

昇降圧形コンバータを用いた太陽電池ブースターの開発*

小 浜 輝 彦**

山 邊 卓***

Development of Photovoltaic Cell Booster
Using Buck-boost Converter

Teruhiko KOHAMA** and Taku YAMABE***

Photovoltaic (PV) power generation has been receiving considerable attention as one of the promising alternative energy without emitting CO₂. In order to develop equipment such as inverter and converter suitable for PV power generation, the equipment need to be tested with real size of solar panel. However, the panel occupies large area and its cost is expensive. This paper proposes photovoltaic cell booster, where voltage and current in small PV cell are amplified with buck-boost converter. The booster behaves as large PV cell and is small and light enough to carry. Principle of proposed PV cell booster is described at first. Secondary, prototype of the booster is made and tested to confirm the effectiveness of the PV cell booster.

Key Words : Buck-boost converter, Photovoltaic cell, Booster

1. まえがき

石油，天然ガスなど化石燃料の大量消費によるエネルギー資源の枯渇が懸念されている。また，これらのエネルギー消費により排出される大量の二酸化炭素が地球の気温を上昇させる環境問題も引き起こしている。現在，これらエネルギー問題と地球環境問題の両者を解決することが求められており，省エネルギーの推進と自然エネルギー等の利用拡大が重要な課題となっている。太陽光発電は，無貯蔵で枯渇の心配がない光エネルギーを利用するもので，地球に悪影響な二酸化炭素を発生しないこと，設置条件において他の発電方法と比較して容易であることから今日，太陽電池の開発が急速に進んでいる。

これに伴って太陽光発電用機器やシステムの開発も盛んとなっている。しかし，太陽電池用機器を開発する場合，想定規模に見合った太陽電池パネルを準備しなければならず設置面積の確保とコストが問題となっている。そこで本研究では，小容量太陽電池とスイッチングコン

バータを用いて小スペースで安価に擬似的な大容量太陽電池特性を再現可能な太陽電池ブースターを考案した。本稿ではその基本原理を提案すると共に回路の試作を行ったので報告する。

2. 太陽電池ブースターの原理

太陽電池ブースターの構成及び，動作原理について述べる。まず，太陽電池ブースターの原理図を図1に示す。太陽電池の出力電圧は電圧増幅器により K_V 倍増幅される。電圧増幅器にはスイッチング電源を使用する。同時に，負荷に流れる電流 I_L を検出し，電流減衰器により $1/K_I$ 倍減衰させる。この電流値を電流源負荷として太陽電池にフィードバックさせることで負荷変動に応じた太陽電池の出力電圧特性を模擬できるようにしている。

太陽電池ブースターの回路構成を図2に示す。電圧増幅器にはPWM制御のDC-DCコンバータを使用する。電流減衰器は負荷電流を低抵抗 R_S で電圧 V_{IL} に変換した後，電圧制御電流源を用いて実現している。負荷に流れる電流は $1/K_I$ 倍減衰され，電流源として太陽電池に接続される。この構成により，軽負荷時において負荷電流が減少すると太陽電池のセル電流も減少し太陽電池の出力電圧が上昇する。太陽電池セル電圧はDC-DCコン

