

研究成果報告書

研 究 題 目		集光式 PV システム用定電圧制御パワーコンディショナの開発	実 施 年 度 平成 28 年度
代 表 研 究 者	所 属	津山工業高等専門学校 総合理工学科	
	氏 名	桶 真一郎	印
<p>1. 研究の目的・背景</p> <p>集光式太陽光発電（CPV）システムは、海外とくに欧州では Amonix などの有力企業によって一定の地位を確保しつつある。今後も我が国での普及はさまざまな要因から容易ではないが、高い技術力を有する国内企業があることから、欧米や豪州への輸出産業として成長の可能性がある。太陽光発電に用いられるほとんどのパワーコンディショナ（PCS）は、直流側の電流・電圧を最大電力点追従（MPPT）制御している。MPPT 制御は、電流あるいは電圧を変化させて最大電力点を探索する山登り法によって実現されることが多い。MPPT 制御には常に最大電力点付近で運転する長所がある一方で、I-V カーブが急激に変動したときには最大電力点を追従できず、発電効率が低下する短所がある。このことは、曲線因子（FF）が高く I-V カーブが長方形に近い太陽電池を使用する際に大きな問題となる。集光式 PV システムには多接合化合物太陽電池が用いられることが多く、それらの FF は 0.8 以上と高いことが知られていたが、PCS には従来の非集光式 PV システムと同じものが使われることがほとんどであった。一方で、直流側の電圧を一定とする定電圧制御は、一部の小規模な PV システム以外にはほとんど採用されていない。FF があまり高くない場合、わずかな I-V カーブの変化によって動作電流が大きく変化して発電電力が大きく変動することを防ぐために動作電圧を最適動作点電圧の 80%程度とすることが多く、発電効率が低下することが主な理由であった。</p> <p>本研究の第一の目的は、従来の結晶系シリコン太陽電池とは異なり化合物系の多接合太陽電池を用いる CPV システムを実使用環境（屋外で長期暴露するフィールド試験）におき、その FF が定電圧制御に耐えうるほど高いことを実証することである。第二の目的は、CPV システムのフィールド試験で得られた実際の発電特性データに基づいて定電圧制御と従来の MPPT 制御とを比較し、とくに発電電力がどのように異なるかを定量的に示すことである。第三の目的は、定電圧制御 PCS の実現に向けて、任意の CPV システム・モジュールの制御電圧を定める方法を示すことである。これらの目的を達成するために、実証レベルの CPV システム・モジュールを用いたフィールド試験を実施し、その発電特性データや気象データを収集した。それらの計測データに基づき CPV システムにおける定電圧制御をシミュレーションした。</p>			

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

2.1 実施内容

本研究で用いた CPV システムは、レンズ、二次光学系（ホモジナイザー）、および三接合化合物太陽電池を組み合わせた発電モジュールを太陽追尾装置に搭載している。本発電モジュールは 2003 年に製作された初期型のもので、幾何学的集光倍率は 550 倍、受光面積は 0.545 m²、定格出力は 150 W である。2005 年 10 月～2009 年 5 月は愛知県豊橋市で、2010 年 9 月以降は岡山県津山市でそのフィールド試験を実施している。なお、太陽追尾装置の変更に伴い、2013 年 8 月以前を津山 I 期、2013 年 12 月以降を津山 II 期と区別する。また、2013 年 12 月からは上記のモジュールに加えて幾何学的集光倍率 820 倍、受光面積 1.0 m²、定格出力 280 W のモジュールの発電データの収集を実施した。CPV システムの比較対象として、南東向きに傾斜角 30° で設置した受光面積 1.40 m²、定格出力 190 W の平板式 PV（FPV）システムの発電データも計測した。

CPV システムの FF を長期的に評価したところ、時間の経過や追尾装置の変更に伴う変化はあるものの、おおむね 0.8 以上と従来の PV システムに比べて高い水準で推移したことがわかった。また、最大電力点電圧は季節変動以外に経年変化などは見られなかった。このことから、定電圧制御で運転した場合でも損失があまり大きくならないと予想した。CPV システムのフィールド試験の過程において、空気中のエアロゾルや黄砂の飛来によるレンズ表面の汚れが発電特性に及ぼす影響を検討したが、日本の気候ではある程度の間隔で発生する降水によって汚れが洗い流されるため、ほとんど問題にならないことが明らかになった。また、直達日射を遮る霧やレンズ表面に生じる霜の影響についても検討したが、霧や霜が発生するような日は静電であることが多いため、年間の発電電力量に影響を及ぼすほどではないことがわかった。

