

太陽電池を用いた二次電池充電システムのための電源回路の研究

A Study of a Boost DC-DC Converter Circuit to Charge the Secondary Battery by using MPPT for a Solar Cell System

中央大学電気電子情報通信工学専攻 小舘 直人

Naoto Kodate

1. 研究背景

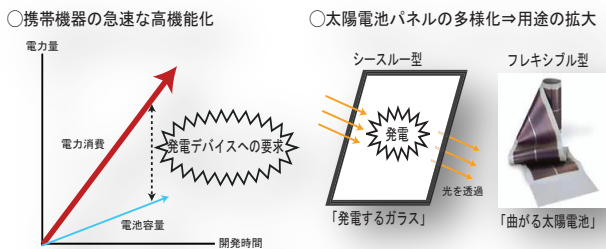


Fig.1 研究背景

100mW 級太陽電池はニーズとシーズの両面から注目されている。

ニーズは消費電力と電池容量のギャップにある。近年、電子機器は機能が多様化し消費電力が急増している。しかし、二次電池の電量は消費電力の変化に追従出来ず、ギャップが生じている。また、シーズは太陽電池セルの多様化にある。例えば、フレキシブル型の「曲がる太陽電池」や透過型の「発電するガラス」などが挙げられる。そのため、湾曲したデバイスや電子機器のディスプレイへの搭載が期待されている。

以上が 100mW 級太陽電池の研究に着手した背景である。

2. 研究概要

始めに太陽電池の最大電力点追従：Maximum Power Point Tracking (MPPT) のアルゴリズムとシステムの検証と比較を行う。まず、100mW 級太陽電池に適する MPPT を定義し、太陽電池の特性上の動きとシステムの構造、利点と欠点を明確にして 100mW 級太陽電池に有効な MPPT アルゴリズムとシステムを提案する。

次に、提案する MPPT の実現には電力計算回路が必要であることから、高精度な電力計算を低消費電力、省面積で実現する回路：Power Calculation Circuit(PCC)を提案する。具体的には、従来構成であるデジタル回路と電圧型乗算器の問題点を明確にし、提案回路である電流積分型乗算器の概念、機能、回路を説明する。そしてシミュレーション結果から高精度な電力計算が可能であることを示す。

そして、PCC を用いた提案アルゴリズム：Active Hill Climbing method(AHC)を説明し、シミュレーション結果から提案回路の有効性を示すと同時に、PCC の実用性を示す。

3. MPPT アルゴリズムの検討

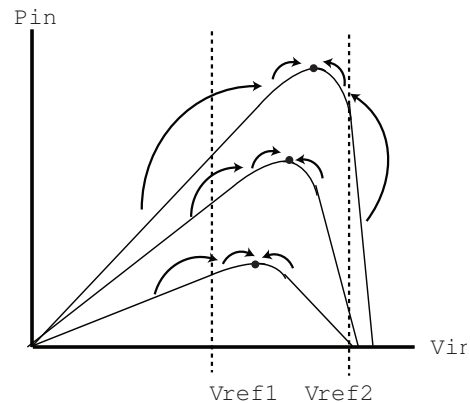


Fig.2 Active Hill Climbing method(AHC)

本章では、MPPT のアルゴリズムとシステムを比較し、100mW 級太陽電池に適する MPPT を検討する。

まず、MPPT の中で最も簡易とされる固定電圧制御：Constant Voltage Tracking (CVT)について検討する。太陽電池は一般的に MPP が開放電圧の 70~80%とされている。よって、環境に依らず太陽電池が開放電圧の 75%付近の出力電圧になるように帰還をかけることで、発電効率を上げることが出来る。

CVT の利点は2つある。1つ目はアルゴリズムの簡易性だ。回路状態の検出と、制御のための帰還回路が少ないため、省面積で低消費電力が実現出来る。2つ目は応答性の速さだ。一定の電圧になるように帰還するだけなので応答が速い。CVT の致命的な欠点は、環境に依って変わる最大電力点：MPP に追従しないことだ。また、参照電圧との比較で制御信号を決めるため、MPP ではない動作点で振動を繰り返すため非効率で不安定である。そのため、CVT 単独では 100mW 級太陽電池の MPPT システムにおいて不十分である。