* 平成24年5月31日受付

** 電気工学科

*** 工学研究科電気工学専攻

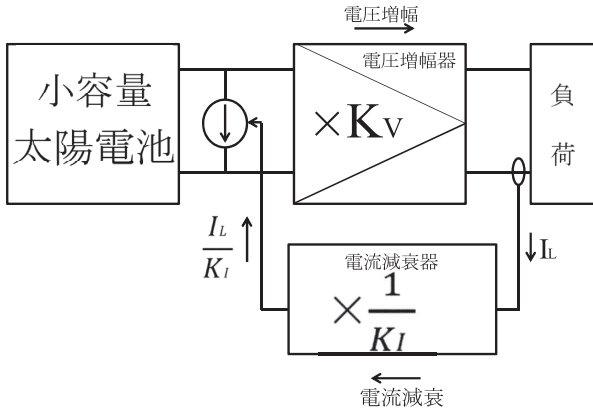


図1 太陽電池ブースターの原理図

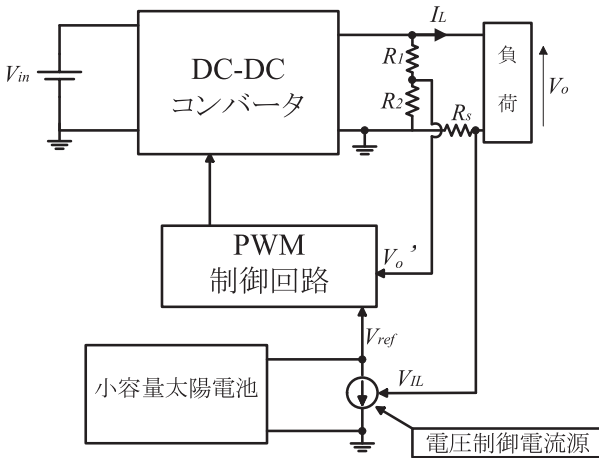


図2 太陽電池ブースターの回路構成

バータの基準電圧 V_{ref} となっており、セル電圧の上昇に比例してコンバータの出力電圧も増大する。一方、重負荷時には負荷電流の増加に伴い、太陽電池セル電流も増加するためセル電圧が減少する。この結果、コンバータの出力電圧が低下する。

3. 太陽電池の基本特性

太陽電池の特性は、主に出力特性・分光感度特性・照度特性などに分類されるが、V-I 出力特性は最も重要である。V-I 特性の測定回路と基本的な V-I 特性をそれぞれ図3、図4に示す。図3のように可変抵抗 R_L を太陽電池に直列に接続し、高抵抗から低抵抗へ変化させると図4の V-I 特性が得られる。高抵抗時、電流はほぼ流れず電圧のみが生じる。この時の電圧を開放電圧 V_{oc} (Open Circuit Voltage) とし、低抵抗時に流れる電流を短絡電流 I_{sc} (Short Circuit Current) とする。図4の電力曲線上の点を動作点とすると最も大きな有効電力が得られる動作点を最大出力点と呼び P_{max} で示す。この時の出力電圧を V_{max} 、出力電流を I_{max} としている。今回の実験では開放電圧 $V_{oc} = 2.2[V]$ 、短絡電流 $I_{sc} = 200[mA]$ の小容量太陽電池セルを使用した。

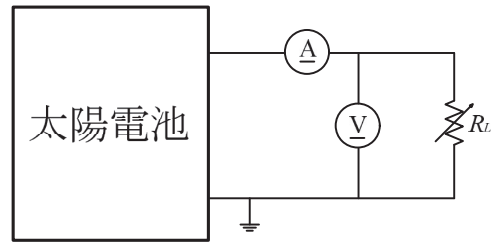


図3 太陽電池の V-I 特性測定回路

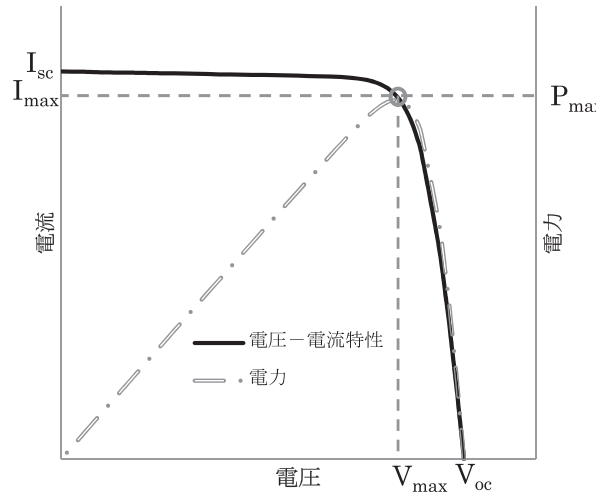


図4 太陽電池の V-I 特性と電力特性

4. 電圧増幅器

ここでは、図1内の電圧増幅器に用いるスイッチング電源について述べる。今回の実験では入力電圧に対して出力電圧を昇降圧する必要があるため、使用するコンバータは降圧・昇圧が可能な絶縁形昇降圧コンバータ(フライバックコンバータ)を使用する。フライバックコンバータの基本回路を図5に示し、一次側のメインスイッチが ON と OFF 時の動作回路をそれぞれ図6、図7に示す。

図6に示すようにメインスイッチが ON の場合、一次側には入力電圧 V_{in} がトランスの一次巻線に印加される。この時、トランスの二次巻線は逆極性となるので、二次側のダイオード D は OFF となり電流が流れず、二次巻線は開放状態に等しい。この結果二次側へ電力が伝達されず、一次巻線へ供給されたエネルギーはすべてトランス内に蓄積される。

