

## 二次曲線近似を用いた太陽光発電システムの 最大電力点追従制御

泉 勝 弘\*・辻 峰 男\*  
山 田 英 二\*・小 山 純\*

### Maximum Power Point Tracking Control of PV System with Quadratic Approximation

by

Katsuhiro IZUMI\*, Mineo TSUJI\*, Eiji YAMADA\*  
and Jun OYAMA\*

This paper presents a maximum power point tracking control method with quadratic approximation. To generate maximum power from the solar cell, a terminal voltage of the cell is obtained from parabolic curve through three points near operating point. The experimental system is constructed with this method and DSP controller. The solar power is converted into three-phase AC one by IGBT voltage-type PWM inverter.

#### 1 まえがき

我が国のエネルギー使用量は年々増加の一途をたどっているが、エネルギーの大半は依然として石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料を消費することによって得ている。我が国ではオイルショックを契機として、様々な新エネルギーの研究・開発が進められた。特に最近では、地球環境問題との観点から太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーが、そのクリーンさから改めて見直されている<sup>1), 2)</sup>。太陽光発電では、結晶系シリコンの太陽電池が実用化の段階にあり、多結晶シリコンも変換効率18%を達成している。これによりその応用分野も広がり、クリーンなパワーを供給する自然発電の中でも特にその利用法の研究は活発になってきている<sup>3)~5)</sup>。

近年になって系統連系技術ガイドラインが改訂され、従来逆潮流なしで系統連系していたものが、逆潮流も可能となり、太陽光発電システムを利用することが可能となった。さらに、炭酸ガス発生抑制のために、太陽光発電や風力発電によって発生された電力の売電

価格を販売電力料金と同程度に設定されるようになり、より一層の普及が見込まれている。

太陽光発電のエネルギー源である太陽の日射量は時間的な変動が大きく、従って得られる電力も不安定である。我が国では時間による変動以外に、季節による変動、地域差もきわめて大きい。また、太陽電池は低価格になったとはいえ、まだまだ高価である。このため、常に太陽電池から最大の電力を引き出す最大電力点追従制御が広く研究されている。これらの最適な動作点を求める方法には、太陽電池両端の電圧または電流を常に小刻みに変化させる方法と、太陽電池のモデルを用意してこのモデルから求める方法がある<sup>6)~9)</sup>。後者の方法では、モデルを実際の太陽電池の特性に完全に一致させるのが難しく、太陽電池系の制御に高度な演算を必要とする。

本論文では、太陽電池両端の電圧を小刻みに変化させる方法を改良した二次曲線近似を用いた最大電力点追従制御を開発した。これは、現在の動作点電圧とその前後の動作点での3個の電力を二次曲線で近似して

平成11年4月23日受理

\*電気電子工学科 (Dept. of Electrical and Electronic Engineering)

最大の電力を発生する動作点電圧を求める方式である。この方法を実際の系統連系の太陽光発電システムに適用して、実験によりその有効性を示す。本システムでは太陽電池で得られた電力を三相 IGBT 電圧形 PWM インバータにより三相交流に変換し、電源系統に送っている。

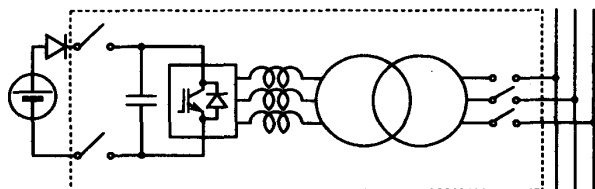


Fig. 1 Overview of photovoltaic system.

Table 1 Parameters of solar cell.

型式	三洋電機株式会社 AMP-1860
出力	18W
最適動作電圧	60V
セル1個の大きさ	11mm×292mm
セルの数	28×4個
パネルの表面積	0.36m <sup>2</sup>

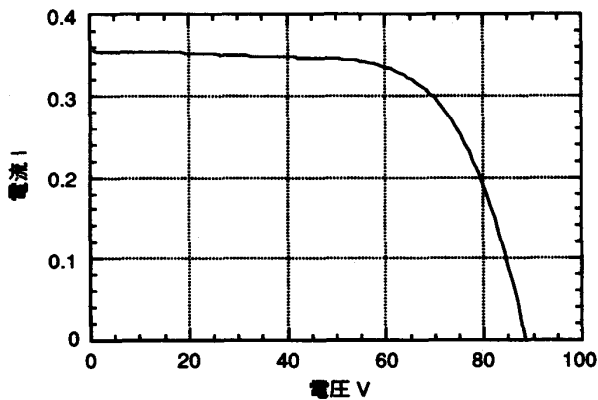


Fig. 2 Characteristic of solar cell.

