

太陽電池発電システムの発電動作点制御回路

Generation Control Circuitry for Operating Point Normalization of Photovoltaic Modules

東京都立大学 大学院工学研究科 電気工学専攻
助教授 清水 敏久
Toshihisa Shimizu



Abstract

Photovoltaic modules should generally be connected in series in order to generate the voltage required to efficiently drive an inverter. However, if even a very small part of photovoltaic module (PV module) is prevented from receiving light, the generation power of the PV module is decreased disproportionately. This greater than expected decrease occurs because PV modules which do not receive adequate light cannot operate on the normal operating point, but rather operate as loads. As a result, the total power from the PV modules is decreased if even only a small part of the PV modules are shaded. In the present paper, a novel circuit, referred to as the generation control circuit (GCC), which enables maximum power to be obtained from all of the PV modules even if some of the modules are prevented from receiving light. The proposed circuit enables the individual PV modules to operate effectively at the maximum power point tracking, irrespective of the series connected PV module system. In addition, the total generated power is shown experimentally to increase for the experimental set-up used in the present study.

1. まえがき

太陽光発電は自然エネルギー利用の観点から盛んに研究が行われ、家庭用の発電装置としても普及の兆しを見せている。家庭用に用いられる太陽光発電装置では、配電系統と連系運転を行う場合が大半であり、各種インバータ回路方式が検討されている。ところで、既存一般家屋の屋根面に太陽電池モジュールを設置する場合、日本の都市部のように設置面積の制約が大きい地域では、全ての太陽電池モジュールに均一な日射が得られるように敷設できるとは限らない。また、隣接家屋の屋根あるいは電柱、樹木などの影響で太陽電池モジュールの一部分が陰になる（以下、これを部分陰と呼ぶ）事例が多数見受けられる。

筆者らのこれまでの研究の結果、僅かな部分陰であっても全体の発電電力が大幅に低下することが判っている。しかもこのような部分陰は、その様態が時々刻々と変化するのが一般的である。このような原因によって、当初の発電設備容量に比べて実質的

な発電容量が低下して設備投資の回収効率の低下を招いたり、あるいは、陰の影響を受けないように屋根の構造を改良する結果、設備価格が大幅に上昇するなどの問題が生じる。本稿では、一般的な家庭用規模（3kW程度以下）の太陽光発電システムにおいて、部分陰によって発電電力が低下する機構を示し、これを解決しうる太陽電池の発電動作点制御方式の原理と具体的回路を提案し、その効果を検証している。本方式の特長は、直列に接続された太陽電池モジュールそれぞれの発電動作点を個別に制御することにより、部分陰等の影響でモジュールの発電量が不規則に変化しても、各モジュールが持つ最大電力の総和を出力点に取り出せることである。

2. 太陽電池の接続方法と部分陰の影響

図1は一般的な太陽電池の発電特性（I-V特性とP-V特性）であり、その解放端子電圧は数十V程度、短絡電流は数A程度である。交流100V配電系に対して連系運転を行うにはインバータ回路が必要となるが、変換の高効率化を目的として直流電圧は180

・ 著者略歴：清水敏久 1955年生まれ。1980年3月東京都立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月富士電機製造(株)(現、富士電機株)入社。1993年4月東京都立大学大学院工学研究科助教授。工学博士。パワーエレクトロニクスの研究に従事。電気学会、IEEE、EPE会員。

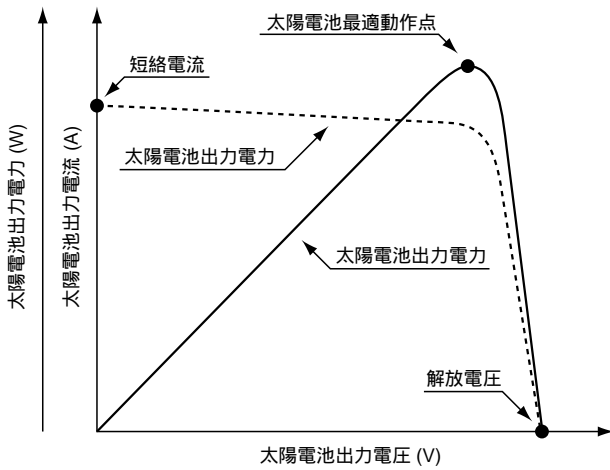


図1 太陽電池の発電特性
Fig.1 Generation Characteristics of the photovoltaic modules.

