k \times (T(t) \\
 & \left. - T_{air}) \right\} \div C
 \end{aligned} \quad (3)$$

$T(t)$: 時刻 t の電解温度, V_{mol} : 水素製造量, N_{WE} : 通電セル数, F : ファラッド定数, C_{pH_2} : 水素定圧モル比熱, C_{pO_2} : 酸素定圧モル比熱, Q : 最大冷却能力, I_0 , T_0 : 50% デューティ比 電流値と温度, γ_I , γ_T : 冷却系電流, 温度検知コーシー分布ガンマ, k : 空冷・電解水系放熱係数, T_{air} : 雰囲気温度, C : 熱容量

3. 200kW 級 PV-WE の運転シミュレーション

3.1 計算手順

本研究では、本システムを制御できる LabVIEW2018 (National Instruments) をベースにシミュレータを構築した。また、以下の手順で計算を行った。

1. 電氣的動作点算出

PV-WE 直結の本システムでは、動作電流・電圧がそ

れぞれ等しくなるため、二分法（解を含む区間の中間点を求める操作を繰り返し、近似解を求めるアルゴリズム）を用いて電氣的動作点を算出する。

2. 通電セル数制御

算出された動作電流から通電セル数を決定する。

3. 電解温度算出

動作点や通電セル数等から電解温度を算出し、手順1に戻る。

本研究では産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所 (FRE) で計測した 2017 年 10 月 1 日から 2018 年 9 月 30 日の 1 年間の日射強度と気温のデータをもとにした。また、計算簡略化のため、日射強度 20 W/m^2 以下の時は全体に与える影響は少ないとし、計算から除外した。

3.2 シミュレート結果

本研究では制御法の有効性を以下に定義する MPPT 効率を基準に評価する。

$$\text{MPPT 効率} = \frac{\text{実際の PV 出力}}{\text{PV 最大出力}} \quad (4)$$

図4、表2に1年間の運用を想定した一律セル数制御と槽数制御の日ごとの MPPT 効率及び両制御法における年積算発電量の MPPT 効率をそれぞれ示す。これらより、両制御法において1年を通して MPPT 効率が高く、年積算の MPPT 効率が 98% を達成されることが示唆され、従来 MPPT 制御の 94% と比較すると高効率であることが分かる。また図5にある特定の日（2018年3月31日）における毎秒の MPPT 効率と通電セル数の時間遷移を示す。図5より両制御法において、通電セル数の切り替えによって MPPT 効率が向上している。したがって、それぞれの季節や様々な天候において両制御法が有効であると言える。更に、両制御法の MPPT 効率に有為な差はないため、2章で述べたコストの差から槽数制御法が優位であることが言える。一方で、図4より MPPT 効率が 96% を下回る日が散在する。ここで、MPPT 効率が 96% 下回る代表日（2017年10月31日）の日射強度の時間遷移を図6に示す。代表日の日射強度には低いところから急激に変化するという特徴が見られる。この特徴は他に MPPT 効率が 96% を下回る 2017年12月2日と 2018年9月22日に共通する特徴であった。日射変動が激しい日は PV の最大出力点の変動と動作点の追従に時差が生じるため、日射が安定している日に比べ、MPPT 効率が下がる傾向にある。更に日射強度が低いところから変動する日は、日射強度が高いときに低い日射強度に適した通電セル数で発電してしまう。つまり、より大きな発電能力を持つときに動作点が最大出力点から遠ざかり、MPPT 効率が下がりやすいと考えられ

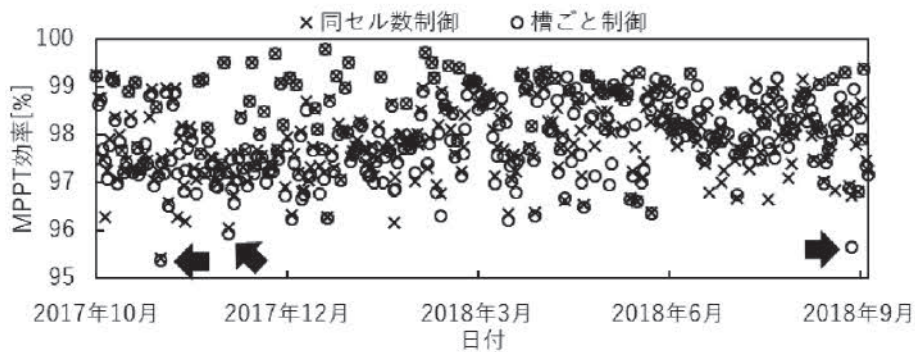


図4 通年日毎のMPPT効率
Fig. 4 MPPT efficiency of both methods on each day.

