瞬時最大電力追従法を用いたMPPT制御

学生員 徳島 大己* 学生員 内田 正人**
 学生員 神戸 智* 正員 石川 裕記*
 正員 内藤 治夫*

A New MPPT Control for Photovoltaic Panels by Instantaneous Maximum Power Point Tracking

Daiki Tokushima*, Student Member, Masato Uchida**, Student Member, Satoshi Kanbei*, Student Member,
 Hiroki Ishikawa*, Member, Haruo Naitoh*, Member

This paper presents a new maximum power point tracking control for photovoltaic (PV) panels. The control can be categorized into the Perturb and Observe (P&O) method. It utilizes instantaneous voltage ripples at PV panel output terminals caused by the switching of a chopper connected to the panel in order to identify the direction for the maximum power point (MPP). The tracking for the MPP is achieved by a feedback control of the average terminal voltage of the panel. Appropriate use of the instantaneous and the average values of the PV voltage for the separate purposes enables both the quick transient response and the good convergence with almost no ripples simultaneously. The tracking capability is verified experimentally with a 2.8 W PV panel under a controlled experimental setup. A numerical comparison with a conventional P&O confirms that the proposed control extracts much more power from the PV panel.

キーワード：太陽電池，MPPT，瞬時最大電力追従法

Keywords: Photovoltaic, MPPT, Instantaneous Maximum Power Point Tracking Control, Perturb and observe method

1. はじめに

地球環境問題から、太陽光発電をはじめとして化石燃料に対する代替エネルギーの活用技術の開発・向上が急務である。太陽光発電の技術開発要素は、太陽電池（Photovoltaic, 以下、PV と略記）の材料関連と、太陽光発電システム技術関連に大別できる。太陽電池材料開発では、材料コストとの低減と並んで、変換効率の高い材料の開発が必須の課題である。太陽光発電システム技術開発においても、効率の向上は不可欠である。最大電力点追従（MPPT: Maximum Power Point Tracking, 以下、MPPT と略記）制御は、PV をその出力電力が最大になる動作点（最大電力点: Maximum Power Point 以下、MPP と略記）で稼働させる制御法である。これは太陽電池から最大限の電力を取り出す技術である。

これまでに、多数の MPPT 法が報告されている。PV の特性の関数近似による方法⁽¹⁾⁽²⁾、PV の内部インピーダンスと PV に接続される変換器の入力インピーダンスを最大電力条件に整合させる方法⁽³⁾⁽⁴⁾、二値制御方式⁽⁵⁾⁽⁶⁾などがある。

山登り法（Perturb and Observe method: P&O と略記）もその一つで、数多くの手法が提起されている。以下に基本原理を示す。

- 常に動作点電圧指令値または電流指令値に一定幅の振動を与え続ける
- これに伴う電力の変化を検出する
- この変化に基づき動作点を MPP へ接近させる方向を特定する
- その方向へ動作点を移動させる

この方法では、MPPT 達成のいかんに関わらず、一定幅の動作点振動を続行するため、MPPT 達成後の定常状態でも MPP 近傍で振動が残り、電力の損失をまねく。これは従来の P&O の本質的欠陥である。

本論文で提示する方法は P&O の一種である。動作点を MPP へ接近させる方向の特定には、PV に接続される変換器（本文ではチョッパ）のスイッチング動作に起因する瞬時電圧変動を利用する。スイッチング動作による瞬時電圧

* 岐阜大学 工学部
 〒501-1112 岐阜市柳戸 1-1
 Gifu University Engineering Department
 1-1, Yanagido, Gifu 501-1112

** 東芝産業機器製造（株）
 〒510-8521 三重県三重郡朝日町縄生 2121
 TOSHIBA Industrial Products Manufacturing Corporation
 2121, Nao, Asahi-Cho, Mie-Gun, Mie-Prefecture 510-8521

変動を検出可能ならば、変換器の種類は問わない。動作点の MPP への追従制御には動作点電圧の平均値を用いる。瞬時値と平均値を適切に使い分けることにより、迅速な過渡応答と MPP 近傍での脈動が極めて小さい収束性を実現できた。

以下、本文では、本制御法の原理を説明し、実験によりその効果を確認する。

2. 瞬時最大電力追従法の制御原理と動作電圧制御系

太陽電池の出力特性の典型例を図 1 に示す。基本となる電流-電圧特性（以後、I-V 特性と略記）と、これから算定できる電力-電圧特性（以後、P-V 特性と略記）を示している。P-V 特性曲線の頂点が MPP である。無制御では、PV の動作点が MPP に位置する保証はどこにもない。P-V 特性曲線上で電力が小さい動作点に滞留することは十分あり得る。さらに、図 1 に例示した特性は不変ではなく、日照量、温度など気象条件により時々刻々変化し、MPP も定点とはならない。PV から最大の電力を取り出すには、PV に電力変換器を接続し、移動する MPP に PV の動作点を追従させる制御を施す必要がある。これが MPPT 制御である。

