

# Fast-MPPT control algorithm capable of escaping Local Maximum Power Points

Hideya KINJO<sup>\*1</sup>Naomitsu URASAKI<sup>\*2‡</sup>

## 局所的な最大電力点から脱出可能な高速 MPPT 制御アルゴリズム

金城 秀弥<sup>\*1</sup>浦崎 直光<sup>\*2‡</sup>

### Abstract

The power-voltage (PV) characteristic of a photovoltaic (PV) string has multiple local maxima under partial shading conditions (PSCs). Maximum power point tracking (MPPT) control needs both accuracy and fast speed. However, due to the trade-off between accuracy and tracking speed, MPPT methods that complement them are not yet complete. Another issue is the inability to detect changes in the high-voltage side local maxima when operating at the low-voltage side maximum power point. This study proposes an MPPT method based on a system with current sensors in each module. This proposed method can detect individual short-circuit currents and estimate the maximum power point quickly and accurately, furthermore respond to changes in all power points. Through simulations, the MPPT method is compared with the conventional method (scan method) in terms of tracking time and accuracy.

**Keywords:** MPPT control, fast tracking, Partial shading  
**キーワード:** MPPT 制御, 高速追従, 部分影

### 1. はじめに

太陽光発電の課題に部分影がある。部分影とは、太陽電池 (PV: Photovoltaic) ストリングを形成する各モジュールに異なる日射量がかかる状態のことを指し、近隣の建物や樹木、雲などの影が PV ストリングの一部を遮光することにより引き起こされる。部分影時の電力-電圧 (P-V) 特性には、局所的な最大電力点 LMPP (Local-Maximum Power Point) と呼ばれる複数の極大点が見られる。この時、最大電力点追従 (MPPT: Maximum Power Point Tracking) 制御法に求められることは、①複数の LMPP から大域的な最大電力点 GMPP (Global-Maximum Power Point) を検出すること、②P-V 特性の変化により GMPP が LMPP となった場合にその LMPP から脱出することである。①では、追従速度と精度が重要になる。広く用いられている山登り法や IC 法<sup>1)</sup>は MPP の追従精度は高いが、アルゴリズムの構造上、複数の MPP から GMPP を検出することはできず動作電圧が LMPP に留まる場合がある。この課題を克服するため、部分影時に対応できる MPPT 制御法が数多く報告されてきた。スキャン法<sup>2)</sup>は、短絡から開放の方向に電圧を

動作させる過程で最大電力  $P_{max}$  を検出し、その時の電圧を最適動作電圧  $V_{mpp}$  として設定する手法である。追加回路がいらぬ複雑な計算を必要としない手法であるが、電圧の探索幅が広いことから追従時間が長い欠点を持つ。メタヒューリスティック手法<sup>3,4)</sup>では、部分影のパターンや PV アレイの構成に関係なく、GMPP を正確に追従することができる。しかし、この手法においても探索手順が確立されていないために追従時間が長くなる場合がある<sup>3-5)</sup>。これらの手法は、様々な PV に対応できる利点を持っているが、PV の特性を必要としないために探索領域を制限できず追従時間が長くなる。つまり、追従時間を短縮するためには PV の特性に基づいたアルゴリズムが必然的に求められる。

SSJ-GMPPT 法<sup>6)</sup>は、電流-電圧 (I-V) 特性を利用した手法である。I-V 特性の階段曲線に基づいて動作電圧上のある LMPP の等電力線と右隣の LMPP の短絡電流との交点を探し、なければ右側区間の電圧区間全てをスキップ処理する手法となっている。例えば、モジュールを何枚も接続した PV ストリングにおいて低電圧側で GMPP が検出できれば、スキップ動作により速く追従することが可能

\*1 Graduate School of Science and Engineering, University of the Ryukyus

\*2 Professor, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, 1 Senbaru Nishihara-cho Nakagami Okinawa Japan 903-0213, Japan  
‡e-mail: urasaki@tec.u-ryukyu.ac.jp

Received: February 13, 2024, Accepted: April 22, 2024

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科

\*2 琉球大学 工学部 教授 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地)

‡e-mail: urasaki@tec.u-ryukyu.ac.jp

(原稿受付: 2024 年 2 月 13 日, 受理日: 2024 年 4 月 22 日)

となる。しかし、高電圧側に GMPP があるとスキップ動作が行われず探索処理が続くため追従に時間がかかってしまう。PV の特性に基づいた FOCV 法の改良手法<sup>6)</sup>では、P-V 特性の各 LMPP がモジュールの開放電圧の 0.8 倍に位置すると仮定して、それら以外の電圧領域を探索せずに特定の電圧点の近傍のみスキャンしている。探索領域を最初から絞ることで追従時間を短縮することが可能となる。また、モジュールの開放電圧 $V_{oc\_mod}$ を固有値として設定するため計算コストを抑えている。しかし、本来開放電圧は日射量や温度により変化するパラメータであるため、全ての部分影パターンに対応できる保証はなく追従できない恐れがある。

迅速かつ正確に GMPP に追従するためには、探索領域の削減、PV 特性の利用、より正確な開放電圧等のパラメータ設定の 3 つの条件が不可欠である。本研究で提案する MPPT 制御法は、電流センサを各モジュールに搭載したシステム構成により短絡状態から各 LMPP の電力を推定し、GMPP となる LMPP を決定する。これにより、動作電圧が最適動作電圧 $V_{mpp}$ 近傍に近づき、最終的に山登り法を用いて $V_{mpp}$ に追従する。提案手法は、①の課題に対する上記 3 つの条件を満たす。