次に、MPPT の中で最も一般的である山登り法：Hill Climbing method (HC)について検証する。HC では太陽電池と負荷の関係を利用する。太陽電池は電流源とダイオードで等価回路が表せるから、負荷に応じて IV 特性上の動作点が変わる。つまり、負荷とのインピーダンスマッチングを行い MPP での動作を実現する。具体的には、負荷に DC-DC コンバータを接続し、Duty を操作してマッチングを取ることが一般的で、本研究では昇圧型 DC-DC コンバータ：Boost を負荷に用い

た。通常、HC では電力値を帰還し探索するが MPP から遠い動作点からでは効率が悪い。

そこで、本研究では適応的に MPPT アルゴリズムを変更する構成を提案する。MPP 近傍外では CVT を行い、開放電圧の 60~80% 付近に太陽電池の動作点を移し、HC に切り替える。このアルゴリズムを、全動作領域で HC を適用するのではなく、能動的に動作点を MPP 近傍に規定することから、「Active Hill Climbing method(AHC)」と名付けた。

AHC の利点は 3 つある。1 つ目は応答性が良いことだ。CVT により MPP 近傍へ高速に収束する。2 つ目は収束精度が高いことだ。HC により MPP 近傍で振動する。また、HC 適用時の振動幅を狭くすることで MPP での振動幅も小さくなる。3 つ目は簡易性に優れていることだ。CVT と HC の基本構成は簡易であり、AHC ではアルゴリズムを規定する論理回路が追加されるのみであるから簡易性は損なわれない。つまり、消費電力の増大も抑えることが出来る。

AHC の一部である HC は以下のような制御を行う。MPP 近傍で適用する HC は「Duty を任意幅： $\Delta d'$ だけ変更したときの電力の増減をモニターし、次状態の Duty の増減： Δd を決定する」というアルゴリズムである。つまり、MPP に近づけば同じ制御を、離れれば反対の制御を行う。よって、以下のような論理値で表せる。

Tab.1 山登り法アルゴリズムの論理値表

Pin	$\Delta d'$	Δd
減少	+	-
減少	-	+
増加	-	+
増加	+	-

Tab.1 の論理値を実現するシステムを Fig.3 に示した。

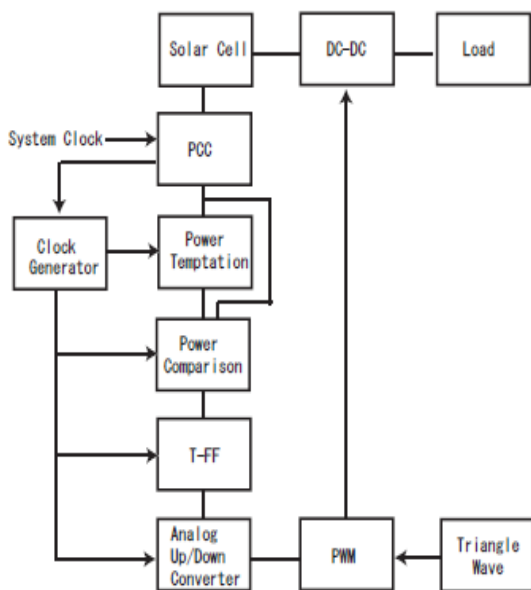


Fig.3 山登りシステム

本システムの機能は以下の 4 つに分類出来る。

- 電力計算 (Power Calculation Circuit)
- 電力保持 (Power Temptation)
- 電力比較 (Power Comparison)
- Duty 増減 (Analog Up/Down Counter)

つまり、HC のシステムを実現するためには電力計算回路が必要である。

4. Power Calculation Circuit (PCC)

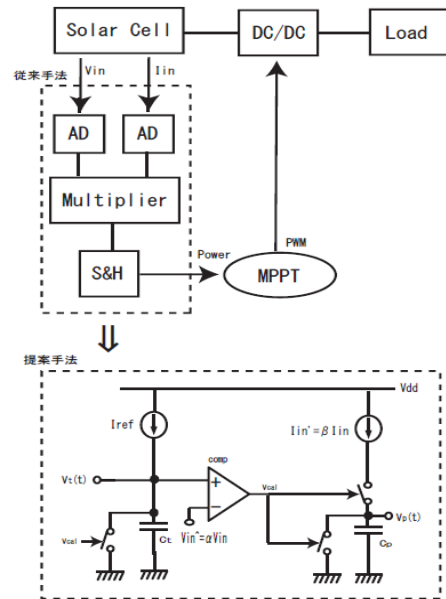


Fig.4 従来手法の問題点と提案手法

HC を適用するには、太陽電池の出力電力計算が必要である。一般的には、Fig.4 の上部に示すように、AD 変換器を用いて電圧と電流を検出し、マイコンや DSP のような汎用回路で、電力計算、電力保持、電力比較、Duty 増減、PWM 変調を行い、Fig.3 のシステムを実現する。