〈2・1〉 瞬時最大電力点追従法による MPPT 制御原理
本論文による MPPT では、電力変換器としてチョッパを用いる。これを PV に接続し、PV の動作点電圧を、動作点電圧指令値に追従させる。この指令値は、チョッパ入力段における、チョッパ電圧制御サンプリング期間（後述する ΔT と同一）の平均電圧である。

PV の動作電圧は必然的に、チョッパのスイッチング動作により、上記指令値（平均値）付近で脈動する。PV の電力もこれに応じて図 2(b) に示した脈動を呈する。図 2(a) の P-V 特性曲線にて、双方向の矢印で示した動作点の範囲がこれに対応する。本論文が提示する方法は、この電力の脈動を利用する。

制御のサンプリング周期を ΔT 、その間の瞬時電力の最大値を P_{IMAX} 、これに対応する瞬時電圧を V_{IMAX} とする。 ΔT 間の瞬時動作点電圧の平均値を V_{AVE} とする。図 2(a) において、動作点が MPP の電圧より低い場合と、高い場合とで、それぞれ以下の関係が成立する。

$$V_{IMAX} > V_{AVE} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{IMAX} < V_{AVE} \dots\dots\dots (2)$$

図 2(a) から明らかなように、 V_{IMAX} は必ず V_{AVE} よりも MPP に近い側に存在する。よって、 V_{AVE} が V_{IMAX} を追従するよう制御を適応させれば、MPP に到達できる。

MPP 近傍に達した図 3 にて、上記追従動作の停留性を考察する。MPP 近傍では図 3 の P-V 特性曲線から分かるように、瞬時電圧の脈動、つまり動作点電圧の変化範囲が図 2(a) の場合とは異なり、 V_{IMAX} の両側に亘る。 V_{IMAX} への追従を続行すれば、 V_{IMAX} は、この動作点電圧の変化範囲のほぼ中央に位置し、MPPT が達成できる。動作点が MPP

図 1 太陽電池の出力特性
Fig. 1. Characteristics of a typical PV.

図 2 PV 出力電力の脈動
Fig. 2. Tracking principle of IMPTC.

図 3 最大電力点近傍における動作点の脈動
Fig. 3. The ripple of the operating points around the MPP in IMPTC.

電圧より低い場合でも同様である。

本論文の MPPT 制御を瞬時最大電力追従法 (Instantaneous Maximum Power Point Tracking Control : IMPTC と略記) と称する。

〈2・2〉 動作点電圧指令値の算定過程 V_{IMAX} は PV の動作点電圧の追従目標値である。図 4 に V_{IMAX} を算出する過程をフローチャートで示した。PV の瞬時電圧 $v(t)$ と瞬時電流 $i(t)$ を検出し、乗算により瞬時電力 $p(t)$ を求める。 $p(t)$ の ΔT 間での最大値 P_{IMAX} を算定し、これに対応する

V_{IMAX} を特定する。 V_{IMAX} をチョッパへの電圧指令値 V^* とする。

$$V^* = V_{IMAX} \dots \dots \dots (3)$$

〈2・3〉動作点電圧制御系 V^* に PV の動作電圧を追従させるよう制御系を構成する。実際にチョッパに指令値として直接与える物理量はデューティ比である。チョッパは与えられたデューティ比を実現すべく、スイッチング周波数、本論文では 10 kHz、にてスイッチのオン・オフ制御を実行する。スイッチをオンして短絡状態にすると、PV の出力電流が増加し、図 1 に示した I-V 特性にしたがって PV の出力電圧が減少する。スイッチがオフしたときはこの逆の現象を呈する。この電圧の増減は、スイッチングによる瞬時値の変化で、先に指摘したように、本論文ではこの脈動を利用して MPPT を行っている。 V^* は瞬時値への指令値ではなく、 ΔT での平均値に対する指令値である。PV の出力電圧の平均値 V_{AVE} が V^* を追従するようフィードバック制御系を構成する。この制御系のブロック図を図 5 に示す。図中の、IMPTC logic は、〈2・2〉の動作電圧指令

値の算定過程である。追従を達成し、電圧偏差 ΔV が 0 になったとき、その時のデューティ比を維持する、つまり動作電圧を動作電圧指令値に保つために、制御論理は積分制御とした。