本研究のシステム構成は、②の課題においても有効である。通常、MPPT 制御法の GMPP 探索はストリングの電圧と電流を入力とした動作電圧上の電力差をトリガーとしている。部分影時に低電圧側の GMPP で動作している場合、高電圧側の LMPP が GMPP に変わったとしても低電圧側の LMPP の電力値が変化しないため、電力差を検出できず、トリガーが発生しない場合がある。この時、動作電圧が変更されず低電圧側の LMPP に留まる可能性があるため、一定時間を設けて、強制的にトリガーを発生させる対処方法がある。ただし、この方法では②の課題に対する本質的な解決方法とはなっていない。そこで、モジュール内のセルストリング電流を MPPT 制御器の入力情報として加えることで、動作電圧上で短絡しているセルストリング電流の増減を監視し、動作電圧以外の LMPP の電力変化を推測することが可能となる。これにより、どの動作電圧点でも GMPP 探索を行うことができる。

これらを踏まえて、本研究では追従時間が短く、かつ

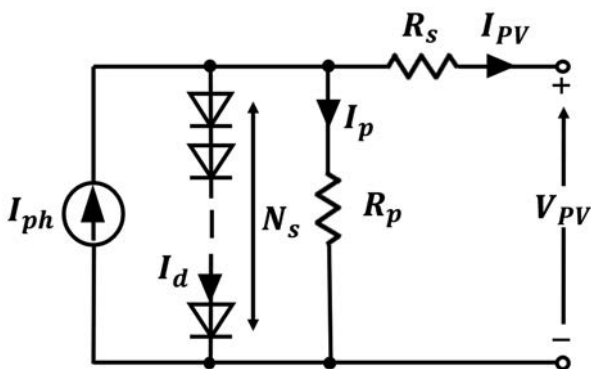


Fig. 1 Equivalent circuit of a cell string in PV module

精度の高い GMPP 探索を行うとともに、LMPP を瞬時に脱出する MPPT 制御法を提案する。追従速度、過渡効率<sup>3)</sup>ならびに LMPP 脱出の観点から従来手法の 1 つであるスキャン法<sup>2)</sup>との比較をシミュレーションにより行い、提案手法の有効性を示す。なお、現段階では PV モジュールの温度は標準状態の 25°C で一定であると仮定しており、温度変化については今後検討していく予定である。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、PV モジュールの特性を紹介する。最適動作電流 $I_{mpp}$ と短絡電流 $I_{sc}$ 、最適動作電圧 $V_{mpp}$ と開放電圧 $V_{oc}$ 、ならびに $I_{sc}$ と $V_{oc}$ の関係について述べる。第 3 章は、部分影時の PV ストリングの P-V 特性を紹介する。各 LMPP の最適動作電流 $I_{mpp}$ とモジュールの接続数により決まる最適動作電圧 $V_{mpp}$ について述べる。第 4 章では、提案する MPPT 制御法として、最適動作電圧 $V_{mpp}$ 追従のアルゴリズムと LMPP 脱出の方法について述べる。第 5 章は、シミュレーションにより従来手法と提案手法の比較を行い、評価する。第 6 章は、本研究の結論と今後の展望について述べる。

## 2. PV モジュールの特性

Fig. 1 に PV モジュール内のセルストリングの等価回路を示す。ダイオードの数は直列セル数 $N_s$ に依存する。短絡電流は日射量に比例し、開放電圧は $N_s$ と温度に依存する関係となっている。本研究で取り扱う PV モジュールはセルストリングにバイパスダイオードを並列接続した 1 つのクラスタで構成されているものとする。

### 2.1 最大電力点 (MPP)

Fig. 2 に PV モジュールの I-V および P-V 特性を示す。モジュール単位の場合、P-V 特性における極大点 MPP の数は常に 1 つであり、これが最大電力点となる。MPP を基準とする左側の低電圧領域では電流がおおよそ一定であり、右側は電圧が一定の領域である。佐々木ら<sup>7)</sup>の実験によると、温度変化および日射量変化に対する $P_{max}$ における最適動作電流 $I_{mpp}$ は短絡電流 $I_{sc}$ の約 90%、最適動作電圧 $V_{mpp}$ は開放電圧 $V_{oc}$ の約 80%であることが示されている。

$$I_{mpp} \approx 0.9I_{sc} \quad (1)$$

$$V_{mpp} \approx 0.8V_{oc} \quad (2)$$

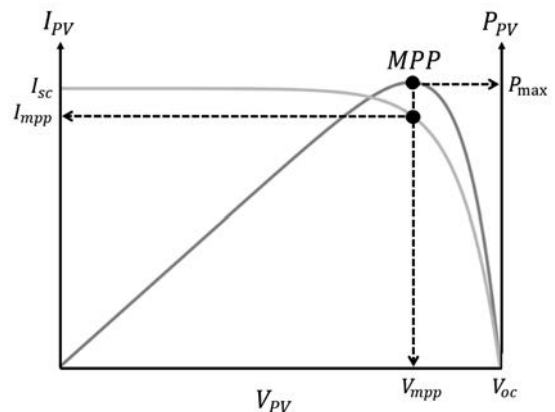


Fig. 2 I-V and P-V characteristics of PV Module

2.2 定温度環境下における短絡電流と開放電圧

Fig. 3 は、温度を一定とした時の日射量別の I-V 特性を示している。日射量が低下するにつれて短絡電流  $I_{sc}$  は等間隔に、開放電圧  $V_{oc}$  は指数関数的に減少していることがわかる。この関係は、Fig. 1 のセルストリングの等価回路から得られる開放状態時の式 (3) と短絡状態時の式 (4) の 2 つの回路方程式<sup>8)</sup>を用いて表すことができる。

<開放状態>

$$0 = I_{ph} - I_s \left\{ \exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s A v_T}\right) - 1 \right\} - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (3)$$

<短絡状態>

$$I_{sc} = I_{ph} - I_s \left\{ \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{N_s A v_T}\right) - 1 \right\} - \frac{I_{sc} R_s}{R_p} \quad (4)$$

各式の第三項は微小量であるため除いて計算すると、

$$V_{oc} \approx N_s A v_T \ln \left\{ \frac{I_{sc}}{I_s} + \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{N_s A v_T}\right) \right\} \quad (5)$$