しかし、従来手法では AD 変換器と汎用回路の性能が、消費電力および実装面積とトレードオフの関係であり、システム全体の性能のボトルネックになる。

また、ギルバートセルに代表される電圧型アナログ乗算器を用いる方法もあるが、電圧振幅を使って乗算をするという原理的に、2V 以上の電源電圧を要するため低電圧化出来ない。また、容量負荷に対してバッファの設計が必要になるため、設計が煩雑化する。

そこで、Fig.4 の下部に示す提案回路：電流積分型電力計算回路：Power Calculation Circuit (PCC) を考案した。提案回路は、キャパシタで Boost の入力電圧： V_{in} に比例する積分区間だけ、入力電流： I_{in} を積分することで AD 変換器を用いずに電力計算する。提案回路は電力情報を電流と時間に変換することで低電圧動作可能で、電流源による負荷の駆動にはバッファが不要である。よって、PCC は低消費電力、小面積、容易な設計で実現出来る。

PCC の原理を定式的に説明する。キャパシタ : C_{vt} に定電流源 : I_{pcc} で充電するとき、充電電圧が αV_{in} に達する時間 : t_{cal} は

$$t_{cal} = \frac{C_{vt}}{I_{pcc}\alpha V_{in}}$$

と表せる。ここで、 $i_{in}(t)$ を積分区間 : t_{cal} で積分すると、積分結果 : v_p は $i_{in}(t)$ の平均値を I_{in} として

$$\begin{aligned} v_p &= \frac{1}{C} \int_0^{t_{cal}} i_{in}(t) dt \\ &= \frac{1}{C} [\beta I_{in} * t]_0^{t_{cal}} \\ &= \beta \frac{I_{in} t_{cal}}{C_{vp}} \end{aligned}$$

t_{cal} を代入して、

$$v_p = \alpha \beta \frac{C_{vt}}{C_{vp} I_{pcc}} I_{in} V_{in}$$

と求まる。つまり、入力電圧と入力電流の積に比例する結果が得られる。

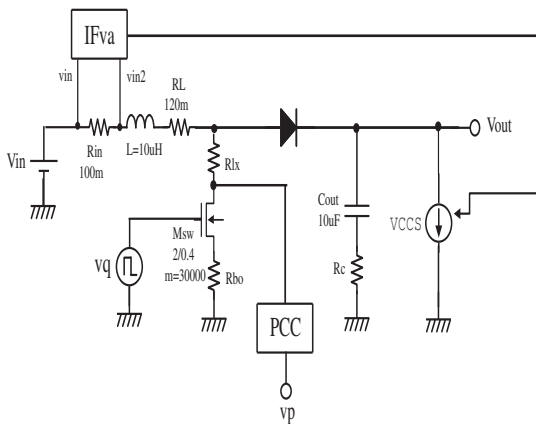


Fig.5 PCC シミュレーション回路

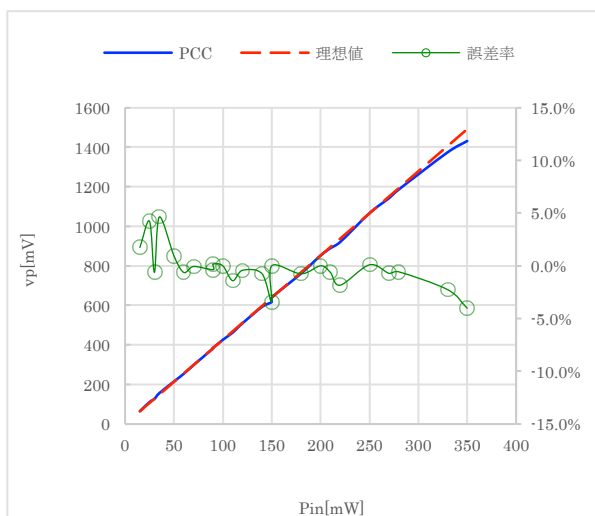


Fig.6 PCC シミュレーション結果

提案回路 : PCC を評価するシミュレーションシステムを Fig.5 に示す。本評価では、Boost の入力電圧 : V_{in} と入力電流 : I_{in} を任意に設定し、PCC の出力電圧を確認した。

