

新方式太陽電池電源システムの基本特性について

松尾 博文* ・ 黒川不二雄** ・ 川原 学*

Characteristics of the New Solar Cell Power Supply System

by

Hirofumi MATSUO

(Department of Electronics)

Fujio KUROKAWA

(Electronics, Fukuoka Institute of Technology)

and

Manabu KAWAHARA

(Department of Electronics)

Recently, the solar cell has been used as power sources for the radio relay stations, the light houses, the agricultural systems, the microwave communication systems, and so forth. In such solar cell power supply systems, it often requires that the maximum power point of the solar array is tracked, in spite of the variations in the load and the light intensity, to make the most efficient use of the solar array and the storage battery.

The purpose of this paper is to propose a new solar cell power supply system, in which the bidirectional DC-DC converter and the simple control circuit with a small monitor solar cell are used to track the maximum power point of the solar array. It is clarified experimentally that the new system can realize high power conversion efficiency and precise maximum power tracking performance.

1. まえがき

太陽電池は光起電力効果を利用して太陽の光エネルギーを直接電気エネルギーに変換する無公害のエネルギー変換素子であり、石油代替エネルギー源として注目され、素子、利用システムの研究・開発が進められている^{1)~8)}。太陽電池を用いた電源システムにおいて

は、天候に左右されずに負荷に電力を安定に供給するために、通常エネルギー蓄積用の蓄電池が併用されることが多い。太陽電池と蓄電池の効率的な利用を計り、これらの電力容量をできるだけ小さくして電源システムの小形化、低価格化を実現するために、太陽電池からの出力電流を光の放射照度に応じて変化させ、太陽

昭和57年5月6日受理

* 電子工学科

** 福岡工業大学工学部電子工学科

電池から常に最大の出力電力を取り出す制御方式、いわゆる、太陽電池の最適動作点の追尾制御方式が検討されている¹⁾。従来、このような制御を行うためには、太陽電池の動作点を外部信号により微小変化させ、変化に伴う出力電力の増減により動作点を移行させる方式が用いられている。しかし、この方式では制御回路が複雑となり、また過渡特性に問題があることが指摘されている¹⁾。

本稿では、比較的簡単な制御により、光の放射照度に拘らず常に太陽電池から最大の出力電力を取り出すために、両方向性 DC-DC コンバータ⁹⁾とモニタ用の太陽電池を用いた新しい太陽電池電源システム^{6),8)}を提案し、この回路の基本的な動作、特性について考察を行った。この結果、太陽電池の最適動作点の追尾制御動作、蓄電池の充放電動作が良好に行われ、また高い電力効率を得られるなど本システムの有用性が明らかにされた。

2. モニタ用太陽電池による最適動作電流の検出

2.1 太陽電池の最適動作電流

太陽電池は光の放射照度 E_e に対応して図1の破線で示すように出力電圧対電流 ($V_s - I_s$) 特性が変化し、このため、実線で示すように出力電力対電流 ($P_s - I_s$) 特性が変化する。したがって、光の放射照度 E_e が変化した場合、太陽電池から最大の出力電力を取り出し得る動作電流 I_{op} もまた変化する。この動作電流 I_{op} を本稿では最適動作電流と呼ぶ。 $I_{op} - E_e$ 特性が図2(a)の実線で示されている。但し、図1, 2における光の放射照度 E_e は照度計 (YEW Type 3281) により測定され、このため、 E_e の単位として lux が用い

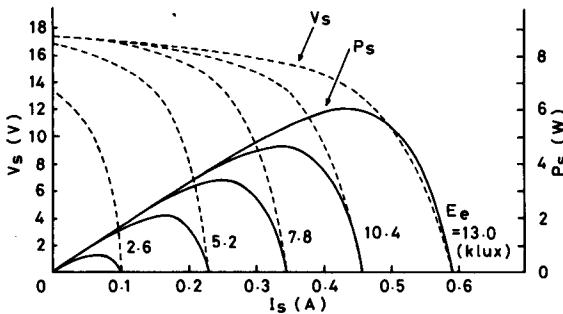
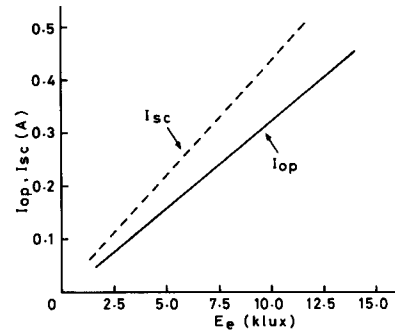
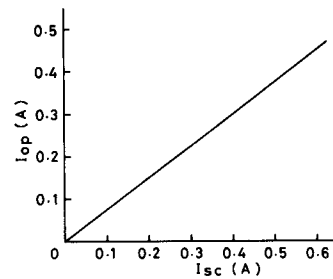


Fig. 1 Characteristics of the output voltage V_s vs. the output current I_s and the output power P_s vs. I_s in the solar cell (RSA 50150 401). E_e is the illumination intensity of the light emission.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Characteristics of the optimum output current I_{op} vs. the illumination intensity E_e and the short circuit current I_{sc} vs. E_e in the solar cell.

