

太陽電池の短絡電流パルスに着目した 適応最大出力点追跡法

正員 野口季彦 (長岡技術科学大学)

学生員 富樫重則 (長岡技術科学大学)

准員 中本 良 (ユアサコーポレーション)

Short-Current-Pulse Based Adaptive Maximum-Power-Point Tracking for Photovoltaic Power Generation System

Toshihiko Noguchi, Member, Shigenori Togashi, Student Member (Nagaoka University of Technology),
Ryo Nakamoto, Associate (Yuasa Corporation)

This paper focuses on a maximum power point tracking method of photovoltaics by means of use of the short-current pulse. It has been reported that the optimum operating current is proportional to the short current and the maximum power point tracking can be performed by detecting the short current. The proposed method utilizes the intermittent short-current pulse to estimate the optimum operating current and its operating characteristics have experimentally been verified. Also, an adaptive mechanism to identify the parameter between the optimum current and the short current is discussed. A prototype of the controller has been set up and the experimental results have demonstrated excellent performance, which proves feasibility of the system.

キーワード：太陽電池，MPPT，短絡電流パルス，パラメータ同定

1. はじめに

再生可能なエネルギーへの転換が求められる中、設置条件の制約が少ない太陽電池は現実的な選択の一つとして期待される。しかし、そのエネルギー密度と効率の低さが普及の足かせとなっている。このような効率の低い太陽電池を最大限に利用する技術が最大出力点追跡法(MPPT)である。これまで太陽光発電システムにおいて種々のMPPTが研究されてきたが⁽¹⁾⁽²⁾、現在主流となっているものは数学的山登り法に基づく手法である。これは太陽電池に接続された電力変換器の動作電圧(電流)を直接変化させ、その変化量に対する出力電力の変化が零となる点(最大出力点)を探索するものである。この手法では実際の出力を測定するため、いかなる環境の変化にも高い適応性を有するが、応答の遅い点が問題となる。最近では適応アルゴリズム⁽³⁾やファジイ理論⁽⁴⁾などを用いた制御システムも報告されているが、これらも基本的には山登り法に基づいた手法である。

これとは対照的に、照度や温度を常時測定し、あらかじめ記憶しておいたデータテーブルをもとに動作点を決定する手法は応答性で有利な反面、太陽電池の経年変化や表面汚損などには完全に対応することができず、適応性に欠け

る点が問題である。また、照度や温度を測定するために複数のセンサを必要とするので、実装上いくつかの制約が課せられる。

今回注目したのは、太陽電池の短絡電流から最適動作電流を決定する手法である⁽⁵⁾。これは最大出力となる最適動作電流が短絡電流に比例する性質を利用したもので、制御の簡便さと優れた応答性の点で他の手法を凌駕する。しかし、発電を行わない短絡電流検出用のモニタ太陽電池を必要とするため、構成が冗長でコスト的に不利である。また、この手法は一定であると仮定したパラメータ(最適動作電流-短絡電流比)に基づいてMPPTが行われるため、影等によるパラメータ変動に対して適応性をもたない。

本稿では太陽電池の短絡電流パルスに着目したMPPTシステムについて検討した。これは太陽電池を直接間欠的に微小時間短絡させ、このとき流れるパルス状の短絡電流から最適動作電流を求めるものである⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。また、トランジスタの能動領域を用いた、最適動作電流-短絡電流比を補正する適応機能の付加についても検討する⁽⁹⁾。ここでは、はじめに短絡電流から最適動作電流を決定する手法の有用性を種々の環境のもとで確認した後、提案するシステムの動作原理と運転特性について報告する。

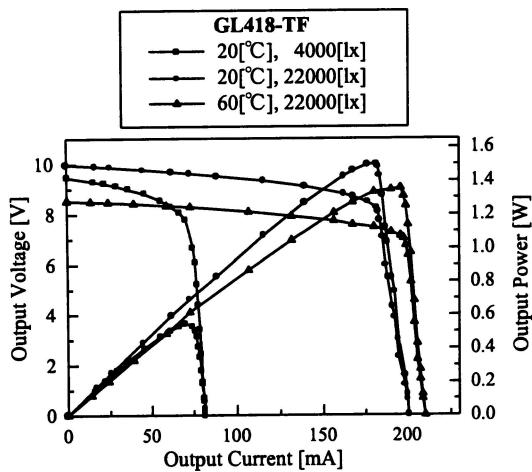


図 1 太陽電池の電圧-電流特性および電力-電流特性 (GL418-TF)

Fig. 1. V-I and P-I characteristics (GL418-TF).