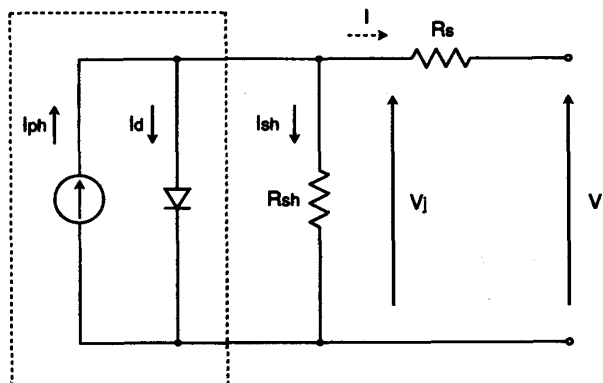


Fig. 3 Equivalent circuit of solar cell.

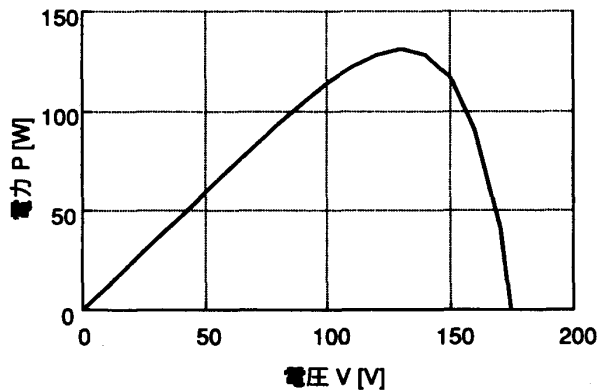


Fig. 4 P-V curve of solar cell.

## 2 最大電力点追従制御

太陽電池一個から得られる電圧は1V以下なので、これをいくつか直列にしたものをひとつのモジュールにし、さらにこのモジュールを直並列に接続して太陽光発電に使用している。これをインバータで交流に変換して、電力系統に接続している。この様子を図1に示す。

本システムで使用した太陽電池の仕様を表1に示す。この電池1枚を太陽光下照度100,000lx, 外気温10.0℃に置いたときの特性を図2に示す。同図の特性は図3に示す等価回路<sup>10)~12)</sup>のセルが直列に112個接続されたものとして表すことができる。実験では表1のモジュールを2枚直列接続して、さらにこれを4組並列接続している。これにより三相インバータを働かせるのに十分な約120Vの電圧を得ている。これらの太陽電池を先ほどと同じ条件で測定したものを図4に示す。この図のように最大の電力を発生する動作点は一つ存在するが、最大点は素子の温度や日射量により絶えず変化する。

この最大点を求めるために、従来、小刻みに太陽電池両端電圧を変化させて発電電力を測定し、変化前後で比較を行い最大電力点付近に追従する方式が用いられていた。この従来方式では、最大電力点近傍には到達できるが最大電力点に到達するのは難しく、小刻みな振動を常に繰り返している必要がある。そこで、3点の電力により最大電力点に追従する方式を新たに開発した。電圧指令値  $V_{ref}$  を刻み幅  $\Delta V$  の等間隔にステップ変化させたときの3点の電圧  $V_1 = V_2 - \Delta V$ ,  $V_2$ ,  $V_3 = V_2 + \Delta V$  に対応する電力を  $P_1, P_2, P_3$  としたとき、これらの3点を通る二次曲線の極地  $V$  は次式で表される。

$$V = V_2 - \frac{1}{2} \frac{(V_2 - V_1)^2 (P_2 - P_3) - (V_2 - V_3)^2 (P_2 - P_1)}{(V_2 - V_1)(P_2 - P_3) - (V_2 - V_3)(P_2 - P_1)} \quad (1)$$

$$V = V_2 - \frac{\Delta V}{2} \frac{P_3 - P_1}{P_3 - 2P_2 + P_1} \quad (2)$$

しかし、実際のシステムでは A/D コンバータ等から入力される検出値に誤差やノイズがあるため、ある程度大きな  $\Delta V$  を使用し、

$$P_1 < P_2 \text{ かつ } P_2 > P_3 \quad (3)$$

の範囲で二次曲線近似を行う方が望ましい。この範囲外にあるときには、範囲内になるように  $\Delta V$  ごと  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  をずらしていけばよい。たとえば、 $P_1 < P_2 < P_3$  のとき、

$$V_1 \leftarrow V_2, V_2 \leftarrow V_3, V_3 \leftarrow V_3 + \Delta V \quad (4)$$

