

- To improve the efficiency of solar power systems -
Development and Evaluation of the electromagnetic relay
for the partially shaded PV array

—太陽光発電設備発電効率向上のための—
部分陰用電磁リレーの開発と評価

Masamichi IKEMOTO Ryousuke HARAOKA Ikuo NANNO
池本 将道^{*1} 原岡 了祐^{*2} 南野 郁夫^{*3}

Abstract

The output power of the partially shaded photovoltaic (PV) array is greatly reduced due to the blocking of the direct sunlight, and the current difference between the shaded and illuminated PV modules. For increasing the efficiency of the partially shaded PV array, a new configuration using an electromagnetic relay is proposed. This configuration is mainly used for collecting all currents of the shaded modules using the contacts of the electromagnetic relay. Therefore, the shaded modules in the new configuration delivered more output power with creating only one peak on the PV array characteristic for proper and simple functioning of the maximum power tracker. The simulation and experimental data validate the effectiveness of the new configuration for the power recovery of the partially shaded PV array using only an electromagnetic relay.

キーワード：太陽光発電システム，効率，電磁リレー

Key Words : Photovoltaic power system, Efficiency, Electromagnetic Relay

1. はじめに

太陽光発電システム（PV システム）の健全な普及のため発電効率の維持向上が求められている。また福島原子力発電所の事故後その傾向はさらに強まっている。PV システムによる発電をより効率的にしていくには、PV システムのあらゆる環境条件におけるすべての要素の効率を向上させる必要がある。しかし多くの研究は太陽電池の効率を向上させることについて行われている。その結果、太陽電池の効率は理論限界値に近づいてきている。PV システムの大きな課題の一つとして、雲や電柱、建物な

どで PV アレイの一部分に陰がかかることにより、PV アレイが日射を均一に受けない場合の発電量を上昇させることがある。部分陰がある場合、P-V 特性に複数のピークが表れる⁽¹⁾⁽²⁾。この複数のピークの存在は MPPT のアルゴリズムを複雑化させるだけでなく、最大出力電力を低下させることにもなる。複数のピークのうち小さい方を MPPT が捉えてしまった場合、さらに大きな電力損失が生じることになる。陰による発電量を回復させる方法の一つに昇圧 DC/DC コンバータを使用する方法がある⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしこの方法はストリング全体が陰の場合には効果があるが、ストリングの一部が陰の場合効果が小さい。その原因は P-V 特性のピークが複数になることにある。

*1 宇部工業高等専門学校生産システム工学専攻 学生

*2 九州大学総合理工学府 学生

*3 宇部工業高等専門学校 教授（〒755-8555 山口県宇部市常盤台 2-14-1），e-mail：nanno@ube-k.ac.jp，元オムロン株式会社

（原稿受付：2016 年 8 月 31 日，受理日：2017 年 1 月 10 日）

本論文では部分陰ができた状態でも、P-V 特性のピークを一つにし、複数のピークを生じさせず、最大出力を増加させる手法を提案する。PV アレイ中に電磁リレーを一つだけ追加し、日陰モジュールの発電電力を有効活用することで発電量を回復させることを試み、シミュレーション⁽⁵⁾⁽⁶⁾と実験を行ったのでその結果を示す。

2. 部分陰問題

PV システムの設置場所によっては、図 1 のように近隣のビルや電柱などにより PV アレイ（家一軒分の太陽電池モジュール群）の一部分に陰がかかり、日射強度が不均一になることがある。このような PV アレイの一部分に陰がかかり日射強度にムラができた状態を部分陰といい、わずかな部分陰で発電電力が大幅に低下することを部分陰問題という⁽¹⁾。

部分陰問題は太陽電池の特性と接続回路の特性が原因で起こる。直列に接続されている PV モジュールを流れる電流は一定であるため、日陰部分の PV モジュール（日陰モジュール）は日向のモジュールと同じ電流を流すには逆バイアス電圧で動作することになる。つまり、最も発電電流の小さい太陽電池セルにより、ストリングの発電電流が制約される。実際にはバイパスダイオードが取り付けられているため、逆電圧は防止され、日向モジュールの発電電流を流している。しかし、バイパスダイオードを電流が流れると日陰モジュールの両端の電圧が 0[V] になり、その日陰部分は発電に寄与できない。陰が非常に暗く日陰モジュールの電力が小さい場合には問題ないが、ある程度明るく電力が大きい場合には日陰モジュールの発電量を損失することになる。