(b) Characteristics of I_{op} vs. I_{sc} in the solar cell.

られている (E_e の単位には、普通 mW/cm^2 が用いられている)。

2.2 最適動作電流と短絡電流

太陽電池の両端子を短絡した場合に流れる出力電流 I_{sc} は短絡電流と呼ばれ、光の放射照度 E_e の変化に対して図2(a)の破線のように変化する。したがって、図2(a)より、最適動作電流 I_{op} と短絡電流 I_{sc} とは図2(b)に示すように比例することが分かる。すなわち、比例定数を k_1 として

$$I_{op}(E_e) = k_1 I_{sc}(E_e) \quad (1)$$

となる。今、式(1)を満足する太陽電池と同一特性の小容量の太陽電池をモニタとして用いて、モニタ用太陽電池の短絡電流 I_{sc}^* を測定すれば、図3の破線で示すように

$$I_{sc}(E_e) = k_2 I_{sc}^*(E_e) \quad (2)$$

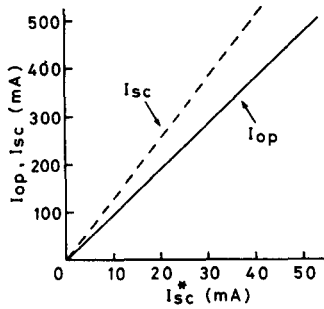


Fig. 3 Characteristics of I_{op} vs. I_{sc}^* and I_{sc} vs. I_{sc}^* . I_{sc}^* is the short circuit current of the solar cell (SSA 2525 201) for monitoring.

となる。式(1), (2)より, I_{op} と I_{sc}^* との関係は

$$I_{op}(E_e) = k_1 k_2 I_{sc}^*(E_e) = k^* I_{sc}^*(E_e) \quad (3)$$

となる。但し, $k^* = k_1 k_2$ であり, 図3の実線より $k^* \approx 9.52$ が求まる。このことより, モニタ用太陽電池の短絡電流 $I_{sc}^*(E_e)$ を用いて, 主太陽電池の最適動作電流 $I_{op}(E_e)$ が求められることが分かる。

3. 両方向性 DC-DC コンバータを用いた太陽電池電源システム^{6),8)}

図4(a)は本稿で提案するモニタ用の太陽電池と両方向性 DC-DC コンバータを用いた太陽電池電源システムの電力回路部である。図に示すように, 電力回路部は主太陽電池, 蓄電池, 両方向性 DC-DC コンバータ, モニタ用の太陽電池, 電圧安定化のための DC-DC コンバータおよび負荷から構成されている。ここで, 両方向性の DC-DC コンバータは蓄電池の充放電装置として用いられる。両方向性のコンバータには幾つかの回路方式があるが⁹⁾, 光の放射照度 E_e が非常に小さく, 蓄電池のみから負荷に電力が送られる場合, スイッチ Tr_2 および Tr_3 をそれぞれオフおよびオンに固定することによりスイッチング損失を無くしてこのコンバータにおける電力効率を高めるために, ここでは昇圧形回路を用いている。光の放射照度 E_e がある値より大きい場合には, スイッチ Tr_2, Tr_3 は図4(b)のドライブ信号によって交互にオン, オフされる。ドライブ信号のすき間の期間 T_{D1}, T_{D2} は Tr_2, Tr_3 が同時にオンすることを防ぐためのもので, $1 \mu\text{sec}$. 程度に選ばれている。

図4(a)において, l_1, l_2 は電流 i_{L1}, i_{L2} を平滑するためのリアクトルであり, i_{L1} および i_{L2} の平均値を I_{L1}

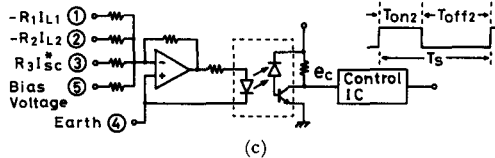
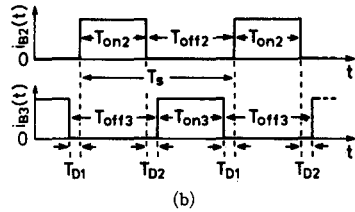
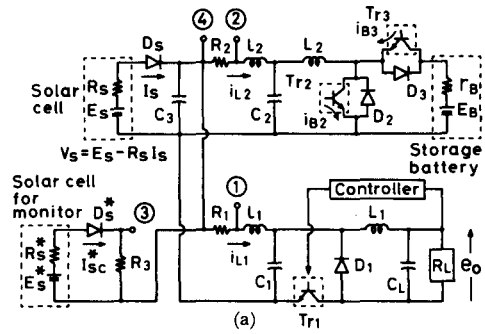


Fig. 4(a) Power circuit of the solar cell power supply system.