ここで、 $I_{ph}$  は光電流、 $I_s$  は逆方向飽和電流、 $R_s$  は直列抵抗、 $R_p$  はシャント抵抗、 $v_T$  は熱電圧、 $A$  は理想係数、 $N_s$  は直列セル数である。なお、文献(8)においては、式(3)の  $V_{oc}$  の部分が  $V_{oc} + I_{PV} R_s$  という表現となっているが、開放状態では  $I_{PV} = 0$  であるので、本論文では  $V_{oc}$  のみの表現としている。Fig. 4 は、式(5)に基づいた結果であり、短絡電流の減少に対して開放電圧は徐々に勾配が大きくなりながら減少している。式(5)より、一定温度環境下において短絡電流から開放電圧の推定が可能となる。

3. 部分影下での PV ストリングの出力特性

Fig. 5 に 2 つのモジュールを直列に繋いだ部分影時の PV ストリングの回路図を示す。PV<sub>2</sub> は部分影であり PV<sub>1</sub> より低い日射量を受けているとする。PV ストリングにおける均一日射下での P-V 特性は Fig. 1 と同じように 1 つの極大点を有する。しかし、ストリング内に部分影が生じ、各モジュールにかかる日射量に差が生じるとバイパスダイオードの作用によって、P-V 特性には SDP (Section

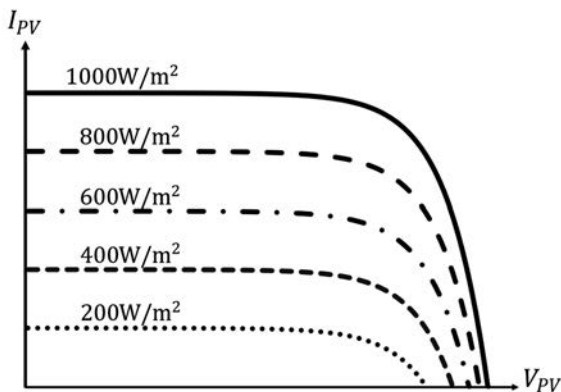


Fig. 3 I-V characteristic with solar insolation change

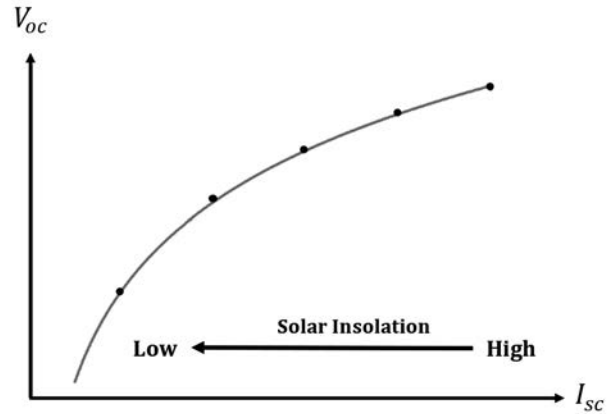


Fig. 4 Open circuit voltage for short circuit current with solar insolation change

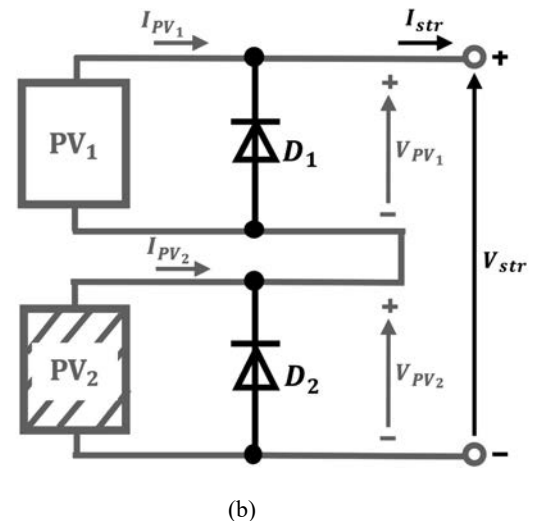
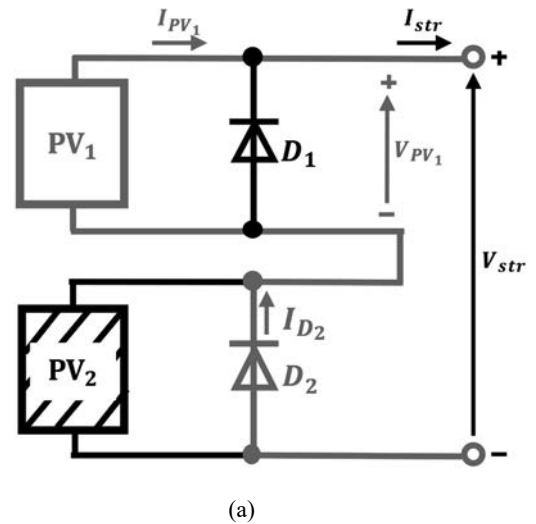


Fig. 5 Two PV Module in series under PSC  
(a) Current Pass when  $V_{str} < V_{SDP}$  (b) when  $V_{str} > V_{SDP}$

Dividing Point)<sup>6)</sup>を境に 2 つの極大点が発生する (Fig. 6)。SDP は PV ストリングの出力電流  $I_{str}$  と部分影下である PV<sub>2</sub> の短絡電流  $I_{sc2}$  が等しくなる電圧点である。  $I_{str}$  が  $I_{sc2}$  より大きい時、つまり SDP より左側の電圧区間では Fig.