ビルや電柱などの日陰に入射する散乱光の強さは直達光に比べ 0~70[%]だと言われている⁽¹⁾。気象庁の直達光と散乱光の年間データを元に月単位で（散乱光）/（直達光+散乱光）を計算した結果、図 2 のように 20~70[%]に分布していることが分かる。これより、日陰部分のモジュールも散乱光により発電しており、これを活用することができれば PV システムの発電量を増加させることが期待できる。



Fig.1 PV array under partial shading by building
図 1 ビルによる部分陰

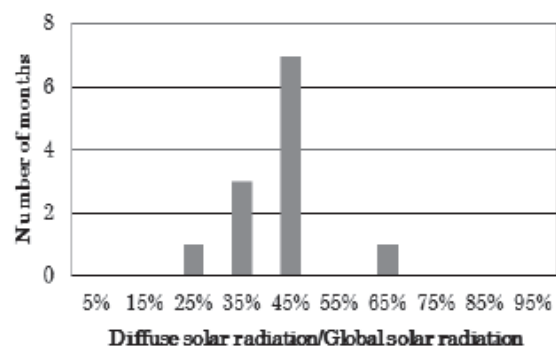


Fig.2 Diffuse solar radiation vs. global solar radiation

図 2 散乱光の割合

3. 電力損失解析

部分陰による電力損失は主に直達光の遮断による日陰モジュールと日向モジュールの電流の差によって起こる。ここで分かりやすさを優先し、2 直列 2 並列で接続された 4 つのモジュールで構成され、一つのモジュールの電力、電流、電圧は 210[W], 7[A], 30[V] をモデルケースとする。陰は図 3 のように 3 枚のモジュールにかかるとし、陰における日射強度は図 2 より散乱光の強度の比の平均値を求め、日向の 33[%] とする。

3.1 日陰モジュールの限界出力

PV アレイに陰がかかっていない場合、PV アレイの最大定格出力 P_i は 840[W] ($=210[W] \times 4$ 枚) となる。PV アレイにモデルケースのような陰がかかった場合、日向モジュールの出力を 210[W]、日陰モジュールの出力を日向モジュールの出力の 33% の 70[W] として限界値の計算をし、限界出力 P_1 は 420[W] ($=210[W] + 70[W] \times 3$ 枚) となる。

3.2 部分陰発生時の I-V 特性

図 4 は 2 直列 2 並列で接続された 4 つのモジュールで構成される PV アレイの I-V 特性の概念図を示す。陰のかかっていない場合の最大出力 P_i は 840[W] であり、モデルケースのような陰がかかった場合、日陰モジュールにバイパスダイオードが接続されているとすると P-V 特性は二つのピークになり最大出力は 280[W] まで低下する。左のピークは左下のモジュールのバイパスダイオードが ON 状態でのピーク、右のピークはバイパスダイオードが OFF 状態でのピークである。バイパスダイオードが ON のときは左下のモジュールは発電に寄与せず、右 2 枚のモジュールは電流 1/3、電圧 1/2 となり最大出力は 280[W] ($=210 + (210 \times 1/3 \times 1/2) \times 2$ 枚) となる。バイパスダイオードが OFF のときは日向モジュールの電流が日陰モジュールの制約を受け、4 枚の

モジュールにおいて電流が $1/3$ となり、最高出力は $280[\text{W}]$ ($(210 \times 1/3) \times 4$ 枚) となる。

今回提案する手法を用いた場合、リレーなどの消費電力が無視できれば最大出力は $420[\text{W}]$ となる。これは P-V 特性の二つのピークを一つに集中させる効果であり、モデルケースの場合の限界出力 P_1 に達している。つまりこの手法を用いることで $140[\text{W}]$ ($P_c=420-280[\text{W}]$) の電力損失を $100[\%]$ 回復することができる。最大定格出力 P_i に対する回復電力 P_c の比率 P_c/P_i は $17[\%]$ である。ただし、部分陰になる時間だけの効果である。仮に同じ条件で DC-DC コンバータを用いても P-V 特性のピークは二つのままなので $50[\%]$ の回復にしかない。