実際のシステムを定電圧制御で運転するためには、あらかじめ制御電圧 V_c を定める必要がある。本研究では、定格出力が 150 W の CPV モジュールの特性値を用いてその方法を考案した。まず、I-V カーブを FF で分類し、それらの電流値を短絡電流で規格化した。次に、FF ごとに平均最大電力点を求め、それを境に I-V カーブを定電流領域と定電圧領域に分けた。最後に、それぞれの領域について最小二乗法に基づき直線近似し、それらの直線の交点をその FF に適した制御電圧 V_c とした。

定電圧制御と従来の MPPT 制御とを比較する際、MPPT 制御については山登り法などによる MPPT 動作による時間遅れを考慮しない理想 MPPT 制御と、その時間遅れを考慮した MPPT 制御を想定した。時間遅れを考慮した MPPT 制御については、時間遅れを 1～5 秒の範囲で 1 秒ごとに変化させ、それぞれの場合の発電量を計算した。具体的には、ある時刻の I-V カーブの最大電力点電圧をその 1～5 秒後の I-V カーブにおける動作電圧として発電電力を計算した。

2.2 結果と考察

2.1 節で説明した方法で求めた FF と V_c (開放電圧に対する%値) との関係を図 1 に示す。これらの関係は、次のような近似式で表すことができる。

$$V_c/V_{oc} = 88.97(FF - 0.70)^4 + 0.8613 \quad (1)$$

この式 (1) に、対象とする CPV モジュールの定格 FF と定格開放電圧 V_{oc} を代入することにより、そのモジュールに適した V_c を得ることができる。たとえば、定格出力 280W の CPV モジュールの場合は定格 $FF: 0.82$, $V_{oc}: 70V$ から、 $V_c: 61.6V$ を得ることができる。ただし、この式が適用できるのは FF が 0.7 以上の場合である。なお、PCS の直流側電圧を任意の制御電圧で定電圧動作させることは、現在普及している MPPT 制御に比べて技術的に非常に簡単である。

図 2 に、CPV システムに理想 MPPT 制御を適用した場合の発電電力 P_{mppt} と定電圧制御を適用した場合の発電電力 P_{Vc} の快晴日における日変化例を示す。同図から、 FF の高い CPV システムの場合は、どちらの制御方式でも発電電力にはあまり差があまりないことがわかる。この一日において、理想 MPPT 制御の場合の発電電力量に対する定電圧制御の場合の発電電力量の減少分 (定電圧制御によって生じる発電量損失) は 2.34% であった。図 3 に、CPV および FPV システムにおける理想 MPPT 制御の場合の日積算発電量と定電圧制御によって生じる発電量損失との関係を示す。CPV システムの発電量損失は日積算発電量によらず 3% 以下であった。一方で、FPV システムの発電量損失は日積算発電量の増加に伴い大きくなり、最大で 18.9% に達した。CPV システムの発電特性データに基づき、定電圧制御、理想 MPPT 制御、および時間遅れを考慮した MPPT 制御の発電電力量を比較し