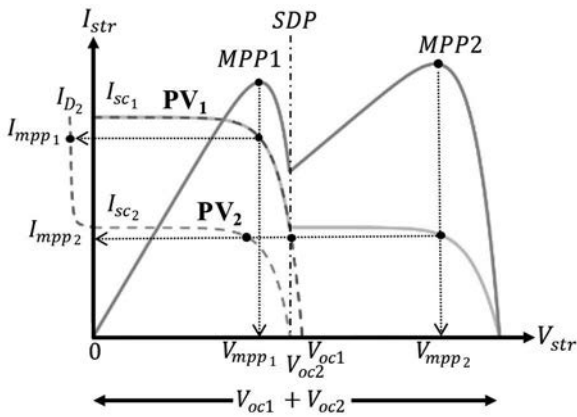


Fig. 6 P-V and I-V characteristic under PSC

5(a)の電流経路をたどる。モジュール間の電流差により  $D_2$  の端子は順方向電圧となり  $D_2$  が導通する。この時、 $PV_2$  の端子電圧は短絡状態となるため  $PV_1$  のみ発電可能となり、 $I_{str}$  は  $I_{PV_1}$ 、 $V_{str}$  は  $V_{PV_1}$  に依存する。 $I_{str}$  が  $I_{sc_2}$  より小さい時、SDP より右側の電圧区間では Fig. 5(b) の電流経路をたどる。 $D_2$  は逆方向電圧となるため非導通となり、電圧が生じる。2枚の電流源が直列に接続される構成から、 $I_{str}$  は  $I_{PV_1}$  ( $= I_{PV_2}$ )、 $V_{str}$  は  $V_{PV_1}$  と  $V_{PV_2}$  の和に従い、両モジュールで発電可能となる。モジュールを  $N$  枚直列接続した部分影 PV ストリングでは、短絡から電圧を上げていく過程で、日射量が高いモジュールから順にバイパスダイオードが解除される。

また、Fig. 6 の各モジュールに分解した時の I-V 特性とストリングの I-V 特性に焦点を当てると、 $MPP_1$  の電力  $P_{m1}$  を計算するための短絡電流は  $I_{sc_1}$ 、開放電圧は  $V_{oc_1}$  に相当し、 $MPP_2$  の電力  $P_{m2}$  を計算するための短絡電流は  $I_{sc_2}$ 、開放電圧は  $V_{oc_1}$  と  $V_{oc_2}$  の和に相当する。つまり、 $MPP_i$  の電力  $P_{mi}$  を計算するための短絡電流は日射量が高いモジュールの短絡電流  $I_{sc_i}$  に等しく、開放電圧は日射量が高いモジュールの開放電圧  $V_{oc_i}$  とそれより日射量が高いモジュールの開放電圧  $V_{oc_j}$  ( $0 < j \leq i$ ) を加算した値に等しくなる。以下、モジュールを  $N$  枚直列接続した PV ストリングの  $MPP_i$  ( $i = 1, 2 \dots N$ ) の最適動作電流  $I_{mpp_i}$  と最適動作電圧  $V_{mpp_i}$  を式 (1) (2) の性質を用いて式 (6) (7) のように表す。

$$I_{mpp_i} \approx 0.9 I_{sc_i} \quad (6)$$

$$V_{mpp_i} \approx 0.8 \sum_{j=1}^i V_{oc_j} \quad (0 < j \leq i) \quad (7)$$

さらに、式 (6) (7) から  $MPP_i$  の電力の推定が可能となる。

$$P_{mi} = I_{mpp_i} V_{mpp_i} \quad (8)$$

## 4. MPPT アルゴリズム

### 4.1 山登り法 (P&O 法)

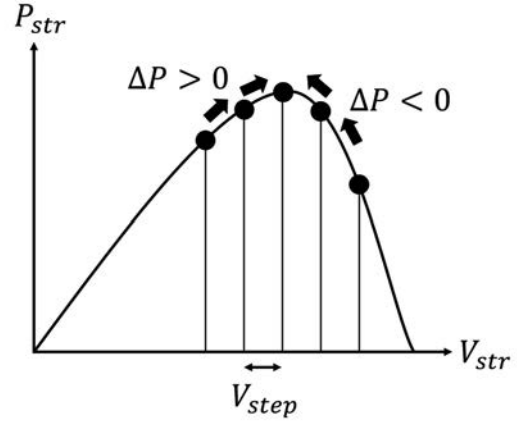


Fig. 7 Perturbation and Observation (P&amp;O) method

山登り法は、実装の簡便さから、実用的な MPPT 制御法として最も普及している技術の一つである。本研究では、最適動作電圧の推定値と真値との差を低減するために Fig. 7 に示す従来型の山登り法<sup>1)</sup>を採用した。以下、山登り法の計算式を示す。ここで  $V_k$  は  $k$  番目の動作電圧、 $P_k$  は  $k$  番目の動作電力、 $\Delta P$  は  $k$  番目の電力と

$$V_{k+1} = \begin{cases} V_k + V_{step} & \Delta P > 0 \\ V_k - V_{step} & \Delta P < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta P = P_k - P_{k-1} \quad (10)$$

$k-1$  番目の電力差である。最初に動作電圧の初期値を決め、その動作電圧から任意の摂動ステップ  $V_{step}$  の変動を与える。変動を与えた結果、電力が増加した場合、再び正の摂動ステップの変動を与える。一方、電力が減少した場合、負の変動を与える。この動作を繰り返すことで最適動作電圧  $V_{mpp}$  に追従させる。今回、動作電圧の初期値は最適動作電圧の推定値であり、真値の誤差が小さいことを想定して摂動ステップを小さく設定する。

### 4.2 Mode

提案する MPPT 制御のフローチャートを Fig. 8 に示す。提案手法では 4 つの Mode の切り替えによりシステム動作を変えている。以下、4 つの Mode について説明する。  
[Mode1]

山登り法を実行し、最適動作電圧  $V_{mpp}$  の推定値と真値との差を低減する。同時に、探索動作を行う Mode2 と Mode3 に移行するトリガーとして電力差や部分影モジュールの電流差の監視を行う。電力差  $dp$  が閾値  $\delta_p$  を超えたとき、Mode2 に切り替える。通常、動作電圧上で得られる情報は、電力のみである。しかし、提案手法は電流センサによりバイパスダイオードが導通しているモジュールの短絡電流  $I_{sh}$  の測定が可能である。これより、電力変化率  $|dP/dv| < \delta_{str}$  の範囲内で閾値  $\delta_i$  を超える短絡電流差  $dI_{sh}$  が検出されると、Mode3 へ切り替えを行う。

