The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

学術論文

PICを用いたプログラマブルMPPTの開発に関する研究

System development of a programmable MPPT using PIC

佐々木 実[*1](正員)，佐々木 佳久[*2]（学生員)，伊藤 聡[*1]

Minoru SASAKI (Mem.), Yoshihisa SASAKI (Stu. Mem.), Satoshi ITO

This paper describes development of a programmable MPPT (Maximum Power Point Tracking) using PIC which is indispensable for the efficiency improvement of the PV (Photovoltaics) system. The performance of the trial model circuit applying the perturb and observe method and the constant voltage method is evaluated and compared. The proposed programmable digital control MPPT system is able to improve the problem of the conventional analog MPPT. Experimental results show validity of the proposed programmable MPPT system using PIC.

Keywords: Maximum Power Point Tracking (MPPT), Perturb and observe method, Constant voltage method, PWM, PIC, programmable, PV (Photovoltaics) system.

1 緒言

太陽光発電システムの構成要素は，太陽電池（Photovoltaic ; PV)，最大電力点追尾装置（Maximum Power Point Tracker ; MPPT)，蓄電池などである。この構成要素の中でシステムの効率向上に不可欠なものはMPPTである。これは，太陽電池の出力特性は接続した負荷の電圧および電流に影響され，太陽電池には最適動作点が存在し，この最適動作点に制御する装置がMPPTである。近年の電子機器は高性能化・高機能化されてきた理由の一つとしては，制御技術がアナログ制御からディジタル制御へと移り変わってプログラマブル化されてきているからと考えられる。しかし，現在でもMPPTを含む電源装置はアナログ回路が多く用いられている。これは基本的な設計手法が確立されていることや，多種多様なアナログ制御ICが存在することであると考えられる。今後の太陽光発電システムの普及を促進するためには，太陽電池の製造技術や新材料の開発のみならず，MPPTの技術の向上も必要とされている。今後，MPPTへ要求される性能や技術は，高耐久性，低コスト化，自律度向上型システム技術および他エネルギー連系システム技術などである[1-10]。そこで，MPPTの回路にPIC（Peripheral Interface Controller）を用いることによって，最大電力点追従（Maximum Power Point Tracking ; MPPT）制御を行うために必要な電圧および電流の計測，電力変換のためのPWM（Pulse Width Modulation : パルス幅変調）制御をワンチップで行うシステムの開発を考える。これにより同じ回路を用いてもプログラムを変更することによって太陽電池の種類に応じた仕様の変更や，MPPT構成部品の特性ばらつきの補正なども容易に実現でき，燃料電池などの異なるシステムにも柔軟に対応できるものと考えられる。さらに，PICを用いることにより，柔軟でインテリジェントなMPPTの開発を目的とし，部品点数を最小限にとどめ，MPPTのコンパクト化および軽量化・ディジタル化が可能になる。そして，試作回路に山登り法（Perturb and Observe ; P&O）と電圧追従法（Constant Voltage ; CV）のMPPT制御方式を適用し，動作確認と有効性の検討と改良を行い，既製品のMPPTと性能を比較・検討し，その結果から今後の課題についても考察を行う。

2 太陽光発電システム

太陽光発電システムの構成は，独立システムと系統連系システムの二つに分類される。さらに蓄電池の使用の有無や負荷の種類などの区別がある。さらに，他にも多くの組合わせが提唱されている。今回用いたFig. 1の独立システムは商用電力系とは何ら関係をも

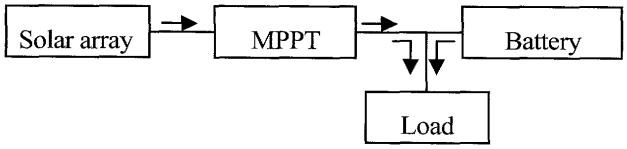

Fig. 1 Independent system.