(b) Waveforms of the driving signals i_{B2} and i_{B3} for Tr_2 and Tr_3 . $T_{D1} \approx T_{D2} \approx 1 \mu\text{sec}$.

(c) Control circuit of Tr_2 and Tr_3 .

および I_{L2} とすれば, 太陽電池からの出力電流 I_s は

$$I_s(E_e) = I_{L1}(R_L) + I_{L2} \quad (4)$$

である。ここで, 太陽電池の出力電流 $I_s(E_e)$ を最適動作電流 $I_{op}(E_e)$ になるように追尾制御を行った場合, 電流 I_{L2} は式(4)より

$$I_{L2} = I_{op}(E_e) - I_{L1}(R_L) \quad (5)$$

となる。このことは逆に, 式(5)を満足するように I_{L2} を制御すれば, 太陽電池の出力電流 $I_s(E_e)$ は最適動作電流に決定されることを示している。図4(a)において, ①~④は式(5)を満足するように I_{L2} を制御するための信号検出端子である。端子①, ②および③により $I_{L1}(R_L), I_{L2}$ およびモニタ用太陽電池の短絡電流 I_{sc}^* が検出され, また④は共通接地端子である。そして, これらの端子からの信号出力は図4(c)の制御回路に加えられる。

図4(c)は両方向性 DC-DC コンバータのスイッチ

T_{r_s} および T_{r_s} の制御回路であり、図中の Control IC は通常のスイッチングレギュレータ用 IC である。演算増幅器、フォトカプラおよび Control IC から成る回路の利得を H とし、図 4 (a)において $R_1=R_2=R$ とすれば、制御回路からの出力パルスの時比率 T_{on1}/T_s は

$$\begin{aligned} T_{on1}/T_s &= T_{on1}^*/T_s + HR\{(R_3/R)I_{sc}^*(E_e) - I_{L1}(R_L) - I_{L3}\} \\ &= T_{on1}^*/T_s + HR\{k^*I_{sc}^*(E_e) - I_{L1}(R_L) - I_{L3}\} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。但し、

$$k^* = R_3/R \quad (7)$$

であり、また T_{on2}^*/T_s は端子⑤から加えられるバイアス電圧 V_b によって設定され

$$T_{on2}^*/T_s = HV_b \quad (8)$$

である。更に、式(3)を式(6)に代入すれば

$$T_{on1}/T_s = T_{on1}^*/T_s + HR\{I_{op}(E_e) - I_{L1}(R_L) - I_{L3}\} \quad (9)$$

が得られる。上式で HR が十分大であると仮定すれば

$$I_{op}(E_e) - I_{L1}(R_L) - I_{L3} = 0 \quad (10)$$

となり、式(5)が成立する。このことは、式(3)に示されたモータ用太陽電池の短絡電流 $I_{sc}^*(E_e)$ と主太陽電池の最適動作電流 $I_{op}(E_e)$ との関係を用いて、両方向性 DC-DC コンバータを流れる電流 I_{L3} を制御することにより、光の放射照度 E_e および $I_{L1}(R_L)$ の変化に拘らず、主太陽電池からの出力電流 $I_s(E_e)$ を $I_{op}(E_e)$ に追尾できることを意味する。また、この動作においては、両方向性 DC-DC コンバータにおけるスイッチ T_{r_s} 、 T_{r_s} の時比率 T_{on2}/T_s 、 T_{on1}/T_s を制御することにより、 I_{L3} を正から負まで連続的に変化できる(付録参照)ことが重要である。そして、 I_{L3} の正および負に応じて次の 2 つの動作モードを取る。すなわち、(i) $I_{L3} \geq 0$ の場合には、 $I_{op}(E_e) \geq I_{L1}(R_L)$ であり、太陽電池 E_e から負荷 R_L および蓄電池 E_B に電力が送られる。蓄電池 E_B に着目すれば、 $I_{L3} = I_{op}(E_e) - I_{L1}(R_L) > 0$ なる電流 I_{L3} により E_B は充電される。(ii) $I_{L3} < 0$ の場合には、 $I_{op}(E_e) < I_{L1}(R_L)$ であり、 $-I_{L3} = I_{L1}(R_L) - I_{op}(E_e) > 0$ なる電流 $-I_{L3}$ が E_B から放電され、 E_B および E_e から R_L に電力が送られる。これらの(i)および(ii)の動作モードをそれぞれ充電モードおよび放電モードと呼ぶことにする。