表 1 GL418-TF の電気的特性

Table 1. Ratings of GL418-TF

Rated maximum power	6.5 [W]
Rated output voltage	6 [V]

2. 太陽電池の基本特性と最適動作点

〈2・1〉 短絡電流と最適動作電流 図 1 に種々の照度および温度における供試太陽電池パネル（昭和シェル製 GL418-TF：単結晶 Si）の電圧-電流 (V-I), 電力-電流 (P-I) 特性を示す。表 1 は供試太陽電池パネルの電気的特性である。図 1 より照度および温度の変化に伴って最大出力電力と最大出力点が変化することがわかる。ここで照度と温度の組み合わせによっては、異なる特性曲線でありながら最大出力となる動作点が複数存在することに注意しなければならない。さて、文献では次式のように、任意の照度 E において最大出力となる最適動作電流 I_{op} は短絡電流 I_{sc} に比例することが報告されている⁽⁵⁾。

$$I_{op}(E) = k I_{sc}(E) \quad (k = \text{const.})$$

しかし、太陽電池の出力特性は照度だけでなくパネル面の温度によっても大幅に変化するが、上式では考慮されていない。そこで、先ほどと同一の供試太陽電池パネルで、照度を 1000~32000[lx], 温度を 0~60[°C] の範囲で変化させたときの最適動作電流とそのときの短絡電流の関係を実測した。その結果を図 2(a) に示し、参考までに最適動作電圧と開放電圧の関係も図 2(b) に示す。(a) より短絡電流に対し最適動作電流は単純に比例関係にあることがわかる。この結果から、最適動作電流と短絡電流の関係は照度だけでなく、いかなる温度においても一次関数で近似されることが確認できる。一方、(b) に示したように、太陽電池の開放電圧は照度に対して正、温度に対して負の係数をもつ

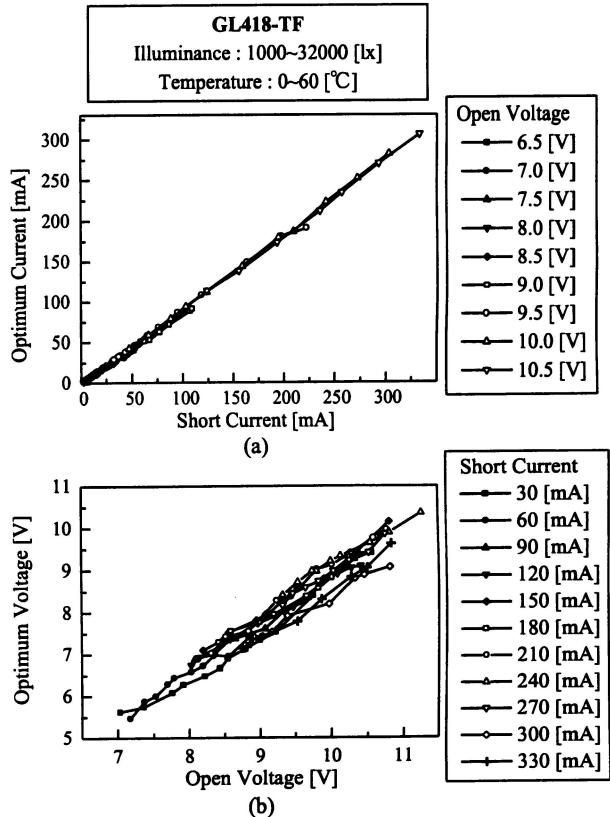


図 2 最適動作点の特性 (GL418-TF)

(a) 最適動作電流-短絡電流特性

(b) 最適動作電圧-開放電圧特性

Fig. 2. Optimum operating conditions (GL418-TF). (a) Optimum current for maximum power against short current. (b) Optimum voltage for maximum power against open voltage.

