独立型太陽光発電システムにおける 最大電力点追跡のための一制御方式

正員 板子 一隆* 正員 森 武昭*

A Control Method for Maximum Power Point Tracking in Stand-Alone-Type PV Generation Systems

Kazutaka Itako*, Member, Takeaki Mori*, Member

In this paper, a new control method for maximum power point tracking(MPPT) in stand-alone-type PV generation systems is proposed. In this control method, the operations detecting the maximum power point and tracking its point are alternately carried out by using a step-up DC-DC converter. This method requires neither the measurement of temperature and insolation level nor PV array model.

In a stand-alone-type application with a battery load, the design method for the boost inductance L of the step-up DC-DC converter is described, and the experimental results show that the use of the proposed MPPT control increases the PV generated energy by 14.8% compared to the conventional system.

キーワード：太陽光発電，最大電力点追跡制御，昇圧形 DC-DC コンバータ

Keywords: PV generation system, MPPT control, step-up DC-DC converter

1. まえがき

山小屋などで利用されている独立型の太陽光発電システムでは，その電力需要が年々増加の傾向にあるため，設備の利用率の向上が重要な課題となってきた⁽¹⁾。このシステムでは，最大電力点追跡（MPPT）制御は一般に行われず⁽¹⁾，バッテリーの充電制御のみで太陽電池の出力利用率は，本研究室での実測例では85%前後となることが明らかとなっている。従って，高い精度の MPPT 制御を適用して利用率のより一層の向上を図ることが肝要である。

一方，系統連系型システムでは，太陽電池の MPPT 制御として最も一般的な山登り法^{(2)・(3)}がパワーコンディショナーで実用化されている。この手法は，適用性に優れているが一般に応答性が悪く，実際の運用において MPPT ミスマッチにより，太陽電池の出力利用率は最も低い場合75%になる事例が報告されている⁽⁵⁾。そこで，この MPPT ミスマッチを軽減するために，ある一定間隔で太陽電池の I-V 特性を求め，これを基に動作点の補正を行う瞬時短絡補正法^{(6)・(7)}や山登り法とは異なり，オンラインで太陽電池の短絡電流を測定して最適動作電流を予測する方法⁽⁸⁾など

種々の方法が活発に検討されている。しかしながら，これらの手法は太陽電池の出力利用率が必ずしも定量的に明確となっていないなどの問題を含んでいる。

そこで，本論文では，独立型太陽光発電システムのより高い利用率を得ることを目的として，これらの手法とは異なり，通常の DC-DC コンバータを用いた簡単な回路構成で，高い精度の MPPT を可能とする太陽光発電システムのための新しい制御方式を提案する⁽⁹⁾。この制御方式は，太陽電池に昇圧形の DC-DC コンバータを接続し，この回路が本来持つ動作モードを利用して最大電力点検出動作と追従動作を交互に独立させて行うものである。この方法は，太陽電池の出力特性モデルを用いないので，パネル面温度や日射強度などの検出を必要としない。そこで，本制御方式の動作原理および数値計算によるブーストインダクタのインダクタンス L の設計方法を示し，実測例により，本制御方式の有効性を明らかにしている。なお，本制御方式は原理的には系統連系型システムにも同様に適用することができるが，この点については別の機会に報告する。

2. 制御システムの構成および制御方法

図1に今回提案する制御システムの構成を示す。同図において L はブーストインダクター， S は MOSFET 等の高速スイッチング素子， C は平滑コンデンサ， D は C の短絡防止用ダイオードをそれぞれ表している。太陽電池は所要の電力に応じて並列に接続される。これを昇圧形の DC-

* 神奈川工科大学電気電子工学科
〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030
Department of Electronic & Electrical Engineering, Kanagawa
Institute of Technology
1030, Shimo-Ogino, Atsugi, Kanagawa 243-0292

図1 提案する制御システム
Fig. 1. Proposed control system.

図2 動作波形
Fig. 2. Operating waveforms.