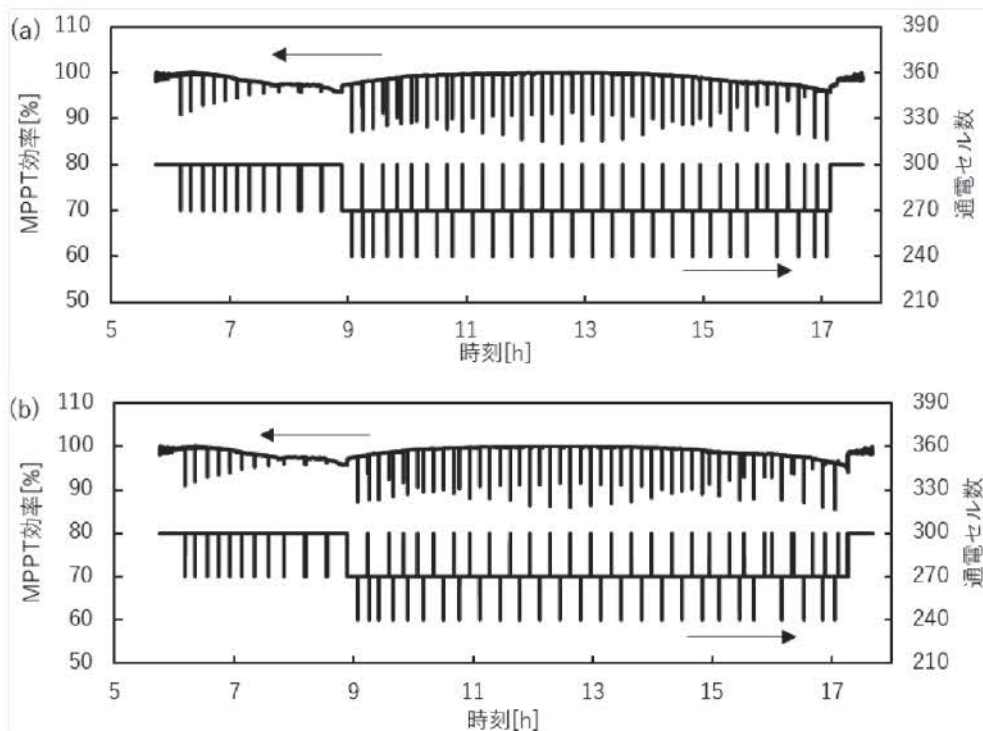


図5 一律セル数制御法(a)及び槽数制御法(b)による2018年3月31日のMPPT効率と通電セル数
Fig. 5 MPPT efficiency and number of active cells controlled by on/off of cells in every WE stack (a) and on/off of WE stack (b) on March 31st, 2018.

表2 年間利用を想定したMPPT効率
Table 2 Efficiency of MPPT throughout one year.

制御法	MPPT 効率 [%]
一律セル数制御法	98.19
槽数制御法	98.20

る。PVを大規模化すると、PVパネルごとに発電分布が生じ、PVの総出力が平準化されると考えられるため、PVの大規模化がMPPT効率を改善することが期待できる。

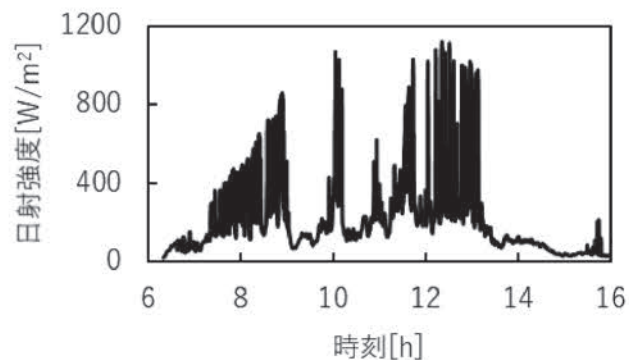


図6 2017年10月31日の日射強度
Fig. 6 Intensity of solar radiation on October 31st 2017.

4. 結論

本稿では、20kW級の太陽光発電－水電解直結システムを10直列した200kW級システムにおける通電セル数制御法の有効性を1年間の運用を想定したシミュレーションにより評価した。その結果から以下の新たな知見が得られた。

1. 全ての電解槽で同様の通電セル数制御を行う一律セル数制御法と電解槽単位のON/OFFにより通電セル数を切り替える槽数制御法の両制御法において、年積算の最大出力点追従（MPPT）効率が98%を上回り、本手法では効率の高い運用が可能であると分かった。
2. 両制御法の効率に有為な差が無いことから、電解槽単位で通電セル数を切り替えることでコストを低く抑えられると考えられ、本提案が十分機能することが示された。
3. 本制御手法では、日射強度が高いところから変動する日に比べ、低いところから変動する日の方が低MPPT効率になることが分かった。

本稿では1点に日射データから定格200kW分の発電出力を仮定したが、実制御では雲の動き等により、ソーラーパネルごとに発電分布が存在する。したがって、より実機

制御に近いシミュレーションを行うためには、パネルごとの発電分布を考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 経済産業省、「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」、次世代送配電ネットワーク研究科報告書11-16（2010）
- 2) 経済産業省、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」（2019）
- 3) ㈱ニプロン：“Nipron Wave Vol.22”（2011）
https://www.nipron.co.jp/pdf/download/catalog/Nipron_Wave_vol22
- 4) D. P. Hohm, M. E. Ropp：“Comparative study of maximum power point tracking algorithms”, Progress in photovoltaics research and applications, vol. 11, pp. 47-62（2003）
- 5) T. Maeda, et al., Int. J. Hydrogen Energ., vol. 37, pp.4819-4828（2012）
- 6) T. Maeda, et al., journal of International Council on Electronical Engineering, 6：1, 7-83（2016）
- 7) S. Suzuki, et al., Int. Conf. Electr. Eng. (ICEE2017), Weihai, 8（1）1-7（2018）