て変化する。同一の開放電圧における最適動作電圧の幅は ±0~6[%] とばらつきが大きいため、開放電圧のみで一意に最適動作点を決定することはできない。以上の実測結果より、短絡電流のみを検出することで照度、温度に関係なく最大出力となる最適動作点を参照できることが確認された。図 2(a) によれば、この供試太陽電池パネルの最適動作電流-短絡電流比 k は 0.92 であり、短絡電流を 0.92 倍することにより最適動作電流を容易に求めることができる。

次に、この結果が一般に敷衍できるかどうか、他の単結晶 Si 太陽電池 (GM1618-MF と GT144) についても最適動作電流と短絡電流の関係を調べた。表 2 に GM1618-MF と GT144 の電気的特性を示す。図 3 は GM1618-MF で照度を 1500~20000[lx], 温度を 0~60[°C] の範囲で変化させたときの最適動作電流-短絡電流特性、図 4 は GT144 で照度を 6000~130000[lx], 温度を 20~50[°C] と変化させたときの同特性である。どちらの結果も図 2(a) と同様に短絡電流に対する最適動作電流は一次関数で近似できる。以上の実測結果より、単結晶 Si 太陽電池における最適動作電流と短絡電流は、一般に照度や温度に関係なく一次関数とみなすことが可能である。

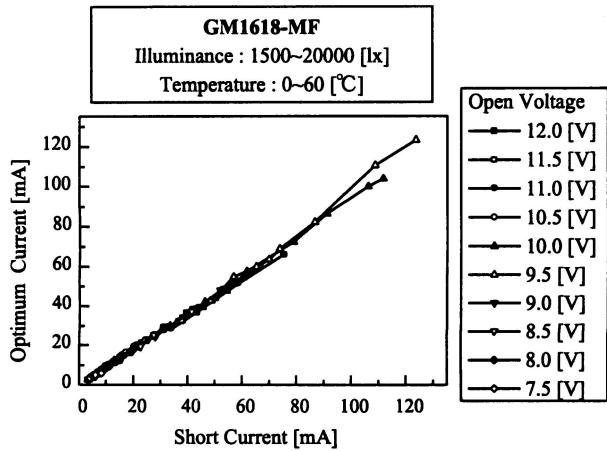


図3 最適動作電流–短絡電流特性
(GM1618-MF)

Fig. 3. Optimum current for maximum power against short current (GM1618-MF).

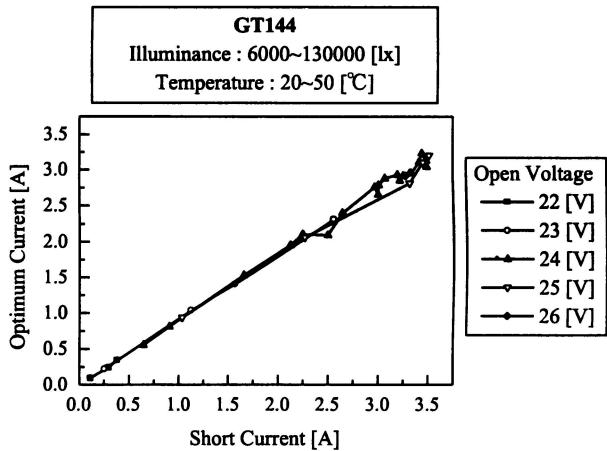


図4 最適動作電流–短絡電流特性 (GT144)

Fig. 4. Optimum current for maximum power against short current (GT144).