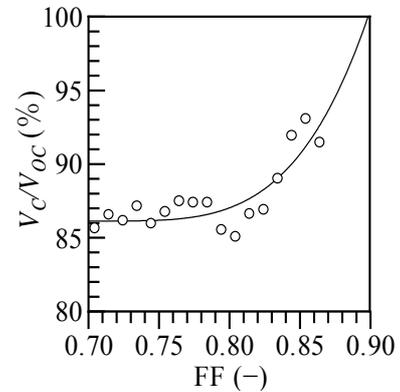


図 1 FF と V_c との関係

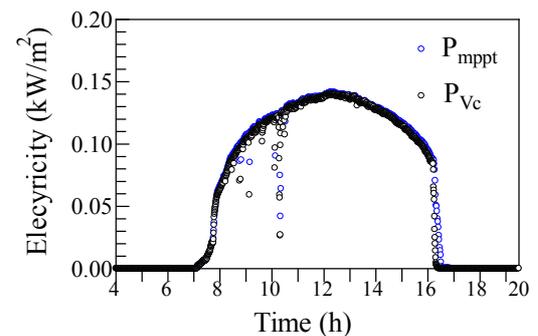


図 2 定電圧制御と理想 MPPT 制御との発電電力の比較

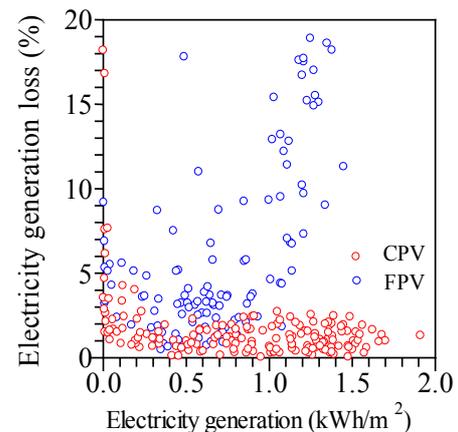
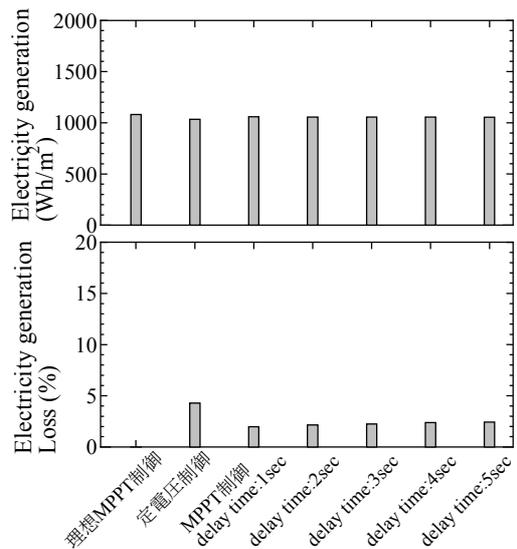
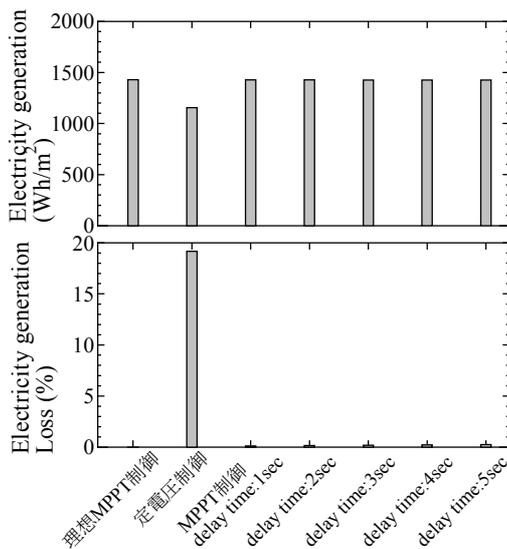


図 3 日積算発電量と発電量損失との関係



(a) 日射が安定していた日

(b) 日射変動が激しかった日

図4 日積算発電電力量と発電量損失

た。図4に、それぞれの制御方式における日積算発電電力量と理想MPPT制御に対する発電量損失を示す。なお、日射が安定していた日(a)と日射変動が激しかった日(b)のそれぞれについて示した。同図(a)から、日射が安定していた場合にはMPPT動作の時間遅れの影響は非常に小さくなり理想MPPT制御とほぼ同等であることがわかった。それに対して定電圧制御の場合には20%近い発電量損失が生じた。一方で、同図(b)に示す日射変動が激しかった日の場合には、定電圧制御の場合の発電量損失は時間遅れのあるMPPT制御とほとんど差がなく、5%未満にとどまることがわかった。同様の計算を1年間にわたって行った結果を図5に示す。定電圧制御による発電電力量の損失は理想MPPT制御に比べても7%程度にとどまることがわかった。なお、時間遅れを含むMPPT制御の場合でも2~3%の損失が生じた。すなわち、実際のMPPT制御に対する定電圧制御の場合の発電電力量の低下は数%以下にとどまることがわかった。このことは、制御回路の簡素化や堅牢化などのメリットを踏まえると、CPVシステムにおける定電圧制御PCSの採用の可能性を示したといえよう。