3. 実験結果と考察

本章では、IMPTC の各種動作条件における応答を実験により確認する。従来の P&O との比較により、その有用性を示すとともに、その理由を考察する。

実験条件を表 1 に示す。光源は光量が可調節のハロゲンランプを用いた。

〈3・1〉検証対象システムの回路構成 図 6 に本論文で検討する太陽光発電システムの回路構成を示す。チョッパは、PV の端子電圧の平均値 V_{AVE} を指令値 V^* に制御する。チョッパの出力段は、直接負荷に接続したり、インバータを介して負荷や交流系統などに接続する。本文では、MPPT の性能のみを評価するため、インバータ/負荷の代わりにバッテリーを接続してある。PV の電圧（瞬時値）はアイソレーションアンプで検出し、IMPTC に必要な電圧（平均値）の制御に供する。PV の電流はホール CT で検出し、瞬時電力の算出に用いる。

〈3・2〉比較対照の P&O の概要 比較に用いた従来山登り方式（以下、単に P&O と記す）の概略を以下に示す。

表 1 実験条件

Table 1. Experimental conditions.

Tested photovoltaic	GT-1633-TF
Rated maximum power	2.8 [W]
Rated output voltage	15.4 [V]
Switching frequency	10[kHz]
Sampling period of IMPTC	10[μs]
MPPT period	50[ms]
Output voltage	24[V]

図 4 瞬時最大電力算定フローチャート

Fig. 4. Flow chart of detection of V^* of IMPTC.

- $v(t)$: Instantaneous voltage of PV
- $i(t)$: Instantaneous current of PV
- V^* : Reference voltage
- V_{AVE} : Average voltage of PV
- K_I : Integral gain

図 5 IMPTC controller のブロック図

Fig. 5. Control block of IMPTC controller.

図 6 太陽光発電システム回路構成

Fig. 6. Experimental setup.

PV の動作電圧を ΔT ごとに一定変化幅で変動させる。変動前と変動後の PV の出力電力を比較し、常に電力が大きくなる方向へ PV の動作点を移動させ MPP へ接近させる。PV における変動前の動作電圧を V_A 電力を P_A 、変動後の動作電圧を V_B 電力を P_B 、電圧の変動幅を ΔV とし、以下の判定条件で動作点を変更する。

$$(P_A > P_B) \cap (V_A > V_B) \Rightarrow \Delta V > 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$(P_A < P_B) \cap (V_A < V_B) \Rightarrow \Delta V > 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$(P_A > P_B) \cap (V_A < V_B) \Rightarrow \Delta V < 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$(P_A < P_B) \cap (V_A > V_B) \Rightarrow \Delta V < 0 \dots\dots\dots (7)$$

〈3・3〉 照度、温度一定運転 照度と温度を一定に保った条件での実験結果を示す。この条件では、PV の P-V 特性が一本の曲線で定まるので、MPPT 制御の基本性能を評価するのに適している。この実験では MPPT 制御を施していない状態で MPP から外れた動作点を初期動作点とする。この点から、MPPT 制御を開始し電力応答を観測する。初期動作点は、MPP 電圧より低い状態で MPP 電力の 65% とした。

図 7 は、IMPTC の電力応答を最速の設定とし、比較対象の P&O における動作点電圧の変化幅 ΔV を、この IMPTC の応答とほぼ同じになるよう設定した場合の電力応答を示す。具体的な IMPTC の設定は、図 5 のブロック図における K_I の値を 0.06 とした。定常状態に到達した後の波形の比較から、IMPTC では殆ど脈動が発生していないが、P&O で

図 7 照度、温度一定における電力量応答波形

Fig. 7. PV-power response at constant illumination and temperature.

表 2 A 区間における電力量比較

Table 2. Comparison of generated energy during interval A.

MPPT controller	Generated energy
P&O	164.8 mWs
IMPTC	171.8 mWs(+4.2%)

は顕著な脈動が生じている。図中に示した、脈動の一周期 (A 区間) で電力量を比較した結果を表 2 に示す。IMPTC は P&O より約 4% 増の電力量が得られることが分かる。これは先に指摘したように、MPP 到達以後、P&O では原理的に、動作点指令電圧を変動させ続ける必要があるのに対し、IMPTC は積分制御により動作点指令電圧を一定値に維持することによっている。日の出から日没まで太陽電池の稼働時間の大半は定常状態が占めるため、定常状態における電力の増加は、発電量の増加に最も貢献し、重要である。