[Mode2]

電力差  $|dp|$  を検出した後、MOSFET をオンにし短絡す

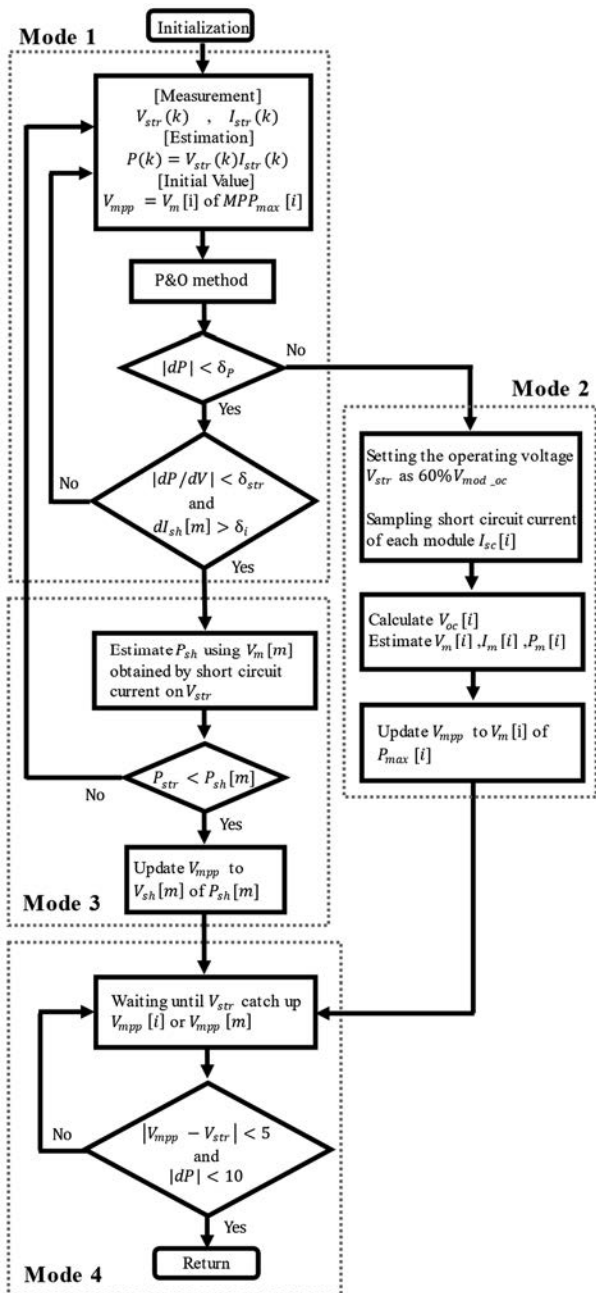


Fig. 8 Flowchart of the Proposed MPPT method

る. 短絡される PV の出力電圧  $V_{str}$  は 0 に近づく. モジュールの開放電圧  $V_{mod\_oc}$  の 60% より低い電圧領域では極大点が存在しないため,  $V_{str} < 0.6V_{mod\_oc}$  になった時点でモジュールの短絡電流  $I_{sc}$  を測定する. 測定値を用いて, 式(3)~(8)により全ての LMPP の電力と電圧の推定を行う. 推定後, 各推定電力の比較を行い, 大域的な最大電力点 GMPP となる LMPP の電圧を最適動作電圧  $V_{mpp}$  として更新し, Mode4 に切り替える.

[Mode3]

電流差  $dI_{sh}$  を検出すると, 短絡せず動作電圧上で部分影モジュールの電流  $I_{sh}$  の測定を行う. この電流  $I_{sh}$  を短絡電流  $I_{sc}$  として扱い, 式(1)~(6)より動作電圧上の極大点  $MPP_i$  より高電圧側の極大点  $MPP_k (k > i)$  の電力と電圧の

推定を行う. そして,  $MPP_i$  の電力  $P_{str}$  と  $MPP_k$  の電力  $P_{sh}$  の比較を行い,  $P_{str} < P_{sh}$  であれば,  $MPP_j$  の電圧  $V_{sh}$  を  $V_{mpp}$  として更新し, Mode4 に切り替える.  $P_{str} > P_{sh}$  の場合は, 動作電圧  $V_{str}$  を継続し, 再度 Mode1 に切り替える. [Mode4]

$V_{mpp}$  を決定した後, MOSFET をオフにして出力電圧  $V_{str}$  を上昇させる.  $V_{mpp}$  との差が 5V, 電力差  $dp$  が 10W より小さくなるまで継続される. これら条件を満たすと, Mode1 に切り替える.