~ 200V程度に設定する人が多い。そのため、複数の太陽電池モジュールを直列に接続して、必要な直流発電電圧を得るようにする。

太陽光発電用インバータの設計においては、直列接続された複数の太陽電池モジュールの発電特性は均一に揃っていることを前提としている。ところが、太陽電池モジュールは、その僅かな部分が陰になっただけでその発電特性は大幅に変化し、これが全体の発電特性に影響を与える結果、設計時に期待した発電電力が得られない場合がある。

図2は複数の太陽電池セルを直列に接続して構成した太陽電池モジュールにおいて、その一部分が陰になった場合の短絡電流の測定結果である。図2(a)は陰の状態を示すのもで、図の左上から太陽電池モジュール内のセルの一部分が陰になり、部分陰のセルが増加する様子を表している。図2(b)はこのような陰のついたセルが増加した場合に、モジュール全体としての短絡電流の変化を示したものである。図2(b)から明らかなように、1個の太陽電池セルが陰になっただけで、モジュール全体としての発電短絡電流は、この場合には約1/2まで低下する。また、陰になったセルが2個以上に増えても、短絡電流はこれ以下には低減しない。つぎに、このような太陽電池モジュール(PV₂)と正常な発電特性を持つ太陽電池(PV₁)とを図3に示すように直列接続した場合に、個々のI-V特性上の動作点が変化する

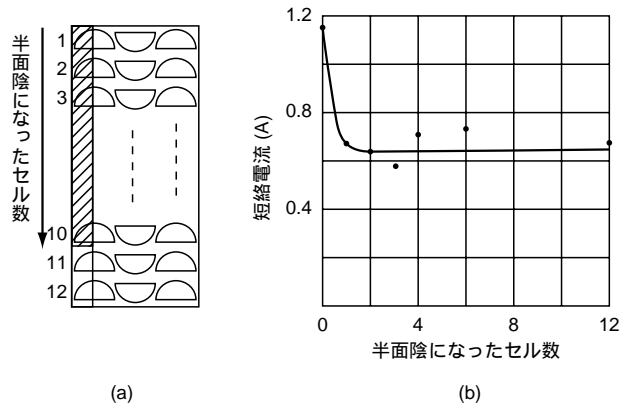


図2 セル半面の部分陰と発電電流（短絡電流）の測定値
Fig.2 Partial shadow on the photovoltaic module and its short current characteristics.

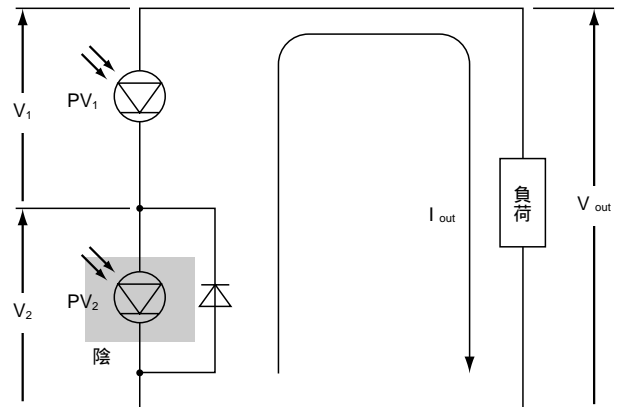


図3 太陽電池モジュールの直列接続動作
Fig.3 Series connection of the photovoltaic modules.

様子を図4(a)に、全体の発電特性(P-V特性)を図4(b)に示す。直列接続された各太陽電池モジュールには共通の出力電流 I_{out} が流れるので、各太陽電池モジュールの動作点は横軸に平行な直線との交点で与えられる。図4(a)の場合、出力電流が0のときの動作点はであり、出力電流が増加してからに向かって変化する。でPV₂の発電電力は最大値となるが、PV₁はまだこれに達しない。からの間はPV₂の発電電圧は低下して発電電力は低下するが、PV₁の発電電力はさらに増加する。以上ではPV₂が出力可能な発電電流(短絡電流)を越えるので、これ以上の電流はモジュールに並列に接続されたバイパスダイオードを経由して流れる。においてPV₁は最大電力を出力し、からではその電力も低下する。からの間のモジュール全体