〈2・2〉 k の変化について 以上の実験結果を通じて、短絡電流を用いた最適動作点決定法の有用性が確認されたが、この手法で最も重要な要素は動作点を決定するパラメータ k である。先の実験結果から、 k の値は GL418-TF で 0.92、GM1618-MF、GT144 ではともに 0.91 と算定される。しかしながら実際問題として、 k はいかなる状況においても一定とは限らない。例えば、太陽電池パネル面の照度が均一でない場合、この k が変化するため動作点が最適動作点から大きく逸脱することがある。また、 k は使用する太陽電池によって個体差があるため、 k を一定とした同一の設計がすべての太陽電池にとって最適とは限らない。

図5は供試太陽電池(GL418-TF)のパネル面に数パターンの影をつけ、照度不均一を模擬したときの k の特性を示している。照度が低くなる(短絡電流が小さくなる)と、影がない場合でも k は若干減少するが、 k を一定と考えて制御

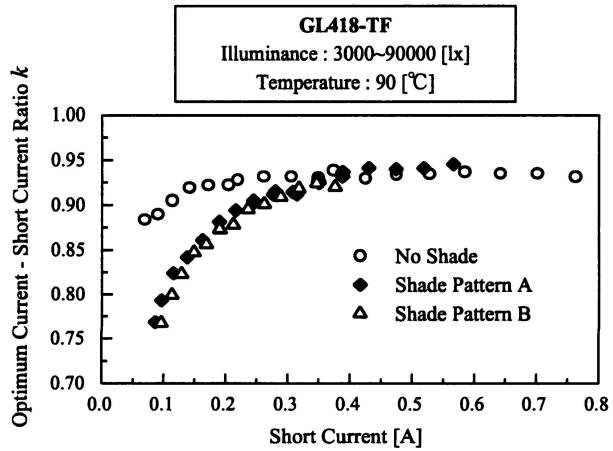


図5 影による k の変化

Fig. 5. Characteristics of k .

表2 GM1618-MF および GT144 の電気的特性

Table 2. Ratings of GM1618-MF and GT144

Photovoltaic panel	GM1618-MF	GT144
Rated maximum power	1.4 [W]	67 [W]
Rated output voltage	6 [V]	21.2 [V]

しても差し支えない。しかし、影をつけた場合、その変化量は大きく無視できない。ここで問題となるのは、 k が実際より大きな値で MPPT 制御された場合である。周知のように太陽電池は電圧(電流)垂下特性をもつため、動作点が最大出力点を超えると出力が急激に低下する。したがって、 k の誤差が負であるかぎり甚大な影響はないが、正の誤差をもった場合、出力を大きく損なうことが懸念される。残念ながら k は後者の変化をもつ傾向にあり、照度の不均一が起こりうる場合、 k を適宜チューニングすることが不可欠となる。

3. 短絡電流パルスを用いた MPPT システム

〈3・1〉 短絡電流を用いた従来のシステム 図6(a)に文献による従来の回路構成を示す⁽⁵⁾。この回路は制御システムの一つとしてモニタ用の太陽電池を設け、そこから得られる短絡電流を指令値とすることにより MPPT 制御を行っている。この構成におけるモニタ用太陽電池は発電自体に寄与せず、一種のセンサとして機能するためコストや実装条件において不利な要因となる。また、モニタ用太陽電池とメインの太陽電池間の特性誤差を考慮しなくてはならず、両者の設置環境に相異が生じた場合、制御特性の劣化は免れない。

そこで本稿では、間欠的に微小時間太陽電池を短絡させ、パルス的に流れる短絡電流を計測することにより最適動作点を決定する手法について検討する。図6(b)に本手法の構成を示す。このような構成をとることでモニタ太陽電池が不要となり、制御系の簡素化が図ることができる。また、直接短絡電流を計測するので、メインの太陽電池とモニタ用

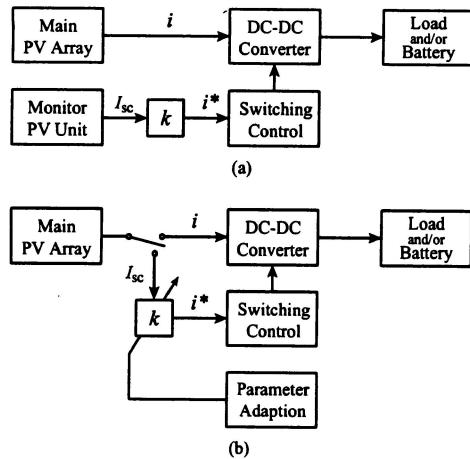


図 6 システム構成の比較

- (a) 短絡電流を用いた従来のシステム
(b) 短絡電流パルスに基づくシステム

Fig. 6. Comparison of system configuration. (a)Conventional system. (b)Short-current pulse based system.