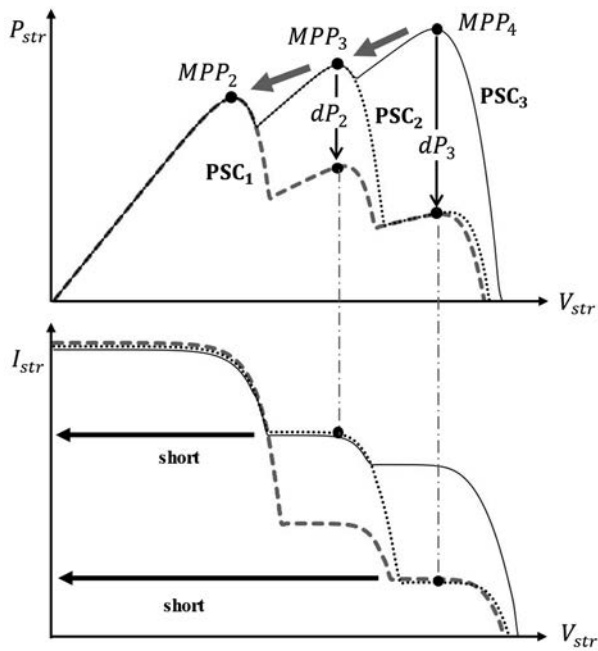
### 4.3 局所的な最大電力点からの脱出

Mode2 と Mode3 は, MPP の電力と電圧を推定する点で同じである. 違いは, トリガーの種類 (電力差あるいは電流差) と動作電圧から短絡動作を行う必要性の有無である. Fig. 9 に, 4 つのモジュールを直列接続したストリングに対する 3 つの部分影条件 (PSC<sub>1</sub>~PSC<sub>3</sub>) での P-V 特性と I-V 特性を示す. いずれの特性も部分的に一致しているため, 特性曲線が重なっている. PSC<sub>3</sub> の特性は,  $MPP_3$  近傍より低電圧部分で PSC<sub>2</sub> の特性と一致, PSC<sub>2</sub> の特性は,  $MPP_2$  近傍より低電圧部分で PSC<sub>1</sub> の特性と一致している. また, 3 つの部分影条件ともに 2 枚のモジュールは同一日射量 (1000W/m<sup>2</sup>) かつ他の 2 枚より日射量が高いことから  $MPP_1$  は現れない.

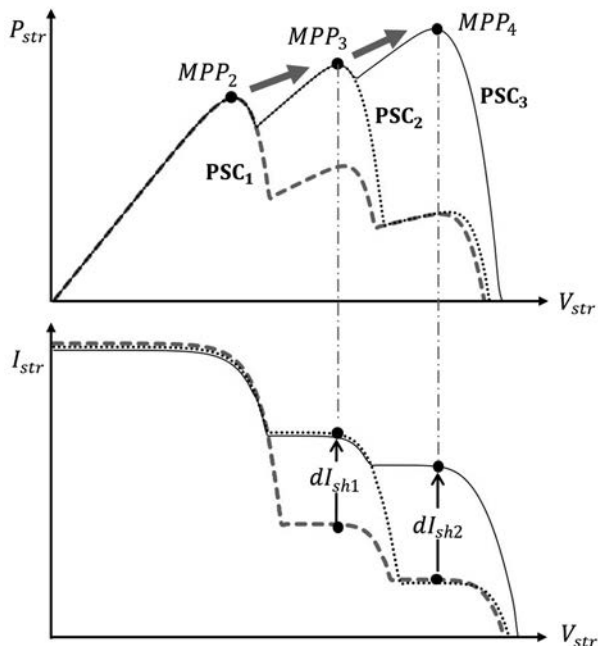
Fig. 9(a) は  $MPP_4$  の動作電圧から始まり PSC<sub>3</sub> から PSC<sub>2</sub> へ日射環境が変化すると動作電圧上の電力が減少し, 電力差  $|dp_3|$  を検出する. しかし, 動作電圧上の各モジュールの電流はすべてのバイパスダイオードが非導通状態となることから  $MPP_4$  の電流に制限される. つまり, この動作電圧上で全てのモジュールの短絡電流を測定できず最適動作電圧を推定することができない. そこで, Mode2 による短絡動作によりモジュールの短絡電流から全ての MPP の推定と比較を行い, この条件下では  $MPP_3$  が GMPP となる. PSC<sub>2</sub> から PSC<sub>1</sub> の日射環境変化も同様に, 電力差  $|dp_2|$  を検出すると  $MPP_3$  の動作電圧上では  $MPP_4$  のモジュールのみ短絡状態であり, すべての短絡電流を得ることができず推定を行えない. 以下, Mode2 の短絡動作より  $MPP_2$  が GMPP と判断できる.

次に, Fig. 9(b) では  $MPP_2$  の動作電圧に始まり PSC<sub>1</sub> から PSC<sub>2</sub> へ日射環境が変化すると, 動作電圧上の電力が同じであることから電力差  $|dp|$  を検出できず, 高電圧側の特性変化に対応できない. 従来の MPPT 制御手法では, LMPP に留まる課題に対して, 一定時間を設けて再探索する方法を取っている<sup>3,6)</sup>. しかし, GMPP で動作しない期間が続き過渡効率が低下する恐れがある. そこで, 動作電圧上で短絡しているモジュールの短絡電流の監視を行うことで, 高電圧側の特性変化を認識することが可能となる. また, 動作電圧上の電力が変化しない場合, それより低電圧側の特性も変化しないため, 推定は高電圧側のみ行えばよく短絡動作を必要としない.

したがって, 電流差  $dI_{sh1}$  から Mode3 より動作電圧上で



(a) PSC<sub>3</sub> → PSC<sub>2</sub> → PSC<sub>1</sub>



(b) PSC<sub>1</sub> → PSC<sub>2</sub> → PSC<sub>3</sub>

Fig. 9 Tracking process of the proposed method under three PSC patterns in which solar insolation [W/m<sup>2</sup>] is set to PSC<sub>1</sub> [1000, 1000, 400, 700], PSC<sub>2</sub> [1000, 1000, 700, 200], and PSC<sub>3</sub> [1000, 1000, 700, 600].

式(3)～(8)による推定を行い、 $MPP_2$ の実電力と $MPP_3$ および $MPP_4$ の推定電力の比較から $MPP_3$ がGMPPとなる。PSC<sub>2</sub>からPSC<sub>3</sub>の日射環境変化においても、電力差がないことから低電圧側の特性に変化はなく、同時に $MPP_2$ が $MPP_3$ より低いことは明らかなので低電圧側を無視できる。つまり、 $dl_{sh2}$ より Mode3 にて $MPP_3$ の動作電圧上で