次に図7に示すようにメインスイッチが OFF すると、一次巻線への電力供給は停止し、同時にトランスの巻線には逆起電力 V_2 が発生する。よって、二次側回路のダイオード D が導通しトランス内の蓄積エネルギーは出力側へ放出される。

フライバックコンバータの電圧変換率はトランスの巻

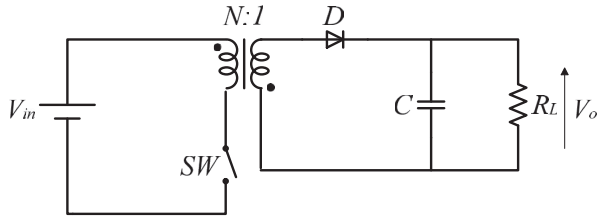


図5 フライバックコンバータの基本回路

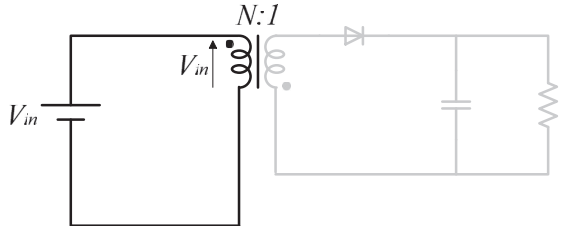


図6 S: ON 時の回路

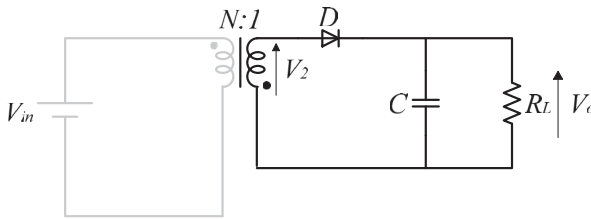


図7 S: OFF 時の回路

数比を $N:1$ とすると

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{N(1-D)} \quad (1)$$

で表される.

5. 電圧制御電流源

図1の電流減衰器を構成する電圧制御電流源について述べる. 実験に使用した電圧制御電流源の回路図を図8に示す. コンバータの負荷に直列に検出抵抗 R_s を接続し負荷電流 I_L と検出抵抗 R_s の積に比例した電圧 V_{IL} を非反転増幅器 U_1 へ入力する. この出力 V_{IL}' は

$$V_{IL}' = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \times V_{IL} \quad (2)$$

となり, これが次段の差動増幅器 U_2 の入力電圧となる. ここで $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ とすると