DC コンバータを通して太陽電池電圧を昇圧して負荷に印加する。本制御システムでは、太陽電池の電圧・電流を検出するためのセンサーを必要とする。リアルタイムで検出される電圧と電流は A/D 変換され、 $P_{\max}$ 検出時にはそれらの積 P_{PV} を求め最大電力点を検出する。そのときの最適動作電流 I_{OP} あるいは最適動作電圧 V_{OP} に太陽電池電流 I_{PV} あるいは電圧 V_{PV} を追従させる。原理的には電流・電圧のどちらでも追従させることが可能であるが、本論文では最適動作電流 I_{OP} に追従させる場合について示している。この検出動作と追従動作を 1 つのサイクル（検出周期 T ）として繰り返し動作させる。これらの制御演算処理は

DSP (Digital Signal Processor) などのマイクロプロセッサを用いることで実現できる。

図 2 に動作波形の概念図を示す。搬送波（のこぎり波）と PI 制御器の出力値 V_{ref} をコンパレータを用いて比較することで PWM 制御信号を得る。最大電力点の検出期間（ $P_{\max}$ 検出期間）では、スイッチ S がオフ（OFF モード）状態になり、太陽電池電流 I_{PV} が零まで減少するとスイッチ S がオン状態（ON モード）となり、 I_{PV} は短絡電流 I_{SC} まで上昇して $V_{PV}=0$ となる。この ON モードのときの電力の変化を利用して最大電力点における最適動作電流 I_{OP} を検出することができる。この検出期間中の太陽電池の I-V 特性が多価関数とならないように適切な L を設定する必要がある。太陽電池電流 I_{PV} が得られた最適動作電流 I_{OP} になるように DC-DC コンバータの出力電圧を制御する（追従動作期間）。このときは、電力取得能力を高めるために数十 kHz と高い周波数 $f_C (=1/T_C)$ でスイッチングを行う。

また、本制御方式はバッテリー負荷に欠かすことのできない過充電保護機能を簡単に付加できるメリットも備えている。すなわち、負荷電圧を検出し、ヒステリシスコンパレータで、ある一定電圧以上になるとスイッチ S を ON 状態にして、バッテリーへの電力供給を断つ。そして、ある一定電圧以下になると、スイッチ S の ON 状態を解除し、再び充電を開始させる。本論文の実験はこの機能を付加した状態で行っている。

ここで、文献 (8) の MPPT 手法は太陽電池の短絡電流と最適動作電流が比例関係にある点に着目し、太陽電池短絡用のトランジスタを新たに付加して一定間隔で太陽電池の短絡電流を検出して最適動作電流を予測し、これに追従するような制御を行っている。このように、太陽電池の状態を一定間隔でモニターする点で本制御方式と似ているが最適動作電流の検出原理が異なる。また、同方法は、太陽電池短絡時には負荷側に電力を全く供給することができないが、本制御方式では、回路が本来持つ動作モードを利用しているため、最大電力点検出時でも最大電力の約半分程度の電力を負荷に供給できる点などが異なっている。

3. 回路解析

〈3・1〉 太陽電池電圧 太陽電池セルの I-V 特性を表す方程式⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾において、太陽電池の直列抵抗 R_S は 10^{-2} 、並列抵抗 R_{Sh} は 10^3 のオーダーであるため、これらの抵抗分の影響を無視して取り扱えば、以下に示す簡単な式を得ることができる。

$$I_{PV} = I_{SC} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{q}{nkT} V_{PVs} \right) - 1 \right\} [A] \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

$$I_0 = \gamma T^\delta \exp \left(\frac{-E_g}{nkT} \right) [A] \quad \dots \dots \dots (2)$$

さらに式 (1) を変形すると、次式を得る。

図 3 回路モード
Fig. 3. Circuit modes.

$$V_{PVS} = \frac{nkT}{q} \log \left(1 - \frac{I_{PV} - I_{SC}}{I_0} \right) [V] \dots\dots (3)$$