申請時に計画した定電圧制御を搭載した集光式PVシステム用PCSの設計に関しては、一般のCPVモジュールの制御電圧を求めることのできる式(1)を導出することができたこと、ならびに、従来のMPPT制御に比べて定電圧制御によるCPVシステムの発電量への影響を示したことにより、おおむね達成できたと考えている。

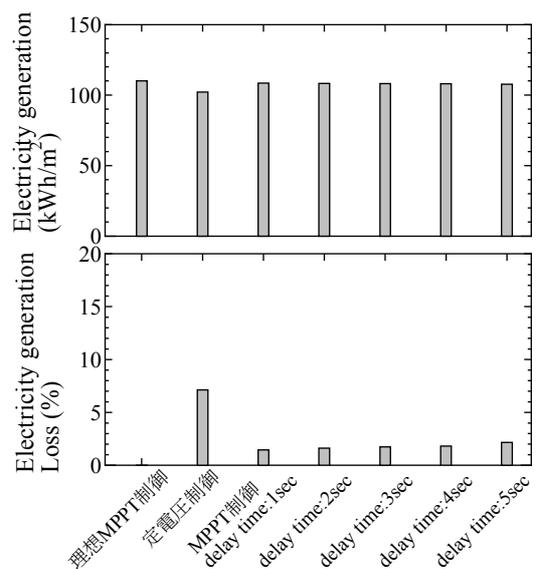


図5 年間発電量と発電量損失

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

【申請時】 申請額：490,000 円

設備備品費	120,000 円（データログ）
消耗品費	320,000 円（計測計装部品）
旅費	50,000 円（学会）

【実績】 配分額：490,000 円

設備備品費	91,368 円（デジタルマルチメータ）
消耗品費	163,832 円（PV モジュール用コネクタなど計測計装部品）
旅費	210,300 円（電気学会，日本太陽エネルギー学会など）
間接経費	24,500 円（学校運営管理費）

※研究の進捗状況を考慮した結果，情報収集および成果発表のための学会参加のための旅費が計画より多く必要となった。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究では，集光式 PV システムの特性に適した定電圧制御パワーコンディショナの開発に向けて，その運転制御における定電圧制御の適用の可能性について検討するとともに，制御電圧の算定方法を提案した。従来のパワーコンディショナは MPPT 制御を実装しているものが大半であり，定電圧制御はそれにくらべてはるかに簡単な制御方法である。課題はシステムごとに適切な制御電圧が異なることであったが，本研究で提案した方法を用いることにより個々の集光式太陽光発電システムに合わせた制御電圧を決定することができる。制御プログラム以外は従来のパワーコンディショナをほぼそのまま利用することができるため，技術的な課題はほぼないといってよく，定電圧制御パワーコンディショナの実用化の見込みは極めて高い。また，海外では集光式太陽光発電システムの導入が急拡大していることから，市場のニーズも高いといえる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

1. Chiki, S.Oke, N.Yamada: "Estimation of electricity characteristics by long-term field test of a CPV module utilizing diffuse irradiance", International Conference of "Science of Technology Innovation" 2017 (STI-Gigaku 2017), Jan.5-7, 2017, Nagaoka, Japan (2017)
2. 地木郁真, 桶真一郎, 山田昇:「CPV+モジュールの発電電力における散乱日射の寄与」, 平成 29 年電気学会全国大会講演論文集, 4-084 (2017)
3. 春日紫吹, 桶真一郎:「自己組織化マップによる日射量予測データのクラスタリング」, 平成 29 年電気学会全国大会講演論文集, 6-211 (2017)
4. 桶真一郎, 帆足介, 山本真弘:「任意地点の日射スペクトルの推定のための全天日射強度を用いた簡易モデル」, 太陽エネルギー, Vol.42, No.3, pp.37-43 (2016)
5. 地木郁真, 桶真一郎, 山田昇:「散乱日射活用型 CPV モジュールの発電特性の長期フィールド試験による検討」, 太陽／風力エネルギー講演論文集 2016, pp.455-456 (2016)
6. 安東克樹, 森光晴, 桶真一郎, 見目喜重, 荒木建次:「集光式太陽電池モジュールにおける結露の持続に及ぼす気温の影響」, 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, P50 (2016)

ほか, 投稿論文 1 編 (Solar Energy など) を予定。