以上のように、図 4 の太陽電池電源システムでは、光の放射照度 E_e および負荷 R_L の状態に拘らず、主太陽電池からは原理的に常に最大の出力電力が得られることが分かる。

4. 実験および考察

図 5 は提案した電源システムにおける太陽電池の最

適動作点に対する追尾特性の実験結果である。破線および実線は光の放射照度 E_e をパラメータとしてあらかじめ測定した太陽電池の出力電圧対電流特性および出力電力対電流特性である。○印はシステムに組込んだ太陽電池の動作点であり、負荷電力 $P_o (= E_o \times I_o)$ を 1.5W から 5W まで変化してもほぼ一定であった。このことから、提案した電源システムにおいては、光の放射照度 E_e および負荷 R_L に拘らず、太陽電池からの

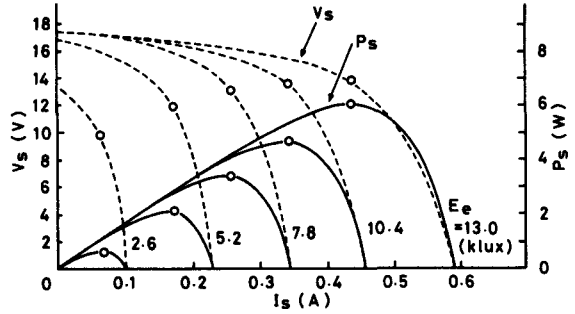


Fig. 5 Maximum power tracking characteristics.

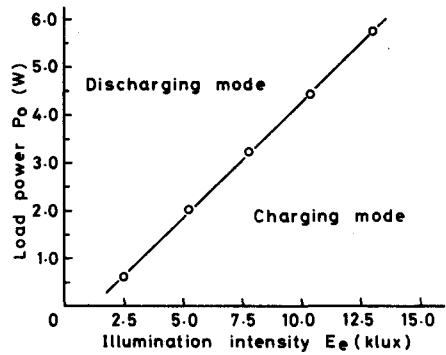


Fig. 6 Boundaries of the operation modes.

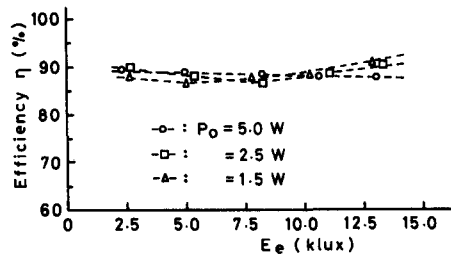


Fig. 7 Power efficiency of the system.

出力電流は最適動作電流であり、常に最大の出力電力が得られていることが分かる。

図6は光の放射照度 E_s と負荷電力 P_o を変化したときの動作モードの境界を示したものである。この図から、両方向性 DC-DC コンバータの使用により、充電モードと放電モードの切り換えが良好に行われていることが分かる。

また、図7は太陽電池電源システムにおいて、負荷電力 $P_o (= E_o \times I_o)$ をパラメータとして、電力効率 η を光の放射照度 E_s を変化して測定した結果である。但し、充電モードにおいては

$$\eta = \frac{P_o + E_s I_s}{(1 + \alpha) E_s I_s} \quad (11)$$

放電モードにおいては

$$\eta = \frac{P_o}{(1 + \alpha) E_s I_s + E_s I_s} \quad (12)$$

を用いて電力効率 η は計算され、また、上式における α は最適動作点における主太陽電池とモニタ用太陽電池の出力電力比である。図より、提案した電源システムにおいては、85%以上の高い電力効率を得られていることが分かる。

5. むすび

以上、モニタ用太陽電池と両方向性 DC-DC コンバータを用いた方式により、光の放射照度および負荷状態に関係なく太陽電池から常に最大の出力電力を取り出す太陽電池電源システムを提案し、検討した結果、次の事柄が明らかになった。

(1)モニタ用太陽電池の短絡電流と両方向性 DC-DC コンバータの充放電機能により、主太陽電池からの出力電流を最適動作電流に設定でき、主太陽電池から常に最大の出力電力が取り出される。

