

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 18 日現在

機関番号：55301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820106

研究課題名(和文) 高いFFを有する集光式PVシステムのための定電圧制御パワーコンディショナの開発

研究課題名(英文) Development of power conditioning system with a constant voltage control for concentrator photovoltaic system

研究代表者

桶 真一郎(Oke, Shinichiro)

津山工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：20362329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：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集光式(CPV)システムは、屋外での実使用環境において、曲線因子(FF)が0.8以上と定電圧制御に耐えうるほど高いことを実証した。そのうえで、フィールド試験において収集した発電特性データに基づくシミュレーションを実施し、定電圧制御の採用による発電量の損失は従来の最大電力点追従(MPPT)制御に比べて数%に留まることを確かめた。また、定電圧制御パワーコンディショナの実現に向けて、任意のCPVシステム・モジュールの制御電圧を簡単に求めることのできる式を提案した。

研究成果の概要(英文)：A constant voltage control can be applied to control for concentrator photovoltaic (CPV) system had high FF (over 0.8) in outdoors. Electricity generation of the CPV system with constant voltage control was calculated using electricity generation characteristics measured in our field test of the CPV system. The constant voltage control was a few percent smaller in the electricity generation than conventional maximum power point tracking control. This is a enough practical value. We proposed that an equation can be calculated to control voltage for the CPV system with the constant voltage control.

研究分野：太陽光発電システム

キーワード：集光式太陽光発電 パワーコンディショナ 電流-電圧特性 フィールド試験

1. 研究開始当初の背景

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った。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。

2. 研究の目的

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。

3. 研究の方法

3.1 CPV システム

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。図 1 に、CPV システムの外観を示す。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。

図 2 に、豊橋、津山 I 期・II 期のそれぞれの期間に計測した I-V カーブの例を示す。同図から、フィールド試験開始当初の I-V カーブは直線的で FF は 0.84 と非常に高かったが、津山 I 期 (2010 年 12 月) にはいくつかの段差が見られるようになり、それに伴い FF が低下したことがわかる。これは、ホモジナイザーの経年劣化や太陽追尾誤差による集光の不均一によるとみられる。太陽追尾装置の



図 1 研究対象とした CPV システム

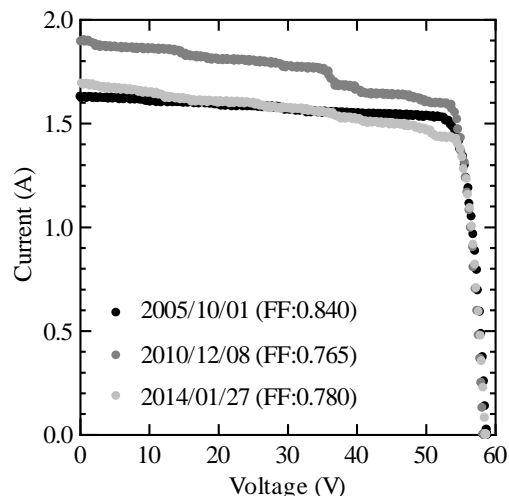


図 2 CPV システムの I-V カーブの変遷

変更後の津山 II 期（2014 年 1 月）には，追尾精度の改善によって I-V カーブの段差は減少し FF は改善したが，直列抵抗の増加に伴うとみられる定電流領域の傾きには変化が見られなかった。

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。

3.2 制御電圧の決定と発電電力の計算

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。

3.3 定電圧制御と MPPT 制御との比較

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。

時間遅れを考慮した MPPT 制御を適用した場合の発電電力を求めるためには，時間間隔の短い I-V カーブが必要である。本研究では，天候が安定した晴天日には，短絡電流は直達日射強度に対して線形に変化することを利用し，1 秒ごとに計測している直達日射強度データを用いて，30 秒ごとに計測した I-V カーブを比例配分により変形することで

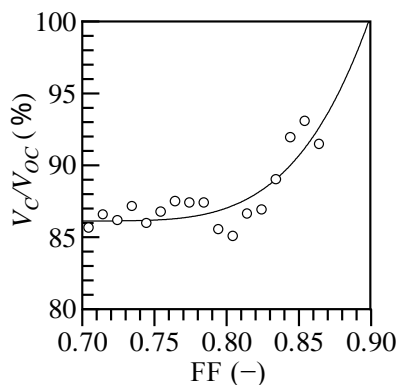
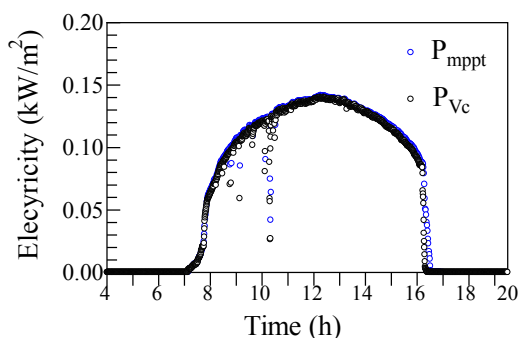
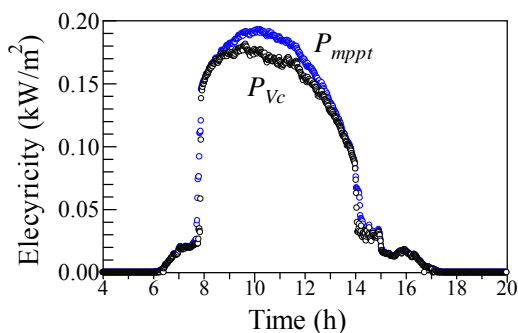