図 8 は、IMPTC の設定はそのままとし、P&O の設定を、定常状態での脈動がほぼ IMPTC と同程度になるよう変更した場合の電力応答の比較を示している。具体的には、P&O にて、動作点電圧の変更幅を図 7 の 1/6 に狭くした。この設定変更により、定常状態での脈動は狙いどおり小さくできたが、過渡応答速度が 0.7s と大幅に劣化する。過渡応答期間中である図中 B 区間での電力量の比較を表 3 に示す。この結果から、定常状態に達するまでの短時間ではあるが、IMPTC の方が、約 20% 増の電力量が得られた。

以上の比較検討から、P&O は MPPT 制御の電力応答を速くすると、MPP 到達後、つまり定常状態での脈動が大きく、ひいては電力の損失が大きい。逆に定常特性を重視すると応答速度が遅くなり、これも電力損失をまねく。一方 IMPTC では、MPPT 制御における PV 電力応答速度と定常特性の優位性を確認した。

特に、定常状態における発電量の低下は、手段の如何を問わず致命的欠陥である。これ以降、別の動作条件での比較

図 8 照度、温度一定における電力量応答波形

Fig. 8. PV-power response at constant illumination and temperature.

表 3 B 区間における電力量比較

Table 3. Comparison of generated energy during interval B.

MPPT controller	Generated energy
P&O	1011 mWs
IMPTC	1218 mWs(+20.4%)

図 9 照度上昇における電力量応答波形
Fig. 9. PV power response at rising stage of illumination.

図 10 照度上昇における IMPTC の動作点軌跡
Fig. 10. The locus of operating points at rising stage of illumination in IMPTC.

較検討を続けるが、P&O の応答速度の設定は定常特性を重視した設定、つまり図 8 の設定とする。

〈3・4〉 温度一定照度変化運転 温度を一定に保ち照度を $0.5 \text{ kW/m}^2 \sim 1.0 \text{ kW/m}^2$ になるようハロゲンランプの電源電圧をステップ状に上昇・下降させた条件での実験結果を示す。この実験は、すでに MPPT 制御を施した状態から照度を上昇・下降させ、照度上昇・下降後の MPP に至るまでの電力応答を観測した。

IMPTC と P&O における、照度上昇時の MPP にいたるまでの電力応答波形を図 9 に示す。P-V 特性上における電力応答中の動作点変動の軌跡を図 10、図 11 に示す。図 9 において、IMPTC のほうが P&O よりも 0.15 s 速く照度上昇後の MPP に至っている。この理由は、P&O が図 9 の時刻 T で MPP から遠ざかる挙動を示すためである。図 10、図 11 の動作点軌跡を比較すると、IMPTC では、この現象はない。これは、P&O が ΔT ごとの平均値しか扱っていないため起こる現象である。つまり、MPP から遠ざかる方向へ動作点を移動させても照度上昇の影響により平均電力は

図 11 照度上昇における P&O の動作点軌跡
Fig. 11. The locus of operating points at rising stage of illumination in P&O.

表 4 D 区間における電力量比較

Table 4. Comparison of generated energy during interval D.

MPPT controller	Generated energy
P&O	764 mWs
IMPTC	875 mWs(+14.6%)

図 12 照度下降による電力量応答波形
Fig. 12. PV power response at decreasing stage of illumination.

増加し、MPP から遠ざかる方向へ動作点を移動させるからである。IMPTC では、常に瞬時最大電力点を監視しているのでこの現象は生じない。過渡応答期間中である図 9 中 D 区間での、両制御法における電力量比較を表 4 に示す。IMPTC は従来山登りより、照度上昇では、約 14.6% 多く電力量を得ることができた。

図 12 に照度を下降させた場合の IMPTC と P&O の電力応答波形を示す。図 13、図 14 に両制御法における P-V 特性上での動作点の軌跡を示す。照度上昇における電力応答と同様に、図 12 における照度下降の電力応答も、IMPTC のほうが速く MPP に至っている。P-V 特性上における動作点の軌跡を見ると、図 13 における IMPTC の動作点軌跡

図 13 照度下降における IMPTC の動作点軌跡
Fig. 13. The locus of operating points at decreasing stage of illumination in IMPTC.

図 14 照度下降における P&O の動作点軌跡
Fig. 14. The locus of operating points at decreasing stage of illumination in P&O.

表 5 E 区間における電力量比較

Table 5. Comparison of generated energy during interval E.