ここで、 I_{PV} ：太陽電池セルの出力電流 [A]、 V_{PVS} ：太陽電池セルの出力電圧 [V]、 I_{SC} ：短絡電流 [A]（日射強度 G [W/m²] に比例する）、 I_0 ：逆方向飽和電流 [A]（(2) 式で表される）、 q ：電気素量 (1.6×10^{-19} [C])、 k ：ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K)、 T ：太陽電池 PN 接合部温度 [K]、 n ：接合定数（材料によって決まる）、 γ ：温度に依らない定数、 δ ：材料によって決まる定数で 1~4 の範囲、 E_g ：エネルギーギャップ [eV] である。

なお、式 (3) において $I_{SC} \geq I_{PV}$ となるので、 $\log$ の括弧内は正となる。太陽電池パネルセルの枚数を N とすれば、太陽電池パネルの出力電圧 V_{PV} は、次式で示される。

$$V_{PV} = \frac{NnkT}{q} \log \left(1 - \frac{I_{PV} - I_{SC}}{I_0} \right) [V] \dots\dots (4)$$

〈3・2〉 回路モードと等価回路 本制御システムに用いている昇圧型 DC-DC コンバータは、スイッチング素子の ON・OFF 状態により、図 3 に示す 2 つの回路モードを生じる。ON モードでは I_{PV} の値は上昇し、OFF モードでは逆に減少する。太陽電池パネル電圧を式 (4) の I_{PV} 、パネル面温度、日射強度 G の関数として表される非線形の電圧源 V_{PV} として取り扱う。各回路モードにおける連立微分方程式を図 1 に示す制御の流れに従って数値計算することで、DC-DC コンバータの各部電圧および電流を求めることができる。

4. L の設計例

本章では、数値計算によるブーストインダクターのインダクタンス L の設計例を示す。 L の大きさは、小型軽量化の観点から小さい方がよい。しかしながら、 $P_{\max}$ の検出を確実に行うことができ、さらに、検出された $P_{\max}$ にほぼ等しい電力を取得できるという条件から制約を受ける。

本論文で用いた太陽電池セルの各定数値は表 1 に示す通りである。24 V 系の発電システムを想定し、バッテリー電圧 25 V 一定とした。定格発電電力を 100 W に設定し、太陽電池パネルを 2 枚並列に接続している。DC-DC コンバータの C は 220 μ F で一定とし、スイッチング周波数 f_C を 10 kHz、検出周期 T を 1.0 s とした。また、配線に含まれる抵抗分は非常に小さいのでここでは無視して取り扱うこととする。

表 1 太陽電池パネルの各定数値

Table 1. Constants of PV panel.

N	33 枚
n	1.95
γ	2.0×10^{-2}
δ	3.0
E_g	1.103 eV

※ Nominal open circuit voltage $V_{OC}=19.8$ V, nominal short circuit current $I_{SC}=3.47$ A, nominal maximum power point voltage $V_{OP}=15.8$ V, and nominal maximum power point current $I_{OP}=3.16$ A, at insolation level $G=1000$ W/m² and cell temperature 25°C.

〈4・1〉 $P_{\max}$ 検出期間における L の制約 太陽電池の $I-V$ 特性を求める場合、数十 kHz と高い速度で電圧・電流を変化させるとその出力特性は多価関数となり、正確な値を得ることができない⁽¹²⁾。従って、 $P_{\max}$ 検出期間において、正確に $I-V$ 特性を求めるためには電圧・電流を数百 Hz と低い速度で変化させる必要があるため、 L の下限値が制限される。図 2 の動作波形で述べたように、最大電力 $P_{\max}$ は、ON モード時に検出される。本論文では、最も厳しい条件として、公称開放電圧 V_{OC} が L に印加されたときに、太陽電池パネル 1 枚分の電流が零から短絡電流 I_{SC} に到達する時間を 1.0 ms 以上に設定する。すなわち、パネル 1 枚あたりの電流の変化率 K [A/ms] を定義すれば、その値が I_{SC} 以下という条件となる。パネルが a 枚並列に接続されていれば太陽電池の総電流 I_{PV} の電流の変化率は aK となる。この速度で、太陽電池電流を $0 \rightarrow I_{SC} \rightarrow 0$ と振動させると 500 Hz（周期 2 ms）と低い周波数となり、太陽電池の $I-V$ 特性を一価関数として取り扱って問題ない⁽¹²⁾。そこで、検出開始時点 $t=0$ 、太陽電池電流 I_{PV} が短絡電流 aI_{SC} に到達する時点 $t=t_1$ とし、 $t=0$ での太陽電池初期電流を零と仮定する。