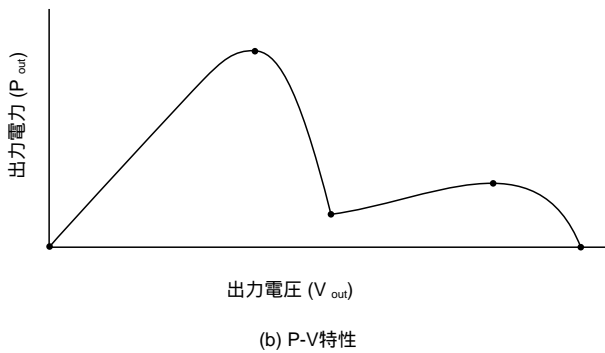
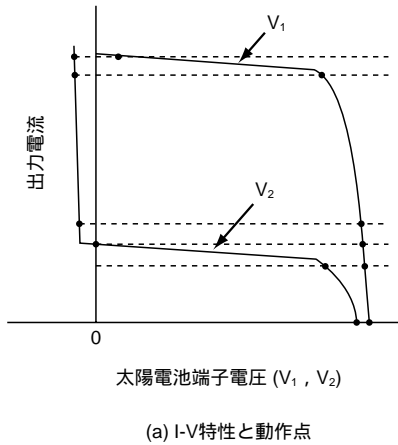


図4 直列接続時の発電特性
Fig.4 Generation characteristics on the series connected photovoltaic modules.

の出力電圧 V_{out} は各モジュール端子電圧の和で与えられる。図4 (b) は全体の出力電圧と出力電力の関係を表している。動作点 と において電力のピークが現れている。このような場合、従来の山登り法を用いた最大電力追従制御 (MPPT) では、電力の少ないほうのピーク点 で運転する可能性がある。また、動作点 で運転したとしても、僅かな陰で発電電力が低下したモジュール (PV_2) は、発電能力が残されているにも拘わらず、その電力を出力として取り出せない。

3. 発電動作点制御方式

本稿で提案する発電動作点制御回路は、それぞれの太陽電池モジュールの発電電流が異なる状態であっても、固有の発電電力の全てを出力できるようにするものである。

3.1 動作原理

図5に発電動作点制御回路の原理図を示す。ここで、簡単化のために各太陽電池モジュール ($PV_1 \sim PV_m$) の発電電流 ($I_1 \sim I_m$) の大きさを (1) 式に仮定する。

$$I_m \geq I_{m-1} \geq \dots \geq I_2 \geq I_1 \quad (1)$$

モジュール PV_m は電流 I_m を供給しながら $V_m = V_{out} / m$ を保持している。 PV_{m-1} は補助電源 E_{m-1} から ($I_m - I_{m-1}$) を供給されて V_{out} / m を保持し、その他のPVについても同様である。

その結果、モジュール間を流れる電流は全て等しく I_m となる。この動作に伴って補助電源がモジュール群に供給した電流の総和 I_x は (2) 式となる。

$$\begin{aligned} I_x &= \sum_{i=1}^{m-1} (I_m - I_{m-i}) \\ &= (m-1)I_m - \sum_{i=1}^{m-1} I_{m-i} \end{aligned} \quad (2)$$

上記の電流は発電動作点制御の一次側から供給され、その一次電流 I_c は (3) 式で与えられる。

$$I_c = \frac{1}{m} I_x = \frac{m-1}{m} I_m - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m-1} I_{m-i} \quad (3)$$

ここで、発電動作点制御回路内での損失を無視すれば全体の出力電流 I_{out} 及び出力電力 P_{out} は (4)、(5) 式で求めることができる。

$$\begin{aligned} I_{out} &= I_m - I_c \\ &= I_m - \frac{m-1}{m} I_m + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m-1} I_{m-i} \\ &= \frac{1}{m} I_m + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m-1} I_{m-i} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{out} &= \frac{V_{out}}{m} \sum_{i=1}^m I_i \end{aligned} \quad (5)$$