$$V_2 = -V_{IL}' + V_{sc} \quad (3)$$

となり, 基準抵抗 R_{ref} にかかる電圧 ΔV は

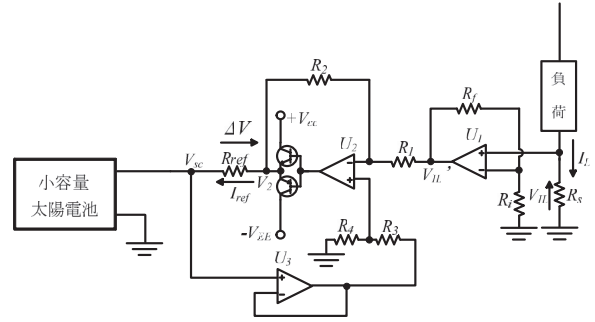


図8 電流減衰器の回路構成

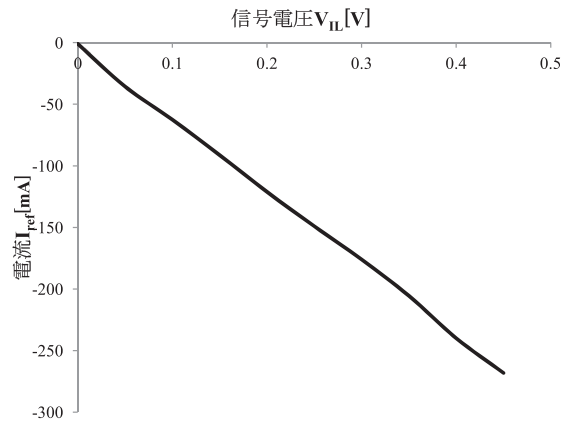


図9 電流減衰器の V-I 特性

$$\Delta V = V_2 - V_{sc} = -V_{IL}' \quad (4)$$

となる. 式(4)により基準抵抗 R_{ref} に流れる電流 I_{ref} は

$$I_{ref} = \frac{\Delta V}{R_{ref}} = -\frac{V_{IL}'}{R_{ref}} \quad (5)$$

となる. 式(5)より, R_{ref} に流れる電流は負となり, 太陽電池の電流を吸い込む. この結果, 負荷変動に応じて小容量太陽電池の電圧を変動させることができる. 電圧制御電流源の信号電圧 V_{IL} と基準抵抗 R_{ref} に流れる電流 I_{ref} の関係を表した V-I 特性を図9に示す. V_{IL} の増加に比例して I_{ref} はマイナス方向に増加している. この働きにより負荷変動した際でも負荷電流の変化を即座に検出し太陽電池セル電流に反映させるため太陽電池特性の模擬が可能となる.

6. 実験回路及び実験結果

現在一般家庭に普及している太陽光発電システムには $3\text{kW} \sim 5\text{kW}$ 程度の太陽電池パネルが使用されている. そこで, 研究の最終目標として 3kW 出力可能な太陽電池ブースターの開発を目指す. 但し, 今回の実験では, 提案原理が正常動作するかを確認するため目標出力の

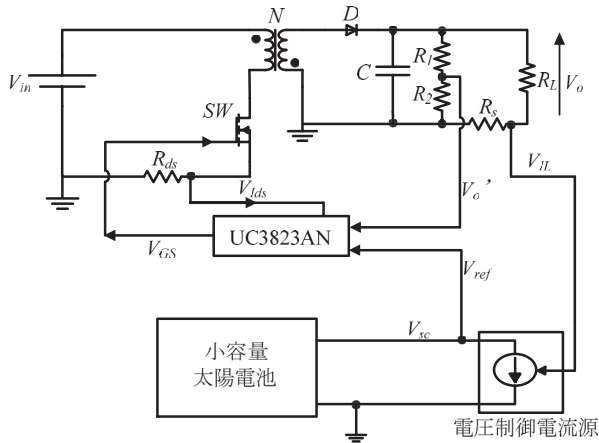


図 10 太陽電池ブースター実験回路

1/50 スケールで実験を行った。

太陽電池ブースターの実験回路を図 10 に示す。実験用のフライバックコンバータの回路定数は以下の通りである。

- 入力電圧 $V_{in}=40[V]$
- 最大出力 電圧 $V_o=55[V]$
- 最大出力 電流 $I_o=1.8[A]$
- 出力コンデンサ $C=1320[\mu F]$
- 分圧抵抗 $R_1=24[k\Omega]$
- 分圧抵抗 $R_2=1[k\Omega]$
- 負荷電流検出抵抗 $R_s=0.22[\Omega]$
- 一次電流検出抵抗 $R_{ps}=0.22[\Omega]$
- スイッチング周波数 $f=100[kHz]$

また、図 8 の電流減衰器の回路定数は次の通りである。

- $R_1=10[k\Omega]$, $R_7=13[k\Omega]$
- $R_1=R_2=R_3=R_4=10[k\Omega]$, $R_{ref}=4.3[\Omega]$
- NPN トランジスタ 2SC2562-Y
- PNP トランジスタ 2SC1012-Y

以上の回路定数を用いて太陽電池ブースターの出力が、小容量太陽電池セル出力電圧の 25 倍、出力電流の 8.5 倍、出力電力の 212.5 倍となるように設定した。

実験結果

図 10 の実験回路において、負荷を変動させた時の小容量太陽電池及び太陽電池ブースターの出力特性を測定した。開放時、最大出力時、重負荷時 ($R_L = 6 \Omega$) の実験データを表 1 と表 2 に示す。また、V-I 特性、電力特性をそれぞれ図 11、図 12 に示す。

小容量太陽電池セルと太陽電池ブースターの動作点について開放時、最大電力時、重負荷時 ($R_L = 6 \Omega$) をそれぞれ比較すると開放時において電流が 9.3 倍、電圧が 25.1 倍、電力が 223.1 倍となっている。また、最大出力時は電流が 8.7 倍、電圧が 24.2 倍、電力が 212.5 倍であり、重負荷時 ($R_L = 6 \Omega$) は電流が 8.8 倍、電圧が 18.9 倍、