の太陽電池の特性誤差を考慮する必要はない。さらに、回路短絡に使用するトランジスタはパラメータ k のオンライン同定にも利用され、 k の変動に対する適応性を提供する。

〈3・2〉 短絡電流パルスに基づく MPPT 図 7 に提案回路の構成例を示す。回路構成は一般的な昇圧形チップの入力にトランジスタ S_1 (FET) とホール CT を付加するのみでよい。 S_1 は短絡用トランジスタであり、間欠的に微小時間ターンオンする。このとき流れる短絡電流パルスを CT で検出し、これに k を乗じて電流指令値 i^* を生成する。一方、この CT はチップの電流制御にも用いられる。本手法における制御量は太陽電池の出力電流 i であり、これは平均電流を検出することで得られる。この i と i^* を比例積分 (PI) レギュレータに入力して電流制御を行う。このように本手法における基本的な MPPT 制御は短絡用トランジスタと電流センサ各々一個で可能なため、システム構成は非常に簡単となる。なお、 S_1 の後段に電源リップル抑制用のコンデンサが接続されているが、逆流防止用のダイオードを挿入しているため、太陽電池と同時に短絡することはない。

〈3・3〉 k 同定機能 k のチューニングは短絡用トランジスタ S_1 を能動領域で動作させることによって実現する。通常 S_1 のゲート信号はステップ的に変化するのでスイッチング動作を行うが、能動動作時はゲート信号をランプ関数状に変化させる。これにより太陽電池から見た負荷率は開放から短絡状態まで連続的に変化し、短期間に P-I 曲線のスキャンができる。このとき、FET のドレイン・ソース間電圧とドレイン電流を検出し、両者を乗じて瞬時電力 P を得る。これをピークホールド回路に基づくピーク電力点検出回路に入力する。この回路は P が最大となった瞬間にパルスを発生し、このパルスをトリガとしてその時点のドレイン電流、すなわち最適動作電流 I_{op} を測定するものであ

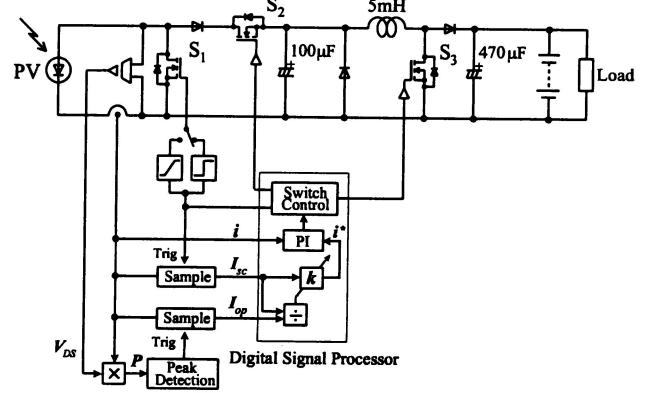


図 7 提案法による回路構成

Fig. 7. Configuration of proposed system.

表 3 実験条件

Table 3. Experimental conditions.

Test photovoltaic	GL418-TF
Rated maximum power	6.5 [W]
Rated output voltage	6 [V]
Switching frequency	10 [kHz]
Sampling interval of I_{sc}	80 [ms]
I_{sc} pulse width	80 [μs]
Load	560 [Ω]
Initial value of k	0.92

る。得られた I_{op} を同時に得られる I_{sc} で除することにより k を同定することができる。このとき、実負荷の影響で完全な P-I 曲線のスキャンができない場合があるため、トランジスタ S_2 をターンオフして実負荷を切り離す。この間、実負荷側には太陽電池から電力が供給されないので、この出力低下をバッテリー等の蓄電要素によって補償しなければならない。出力の変動は電力変換器として好ましくないが、 k の大幅な変動は希であるため、チューニングを頻繁に行う必要はない。 k のチューニングはシステム起動時と、それ以降は数分に一度の実行で十分である。