連絡先：佐々木 実，〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1，岐阜大学工学部人間情報システム工学科，
e-mail: sasaki@gifu-u.ac.jp
[*1]岐阜大学 [*2]岐阜大学大学院

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

たない太陽光発電システムである。日射量の少ない曇りや夜間にも運転する必要がある場合は，蓄電池を設け昼間の余剰電力を蓄えるシステムである。

太陽光発電システムの構成要素の1つである太陽電池は，太陽の光エネルギーを直流電力に変換するものである。Fig. 2に太陽電池の電流 - 電圧特性(I-V曲線)，および電力 - 電圧特性（P-V 曲線）を示す。以下のような特性で太陽電池の性能を評価できる。

- 開放電圧 V_{OC}：出力端子間を開放した際の端子電圧
- 短絡電流 I_{SC}：出力端子間を短絡した際の電流
- 最適動作点：I-V 曲線上で，電流×電圧＝出力電力が最大となる点
- 最適動作電圧 V_{OP}：最適動作点の電圧
- 最適動作電流 I_{OP}：最適動作点の電流
- 最大電力 P_{max}：最適動作点における出力電力
- 変換効率：最大出力/入射太陽光エネルギー

これらの電気的特性は，日射強度や温度，スペクトル分布などで変動する。このため，実際の設置条件を考慮してシステム設計を行うことが重要となる。また，太陽電池の傾斜角と方位角は出力などにも大きく影響する。太陽電池の出力電力は，日射強度や温度などで最適動作点が変化する。また，太陽電池を直接負荷に接続した場合，負荷の電圧と電流が出力に影響する。このため，日射強度や接続した負荷に関係なく最適動作点に追従する装置がMPPTである。太陽電池の電力はMPPTを用いて希望の出力に変換するが，基本的な回路は電力変換回路と同じである。

MPPTで用いられる回路は，太陽電池の出力電力が直流であるためDC-DCコンバータ回路またはインバータ回路である。MPPTは，太陽電池の最大電力点を追従する装置であるが，この制御方法には山登り法を始めとする各種方法がある。

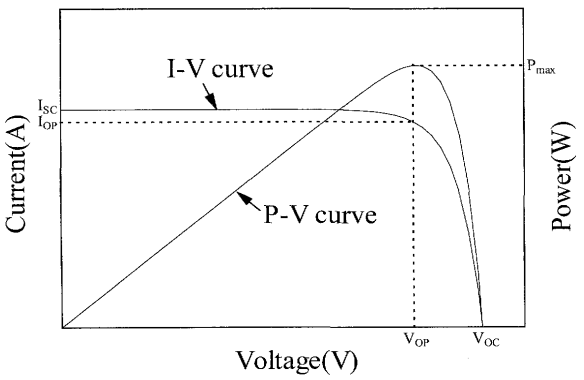

Fig. 2 Power-current characteristics of PV.

3 MPPTの設計

MPPTを設計する際に必要なのは，接続する太陽電池とバッテリの仕様である。今回は身近にあったシャープ製の太陽電池と古河電池の鉛蓄電池を使用した。シャープ製の太陽電池の仕様は，型式 NT3432，最大出力 P_m = 40W，開放電圧 V_{OC} = 19.6V，短絡電流 I_{SC} = 2.70A，最大出力動作電圧 V_{pm} = 15.8V，最大出力動作電流 I_{pm} = 2.53A，セル変換効率 η_{cel} = 17.1%，モジュール変換効率 η_{module} = 16.0%，外形寸法 627×399×1.5mm であり，古河電池の蓄電池の仕様は，型式 FT 4 L-BS，公称電圧 12V，10時間率容量 3Ah，外形寸法 113×70×85mm である。MPPTの入力側にこの太陽電池を1枚接続することにし，MPPTの出力側にはこの蓄電池を1個接続することにする。

太陽電池と鉛蓄電池の仕様より入出力共に直流であること，入力電圧より出力電圧が低いことから本MPPTの基本回路は降圧形コンバータとする。設計した回路をFig.3に示す。MPPT制御はPIC16F876で行うことにする。このPICは，太陽電池の電圧と電流をもとにPWM（Pulse Width Modulation）のDUTY比を変更することによりMPPT制御を行う。よって，MPPT制御を行うために太陽電池の電圧と電流を計測できるようにする。また，付加機能をプログラムにより付け加えられるようにバッテリ電圧も計測できるようにする。付加機能とは過充電防止のためのMPPT停止機能などである。