図 3(a) より、以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{V_{OC}}{L} t_1 = aI_{SC} \dots\dots\dots (5)$$

検出時間 t_1 が 1.0 ms 以上という条件より、 L に関する以下の条件式が導かれる。

$$L [\text{mH}] \geq \frac{V_{OC}}{aI_{SC}} \dots\dots\dots (6)$$

同式より、太陽電池の公称値から容易に L の下限値を知ることができる。例えば、本論文で用いた太陽電池パネルを 2 枚並列接続した場合は、 $a=2$ であるから L の値は 2.85 mH 以上必要ということになる。この場合、パネル 1 枚あたりの電流の変化率 K は 3.47 [A/ms] 以下となる。

なお、本節では太陽電池の $I-V$ 特性が多価関数とならないように低い周波数で L の下限値を設定しているが、文献 (13) で考案されている太陽電池の内部静電容量を考慮した測定手法を用いれば、より高速に $I-V$ 特性を求めることが可能であるため、本制御方式における L の下限値をより小さくすることも可能である。

〈4・2〉 太陽電池出力利用率を考慮した L の設計例 次に、追従動作期間中にスイッチング動作に伴って発生する電流・電圧のリプルによる（結果として、図 2 で P_{PV} が小さく振動しており、これが取得電力を低下させる）電力取得能力の低下を抑制し、高い太陽電池出力利用率 UUF (Useful utilization factor) ⁽¹¹⁾ を得る観点から、適切な L の値を検討する。UUF は以下の式で定義される。

$$UUF = \frac{\text{動作点出力}}{P_{\max} \text{点出力}} \times 100 = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T V_{PV} I_{PV} dt}{P_{\max}} \times 100 [\%] \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 T は検出周期 [s] である。この UUF は $P_{\max}$ に対する検出周期中に太陽電池から実際に取得できた電力の割合を示すものである。従って、検出期間中に最大電力点を追従できない分の影響もこの UUF の中に含まれる。

図 4 は日射強度 G に対する UUF の特性を L をパラメータとして示している。ただし、パネル面温度は 25°C である。同図より、UUF は G の増加に対して約 500 W/m^2 までは 100% に近づくが、それ以上 G が増加すると再び UUF は減少することが分かる。これは、 G の増加に伴って、 V_{PV} 、 I_{PV} のリプルが減少し、結果として P_{PV} の振動が減少しこれが UUF の上昇に寄与している。一方で G の増加は $P_{\max}$ 検出期間を増加させるため、これが UUF の低下の要因となる。 G の高い領域での UUF の低下は後者の要因が支配的になるためである。

そこで、日射強度が 100 W/m^2 と低い場合と $1,000\text{ W/m}^2$ と高い場合の両方で十分な電力取得能力を得るための L を検討する。図 5 に $G = 100, 1,000\text{ W/m}^2$ のときの L に対する UUF の特性を示す。同図より、 $G = 100, 1,000\text{ W/m}^2$ の両者とも UUF が 98% 以上となる L の値は約 $5.0 \sim 10\text{ mH}$ の範囲にあることが明らかとなった。この値は、前節の L の制約条件を満たしている。

図 6 は、UUF が 98% 以上となる L の範囲の太陽電池のパネル面温度に対する変化を表している。同図より、温度の高い場合は L の範囲は大きく、低い場合は小さいことが分かる。温度の影響を考慮すると、本条件では 7.5 mH 程度が適切であると考えられる。

他のスイッチング周波数 f_c についてもここで述べた方法により、適切な値を見出すことができる。ただし、スイッチング周波数 f_c がより高い場合には、原理的に L の値はより小さくて良いが、前節の L の最低条件を下回る値に設定することはできない。なお、 f_c を高くすると回路システムの浮遊容量や配線のインダクタンスの影響が大きくなるため、実装に際しては、太陽電池の電圧センサや電流センサ部を極力太陽電池パネル端子に近い位置に設置するなどして、その影響を十分軽減する必要がある。

5. 実験結果

〈5・1〉 計算波形と実測波形 図 7(a)、(b) に計算波形と実測波形の一例を示す。実験条件は 4. 章と同じである。

図 4 日射強度 G に対する太陽電池出力利用率 UUF

Fig. 4. Useful utilization factor UUF vs. insolation level G .