MPPT controller	Generated energy
P&O	525 mWs
IMPTC	488 mWs(+7.65%)

は、照度下降の MPP に沿って電力が下降し理想的な応答が得られている。図 14 の P&O では、照度下降中の動作点が、MPP から遠ざかる傾向がある。この理由は、照度上昇の場合と同じである。図 12 の過渡応答期間中である E 区間で、両制御法による電力量比較を表 5 に示す。IMPTC は P&O より、約 7.65% 多く電力量を得ることができた。

以上の比較検討より、IMPTC は、照度変化に対し非常に応答性が高いことが確認できた。

4. まとめ

IMPTC の基本原理は、

- 動作点の変更方向の特定には、PV の動作点を制御するのに必要な変換器のスイッチング動作に伴う瞬時電力脈動を利用する
- 動作点の MPP への移動と MPPT 達成後の動作点の維持は、積分制御に基づく、PV の動作点電圧平均値のフィードバック制御によりおこなう

である。この手法は、スイッチング動作による瞬時電力の脈動を検出できれば変換器の種類を問わず適応できる。従来の P&O との本質的相違は、瞬時値と平均値を適切に使い分けたことにある。これにより、ある条件で MPPT を達成した後は、平均値で与える動作点電圧指令値の変化を僅少に留めることが可能となった。同時に、その後の日照などの条件変化に伴う MPP の移動に備え必須である MPP の移動情報は、チョッパのスイッチングにより常時発生している PV の動作点電圧脈動を利用して遅滞なく取得できる。

IMPTC により、迅速な過渡応答と MPP 近傍での脈動が極めて小さい収束性を実現できることを、実験による従来の P&O との比較により実証した。

(平成 15 年 7 月 31 日受付, 平成 16 年 4 月 27 日再受付)

文 献

- (1) A. Kislovski and R. Redl: "Maximum-power-tracking using positive feedback", Proc IEEE Power Electron Spec Conf, pp.1065-1068 (1994)
- (2) Y. Yamaguchi, E. Sato, H. Minakata, and S. Tadakuma: "Maximum Power Tracking Control Method of A Solar Cell by Approximating the I-V Characteristics", Convention Record IEE Japan, Industry Applications Society, pp.191-194 (1998)
- (3) A. Nafeh, F. Fahmy, O. Mahgoub, and E. Abou El-Zahab: "Developed algorithm of maximum power tracking for stand alone photovoltaic system", Energy Sources, Vol.20, Issue 1, pp.45-58 (1998)
- (4) K. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada: "Maximum photo-voltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmosphere conditions", Proc. Inst. Elect. Eng. G, Vol.142, pp.59-64 (1995-1)
- (5) T. Watanabe, T. Yoshida, and K. Ohniwa: "A Maximum Power Point Tracking Control Method of a Photovoltaic Power Generator with Consideration of Dynamic Characteristics of Solar Cells", IEEE Trans. IA, Vol.123, No.7, pp.863-869 (2003-7)
渡辺 崇・吉田俊哉・大庭勝實:「太陽電池の動特性を考慮した最大電力点追従法」, 電学論 D, **123**, 7, pp.863-869 (2003-7)
- (6) M. Miyatake, T. Kouno, and M. Nakano: "Maximum Power Point Tracking Method of Photovoltaic Generation System Introducing Line Search Method", Proc. of Japan Industry Applications Society Conference, pp.327-330 (2000)

徳島大己 (学生員) 1977 年 1 月 22 日生。1997 年 3 月福井工業高等専門学校電気工学科卒業。1999 年 3 月岐阜工業高等専門学校専攻科電子システム工学専攻修了。2001 年 3 月岐阜大学大学院博士前記課程電子情報工学専攻修了。同年 4 月より同大学大学院博士後期課程電子情報システム工学専攻入学。

内 田 正 人 (学生員) 1979 年生。2001 年 3 月岐阜大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月より同大学大学院博士前期課程電気電子工学専攻入学。

石 川 裕 記 (正員) 1970 年 7 月 15 日生。1995 年岐阜大学大学院工学研究科博士前記課程電子情報工学科専攻修了。同年岐阜大学助手。現在に至る。主として電流共振変換器，誘導電動機の特性解析，SRM のトルク制御に関する研究に従事 IEEE 会員。

神 戸 智 (学生員) 1981 年 3 月 1 日生。2003 年 3 月岐阜大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月より同大学大学院博士前期課程電気電子工学専攻入学。

内 藤 治 夫 (正員) 1952 年 6 月 17 日生。1980 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了，工学博士。同年 4 月 (株) 東芝入社。(株) 東芝より派遣され，1984 年 10 月から 1985 年 6 月まで，米国カリフォルニア工科大学で客員研究員，同年 7 月から 1986 年 4 月まで，バージニア州立工科大学で客員助教授。2000 年 4 月より岐阜大学工学部教授。