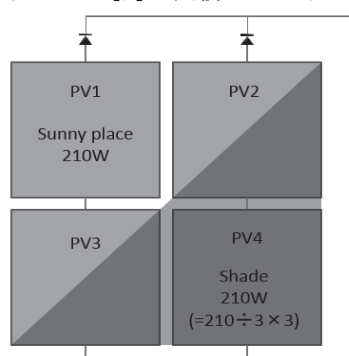


Fig.3 Model case of partial shade
図3 部分陰のモデルケース

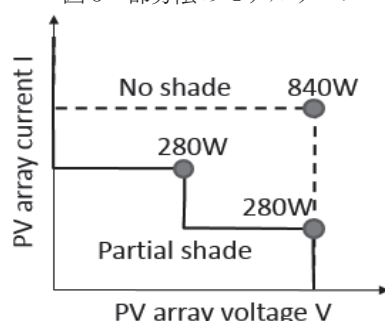


Fig.4 Schematic diagram of I-V characteristic during the partial shading with bypass diodes
図4 2直列2並列で接続したPVアレイのI-V特性概念図

4. 電磁リレー使用時の電力損失解析

電磁リレーを配線切り替え盤に組み込んだ PV システム概略図を図 5 に示す。図 6 はこの実験で使用した電磁リレー（陰リレー：オムロン製、形 MM4XB がベース）の試作品である。リレーは共通のコアに巻かれた二つのコイルと 4 組の ab 接点をもっている（図 6、図 7(c) 参照）。本方式ではその内 3 組を使用している。部分陰状態になりバイパスダイオードが ON となると二つのコイルの電流差により電磁リレーが動作し、PV モジュールの接続状態を変更する。

図 7 は部分陰の検出方法を示している。コイル 1 とコイル 2 にそれぞれ PV1 と PV3 の光電流が流れるように接続されている。このときコイル 1 とコイル 2 に流れる電流の向きが反対になるように接続する。部分陰が存在しない場合、PV1 と PV3 に流れる光電流は等しくなるため、コイル 1 とコイル 2 により発生する磁束は打消し合い、電磁リレーは動作しない。部分陰状態になり PV3 が陰となりバイパスダイオードが ON となるとコイル 2 を流れる光電流が小さくなり、コイル 1 による磁束がコイル 2 による磁束よりも大きくなるため、電磁リレーが動作する。陰がなくなると電流の差が無くなるため、電磁リレーは元の状態に復帰する。夕方になると日射が弱くなるため両コイルに流れる電流が小さくなり、電磁リレーは元の状態に復帰する。またコイルの巻数の差により電磁リレーの動作電流を調整することで、部分陰状態でも散乱光の割合が多く PV1 と PV3 の光電流の差が小さい場合、電磁リレーは動作しないようになっている。ただ電磁リレーの性質上、陰における日射強度が非常に低い場合も電磁リレーは動作する。その場合、電磁リレーが動作することにより損失が大きくなる可能性がある。

通常 PV アレイは複数のストリングが並列に構成されているが、ここでは分かりやすく図 8 に示すように二つのモジュールを直列に接続したストリングが二つ並列に接続されたものを考える。図 8 の三角形の部分陰ができた場合、電磁リレーが動作することで陰のかかったモジュール（PV2, PV3, PV4）が並列に接続される。この構成で 3 枚の日陰モジュールを流れる電流の合計が日向モジュールに流れることになり、バイパスダイオードを電流が流れることがないため、全てのモジュールが発電に寄与できる。図 9 に示すように電磁リレーを使用した場合の最大出力は $420[\text{W}]$ となる。したがって、出力の増加は $140[\text{W}]$ ($=420-280[\text{W}]$) となる。また、電磁リレーを利用した場合の電力損失を P_r とすると、電力損失回復率 $((P_c' - P_r)/P_c)$ 、 P_c' ：電磁リレーによる損失が 0 のときの回復電力）は本ケースでは $P_c' = P_c$ であるため、理想の $100[\%]$ であるが、実際には電磁リレーのコイルにおける消費電力があるため数%程度減少する。電磁リレーを一つしか用いない理由は損失電力の改善効果より対策コストが上回らないように配慮した結果である。