PICとは，Microchip Technology Inc.（マイクロチップ・テクノロジー，アメリカアリゾナ州）の製造するワンチップ・マイコンである。本研究では，プログラムの入れ替えが可能でピン数が28本のPIC16F876を用いる。MPPT制御を行うためには，太陽電池の出力電圧と電流を計測する必要がある。そこで，PICのAN1ピンで太陽電池の電圧を，AN2ピンで太陽電池の電流を計測することにする。しかし，PICでは計測できる電圧の上限が電源電圧であること，また電流が計測できないことから工夫が必要となる。そこで，一般的なサーキットテスタで用いられている方法で，電圧は分圧を計測し，抵抗値の比率から目的の電圧を求める方法，電流は電流計測用の抵抗で発生する電圧降下を計測し，オームの法則から電流を求める方法を用いる。

先に述べたように測定する太陽電池の電圧は開放時に19.6Vとなるので直接計測できない。そこで，直

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

列に接続抵抗した抵抗の *R2* の電圧を計測し，*R1* と *R2* の抵抗値の比率から太陽電池電圧に換算する。

AN 1 の電圧が PIC の電源電圧以上とならないように抵抗値を決定する。抵抗 *R1* と *R2* に流れる電流を *I*，太陽電池電圧 V_{SOL} および AN1 ピン電圧を V_{AN1} とすると，オームの法則より電流 *I* は，

$$I = \frac{V_{SOL}}{R1 + R2} \tag{1}$$

となる．AN1 の電圧は，

$$V_{AN1} = I \times R2 = \frac{V_{SOL} R2}{R1 + R2} \tag{2}$$

となる。PIC の電源電圧を V_{dd} とすると，

$$V_{AN1} < V_{dd} \tag{3}$$

$$\frac{V_{SOL} R2}{R1 + R2} < V_{dd} \tag{4}$$

$$\frac{V_{SOL}}{V_{dd}} < \frac{R1}{R2} + 1 \tag{5}$$

が成り立たなければならない。太陽電池電圧が最大となるときに式(5)が成り立てばよい。本研究で用いる太陽電池電圧が最大となるのは開放電圧 19.6V，PIC の電源電圧が 5V である。これらの値を用いて計算し検討した結果，*R1* を 770kΩ，*R2* を 100kΩ とした。この値とすると本研究で用いる太陽電池を 2 枚直列に接続した場合も電圧が計測できることとなる。

PIC は電流を計測できないため電流計測用の抵抗を設け，電圧値をオペアンプで増幅しこの値を読み取ることにする。今回，DC-DC コンバータ部に用いたのは降圧形のものである。この回路は，入力と出力回路の片側が直流的に共通になった回路である。したがって，入力と出力を絶縁する必要のない場合に使用される。この回路は変圧器を使用していないため，小型で効率のよい電源を作ることができるのが特徴である。

Fig.3 の回路は，トランジスタで ON-OFF した方形波を LC フィルタで平均化する方式である。この回路の出力電圧は，入力電圧を V_I，出力電圧を V_O，インダクタンスを *L*，トランジスタを ON している時間を T_{ON}，OFF している時間を T_{OFF} とすると，トランジスタ (Tr) が ON している期間にチョーク・コイルに加わる電圧は $V_I - V_O$ となる。したがって，この期間の電流変化量

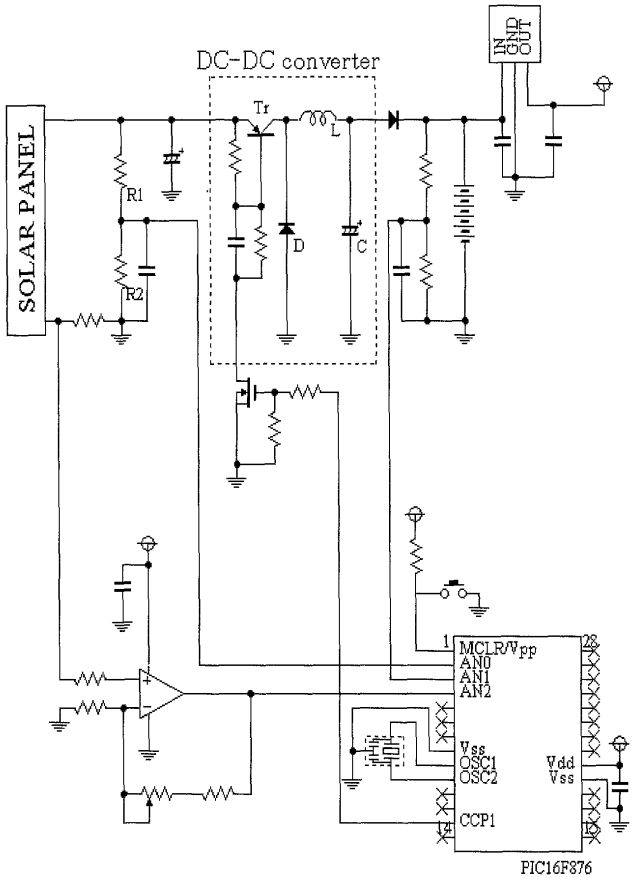

Fig. 3. Programmable MPPT circuit.