とずらし、条件を満たすようにする。本システムでは  $\Delta V$  を太陽電池の最適動作電圧の約 8% にあたる 10 [V] にしている。

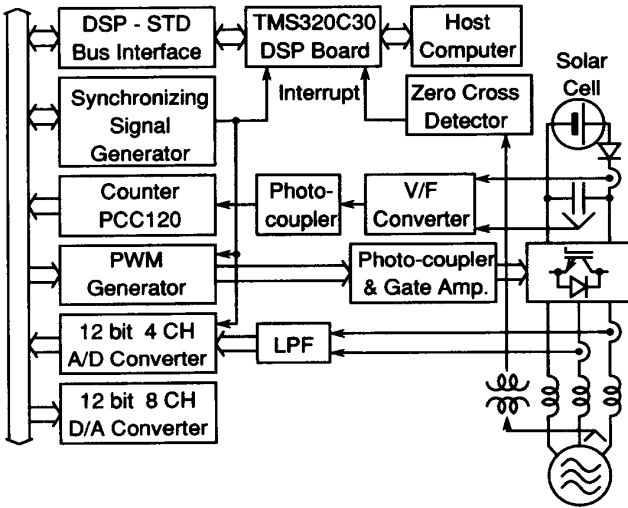
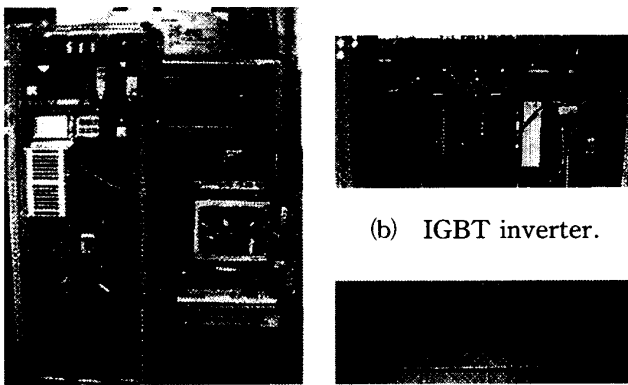
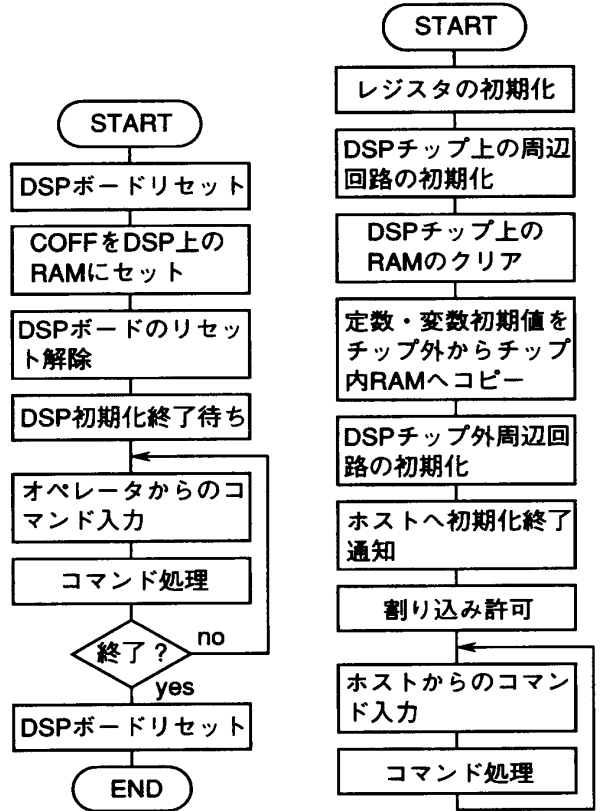


Fig. 5 Experimental system.



(a) Control unit. (c) Solar cell panel.

Fig. 6 Photographs of PV system.



(a) Host.

(b) DSP main.

Fig. 7 Flowcharts of control program.