Fig.5 Schematic diagram of the PV system
図5 PVシステムの概略図

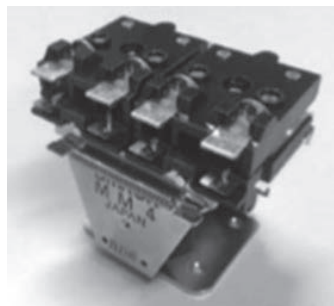


Fig.6 Electromagnetic relay MM4XB type
図 6 電磁リレー

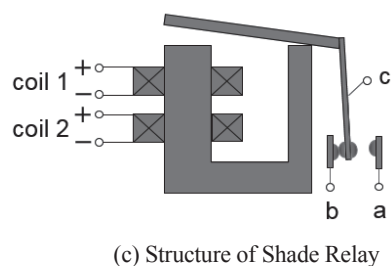
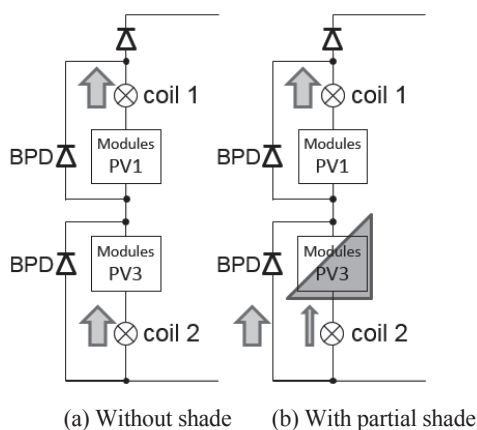


Fig.7 Principle of detecting method for partial shading condition based on the current difference
図 7 部分陰の検出方法

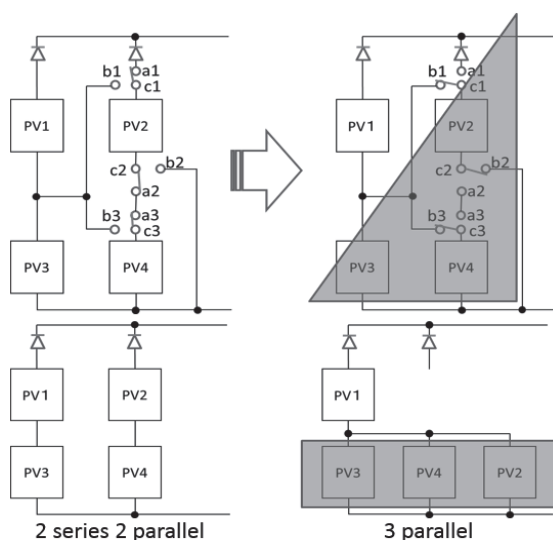


Fig.8 Configurations of the PV array under the normal and 33% transmittance conditions
図 8 部分陰状態での PV アレイの構成

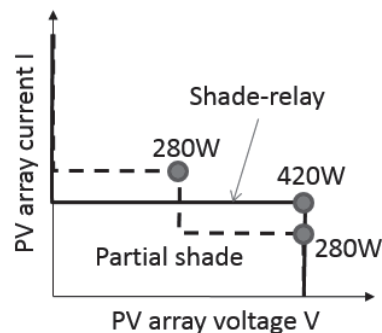
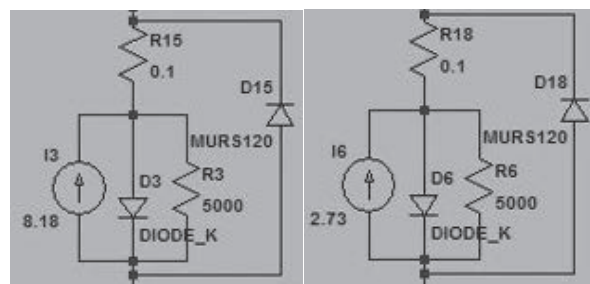


Fig.9 Schematic diagram of I-V characteristics of the PV array during the operation of the partial shading with relay
図 9 電磁リレー使用時の I-V 特性の概念図

5. モデリングとシミュレーション結果

シミュレーションには京セラ製の多結晶シリコンモジュール KS 215P-3CJ2CE（公称出力：215[W]）を等価回路モデル化したものを使用した。モジュールは 3 つのクラスター（1 クラスターは 18 セル）が直列に接続された構成をしており、図 10 に 1 クラスターの等価回路を示す。また図中の各記号は 13, 16: 光起電流源 [A], R15, R18: 直列抵抗 [Ω], D15, D18: バイパスダイオード, D3, D6: 太陽電池ダイオード特性, R3, R6: 並列抵抗 [Ω] である。