ΔI_L は，

$$\Delta I_L = \frac{V_I - V_O}{L} T_{ON} \tag{6}$$

一方，トランジスタ（Tr）が OFF すると，この瞬間にインダクタンス *L* に流れていた電流を維持すたためダイオード D が導通し，Tr が OFF する直前の電流値を同一の電流が流れ，チョーク・コイルには $-V_O$ が加わる。したがって,この期間のチョーク・コイルの電流変化量 ΔI_L は，

$$\Delta I_L = \frac{V_O}{L} T_{OFF} \tag{7}$$

となる。チョーク・コイルの電流が連続的な場合，定常状態ではこの電流変化量は等しくなるので式 (6) と式 (7) より，

$$Vo = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} V_I \tag{8}$$

となる。

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

次に,チョーク・コイルの電流が連続的でない場合を考えると，トランジスタ（Tr）が ON した場合，入力から出力へ供給される電力 P_{ON}は，入力電圧が V_Iのとき，回路に流れ込む電流は$(V_I-V_O)\ t/L$ となるので,

$$P_{ON}=\frac{V_I(V_I-V_O)}{L}t \tag{9}$$

となる。この電力を T_{OFF}～T_{ON} まで積分し，一周期で平均化すると,

$$P_{AV}=\frac{1}{T_{ON}+T_{OFF}}\int_{T_{OFF}}^{T_{ON}}\frac{V_I(V_I-V_O)}{L}tdt \tag{10}$$

$$P_{AV}=\frac{V_I(V_I-V_O){T_{ON}}^2}{2L(T_{ON}+T_{OFF})} \tag{11}$$

となる.

この電力は出力電力 P_Oと等しくなる．つまり，出力電流を I_O，出力電圧を V_O とすると，次の式のようになる。

$$P_O=V_OI_O \tag{12}$$

つまり，式（11）と式（12）とは等しいので，両方から出力電圧 V_Oを求めると,

$$V_O=\frac{(V_IT_{ON})^2}{V_I{T_{ON}}^2+2I_OL(T_{ON}+T_{OFF})} \tag{13}$$

となる。

チョーク・コイルの電流が連続的でなくなる臨界点は，次のようにして簡単に求めることができる。チョークコイルを流れる電流の平均値 I_{AV}は，チョークコイルを流れる電流の谷を I_Vとすると,

$$I_{AV}=I_V+\frac{V_O}{2L}T_{OFF} \tag{14}$$

ここで I_{AV}は出力電流 I_Oと等しいので,

$$I_{AV}=I_O+\frac{V_O}{2L}T_{OFF} \tag{15}$$

となる．臨界点は $I_V=0$ として求める。したがって,

$$I_O=\frac{V_O}{2L}T_{OFF} \tag{16}$$

が臨界点となる。したがって，連続モードとなる条件は，次のようになる。

$$I_O>\frac{V_O}{2L}T_{OFF} \tag{17}$$

この場合の出力電圧 V_Oは，式 (8) の値を使用する。したがって（17）は,

$$I_O>\frac{V_IT_{ON}T_{OFF}}{2L(T_{ON}+T_{OFF})} \tag{18}$$

と表現することもできる。

一般的な設計の場合，全負荷時では連続モードになるように設計するが,軽負荷時には断続モードになる。この場合，パルス幅を十分に狭くしないと軽負荷時に出力電圧が上昇し，希望の安定度を満足しなくなるので注意が必要である。チョーク・コイル L の値は，全負荷時に L を流れるリプル電流のピーク - ピーク値が,負荷電流の 1/2 以下になるように設計する。これは,リプル電流のピーク値を下げ，コンデンサの破損を防止するためである。最大出力電流を $I_{O(max)}$とすると,