Fig.6 に PCC の出力電圧 : v_p を第一縦軸に、太陽電池の出力電力 : P_{in} を横軸にしたグラフを示す。動作領域の広い範囲で線形性が保たれていることがわかる。また、 P_{in} と v_p の比の代表値を傾きにした直線 : 理論値をグラフに示した。理想的な電力計算回路は、電力から出力電圧への変換比が一定であるべきだからだ。理論値と PCC の誤差率は 4 % 以内に収まっている。つまり、非常に高精度であることがわかる。

Tab.2 PCC の消費電力

Pin [mW]	損失 [mW]	損失 [%]
33	0.15	0.45
90		0.16
137		0.1

太陽電池の発電電力 : P_{in} に対する PCC の消費電力の割合を Tab.2 に示した。この結果は代表値との比較である。全シミュレーション条件で発電電力に対して 1% 以内の消費電力を実現した。つまり、PCC の消費電力は P_{in} に対して無視出来るほど小さく、システム全体の効率に及ぼす影響は小さいことがわかる。

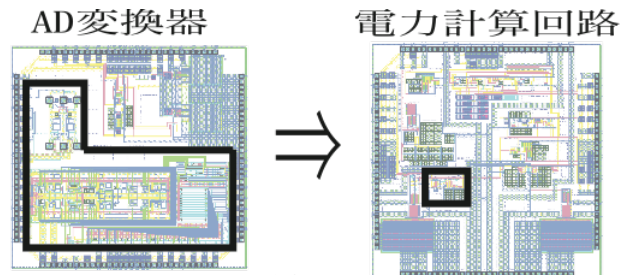


Fig.7 チップ面積比較

Fig.7 に AD 変換器と PCC のチップ写真を示す。AD 変換器は本研究室が試作した小面積が特長の 10bit サイクリック型 AD 変換器である。図より PCC で大幅なチップ面積の削減を実現したことがわかる。PCC の実装面積を AD 変換器 2 つ分の面積と比較して、98.5% の面積削減をした。

以上の精度、消費電力、面積の評価から高精度、低消費電力、省面積な電力計算回路が実現出来たことが示せた。

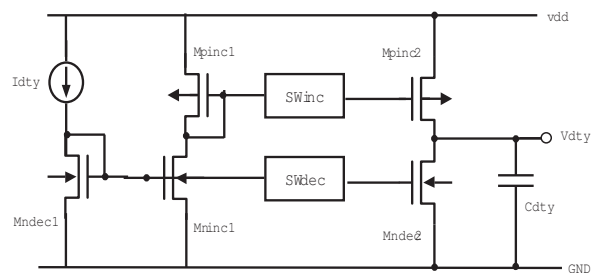


Fig.8 Analog Up/Down Counter (AUDC)

5. Active Hill Climbing method (AHC)

前章で提案回路：PCC が高精度な電力計算回路であることを示した。本章では、PCC を用いて提案 MPPT アルゴリズム：Active Hill Climbing method (AHC) をトランジスタ回路で実現したシステムと回路の説明と評価を行う。

AHC システムを構成する際、面積のボトルネックになる可能性がある回路がアップダウンカウンタである。アップダウンカウンタは Duty 情報の蓄積を行う。一般的には、デジタルカウンタで Duty の蓄積を行い、DA 変換器にて直流電圧に変換し PWM 変調を行う。しかし、DA 変換器で処理をするため、AD 変換器を用いる場合と同様に、消費電力、面積のボトルネックになる。DA 変換器は精度に対して、消費電力と面積がトレードオフであるからだ。