図 11 に陰がかかっていない状態（モジュール 4 枚、2 直列 2 並列）の I-V 特性と P-V 特性を示す。図 12 に部分陰状態（モジュール 4 枚、2 直列 2 並列）での I-V 特性と P-V 特性を示す。陰は PV アレイの 50% を覆っており、日射強度は日向の 33% である。図 3 のような部分陰が生じ、電磁リレーにより接点が切り替わったときの等価回路モデルを図 13 に示し、その I-V 特性と P-V 特性を図 14 に示す。全体的な傾向は図 4、図 9 の概念図と同じになっている。図 13 は図 10 のクラスターの等価回路により構成されている。ただし電磁リレーの抵抗は考慮していない。これに電磁リレーのコイルの抵抗による定格消費電力 20.4[W] (15.6[%]) を考慮すると回復率は 84.4[%] となる。



(a) Without shade (b) With partial shade

Fig.10 Equivalent circuit model of one cluster
図 10 1 クラスターの等価回路

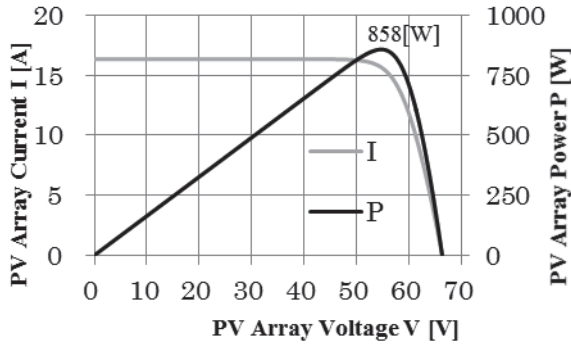


Fig.11 Array characteristics under normal condition
図 11 陰のない状態での I-V 特性と P-V 特性

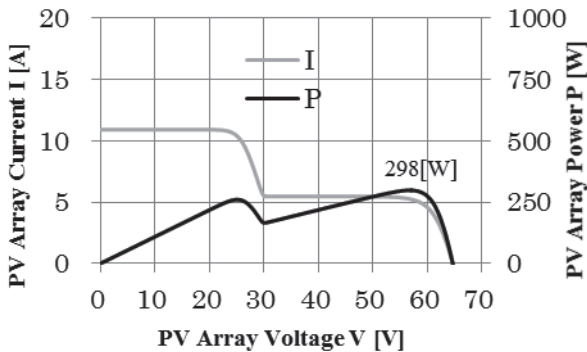


Fig.12 Array characteristics during the partial shading
図 12 部分陰状態での I-V 特性と P-V 特性

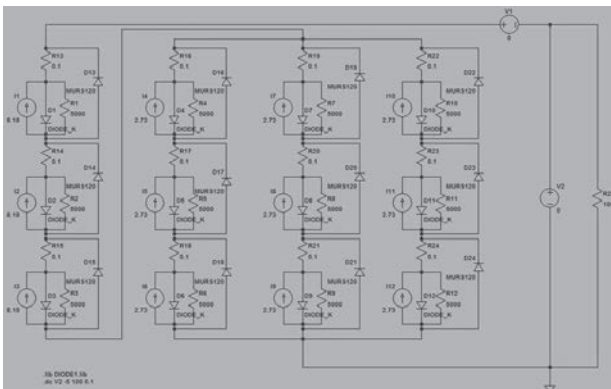


Fig.13 Circuit model of array for optimal configuration using relay

図 13 接点切り替え後の等価回路モデル

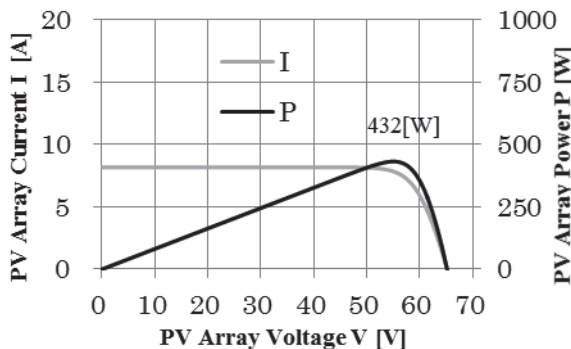


Fig.14 Array characteristics during the optimal configuration
図 14 接点切り替え後の I-V 特性と P-V 特性