$$\frac{V_I-V_O}{L}T_{ON}<0.5I_{O(\max)} \tag{19}$$

となる。したがって，次のような関係が成立する。

$$L>\frac{2(V_I-V_O)}{I_{O(\max)}}T_{ON} \tag{20}$$

この式は，昇圧形コンバータのフィルタ設計にも共通する式である。そこで,本 MPPT に用いるチョーク・コイル L の値を求める。チョーク・コイルに流れる電流が連続的と仮定し，式 (8) を用いて T_{ON}の時間を求める。このとき必要となる値は，V_I, V_Oおよび T の値である。V_Iは最大動作電圧 15.8V，V_Oは鉛蓄電池の充電電圧 14.5V とし，T は PWM 周波数から決定する。PWM 周波数はプログラムにより任意に設定できるが,実験的に周波数 f=9.77kHz として,

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{9.77\times10^3}\sec$$

となる。式 (8) から T_{ON}は,

$$T_{ON}=\frac{V_OT}{V_I}=93.9326\times10^{-6}\sec$$

式 (20) より

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

$$\frac{2(V_I - V_O)}{I_{O(\max)}} T_{ON} = 90.4536 \times 10^{-6}\,\mathrm{H}$$

となる。この値より大きければよいので 155 μH とする。

MPPT 制御の方法はいくつか考案されているが，本研究では山登り法と電圧追従法を用いる。プログラムはアセンブラ言語を用いて作成する。山登り法は太陽電池の動作電圧を一定間隔で変動させ，変動前後の電力を比較する。比較の結果，電力が最大となる電圧に変化させる方法である。また，電圧追従法は，単結晶シリコン太陽電池の最大出力動作電圧が開放電圧の80%付近となることを利用した手法であり，電圧の測定のみで制御ができるため，回路が簡素化できる。

4 制御実験と実験結果

実験には，本 MPPT，太陽電池および鉛蓄電池の他に安定化電源，電子負荷装置等を用いた。太陽電池の出力は天候に左右されるため同条件下でMPPT装置の比較をするのは難しい。そこで，安定化電源を用いることによって同条件で実験を行う。蓄電池は充電および放電状態によって抵抗が変わるため，電子負荷装置を用いて同条件で実験を行う。

また，本 MPPT の動作比較のために，既製品の MPPT を用いた比較実験を行う。既製品の仕様は，入力電圧 15～250V，出力電圧 12～150V，最大出力 500W，最大出力電流 15A であり，回路構成は DC-DC コンバータ(降圧形コンバータ)であり，大きさは 150×100×40mm である。既製品は汎用品であるので入力電圧および出力電圧がワイドであることが分かる。また，既製品の大きさと比較して本 MPPT (95×72mm) はコンパクトであることが分かる。

本 MPPT の基本回路は DC-DC コンバータ（降圧形コンバータ）となっている。そこで，DUTY 比を 20～100%まで一定間隔で変化させ，動作試験を行った。システムの構成は，MPPT の入力側に安定化電源を接続し，出力側に電子負荷装置を接続したものである。まず，プログラムにより DUTY 比を 20～100%まで変化させたときに，設定した PWM 波形が出力されているかをオシロスコープにより確認した。Fig.4 に DUTY 比 80%のときの波形を示す。1 周期 ($T_{ON}+T_{OFF}$) は，PWM 周波数を 9.77kHz としたことから 102.3 μ sec となっていた。T_{ON} が 82 μ sec となっていたことから DUTY 比 80%が確認できた。他の DUTY 比も同様に確

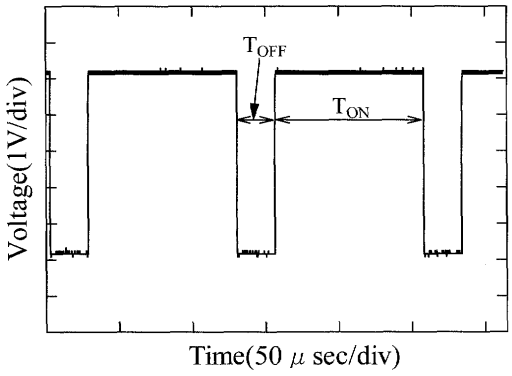

Fig. 4 PWM wave form(Duty ratio 80%).