4. 提案法の実験結果

本節では提案するシステムに対し、供試太陽電池モジュールを接続したときの運転特性について述べる。運転条件は表 3 の通りである。

はじめに最適動作電流-短絡電流比 k の同定機能について述べる。図 8 は P-I 曲線スキャン時の各検出信号と I_{op} サンプリングトリガ波形である。トリガパルスは P が最大となる瞬間に発生している。図 9 はこの同定処理で得られた結果である。太陽電池パネルの設置条件は図 5 のそれと同様であり、各条件に対する k の同定結果は実線で示されている。これより FET の能動動作が P-I 曲線のスキャンに利用でき、 k が精度良く同定されていることがわかる。前節で述べたように、 k 同定中は本来得られるべき電力が出力されず、この間の電力はすべて損失となる。このため同定の周期は十分長くとり、損失の割合を低く抑えなければならな

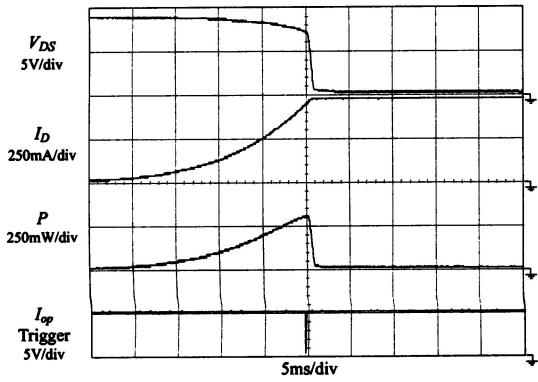


図 8 P-I 曲線スキャン時の各部動作波形

Fig. 8. Waveforms in scanning P-I curve.

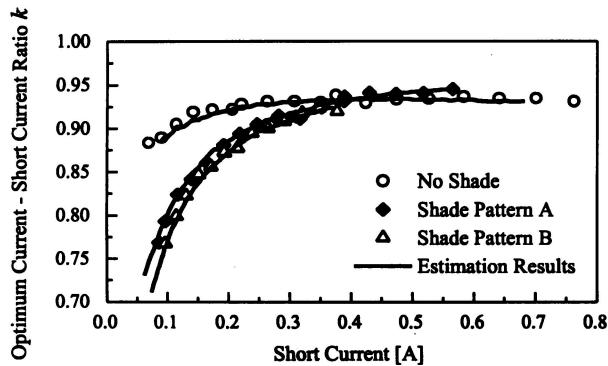


図 9 k 同定結果

Fig. 9. Estimation results of k .

い。試作したシステムでは同定に必要な期間は 25[ms] 程度であるが、同定周期が数分であればこの間の損失はほとんど無視できる。

図 10 は短絡電流パルス検出中の電流波形と各 FET のゲート信号、ならびに電流サンプリングトリガ信号の様子である。短絡直後は寄生容量や線路誘導によるリングが生じるので、電流が定常状態に達してからサンプリングする必要がある。このとき短絡電流を安定化させるために、チョッパの S_3 をオン状態のまま保持し短絡用トランジスタ S_1 をターンオンする。また、短絡電流の検出誤差を抑制するため、そのサンプリングは数回にわたって行われる。なお、 S_1 の能動動作を安定化させるため、ゲート・ソース間に RC フィルタを挿入しており、ゲート信号には 30[μs] の遅延が生じている。

次に、パネル面照度を急激に変化させたときの動作電流、電流指令値および出力電圧の応答を図 11 に示す。急激な照度の変化に対して速やかな動作点の移行が確認できる。照度上昇の過程で電流指令値 i^* が階段状に変化しているのは、 i^* が短絡電流パルス検出毎に更新されるためである。したがって、応答速度は I_{sc} の測定期間で決定されるが、測定期間が短いと短絡による太陽電池出力端および内部に存在する等価容量に蓄えられたエネルギーの消費が大きくなり、

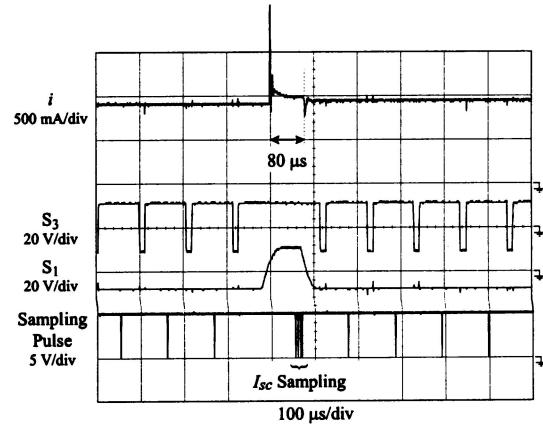


図 10 短絡電流パルスと各部動作波形

Fig. 10. Waveforms of short-current pulse and control signals.