6. 実験と結果

2016 年 1 月 16 日 (土) 14 時 35 分から 14 時 55 分にかけて (天気: 晴れ, 気温 9.7[$^{\circ}\text{C}$], 全天日射強度: 0.49[kWh/ m^2]) 215[W] の PV モジュール 4 枚 (京セラ製, 多結晶シリコン, KS215P-3CJCE) を使用した実験を行った. その様子を図 15 に示す. 図 8 のような部分陰は遮光シートを用いて作成した. 遮光シートは透明のシートに透過率が 33%になるようにクラフトテープを貼り付けたものを使用した. また部分陰用の電磁リレーを試作し, 部分陰が生じると自動で最適な回路構成に切り替わるように接続した. 部分陰があり電磁リレーを用いていない場合の I-V 特性と P-V 特性を図 16 に示す. 実験ではシミュレーションよりも並列抵抗が小さかった可能性があり電流 I に傾きが生じた. 図 16 から出力の極大値が二つ生じていることが分かる. また最大出力は 114[W]である. 電磁リレーを用い図 13 に示すような最適な回路構成とした場合の I-V 特性と P-V 特性を図 17 に示す. 破線は電磁リレーを用いていない場合の I-V 特性と P-V 特性である. 極大値が一つとなり最大出力は 114[W]から 186[W]へ増加した. ただし, 電磁リレーを用いた場合, I-V 特性と P-V 特性には図 17 のようにヒステリシス (リレー動作中の電流 I_o と電力 P_o とリレー復帰中の電流 I_r と電力 P_r に分かれる) が存在し, 開放電圧の点からの山登り法ではリレーが動作する前に最大出力点が決まってしまうため, 短絡電流の点からの山登り法などを行うことが必要であることが分かった.

表 1 に実験による測定値とシミュレーションによる推定値を示す. 理想条件での回復率は 100[%], コイルの抵抗を考慮したシミュレーションでの回復率は 84.4[%]であるが, 実験結果ではそれよりも高い 95.9[%]となった. これより, 電磁リレーを用いて最適な構成にする方式は効率改善の大きな効果があるといえる. さらに電磁リレーを用いることで出力の極大値が一つとなるため MPPT 制御も行い易くなる. しかし実際には電磁リレーの消費電力による PV アレイの出力の低下も考えなければならない. 実験の 95.9[%]は実験を行った季節が冬であり, 太陽の仰角が小さく, 全天日射強度も 0.49[kWh/ m^2]であったため, コイルを流れる電流が小さくなり, コイルでの電力損失がシミュレーションよりも小さくなったと考える. その結果, 実験による測定値の方がシミュレーションによる推定値よりも回復率が大きくなった. この電流は常に定格電流よりも小さく電力は電流の 2 乗に比例するため, 年間でのリレーの電力損失は定格で見積もるより小さいと考える. また電磁リレーの寿命はリレーのデータシートより 50 万回以上で一日平均数回の動作

であるため考慮する必要はない．今回の実験では 4 枚のモジュールを使用した，1 スtring 8 枚 2 列で 16 枚のモジュールを使用する場合は 4 直列モジュールを 1 セットとして 4 つに分けることで同様の電磁リレーによる効果を得ることができる．また，String 数が 3 以上の場合は，例えば最も陰のかかり易い端の 2 列の String に適用すれば良いと考えられる．この方法は複雑な回路や電源が必要なく，コイル 2 つを有する電磁リレーのみを使用すればよいため非常に低コストである．

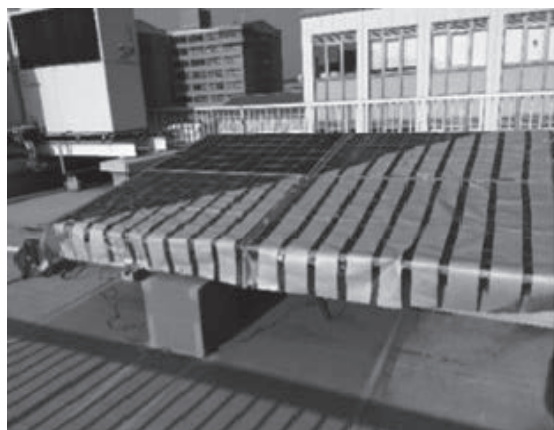


Fig.15 PV array with shading sheet of 33% transmittance
図 15 実験風景

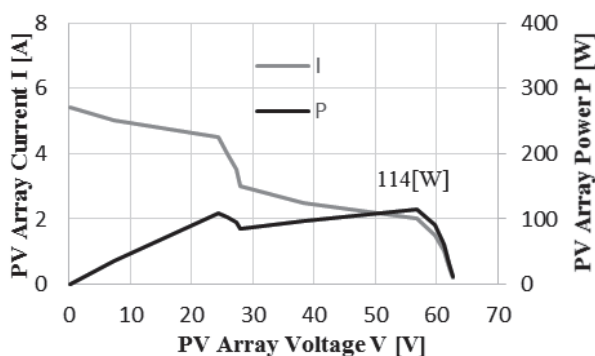


Fig.16 Experimental array characteristics without the Shade-Relay during the partial shading condition
図 16 電磁リレー無しの I-V 特性と P-V 特性