図 3 FF と V_c との関係



(a) CPV システム



(b) FPV システム

図 4 定電圧制御と理想 MPPT 制御との発電電力の比較

1 秒毎の I-V カーブを作成した。

4. 研究成果

4.1 最適制御電圧

3.2 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 3 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

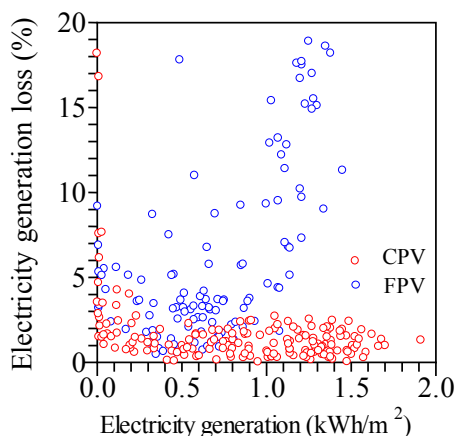


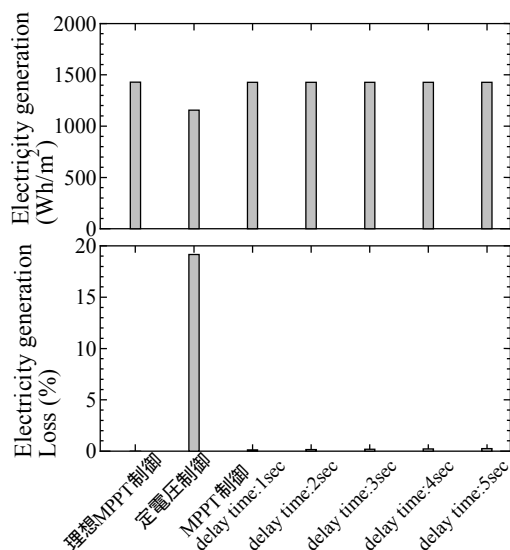
図5 日積算発電量と発電量損失との関係

CPV モジュールの場合は定格 FF0.82，開放電圧 70V から，制御電圧 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。

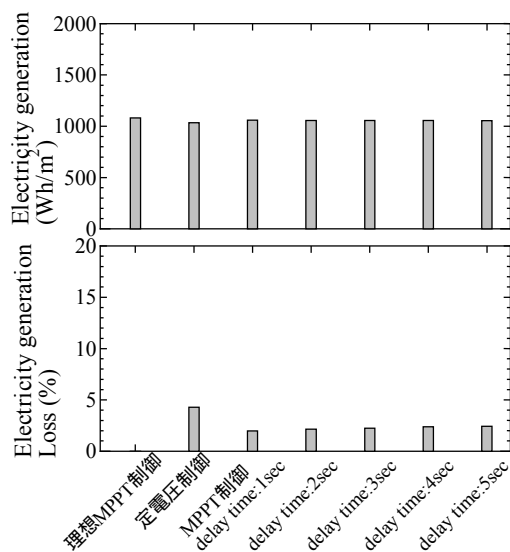
4.2 発電電力の比較

図4に，CPV および FPV システムにおいて理想 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_{cv} 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った。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。一方で，FPV システムの場合は定電圧制御により比較的大きな損失が生じていることがわかった。その値は，6.93% であった。図5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。

フィールド試験によって得られた 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た。図6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



(a) 日射が安定していた日



(b) 日射変動が激しかった日

図6 日積算発電電力量と発電量損失

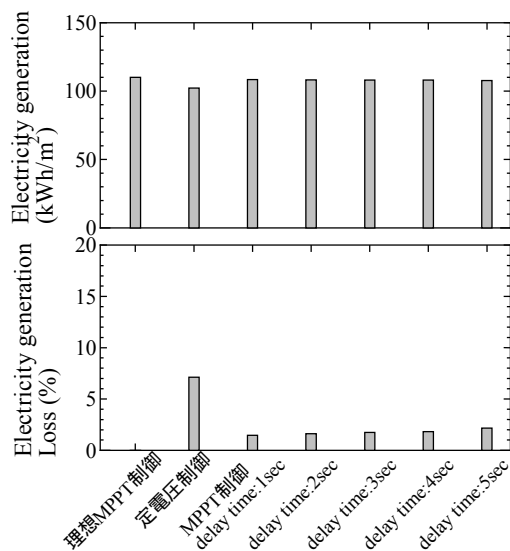


図7 年間発電量と発電量損失

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 7 に示す。同図から、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。