すなわち、全ての太陽電池の発電電圧は、その発電電流に関わりなく、 V_{out} / m に維持される。したがって、各太陽電池は個々の発電条件に応じた発電

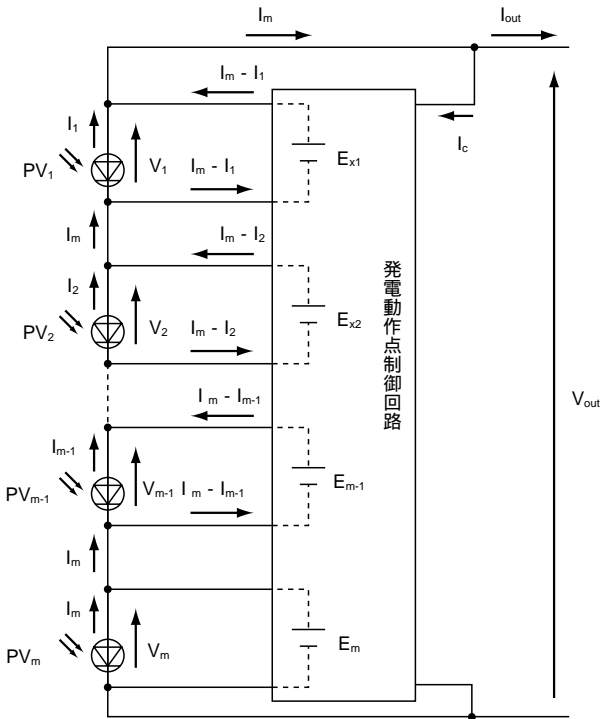


図5 発電動作点制御回路の原理図
Fig.5 Operation principle of the generation control circuit.

電流 I_i で運転し、発電電力 $V_{out} I_i / m$ を出力できる。このことは、図4(a)に示した電圧軸(横軸)に平行な動作線を、電流軸(縦軸)に平行な動作線に変換したことになる。

3.2 回路構成

図6, 図7に発電動作点制御回路の具体的な回路構成を示す。

図6はDC-DCコンバータを用いた方式で、高周波インバータ、 m 個の二次巻線を持つトランス、 m 組の整流回路により構成され、 m 個に分割した太陽電池モジュールに接続される。高周波トランスの一次/二次の巻線比は概ね $m:1$ とし、二次電圧の微調整は高周波インバータの出力電圧パルス幅制御で行う。図7に半導体スイッチの制御信号例を示す。

図8は多段昇降圧チョッパを用いた方式で、 m 個の直列に接続された半導体スイッチと、 $m-1$ 個のチョッパ用インダクタとキャパシタにより構成される。各スイッチ $S_1 \sim S_m$ は図9に示すように順次オフ状態となるように制御される。スイッチングの動作一周期間 T_s に対するスイッチ S_i のオフ期間 T_i の比 D_i を(6)式で定義すると、各太陽電池の発電電圧

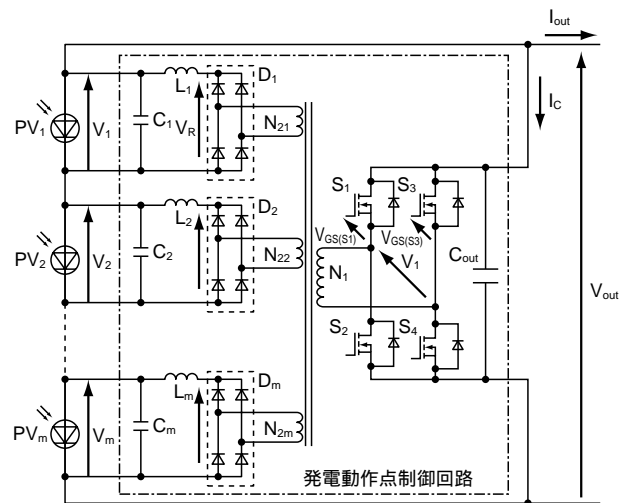


図6 DC-DCコンバータを用いた発電動作点制御回路の主回路構成
Fig.6 Main circuit configuration of the G.C.C. using a DC-DC converter.

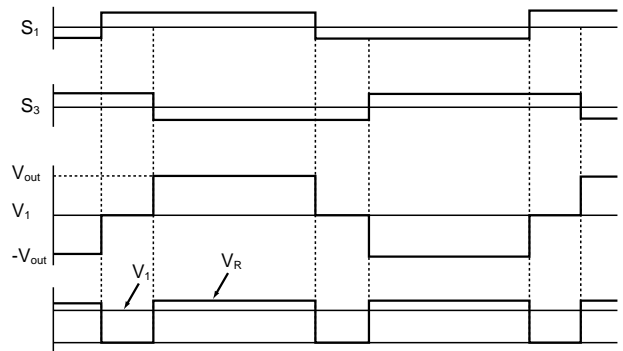


図7 DC-DCコンバータ方式の動作点制御回路の動作波形例
Fig.7 Control signal and operation waveform on the DC-DC Converter