(2)両方向性 DC-DC コンバータにより動作モードの切り換えが適切に行われ、充電モードでは、太陽電池から負荷および蓄電池に電力が送られ、また放電モードでは、太陽電池および蓄電池から負荷に電力が送られる。

(3)提案した電源システムにより、十分高い (85%以上) の電力効率を得られる。

なお、今後、両方向性の DC-DC コンバータを用いた本システムと単方向性の DC-DC コンバータを用いた従来のフローティング方式太陽電池電源システムとの比較、他の制御方式との比較、本システムの動特性、太陽電池および蓄電池の容量決定問題などについて検討すべきであり、これらについては稿を改めて

報告したい。

参考文献

- 1) M. C. Glass : IEEE PESC 77 Record, p. 346 (1977).
- 2) 浜川 : エレクトロニクス, 26, 7, p.705 (昭54-07).
- 3) 山本 : N H K 技研月報, 23, 1, p. 6 (昭55-01).
- 4) 太陽電池電源装置技術資料 (シャープ株式会社).
- 5) 谷 : 電気学会雑誌, 100, 5, p. 45 (昭55-05).
- 6) 松尾, 黒川 : 昭和55年度電気四学会九州支部連合大会講演論文集, 620, p. 260 (昭55-10).
- 7) 谷 : 昭和56年度電気学会全国大会講演論文集(6), S 8-7, P. S. 8-23 (昭56-06).
- 8) 松尾, 黒川 : 電気学会半導体電力変換研究会資料, S P C-81-22, p. 85 (昭56-05).
- 9) 松尾, 原田 : 電気学会論文誌, 53-B, 2, p. 107 (昭53-02).

付 録

両方向性 DC-DC コンバータにおけるリアクトル電流について

図8(a)は両方向性の昇圧形 DC-DC コンバータである。図において、 E_s および E_B はそれぞれ内部抵抗 R_s および r_B の電圧源とし、スイッチ Tr_2 , Tr_3 が図(b)のような理想的なドライブ信号により交互にオン、オ

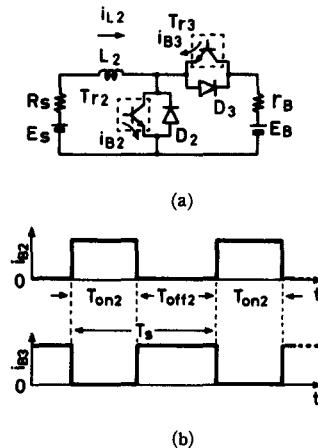


Fig. 8(a) Bidirectional step-up type DC-DC converter.

(b) Idealized waveforms of the driving signals of Tr_2 and Tr_3 .

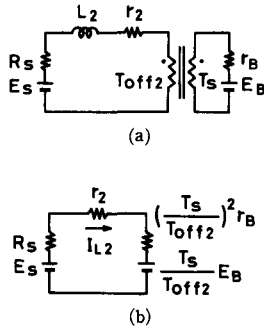


Fig. 9(a) Equivalent circuit of averaging over single switching period.

(b) Equivalent circuit for steady state.

フされるものとする。ここでは、この回路のリアクトル電流 i_{L_2} の平均値を求める。解析に際して、リアクトル L_2 の損失抵抗を r_2 とし、スイッチ T_{r_1} , T_{r_2} および

ダイオード D_2 , D_3 の内部損失は無視できるものと仮定する。図 8(a) に対して、 T_{r_1} , T_{r_2} のオン、オフの 1 周期間 T_s における動作の平均値をとれば、図 9(a) の等価回路が得られ、さらにこの図から、定常状態に対して図 9(b) の等価回路が求められる。したがって、図 9(b) より、リアクトル電流 i_{L_2} の平均値 I_{L_2} は次のように求められる。

$$\begin{aligned}
 I_{L_2} &= \frac{E_s - (T_{\text{off}2}/T_s)E_B}{R_s + r_2 + (T_{\text{off}2}/T_s)^2 r_B} \\
 &= \frac{E_s - (1 - T_{\text{on}2}/T_s)E_B}{R_s + r_2 + (1 - T_{\text{on}2}/T_s)^2 r_B} \quad (\text{A-1})
 \end{aligned}$$

式 (A-1) より、 $T_{\text{on}2} T_s \geq 1 - E_s/E_B$ ならば $I_{L_2} \geq 0$ であり、 $T_{\text{on}2}/T_s < 1 - E_s/E_B$ ならば $I_{L_2} < 0$ である。このことから、両方向性 DC-DC コンバータにおいては $T_{\text{on}2}/T_s$ の制御により I_{L_2} を正から負まで連続的に変化できることが分かる。