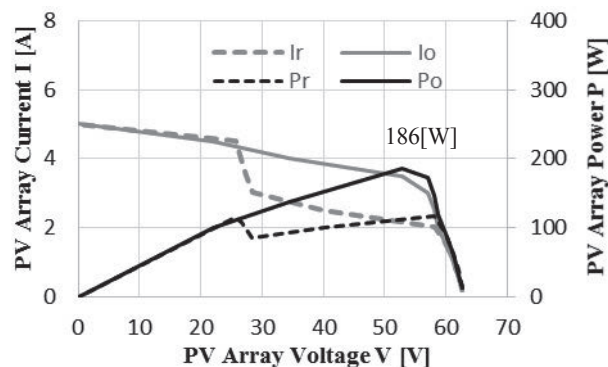


Fig.17 Experimental array characteristics with the Shade-Relay during the partial shading condition
図 17 電磁リレー有りの I-V 特性と P-V 特性

7. おわりに

本論文では，部分陰状態では複数の電力の極大値が存在するため低出力電力となる PV アレイを最適化する PV モジュールの構成を，電磁リレーを用いて自動で切り替える方法を提案した．その結果，部分陰状態にも関わらず電力の極大値を一つにし，最大出力を増加させることができた．実験より 33.3[%]の透過率の部分陰では 95.9[%]の電力を回復させることができた．電磁リレーのコイルの抵抗を低減させ，電磁リレーでの電力損失を低減することで，シミュレーションでの推定値を超える出力の回復も期待できる．ただし，電磁リレーを用いた場合の I-V 特性にはヒステリシスがあり，電磁リレーを動作させるには PCS の MPPT 制御の改良が必要であることが分かった．

今回はある特定の形状や日射強度の部分陰についての実験であった．今後は異なる形状の部分陰についての電磁リレーの有効性や陰における日射強度が非常に低い場合に電磁リレーが動作することによる電力損失の検討が必要である．それに伴い，年間を通じた電磁リレーによる回復電力や損失電力を見積もるためのシミュレーションや実験を行い，最適な動作電流などを求めていきたい．また電磁リレーの切り替え時のヒステリシス特性や直流アーク放電についても対処しなければならない．

Table 1 Simulated and measured power of the partially-shaded PV array
表 1 実験による測定値とシミュレーションによる推定値

	Ideal	Simulated with coil resistance	Experiment
Power generation of unshaded PV array	858W	858W	378W
Limit power generation of partially shaded PV array : P _l	420W	432W	186W
Power loss without Shade-Relay : P _c	140W	131W	74.7W
Power loss of Shade-Relay : P _r	0W	20.4W	3.04W
Percentage of Power Recovered : (P _c - P _r)/P _c	100.0%	84.4%	95.9%

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K13935 の助成を受けたものです.

参考文献

- (1) 三島智和・大西徳生, 太陽電池アレイの部分陰補償制御システム, T. IEE Japan, Vol. 122-D, No. 8, pp799-806 (2002)
- (2) 中島孝, 日射量推定における気象学・大気放射学の活用, 「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術」, 一般社団法人日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部門第 5 回セミナー (2013. 8. 5)
- (3) 板子一隆・森武昭, 独立型太陽光発電システムの電流センサレス MPPT 制御方式, 電学論 D, 125, 10, pp905-910 (2005)
- (4) 板子一隆・森武昭, 太陽光発電システムにおける I-V 特性スキャン型 MPPT 制御の部分陰時の効果, 電気設備学会誌, Vol132, No4, pp301-306 (2012)
- (5) 南野郁夫・原岡了佑, 部分陰による太陽光発電の発電量低下を回復させる陰対策リレーの提案, 太陽／風力エネルギー講演論文集 (2013), 109, pp397-400 (2013. 11)
- (6) Ryosuke Haraoka・Ikuo Nanno, “Proposal of the Shade-Relay to Recover the Loss Power of the Partial Shading PV System”, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, IS1-4, pp1-4 (2015. 3. 9)