V_i との関係は(7)式で与えられる。

$$D_i = \frac{T_i}{T_s} \quad (6)$$

$$V_1 : V_2 : V_3 : \dots : V_{m-1} : V_m = D_1 : D_2 : D_3 : \dots : D_{m-1} : D_m$$

$$\text{ただし、} \sum_{i=1}^m V_i = V_{out}, \sum_{i=1}^m D_i = 1 \quad (7)$$

すなわち、多段昇降圧チョッパを用いた方式では、各太陽電池の発電電圧の比は任意に設定できるので、きめの細かい発電電圧制御が可能となる。

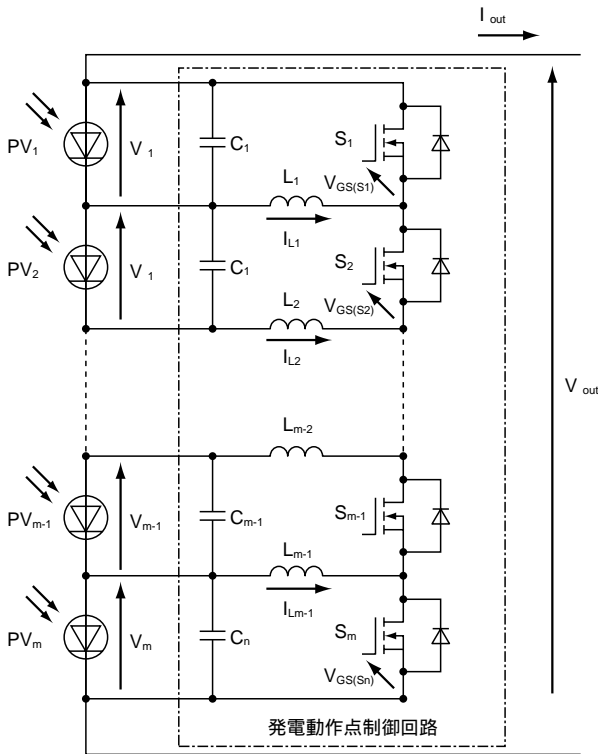


図8 多段昇降圧チョッパを用いた発電動作点制御回路の主回路構成

Fig.8 Main circuit configuration of the G.C.C.using a multistage chopper.

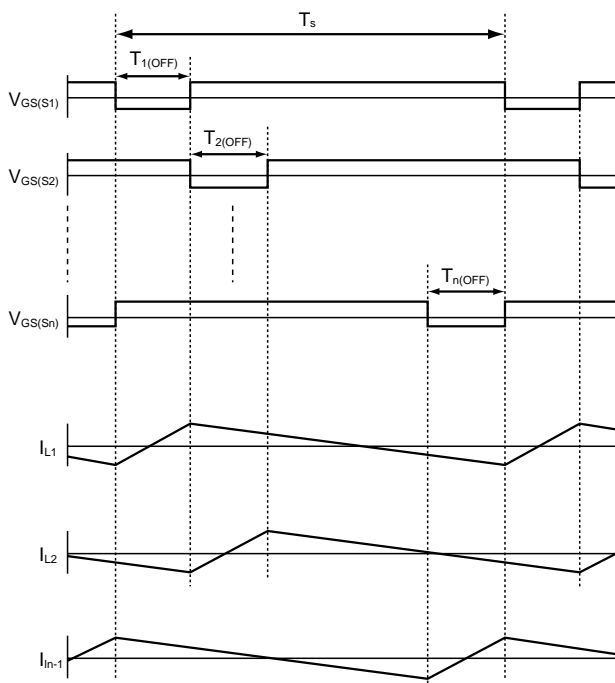


図9 多段昇降圧チョッパ方式の動作点制御回路の動作波形例

Fig.9 Control signal and operation waveform on the multistage chopper.

4. 実験結果

図10に本装置の評価システムの構成を示す。出力電力0.6kWの太陽電池アレイ2組を同一日射条件で設置し、それぞれにパワーコンディショナを接続し、さらにその一方には動作点制御回路を接続している。太陽電池アレイ全体のMPPT制御はパワーコンディショナで行っている。また、動作点制御回路を接続した太陽電池アレイの一部には図11に示すように全面積に対して約4%の部分陰を人為的につけた。

図12に1日の発電電力の試験結果を示す。9時15分に両者同時に発電を開始した。部分陰のあるシステムでは、当初は発電動作点制御回路を停止し、12時20分から発電動作点制御回路を動作させている。部分陰のないシステムの発電電力は時間の経過とともに変化するが、これは、太陽電池表面に対する太陽光の照射角度の余弦に比例する関係から考えて妥当な特性である。一方、部分陰のある場合は太陽光