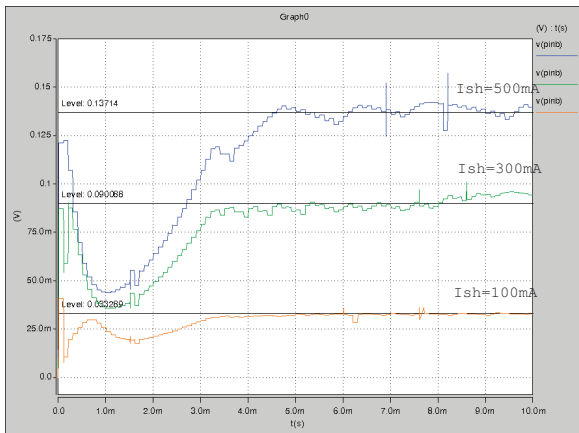
そこで、Analog Up/Down Counter (AUDC) を設計し、DA 変換器を不要にした。Fig.8 に提案回路を示した。本回路は以下の3つのブロックから構成される。

- Idty とカレントミラーの部分
- vdtly の増減を規定する AUDCSW
- Cdtly の充放電トランジスタ

また、AUDC であれば Idty と Duty の単位変化幅： Δd に比例関係があるため、MPPT アルゴリズムによって適応的に Δd を変えることが出来る。つまり、より高速で高精度な AHC が可能である。

では、SPICE シミュレーションから、提案手法の有効性を示すための評価を行う。MPPT の性能は収束精度、充電効率、消費電力、の3点から評価した。

Fig.9 入力電力の過渡特性



Tab.2 AHC の収束効率

Ish [mA]	Pin [mW]	Efficiency [%]
100	33	95.4
300	90	93.3
500	137	96.4

5.1 収束精度

Fig.9 に太陽電池の照度を掃引した入力電力：Pin の過渡特性を示す。全条件で過渡状態を経た後に、一定値を中心に収束していることがわかる。この結果を Tab.2 にまとめ、収束効率を示した。全条件で 93% 以上の収束結果を得た。

5.2 充電効率

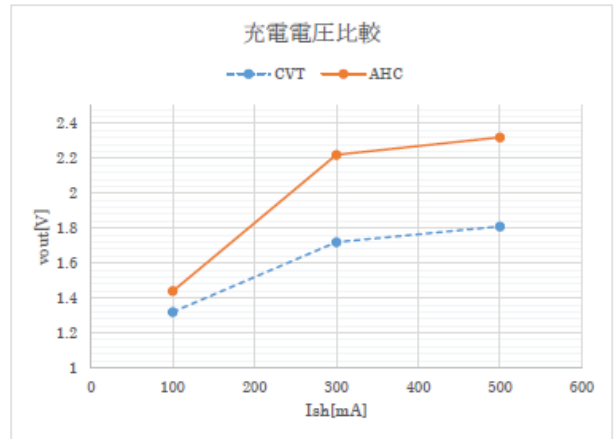


Fig.10 CVT と AHC の充電電圧比較

Fig.10 に太陽電池の照度を掃引したときの充電電圧を示す。本評価では、システム全体の充電効率の評価を従来手法：CVT と、PCC を用いた提案手法：AHC で比較した。AHC が CVT を全条件で上回っている。割合で評価すると、10%~20%の効率を改善した。

5.3 消費電力

発電電力と AHC システム全体の消費電力の割合を評価した結果を Tab.3 に示した。この結果は代表値との比較である。Tab.3 から、消費電力がシステムの発電量の 5% 以内に収まっていることから、影響が小さいことがわかる。特に、発電量と消費電力の割合は反比例する。

Tab.3 AHC の消費電力

Pin [mW]	消費電力 [mW]	消費電力 [%]
33	1.5	4.5
90		1.7
137		1.1

以上で示した収束精度、充電効率、消費電力について評価によって、提案アルゴリズム：AHC の有効性 MPPT システムの実現を示すとともに、PCC の有用性を示すことができた。

6. 結論

本研究では、100mW 級太陽電池に適する MPPT アルゴリズムの検証を行い、山登り法が必要であることを示した。そして、MPPT アルゴリズムを実現するために必要な AD 変換器を用いない電流積分型電力計算回路：PCC を提案し、精度、消費電力、面積を評価し性能を示した。また、MPPT システムに提案アルゴリズムを適用し、収束精度、充電効率、消費電力のそれぞれが有効であるシステムを実現した。よって、100mW 級太陽電池の MPPT は PCC を用いて AHC を適用することで高精度、低消費電力、小面積なシステムが実現できる。

7 参考文献

- [1] Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007