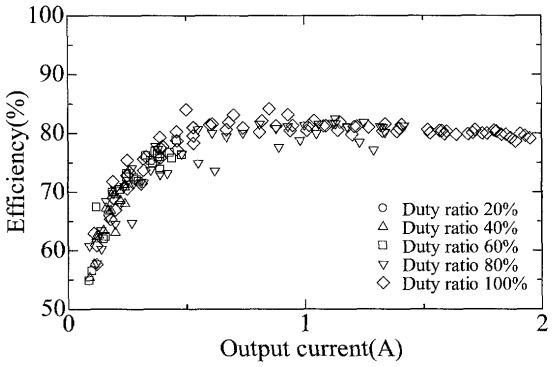

Fig. 5 Output current-efficiency relationship.

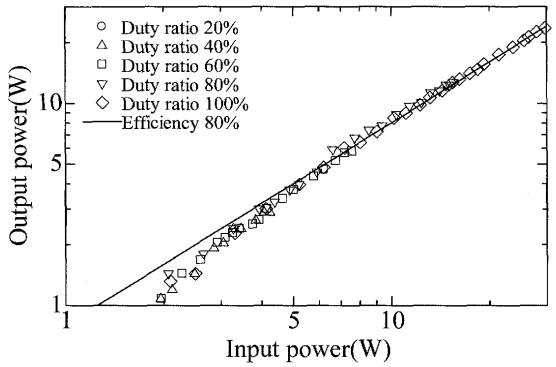

Fig. 6 Relationship between Input and output power.

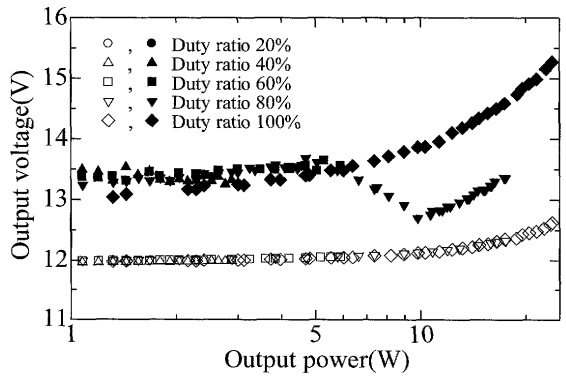

Fig. 7 Relationship between output power and voltage

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

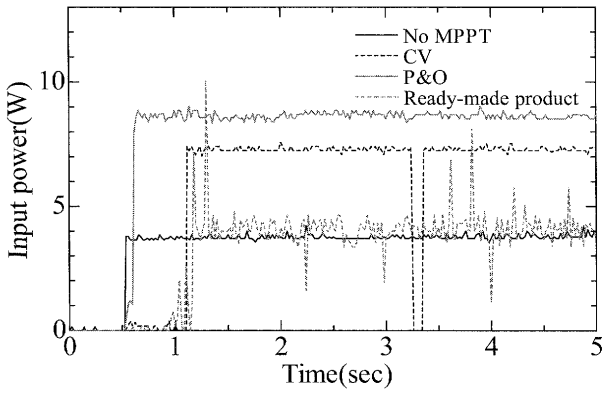

Fig. 8 Input power variation of the MPPT(load off).

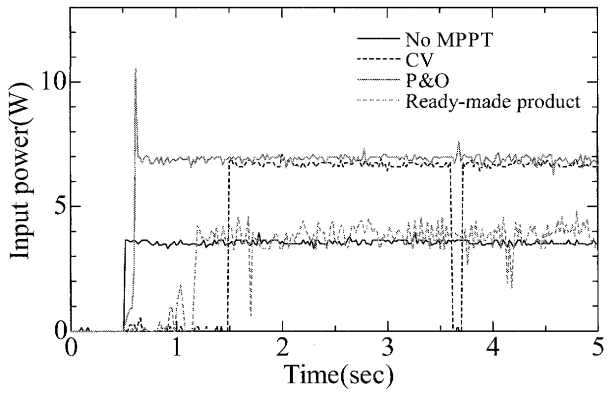

Fig. 9 Input power variation of the MPPT(load on)

認したところ，プログラム通りの波形が確認できた。

Fig.5 は本 MPPT からの出力電流と効率の関係である。安定化電源の電圧を可変させ計測した結果，DUTY 比 80%以外では効率が電流に依存していることが分かる。また，0.5A 以上では効率が 80%と安定しているためこの領域での使用が望ましいことが分かる。Fig.6 は，入力電力と出力電力の関係である。入力電力が 6W 以上で効率が 80%となっていることが分かる。Fig.7 は出力電力と電圧の関係である。白抜きのプロットは実測値，黒いプロットは実測値から計算を行い求めた電圧である。計算は式（19）から連続モードか断続モードかを判断し，式（8）または式（13）を用いた。