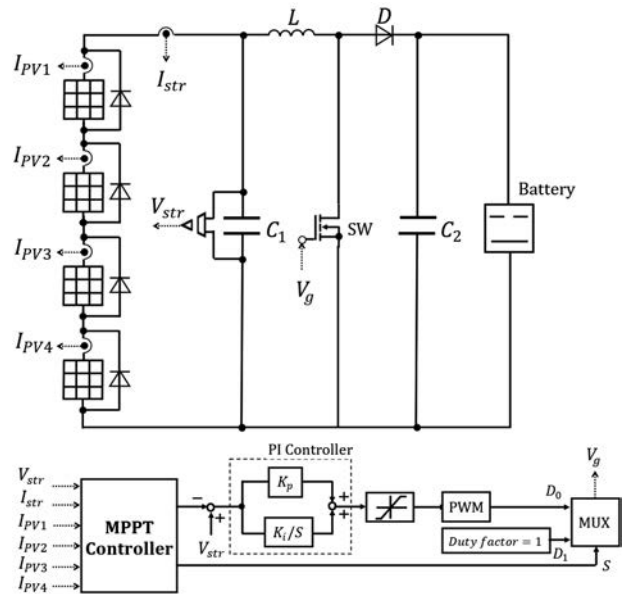


Fig. 10 Photovoltaic system

Table 1 Parameters of PV System

【Converter】		
Switching frequency	$f_s$	10kHz
Inductance	$L$	4mH
Capacitance	$C_1$	200 $\mu$ F
	$C_2$	500 $\mu$ F
【PV Module】		
Saturation current	$I_d$	$5.19 \times 10^6$ A
Series resistance	$R_s$	0.0005 $\Omega$
Shunt resistance	$R_p$	1000 $\Omega$
Series cells	$N_s$	36
Thermal voltage	$v_T$	26mV
Ideal coefficient	$A$	2.03

短絡している  $MPP_4$  のモジュールの電流から得られる電力を推定するだけでよい。そして、 $MPP_3$  の実電力と  $MPP_4$  の推定電力の比較から  $MPP_4$  が GMPP と選択される。このように、動作電圧上で電力差が起きた場合は、低電圧側の P-V 特性が変化した可能性を持つため短絡動作が必要となる。一方、電力差がない場合は低電圧側の P-V 特性は変化していないことを意味するので、短絡動作をせずに高電圧側のみ推定を行う。こうして、動作電圧上で全ての電力点の変化に対して GMPP 探索を作動させることができる。

## 5. シミュレーション

パワーエレクトロニクス回路シミュレータ PSIM により提案手法と従来手法の1つであるスキャン法<sup>2)</sup>のMPPT制御システムの比較を行った。シミュレーションで用いた太陽光発電システムの構成と各種パラメータを Fig.10 と Table 1 に示す。本システムの PV スtring は、4 枚直列の PV モジュールで構成されている。電流センサよりセルString電流  $I_{PV_i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), String電圧  $V_{str}$ , String電流  $I_{str}$  が MPPT 制御器に入力される。これら入

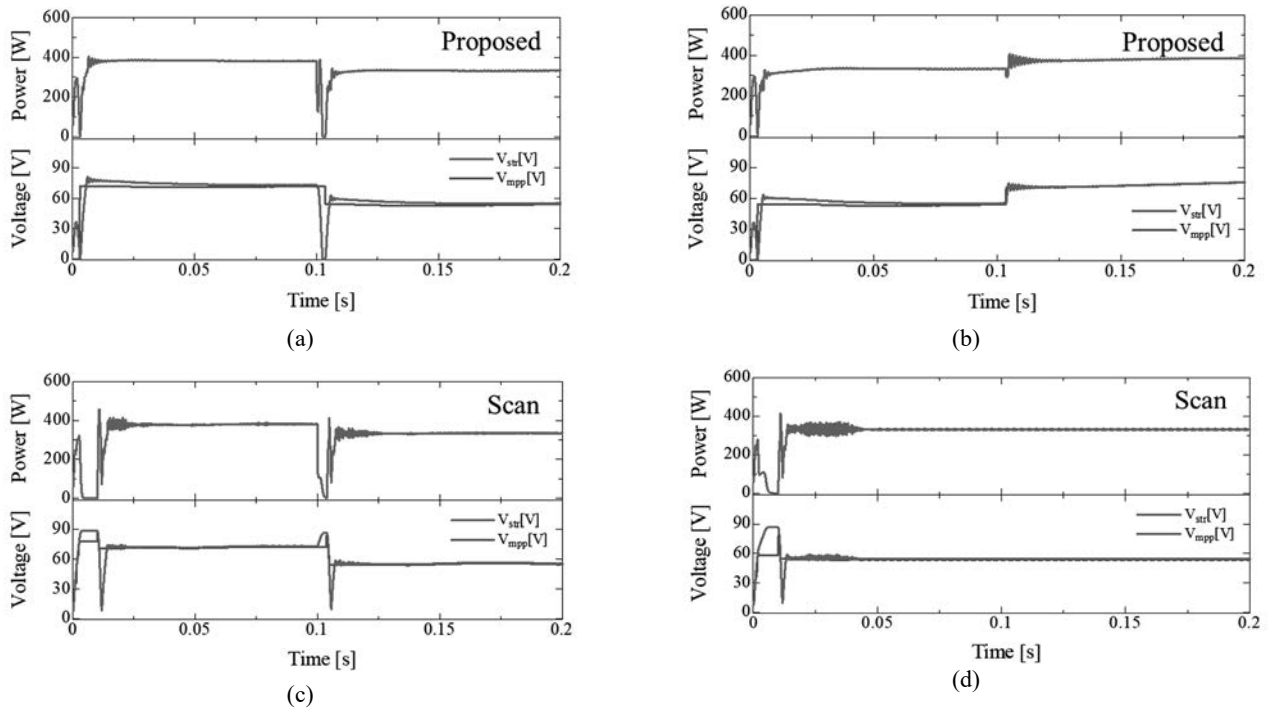


Fig. 11 Tracking Performance of Proposed method and Scan method under changes in solar Insolation from PSC<sub>2</sub> to PSC<sub>3</sub> ((a), (c)) and from PSC<sub>3</sub> to PSC<sub>2</sub> ((b), (d))