4.3 日射変動の影響

日射変動による影響を検討するため、時間窓を 1000 秒として最大日射変動幅を求め、その日平均値とそれぞれの制御方式を適用した場合の日積算発電量(理想 MPPT 制御を適用した場合に対する発電量損失)との関係を調べた。図 8 (a) に MPPT 制御(時間遅れ: 1, 3, 5 秒)を、同図 (b) に定電圧制御の結果を示す。MPPT 制御においては日射変動と発電量損失とは線形の関係があり、日射変動とともに発電量損失が増大することがわかった。一方で、定電圧制御においては日射変動が極端に小さいときを除いて常に一定程度の発電量損失が生じており、その大きさは日射変動とあまり関係がないことがわかった。

5. 主な発表論文等

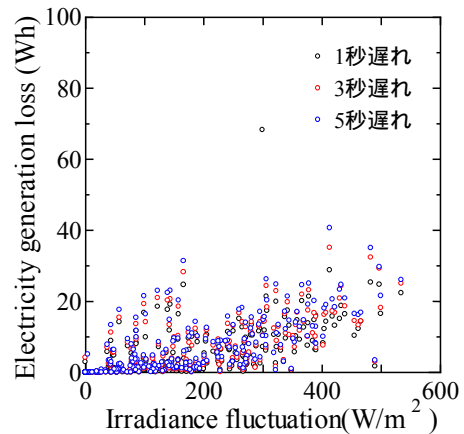
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

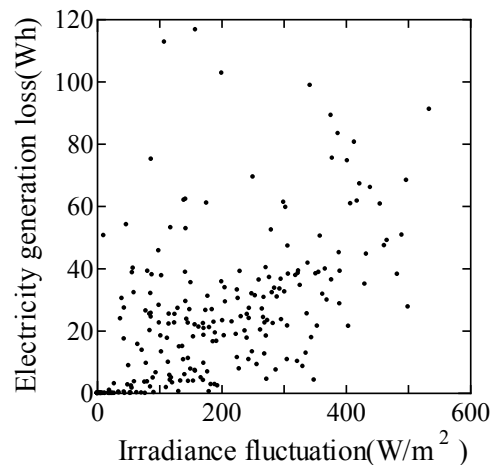
1. 桶真一郎, 帆足介, 山本真弘: 「任意地点の日射スペクトルの推定のための全天日射強度を用いた簡易モデル」, 太陽エネルギー, Vol.42, No.3, pp.37 - 43 (2016)
2. 桶真一郎, 佐伯暢之, 元田大貴, 見目喜重, 荒木建次: 「集光式太陽光発電システムの発電特性に及ぼすレンズの汚れおよび黄砂の影響」, 電気学会論文誌 B, Vol.134, No.5, pp.436 - 442 (2014)

[学会発表](計 11 件)

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+



(a) MPPT 制御



(b) 定電圧制御

図 8 日射変動と発電量損失との関係

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. 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)
4. 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)
5. 桶真一郎, 安東克樹, 森光晴, 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発生・解消およびその影響」, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2015, pp.289-292 (2015)
6. 地木郁真, 小出拓希, 桶真一郎, 平井大貴, 山田昇: 「散乱日射活用型 CPV モジュールの発電特性および熱特性の評価」, 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, 7-6 (2015)
7. 鏡幹志, 桶真一郎, 見目喜重, 荒木建次: 「CPV システムにおける定電圧制御と時間遅れを考慮した MPPT 制御との比

- 較」,平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, P53 (2015)
8. 小出拓希,桶真一郎,山田昇,平井大貴,岡本和也:「散乱日射活用型 CPV モジュールの発電特性の短期フィールド試験による評価」,平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, P54 (2015)
 9. 桶真一郎,安東克樹,鏡幹志,見目喜重,荒木建次:「集光式太陽光発電システムにおける旧型および現行モジュールの初期特性の比較」,太陽/風力エネルギー講演論文集 2014, pp.191-194 (2014)
 10. 桶真一郎,鏡幹志,元田大貴,見目喜重,荒木建次:「集光式太陽光発電システム用 PCS の開発に向けた直流定電圧制御の検討」,平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, pp.9-2-19 - 9-2-20 (2014)
 11. 鏡幹志,元田大貴,桶真一郎,見目喜重,荒木建次:「集光式および平板式 PV システムの定電圧制御による発電量の損失」,平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, P44 (2014)

安東克樹 (ANDO, Katsuki)
地木郁真 (CHIKI, Ikuma)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

津山工業高等専門学校 持続可能エネルギーシステム研究室 web サイト
(<http://www.tsuyama-ct.ac.jp/oke/>)

6. 研究組織

(1)研究代表者

桶真一郎 (OKE, Shinichiro)

津山工業高等専門学校・その他の部局等・准教授

研究者番号 : 20362329

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

見目喜重 (KEMMOKU, Yoshishige)

荒木建次 (ARAKI, Kenji)

元田大貴 (MOTODA, Hiroataka)

鏡幹志 (KAGAMI, Kanji)

小出拓樹 (KOIDE, Hiroki)