DUTY 比が 100%のときは連続モードに，DUTY 比が 80%のときは 1～10W までは断続モードで 10W 以上は連続モードとなった。DUTY 比が 60%以下ではすべて断続モードとなった。DUTY 比 80%を除けば，実測値および計算値共に同じような電圧変化となった。また，実測値は計算値の 90%となっていた。

以上の結果から DC-DC コンバータ回路は入力電圧を降圧し，的確に動作していることがわかった。

本 MPPT の動作試験を行った。システムの構成は，MPPT の入力側に安定化電源または太陽電池を接続し，出力側に鉛蓄電池およびこれに並列に電子負荷装置等を接続したものである。比較のために MPPT を用いない場合と，既製品の MPPT を用いた場合の動作試験も行った。

Fig.8 は入力側に安定化電源を用いた場合の入力電力の時間変化を示したものである。Fig.9 は電子負荷装置を ON にした場合の時間変化を示したものである。安定化電源の出力は測定開始から 0.5 秒後とした。立ち上がりの遅れているプロットは，MPPT の起動後に電源の開放電圧を測定しているためである。3.5 秒前後で 0W となっているのも電源の開放電圧を測定しているためである。本 MPPT を用いた方が電源の電力を高く保つことができることが分かる。また，既製品と比較した場合，電力の振幅を小さくできることがわかる。

Fig.10 から Fig.13 は，入力側に太陽電池，出力側に鉛蓄電池と並列に負荷を接続した場合の電力の時間変化を示したものである。また，計測は日陰で行った。太陽電池の出力が日射量により変動しているためか，どのデータも変動が大きい。電圧追従法と既製品の MPPT は振幅が大きく電力のロスが大きいことが分かる。また，山登り法を用いた場合は太陽電池の平均出力電力が 3.81W（負荷なし）および 4.36W（負荷あり）と，MPPT を用いない場合の 3.78W（負荷なし）および 2.87W（負荷あり）よりも高くなっている。しかし，変換効率があるため本 MPPT の平均出力電力は，電圧追従法では 1.61W（負荷なし）および 2.09W（負荷あり），山登り法では 2.59W（負荷なし）と MPPT を用いない場合の 3.78W（負荷なし）および 2.87W（負荷あり）よりも低くなっていることが分かる。ただし，山登り法の負荷がある場合は 3.12W と MPPT を用いない場合よりも高くなった。

5 結言

本研究では，太陽光発電システムの効率向上に不可欠な装置である PIC を用いたプログラマブル MPPT に関する研究を行った。柔軟でインテリジェントな MPPT の開発を目的とし，このために必要な PIC を用いた MPPT を試作し動作確認試験を行った。試作回路および制御共に的確に動作していることが確認でき，既製品と比較しても良好な性能を示すことができた。以上，得られた結果を要約すると，

1） DUTY 比に関係なく，出力電流が 0.5A 以上と

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

なる領域での使用が望ましいことが分かった。

2) MPPT 制御時の入力電力の振幅が既製品の MPPT よりも小さくすることができた。

3) 入力電源の電力が既製品の MPPT より高出力に制御することができた。

4) PIC を用いたことにより，MPPT のコンパクト化が実現した。また，回路の変更をせずに制御方法の変更が可能となった。入出力の対象を変更した場合でも柔軟に対応できるものと考えられる。

今後の課題として，模擬太陽電池を用いて本 MPPT の性能評価実験を行い，多種多様な条件下でも高効率な制御を行えるプログラムの開発を行う。さらに，入力電源を燃料電池，出力先をキャパシタ等と変更した場合，または，これらを併用した場合でも柔軟に対応できる MPPT システムの開発を行う。

(2008 年 10 月 23 日受付，2009 年 2 月 9 日再受付，
2009 年 2 月 19 日再々受付)

参考文献

[1] 長谷川彰, "スイッチング・レギュレータ設計ノウハウ", CQ 出版社, (1985).

[2] 日本太陽エネルギー学会, "太陽エネルギー利用技術", オーム社, (2006).