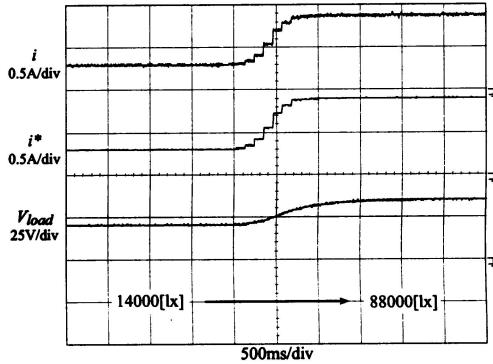


図 11 照度急変に対する応答

Fig. 11. Response against rapid change of illuminance.

効率を低下させる原因となる。しかし、本実験ではこの周期を短絡期間 80[μs] の 1000 倍に相当する 80[ms] としているため、実質的に短絡による損失は無視できるほど小さい。

図 12(a)(b) は種々の条件下で本システムによる動作点を電力-電流 (P-I) 曲線と共に示したものである。(a) は均一光の下で試験したもの、(b) は影により出力が低下している状態での動作結果である。ここで、P-I 曲線 (実線) は図 7 における S_3 の通流率を 0~100[%] に変化させて得た特性である。(b) のようにパネル面に影がさした場合、特性曲線の形状自体が変化する。 k 一定制御 (k の初期値 : 0.92) では黒点のように動作点が最大出力点から逸脱し、最大出力点とは関係のない動作点で運転することとなる。しかし、 k オンライン同定機能はこのような基本特性の変化に対しても適応性を与え、白点で示されたように正確な MPPT 制御を実現する。

以上の結果より、本システムが影による制御特性の劣化を改善し、広範囲にわたり正確に最大出力点を追跡可能であることが確認できた。

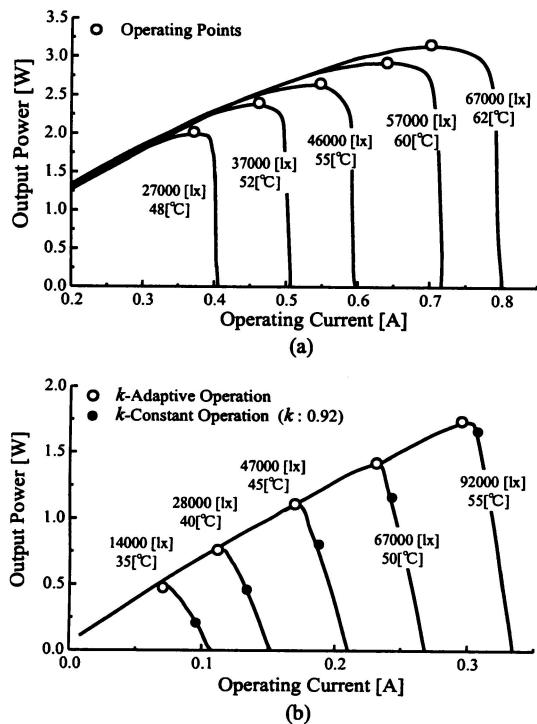


図 12 P-I 特性と提案法による動作点
(a) 均一照度における動作
(b) 不均一照度における動作

Fig. 12. P-I characteristics and operating points.
(a) Under evenly distributed illuminance condition. (b) Under unevenly distributed illuminance condition.