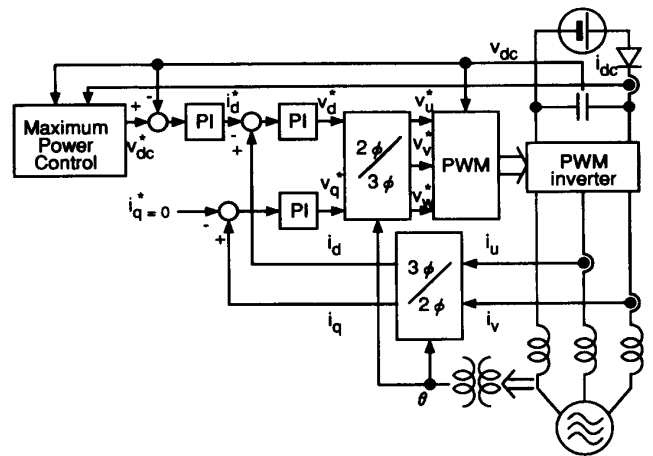


Fig. 8 Photovoltaic control system.

### 3 実験

#### 3.1 実験装置

図5に示す実験装置は電流値を検出する A/D コンバータ、太陽電池電圧を検出する V/F コンバータ、内部状態量を出力する D/A コンバータおよび PWM 発生回路から構成されている。この装置全体を図6に写真で示す。また、制御はパソコンの拡張スロットに挿入された DSP ボードで行う。パソコン (NEC PC 9801) は DSP ボードへの制御プログラムのロード、

DSP のコントロール, 制御指令の入力, 制御ゲインの変更, 状態表示等を担当する。DSP は制御用回路の初期化, パソコンとの通信, 制御演算, インバータの制御を担当する。この様子を図7のフローチャートに示す。

表1から2枚直列の4組並列で構成された太陽電池の最適太陽電池両端電圧は120V である。この直流動作電圧  $V_{dc}=120V$ , 変調率1で三相正弦波 PWM インバータが出力できる交流電圧は

$$V_{uv} \leq \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_{dc} \approx 73.5V \quad (5)$$

である。このため, 常に電力を系統へ送電できるように, インバータの三相線間電圧を少し低めの  $E=50V$  としている。これを変圧器で昇圧して三相200V の配電線に接続している。

図8に示す本システムの制御系は2重のループで構成され, メジャーループとして直流電圧 PI 制御系があり, 指令値は太陽電池最大電力点追従制御により計算された値が使用される。この出力と検出してきた電源側電流から PI 制御を行い, インバータ出力電圧指令値が演算される。

### 3.2 結果

図9に照度110,000 lx 外気温度10.0℃の場合の, 系統連系用インバータの実測効率を示す。太陽電池の出力電圧が最大になる動作電圧付近(120V)では, 90%以上の変換効率が得られることが確認できる。

図10に二次曲線近似を用いた太陽光発電システムの最大電力点追従制御の実験結果を示す。同図  $V_{dc}$  でステップ変化しているのが太陽電池両端電圧の指令値で, 振動しているのが実際の両端電圧である。また,  $P_{ac}$  で振動しているのが, インバータ出力電力の推定値で, ステップ変化しているのが250ms 遅れたその平均電力である。本システムでは太陽電池の出力電流を検出していないので, 制御系内部で推定された系統電圧  $e_{dm}$  と d 軸電流  $i_d$  の積からインバータの出力電力を求めている。このとき, 系統の三相電圧不平衡等により電源一周期の間では出力電力は一定しない。このため, 電源のサイクルで出力電力の平均値をとる必要がある。そこで, 追従に必要な電圧変化の間隔を500ms にしている。これは, 太陽電池両端電圧のステップ変化に伴う過渡現象が約100ms 持続しているため過渡現象終了に250ms 待ち, 系統電源周期の整数倍である250ms の平均インバータ出力電力を太陽電池の出力電力とみなしているからである。

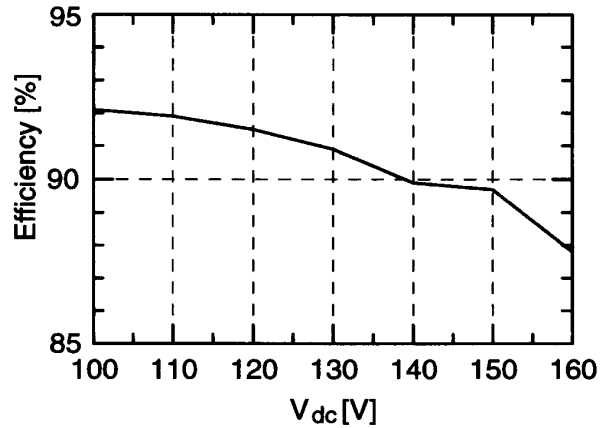


Fig. 9 Efficiency of PWM inverter.