[3] 黒川浩助, "システムとしての太陽光発電 - 1 - 太陽光発電システムの構成", 電気学会論文誌 C, vol.155, No.1, pp.14-14, (1995).

[4] 岡土千尋, "太陽光発電システムの要素技術 - 2 - 太陽光発電用インバータ技術", 電気学会論文誌 C, vol.155, No.1, pp.34-39, (1995).

[5] 山本重雄, "太陽電池システムのはなし", 日刊工業新聞社, (2001).

[6] 岡山努, "スイッチングコンバータ回路入門", 日刊工業新聞社, (2006).

[7] トランジスタ技術編集部, "電池応用ハンドブック", CQ 出版社, (2005).

[8] 日本太陽エネルギー学会, "エコ電気自動車のしくみと製作", オーム社, (2006).

[10] 後閑哲也, "電子工作のための PIC16F 活用ガイドブック", 技術評論社, (2004).

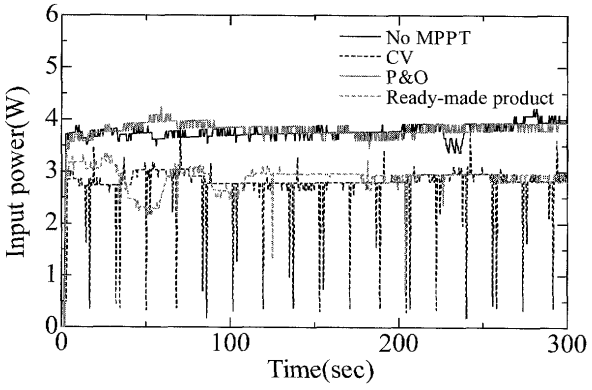

Fig. 10 Input power variation of the MPPT(without load).

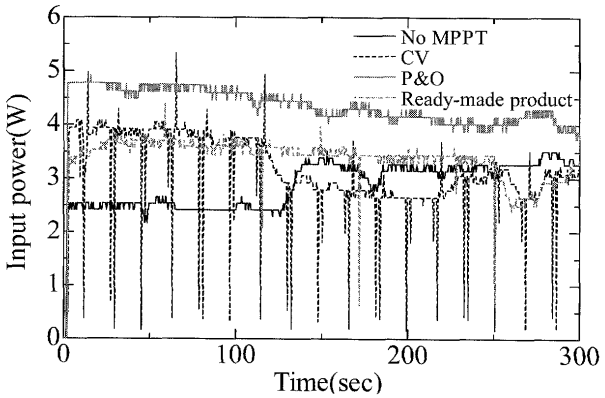

Fig. 11 Input power variation of the MPPT(with load).

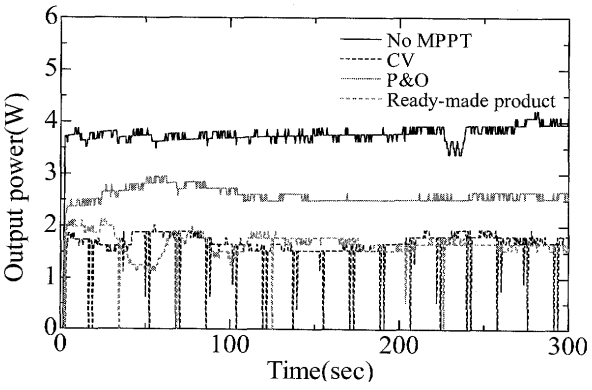

Fig. 12 Output power variation of the MPPT(without load).

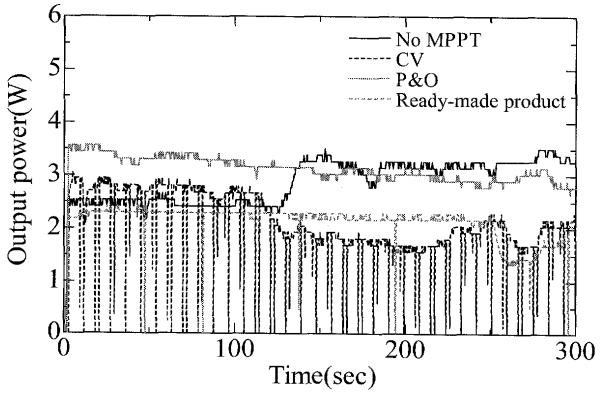

Fig. 13 Output power variation of the MPPT(with load).

NII-Electronic Library Service