表 1 太陽電池セルの電気特性

	$V_{sc}[V]$	$I_{sc}[A]$	$W_{sc}[W]$
開放	2.223	0.003	0.007
最大電力	1.791	0.181	0.324
重負荷($R_L=6\Omega$)	0.56	0.2	0.112

表 2 太陽電池ブースターの電気特性

	$V_o[V]$	$I_o[A]$	$W_o[W]$
開放	55.78	0.028	1.562
最大電力	43.46	1.574	68.41
重負荷($R_L=6\Omega$)	10.6	1.757	18.62

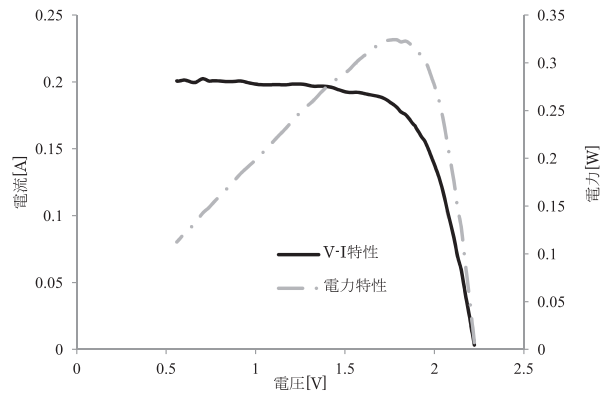


図 11 太陽電池セルの V-I 特性と電力特性

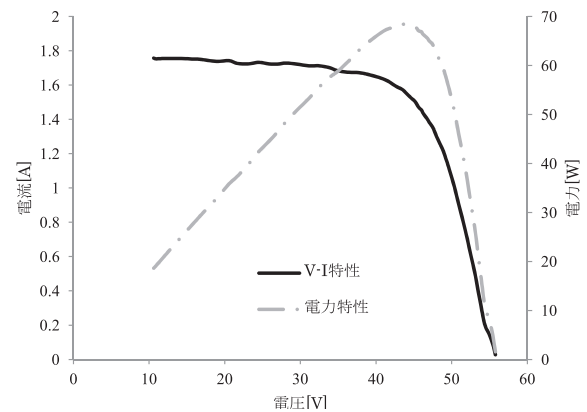


図 12 太陽電池ブースターの V-I 特性と電力特性

電力が 166.3 倍となっている。以上の結果から全負荷時にわたっておおよそ設定に近い値が得られることが確認できた。但し、重負荷時において負荷電流の一部に共振現象が見られたため更なる改善が求められる。

まとめ

太陽電池を利用した機器やシステムの開発において必要とされる想定規模の太陽電池を模擬する太陽電池ブースターについて基本原理を提案し、実験によって動作確認を行った。実験初期であり、最終研究目標の 1/50 スケールであったが、小容量太陽電池セルと昇降圧形コンバータを用いて、擬似的に大容量太陽電池の V-I 特性、電力特性を実現できることを示した。今後は、重負荷時の安定性を確保しながら、ブースター出力の更なる大容量化を図ることで太陽電池ブースターの実用化を目指す。

参考文献

- [1] S.GonzalezI, S.Kuszmaul,D.Deuel, R.Lucca,"PV Array Simulator Development and Validation," 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010
- [2] Agilent E4360 Modular Solar Array Simulators Datasheet, Agilent Technologies,2011
- [3] 山邊 卓,小浜 輝彦,“太陽電池ブースターの開発”,電気学会産業応用部門大会, Y-45, 2011年9月
- [4] 山邊 卓,小浜 輝彦,“太陽電池ブースターの開発”,第64回電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 09-2P-02, 2011年9月
- [5] 佐藤守男著,“高効率・高信頼スイッチング電源設計の勘どころ”,日刊工業新聞社, 2006年3月
- [6] 原田 耕介著,“スイッチング電源ハンドブック”,日刊工業新聞社, 1993年 11月
- [7] 山口 真史, M.A. グリーン, 大下 祥雄, 小島 信晃著,“太陽電池の基礎と応用”,丸善株式会社, 2009年7月
- [8] Texas Instruments UC3823AN data sheet, SLU334C-AUGUST, 1995-REVISED AUGUST 2004