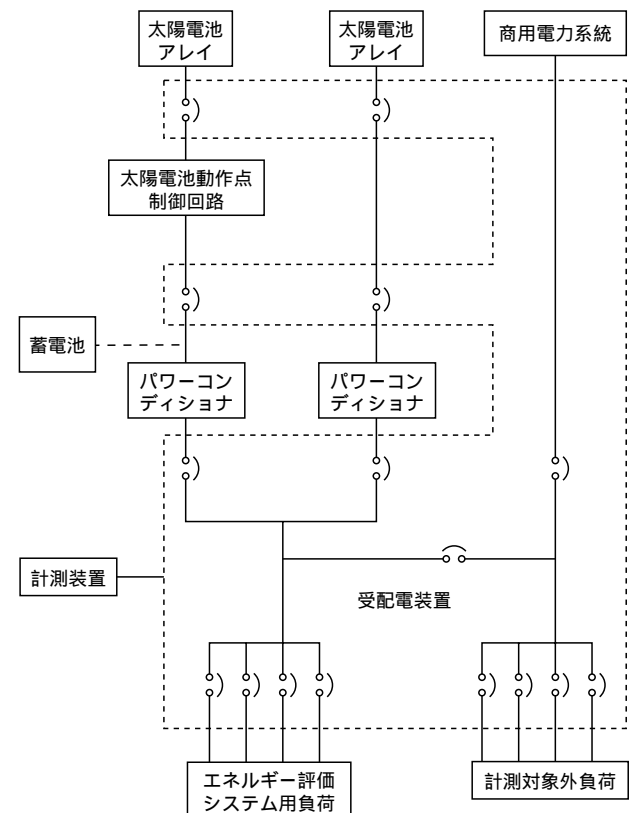


図10 試験システムの構成

Fig.10 System configuration of the experimental set-up.

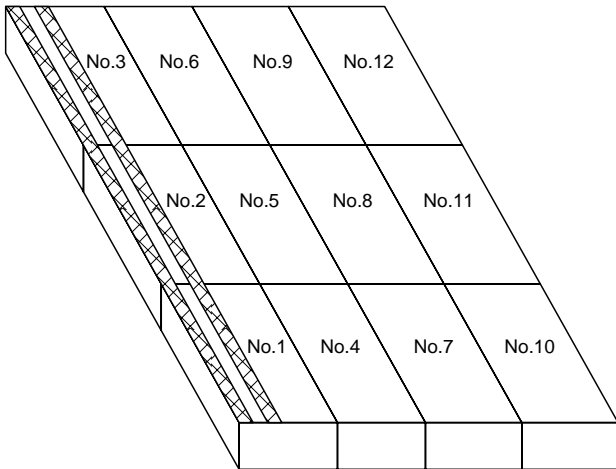


図 11 太陽電池アレイの構成と部分陰の状態
 Fig.11 The layout of photovoltaic array and the artificial shadows covering the photovoltaic modules.

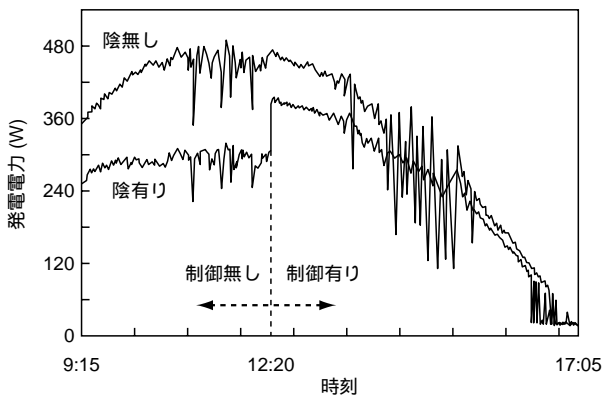


図 12 発電試験結果
 Fig.12 Experimental result of the generation power.

が正面から照射される時間帯（概ね 10 時～ 12 時）になっても部分陰の影響で発電電力が上昇していない。12 時 20 分に発電動作点制御回路を起動すると発電電力は急速に回復し、その発電電力は部分陰のないシステムと相似な特性曲線を示している。部分陰のある側の発電電力が陰の無いシステムの発電電力より少ないのは、陰のある太陽電池モジュールの発電電力そのものが減少したことに起因する。しかし、部分陰のある太陽電池モジュールもその潜在的な発電電力を出力している。

5. まとめ

一般の戸別住宅に設置する太陽光発電システムにおいて、太陽電池モジュールに掛かる部分陰の影響でシステム全体の発電電力が大幅に低下することを明らかにした。また、このような状況においても、個々の太陽電池に潜在する発電電力を効率よく出力できる発電動作点制御回路について述べ、フィールド試験によってその効果を実証した。