5. まとめ

本稿では短絡電流から最大出力点となる最適動作電流を求める方法に着目し、この方式が照度だけでなく温度変化にも対応可能であることを実験的に確認した。また、電力変換回路の構成を簡素化する手法と、照度不均一時の制御特性を改善する手法を提案した。前者は短絡電流パルス検出方式の採用により、後者はFETの能動領域を使った最適動作電流-短絡電流比オンライン同定方式の採用により、照度、温度や影等の外乱要因に対して適応性のある最大出力点追跡法を実現した。実験システムによる動作試験の結果、本手法により上記種々の環境因子に対しても良好な運動特性が得られることを確認した。

末筆ながら、本研究の推進に当たり、平成11年度岩谷科学技術研究助成金を交付していただいた財団法人岩谷直治記念財団に対し深謝いたします。

(平成12年02月09日受付、同12年06月12日再受付)

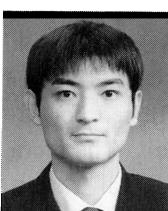
文 献

- (1) 大庭・佐藤：「太陽光発電システムの最大出力追跡制御法」電学論B, **106**, 7, 72-78 (昭61-7)
- (2) 大西・高田：「太陽電池の最大出力制御方式の比較と昇降圧チョッパ回路を用いた制御特性」電学論D, **112**, 3, 250-257 (平4-3)
- (3) 高原・山之内・松田：「環境の変化に対応可能な太陽光発電の最大電力適応取得制御系」電学論D, **119**, 12, 1529-1534 (平11-12)
- (4) 近藤・安野・他：「太陽電池のMPPTにおけるファジイ制御の検討」電学産応大, **3**, 217-220 (平11-8)
- (5) H.Matsuo, and F.Kurokawa, "New Solar Cell Power Supply System Using a Boost Type Bidirectional DC-DC Converter," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, **31**, 1, 51-55 (1984).
- (6) 中本・野口：「開放電圧と短絡電流に着目した太陽電池の最大出力運転法」電学新潟支所研, **4**, 7, 107-108 (平10-11)
- (7) 富樫・野口・中本：「短絡電流パルスによる太陽電池の最大出力運転法」電学産応大, **3**, 284, 221-224 (平11-8)
- (8) 富樫・野口：「太陽電池の短絡電流に着目したMPPT-システム構成の簡素化とその運動特性」電学新潟支所研, **4**, 11, 87-88 (平11-11)
- (9) 富樫・野口：「短絡電流パルスに着目した太陽電池の適応MPPT」電学全大, **7**, 1007-1008 (平12-3)
- (10) S.M.Alghuwainem, "Matching of DC Motor to a Photovoltaic Generator Using a Step-Up Converter with a Current-Locked Loop," *IEEE Trans. Ene. Conv.*, **9**, 1, 192-198 (1994).
- (11) I.H.Altas, and A.M.Sharaf, "A Novel On-Line MPP Search Algorithm for PV Arrays," *IEEE Trans. Ene. Conv.*, **11**, 4, 748-754 (1996).
- (12) O.Wasynczuk, "Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems," *IEEE Trans. Pow. App. Sys.*, **102**, 9, 3031-3037 (1983).
- (13) C.Hua, J.Lin, and C.Shen, "Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, **45**, 1, 99-107 (1998).

野 口 季 彦 (正員) 1959年10月23日生まれ。82年3月名古屋工業大学電気工学科卒業。同年4月東京芝浦電気(株)入社、91年3月まで勤務。86年3月長岡技術科学大学大学院修士課程修了。91年4月岐阜工業高等専門学校講師。94年4月長岡技術科学大学助手。96年4月長岡技術科学大学助教授、現在に至る。工学博士。IEEE Member



富 横 重 則 (学生員) 1976年4月22日生まれ。98年3月長岡技術科学大学電気・電子システム工学課程卒業。同年4月より同大学大学院修士課程在籍。太陽光発電システムに関する研究に従事。



中 本 良 (准員) 1976年7月21日生まれ。98年3月長岡技術科学大学電気・電子システム工学課程卒業。同年4月ユアサコーポレーション(株)入社、現在に至る。太陽光発電システムの設計開発に従事。



(1) 大庭・佐藤：「太陽光発電システムの最大出力追跡制御法」電学論B, **106**, 7, 72-78 (昭61-7)