力値を介して最適動作電圧 $V_{mpp}$ を決定し、昇圧コンバータより $V_{str}$ が $V_{mpp}$ で動作するようにスイッチングを行う。日射環境は Fig. 9 に示すPSC<sub>2</sub>とPSC<sub>3</sub>を用いており、始動から0.1s後にPSC<sub>3</sub>→PSC<sub>2</sub>またはPSC<sub>2</sub>→PSC<sub>3</sub>と日射変化させた時の両手法の追従動作波形を確認した (Fig. 11)。

PSC<sub>3</sub>→PSC<sub>2</sub>の環境変化の場合 (Fig. 11 (a), (c)), 両手法が日射変化に対応し、MPPT 制御よりPSC<sub>2</sub>の GMPP であるMPP<sub>3</sub>に追従している。追従速度は、提案手法が 21.8ms, スキャン法が 47.0ms であった。スキャン法は、電圧 $V_{str}$ を短絡から開放まで動作させ GMPP を探索するのに対して、提案手法は短絡動作のみで探索を行う。この結果から、探索範囲の縮小が追従時間の短縮に繋がることを確認できる。PSC<sub>2</sub>→PSC<sub>3</sub>の環境変化 (Fig. 11 (b), (d)) では、提案手法がPSC<sub>3</sub>の GMPP であるMPP<sub>4</sub>に追従しているのに対して、スキャン法は LMPP であるMPP<sub>3</sub>に停滞している。PSC<sub>2</sub>からPSC<sub>3</sub>に変化する時、MPP<sub>3</sub>の電力が変化しないために、スキャン法は電力差を検出できず MPPT 制御を行っていない。一方、提案手法は動作電圧上で短絡しているMPP<sub>4</sub>のセルストリング電流 $I_{pv4}$ を監視し、その電流差 $dI_{sh4}$ が閾値 $\delta_i$ を超えたことを起因に、Mode3 による推定処理を行いMPP<sub>4</sub>への追従に成功している。セルストリング電流の監視より LMPP から脱出が可能であることを確認できた。

最後に式(11)より、各動作波形の過渡効率を求めた。

$$\eta = \frac{\int_{T_i}^{T_f} P(t)dt}{\int_{T_i}^{T_f} P_{max}(t)dt} \times 100 \quad (11)$$

過渡効率は、任意の期間における理想電力 $P_{max}$ に対する実電力 $P$ の割合を表わす。今回、期間を 0.1s から 0.2s に設定し算出した。PSC<sub>3</sub>→PSC<sub>2</sub>の環境変化では、提案手法が 96.3%, スキャン法が 95.5%となった。PSC<sub>2</sub>→PSC<sub>3</sub>の環境変化では、提案手法が 97.7%, スキャン法が 85.5%となった。いずれの環境変化においても、提案手法ではより多くの発電電力量が得られた。特に、LMPP からの脱出の有無が過渡効率の違いとなっており、脱出効果の優位性がみられた。

## 6. まとめ

本研究は、大域的な最大電力点 GMPP 到達にかかる追従時間を短縮し、瞬時に局所的な最大電力点 LMPP 脱出を図る MPPT アルゴリズムを提案した。シミュレーションでは、追従時間、過渡効率、LMPP 脱出の観点からスキャン法との比較を行い、すべての項目において、提案手法の有効性が示された。提案手法は、短絡動作または動作電圧上で各 LMPP 電力の推定を可能にしたことで、探索範囲の縮小を図り、同時に追従時間の短縮に繋げた。さらに、動作電圧上から高電圧側の MPP 変化を検出できず LMPP に停滞する課題を、セルストリング電流の監視工程より解決した。

今回はシミュレーション解析による比較検討であったが、提案アルゴリズムを実装するためには、セルストリングに電流センサを取り付ける必要がある。しかしながら、一般的な太陽電池モジュールにおいては、セルストリン

グやバイパスダイオードがジャンクションボックス内に封入されていることが多く、取付が容易ではない。また、通常よりも多くの電流センサを必要とすることから、コスト面の課題がある。以上の観点から、今後は、日射環境が高速で変化しうる電気自動車等の移動体用にカスタマイズされた太陽電池モジュールを対象に提案手法の適用の可能性や有効性について検討していきたい。

## 参考文献

- 1) J. W. Beak, J. S. Ko, J. S. Choi, S. J. Kang, D. H. Chung, Development of novel MPPT algorithm of PV system considering radiation variation, ICCAS, 1235-1241(2010).
- 2) 板子一隆, 太陽光発電システムのパワーコンディショナー入門,31-36(2014),オーム社,東京.
- 3) M. Kermadi, Z. Salam, J. Ahmed, E. M. Berkouk, A High-Performance Global Maximum Power Point Tracker of PV System for Rapidly Changing Partial Shading Conditions, IEEE Trans. Ind. Electron., 68(3), 2236-2245(2021).
- 4) K. Ishaque, Z. Salam, A Deterministic Particle Swarm Optimization Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition, IEEE Trans. Ind. Electron., 60(8), 3195-3206(2013).
- 5) M. Kermadi and E. M. Berkouk, Artificial intelligence-based maximum power point tracking controllers for photovoltaic systems: Comparative study, Renewable Sustain. Energy Rev., 69, 369-386(2017).
- 6) Y. Wang, Y. Li, X. Ruan, High-Accuracy and Fast-Speed MPPT Methods for PV String Under Partially Shaded Conditions, IEEE Trans. Ind. Electron., 63(1), 235-245(2016).
- 7) K. Sasaki, D. Tashima, M. Otsubo, C. Honda, K. Ohtsuka, Maximum Power output control decided by the short-circuit current and the open-circuit voltage of PV cell, Journal of Japan Solar Energy Society (太陽エネルギー), 32(1), 55-60(2006).
- 8) V. Tamrakar, S. C. Gupta, Y. Sawle, Study of Characteristics of Single and Double Diode Electrical Equivalent Circuit Models of Solar PV Module, 2015 ICESA. (Oct.2015), 312-317, Pune, India.