図 5 インダクタンス L に対する太陽電池出力利用率 UUF

Fig. 5. Useful utilization factor UUF vs. inductance L .

図 6 太陽電池パネル面温度に対する L の範囲

Fig. 6. Surface temperature of PV panel vs. range of L .

ただし、DC-DC コンバータのインダクタンス L は前章の検討結果を基に 7.5 mH とする。また、スイッチング周波数 f_c を 10 kHz 、検出周期 T を 1.0 s とし、制御演算処理には DSP (TMS320VC-33-150 MHz) を使用した。A/D 変換における縦軸の分解能は 12 bit、サンプリング周波数は 100 kHz である。同図の日射強度 G は 542 W/m^2 、パネル面温度は 35°C であった。同図より、計算波形と実測波形は

図 7 計算波形と実測波形

Fig. 7. Calculated and measured waveforms.

良く一致しており、本シミュレーションの妥当性が確認できる。また、 $P_{\max}$ 検出時の電流の変化率 K が約 0.91 [A/ms] と短絡電流の値を大きく下回っており、設計条件を十分満たしていることが確認できる。

〈5・2〉 太陽電池出力電力特性 図 8 は前節と同じ回路条件で、日射強度 G が急変した場合の応答特性の一例を示している。同図より、本制御方式の G の変化に対する応答は良好であり、日射強度の変化に瞬時に対応していることが分かる。

図 9 は、前節と同じ回路条件で、日中の午前 7 時 30 分から午後 4 時までの太陽電池出力電力 P_{PV} を現在、独立型の太陽光発電で広く利用されているバッテリー制御装置を搭載したシステム（以下、従来方式）と比較している。ただし、従来方式の場合は負荷電圧を 24 V とするために太陽電池を 2 枚直列に接続し、市販のバッテリー制御装置を使用した。同図より、本制御方式では大幅に取得電力を増加できることが分かる。発電電力量で比較した場合、従来方式が 462.6 Wh であったものが本制御方式では 531.2 Wh と約 14.8% 増加させることができた。太陽電池出力利用率 UUF の実測値は午前 7 時 30 分から午後 4 時まではほぼ 99% であった。本実験システムでは、太陽電池側が 12 V 系のため、システム効率は約 94% と従来方式の 98% と比べると幾分低めではあるが、その差分を十分上回る電力の増加を得ることができた。本実験システムの効率低下の要因は、主としてインダクターの直流抵抗分と MOSFET やダイオードによる電力損失であり、これらは損失のより小さな素子を選定することによって従来方式程度に改善できると考えられる。また、太陽電池を直列接続してシステムの電圧を高くすることでも効率の改善が期待できる。

図 10 は負荷変動に対する制御特性を知るために、バッテリーを取り除いて負荷を純抵抗 R_L とし、その値を $10 \Omega \rightarrow 20 \Omega \rightarrow 10 \Omega$ と変化させたときの太陽電池出力電

図 8 日射強度急変時の応答（バッテリー負荷）

Fig. 8. Response under condition of sudden insolation changes (Battery load).

図 9 太陽電池出力電力の特性（バッテリー負荷）

Fig. 9. Output power characteristics of PV cell (Battery load).

図 10 負荷急変時の応答（抵抗負荷）

Fig. 10. Responses under condition of sudden load changes (Resistive load).