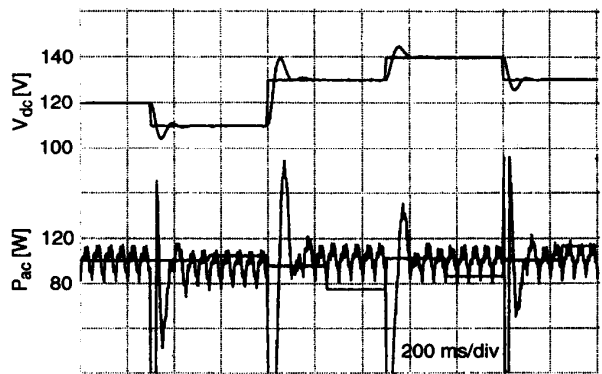


Fig.10 Experimental result of quadratic approximation.

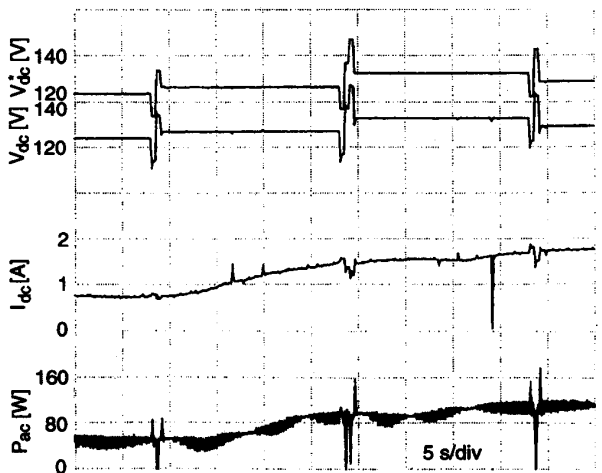


Fig.11 Experimental result of tracking control.

同図では, 最初の電圧120V, 110V, 130V での電力  $P_2, P_1, P_3$  が  $P_1 < P_2 < P_3$  であるから, 10V だけずらした120V, 130V, 140V において二次曲線近似を用いた最大電力点追従演算を行っている。

図11には温度が12.0℃で照度が95,000から115,000 lx へ変化した時の応答を示す。この図で, 太陽電池の電圧  $V_{dc}$  は指令電圧  $V_{dc}^*$  に追従しながら一定に制

御されているため、太陽電池セルに直射する光エネルギーの変化は太陽電池電流  $I_{dc}$  の増減で表される。これらの応答より、二次曲線近似を用いた太陽光発電システムの最大電力点追従制御が示されている。

#### 4 あとがき

本論文では、DSP を用いた系統連系用の太陽光発電システムを構築した。このシステムに二次曲線近似を用いた最大電力点追従制御を適用し実験を行った。この実験により、照度が変化しても本方式により最適な動作点が維持できることが示された。また、交流側電流、太陽電池両端電圧の3個の瞬時値と一つの時間（系統の電源位相）のみを検出するだけで系統連系が達成できることが示された。

#### 参考文献

- 1) 大野：太陽光発電技術開発の歩み，電気学会論文誌 D, 112, (1992), 941
- 2) 桑野：太陽電池とその応用，パワー社，(1985)
- 3) 浜川：特集 太陽光発電－1「太陽光発電とその意義」，電気学会論文誌 D, 115, 4, (1995), 215-216
- 4) 黒川・他：ミニ特集 太陽光発電システム，J. SICE, 35, 5, (1996), 333-359
- 5) 石川・小用：太陽光発電による太陽エネルギーの有効利用，平成6年電気学会全国大会，1675
- 6) 富田：特集 太陽光発電－2「太陽光発電の周辺技術」，電気学会論文誌 D, 115, 4, (1995), 220-222
- 7) 大庭・岩淵：太陽電池パネルアレイの最大出力簡易制御法，電気学会論文誌 D, 108, 2, (1988), 143-150
- 8) 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，電気学会論文誌 D, 112, 3, (1992), 250-257
- 9) 大庭・藤巻・依田：光発電システムの最大出力制御，電気学会論文誌 B, 110, 10, (1991), 1129-1235
- 10) 大庭・藤巻・江田：太陽電池モジュールの動的等価回路，電気学会論文誌 D, 109, 8, (1989), 542-548
- 11) 大庭・藤巻：太陽電池モジュールのシミュレータ，電気学会論文誌 D, 110, 4, (1990), 361-368
- 12) 田中・石谷口・山田：太陽電池の出力特性に基づく模擬電源装置，電気学会論文誌 D, 113, (1993), 753