力の変化を従来方式と比較して示している。ただし、負荷抵抗値は従来方式の太陽電池パネルが2枚直列接続されていることを考慮し、公称最大出力電圧 V_{OP} と電流 I_{OP} から算出した値 $10\Omega (=2V_{OP}/I_{OP})$ を基準とした。また、パネル面温度はほぼ 30°C であった。同図より、従来方式の場合は、 R_L が 10Ω から 20Ω に増加すると最適動作点から大きく外れるため出力電力が大幅に減少してしまうことが分かる。一方、本制御方式では負荷抵抗値が変化してもそれに伴う変化はみられず、日射強度にほぼ比例して常に従来方式よりも大きな電力を取得できることが確認できる。

以上より、本制御方式の有効性が実験によって実証された。

6. 結 論

本論文では、太陽光発電システムにおける太陽電池の最大電力点追跡のための一制御方式を提案した。本制御方式は、最大電力点の検出動作と追従動作を交互に独立させて行うものであり、確実に最大電力点を検出すると同時に、高い太陽電池出力利用率 UUF の得られる新しい制御方式である。また、バッテリー負荷に必要な過充電保護機能も容易に付加できるメリットを持つ。独立型の太陽光発電システムを想定した数値計算および実験より、以下の成果を得ることができた。

(1) 最大電力点を確実に検出するためには、本制御方式の DC-DC コンバータの $L[\text{mH}]$ を (公称開放電圧 V_{OC}) / (公称短絡電流 $I_{SC} \times$ 並列パネル数 a) 以上に設定する必要がある。本論文で使用した太陽電池パネル ($V_{OC}=19.8\text{V}$, $I_{SC}=3.47\text{A}$) を2枚並列 (100W) にして使用する場合、 2.85mH 以上が必要となる。

(2) L の値は、(1)の条件と UUF の向上の観点から適切に設定されなければならない。例えば、本論文の検討条件では、スイッチング周波数 f_C を 10kHz とした場合、太陽電池のパネル面温度の変化による影響を考慮すると、 7.5mH 程度が適切な値となる。この場合、日射強度 G が $100\sim 1,000\text{W}/\text{m}^2$ で UUF が 98%以上と非常に高い値の得られることが数値計算により明らかとなった。

(3) 実験により、日射強度急変時の応答は良好であることが確認された。また、本制御方式の太陽電池の出力電力特性の一例を従来方式と比較したところ、バッテリー負荷において、一日の発電電力量を約 14.8%増加させることができた。UUF は全ての測定時間においてほぼ 99%であった。純抵抗負荷の場合、負荷抵抗値の変化に影響を受けることなく、従来方式の場合の取得電力を大幅に上回ることができた。

以上より、本制御方式の有効性が明らかとなった。今回は、検出周期を一例として1秒としたが、今後はさまざまな気象条件における検出周期と太陽電池出力利用率 UUF の関係を明らかにし、システム全体の効率を高めるための設計方法について検討を行う予定である。また、今回の結果から、高い UUF の得られることが明らかとなり、系統連系型への適用に対しても従来の山登り法よりも高い効果が

が期待できることから、その詳細について今後さらに検討を行っていく予定である。

(平成 15 年 5 月 2 日受付, 平成 15 年 6 月 30 日再受付)

文 献

- (1) 森 武昭:「独立電源型のハイブリッドシステム—最近の山小屋での事例を中心に—」, 太陽エネルギー, Vol.26, No.5, pp.33-34 (2000)
- (2) B.K. Bose, P.M. Szczesny, and R.L. Steigerwald: "Microcomputer Control of Residential Photovoltaic Power Conditioning System.", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol.1A-21, No.5, pp.1182-1191 (1985)
- (3) I.H. Altas and A.M. Sharaf: "A Novel On-Line MPP Search Algorithm for PV Arrays", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol.11, No.4, pp.748-754 (1996)
- (4) E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N.C. Voulgaris: "Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.16, No.1, pp.46-54 (2001)
- (5) 大谷:「住宅用太陽光発電システムの運転特性評価」, 新エネ・環境研究会, p.35 (2000)
- (6) K. Ujiie, T. Kuroda, T. Yokoyama, and T. Hanayoshi: "Maximum-Power Tracking for Solar-Battery Using a PV characteristic detection with Momentarily-Short-Calibration Method", *Proceeding of the 2000 Japan Industry Appl. Soc. Conf.*, Vol.1, No.217, pp.423-426 (2000) (in Japanese)
氏家克俊・黒田智博・横山智紀・羽根吉寿正:「瞬時短絡補正法による P-V 特性検出を用いた最大電力追従制御」, 平 12 電学産業応用部門全大, Vol.1, No.217, pp.423-426 (2000)
- (7) S. Katsushima, T. Izumi, T. Yokoyama, and T. Hanayoshi: "Maximum Power Point Tracking Control Using Dynamic of Photovoltaic Cell", *2003 National Convention Record, IEE Japan*, No.4-20 (2003-3) (in Japanese)
勝島壮一郎・泉 智紀・横山智紀・羽根吉寿正:「太陽電池の動的特性を用いた最大電力追従制御」, 平 15 電学全大, No.4-20 (2003-3)
- (8) T. Noguchi, S. Togashi, and R. Nakamoto: "Short-Current-Pulse Based Adaptive Maximum-Power-Point Tracking for Photovoltaic Power Generation System", *T. IEE Japan*, Vol.121-D, No.1, pp.78-83 (2001-1) (in Japanese)
野口季彦・常樫重則・中本 良:「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」, 電学論 D, **121**, 1, pp.78-83 (2001-1)
- (9) K. Itako and T. Mori: "A Control Method for Maximum Power Point Tracking in Stand-Alone-Type PV Generation System", *2003 National Convention Record, IEE Japan*, No.7-125 (2003-3) (in Japanese)
板子一隆・森 武昭:「独立型太陽光発電システムにおける最大電力点追跡のための一制御方式」, 平 15 電学全大, No.7-125 (2003-3)
- (10) S.M. Sze: *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp.805-806 (1981)
- (11) 太陽電池専門委員会: 太陽電池ハンドブック, pp.200-202 (1986)
- (12) K. Ohniwa, T. Fujimaki, and S. Eda: "On a Dynamic Equivalent circuit Solar Cell Module", *T. IEE Japan*, Vol.109-D, No.8, pp.542-548 (1989-8) (in Japanese)
大場勝實・藤巻忠雄・江田 覚:「太陽電池モジュールの動的等価回路」, 電学論 D, **109**, 8, pp.542-548 (1989-8)
- (13) D. Wang, H. Ishikawa, and H. Naitoh: "A New Approach Instant Measurement of Photovoltaic V-I Characteristics", *T. IEE Japan*, Vol.122-D, No.8, pp.881-882 (2002-8) (in Japanese)
王 道洪・石川裕記・内藤治夫:「太陽電池 V-I 特性瞬時測定の方法」, 電学論 D, **122**, 8, pp.881-882 (2002-8)
- (14) D. Ohta, T. Hayashi, N. Sekiguti, and T. Tani: "Fundamental Study on Production of Hydrogen with Photovoltaic Module (Comparison operational points of direct connection with maximum power point tracker (P_{max}))", *Journal of Japan Solar Energy Society*, Vol.23, No.2, pp.52-57 (1997-2) (in Japanese)
太田大介・林 達也・関口直俊・谷 辰夫:「太陽電池モジュールによる水素製造に関する基礎研究 (直接接続時の動作点と P_{max} 点の比較)」, 太陽エネルギー, Vol.23, No.2, pp.52-57 (1997-2)

板 子 一 隆 (正員) 1966 年 6 月 10 日生。1991 年日本大学大学院工学研究科博士前期課程電気工学専攻修了。同年神奈川工科大学工学部電気電子工学科助手、現在に至る。1999 年 8 月～2000 年 8 月ブラウンシュヴァイク工科大学客員研究員 (ドイツ)。博士 (工学)。主としてパワーエレクトロニクスの研究に従事。電気設備学会, 日本太陽エネルギー学会, IEEE 会員。

森 武 昭 (正員) 1944 年 9 月 6 日生。1969 年芝浦工業大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1970 年上智大学理工学部電気電子工学科助手。1981 年幾徳工業大学 (現, 神奈川工科大学) 電気工学科講師, 1983 年同助教授, 1987 年同教授, 現在に至る。工学博士 (京都大学)。電力線からの誘導障害, 高調波低減対策, 自然エネルギーの実用化などの研究に従事。電気設備学会, 日本太陽エネルギー学会, IEEE 会員。