

PWM Converters Integrating Power Control and Voltage Balance Functions in Photovoltaic Systems

Masaya Yamamoto and Masatoshi Uno

Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511, Japan

Abstract:

Photovoltaic (PV) systems have partial shading problems on photovoltaic string comprising multiple modules/substrings connected in series, triggering a significant reduction in power generation and the occurrence of multiple maximum power points. These problems can be solved by equalizing voltages of series-connected PV modules/substrings. The main converters and voltage equalizers are necessary, generating issues in terms of complexity and cost because of the increased number of converters in PV systems.

Thus, this paper proposes the PWM converter integrating main converters and voltage equalizers. The proposed converter can be derived by stacking so-called 'unit circuit', which contains switching device(s). Sharing the parts in the main converter and voltage equalizer contributes to simplicity and low cost.

First, the operation analysis was performed based on simulation. The derived integrated converter was compared and analyzed, and the experimental tests using a prototype were performed. The results of the analysis and experiments demonstrated that the proposed converter achieves both the power control and voltage balance functions.

部分影補償機能と電力制御機能を統合した 太陽電池システム用 PWM 用コンバータ

茨城大学 山本聖也、鵜野将年

1. はじめに

太陽電池は、太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する半導体デバイスである。太陽電池 (PV: photovoltaic) モジュールは通常、複数を直列接続しストリングを構成することで任意の電圧を得る。しかし、PV ストリングの一部に影が掛かる「部分影」によって深刻な問題を生じることが知られている。また、宇宙機における部分影としては、ローバーにおける搭載カメラによる部分影などが想定される。部分影によって PV ストリングの特性上に複数の最大電力点が生じ、PV ストリングから得られる電力が小さくなる。また最大電力点追尾 (MPPT: Maximum Power Point Tracking) を行った際に、複数の最大電力点の内の低い電力点を追尾してしまう可能性が生じる。これらの問題は部分影によって各 PV モジュールの電圧に差異が生じることに起因している。太陽電池システムにおける部分影の問題は、各 PV モジュールの電圧を均一化する部分影補償器を用いることで解決できる。しかし、従来の太陽電池システムでは電力制御用の PWM コンバータに加えて、部分影補償器が必要となるためシステムが複雑化ならびに高コスト化する。

本研究では、電力制御用コンバータと部分影補償器を統合した統合型コンバータを提案する。2つのコンバータを統合することでシステムの簡素化と低コスト化を同時に実現する。本統合型コンバータは従来方式と比較してトランスを必要としないため小型軽量化を達成できる。本稿では提案する統合型コンバータを試作し、各種解析結果に対する検証実験の結果について報告する。

2. 提案する統合型コンバータ

前述したように従来の太陽電池システムにおけるコストの増加と複雑化の問題を解決するために、本研究では電力制御用コンバータと部分影補償器を統合した統合型コンバータを提案する。2つのコンバータを1つのコンバータに統合することでシステムの簡素化と低コスト化を同時に達成できる。

本研究で扱う統合型コンバータは基本回路を基礎として導出されることを Fig. 1 を用いて示す。Fig. 1(a)の基本回路は電力制御用コンバータとして動作する。また、基本回路は破線部で囲まれたコンデンサとスイッチからなる単位回路を有している。Fig. 1(b)に示すように、本統合型コンバータはこの単位回路を基本回路に多段接続することで導出でき、多段接続できる単位回路の段数に制限はない。

2.1. 回路動作

Fig. 2 は、基本回路に単位回路を3段接続することで導出した統合型コンバータである。動作時における電流経路を Fig. 3 に示す。本統合型コンバータは2つの動作モードを有しており、それぞれのモードにおける電流経路をそれぞれ赤と青の矢印によって示す。本統合型コ

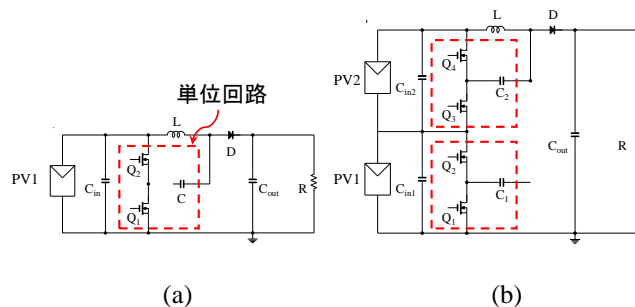


Fig. 1. 統合型コンバータの導出. (a) 基本回路. (b) 単位回路2段の統合型コンバータ.

ンバータは各単位回路のスイッチ Q_{2i} ($i = 1, 2, \dots, n$) と Q_{2i-1} が交互にオン、オフを繰り返し動作する。これに対応して、インダクタ L とカップリングコンデンサ C_i はエネルギーの充放出を繰り返す。 L のみを用いる従来の汎用 PWM コンバータと比較して、本統合型コンバータでは L のみならず C_i もエネルギー蓄積の役割を担う。一般的にコンデンサはインダクタよりも遥かにエネルギー密度が高いため、従来のコンバータと比較して L ならびに回路全体を小型化することが可能である。

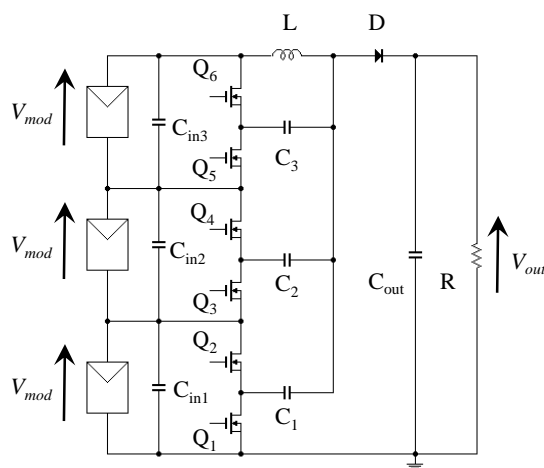


Fig. 2. 統合型コンバータ.

多段接続した単位回路によって構成される部分影補償器部分はインダクタ電圧 V_L が印加する矩形波電圧により駆動される。 C_i は交流成分のみを通過させるカップリングコンデンサであるため、矩形波電圧から見て各単位回路は等価的に並列接続されているものと見なせる。よって、部分影により電圧が低下した PV モジュールに対して矩形波電圧源から補償電流が自動的に供給され、各 PV モジュールの電圧は均一化するよう動作する。その結果、全ての PV モジュールの電気特性は疑似的に均一化され、部分影による悪影響は解消される。

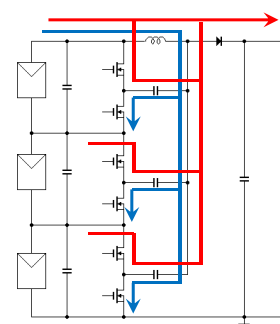


Fig. 3. 電流経路.

2. 2. 提案する統合型コンバータの変形例

本統合型コンバータは単位回路に接続されるインダクタの位置を変更することによって電圧変換比を調整することができる。例として、1段目の単位回路にインダクタを接続した構成の統合型コンバータを Fig. 4 に示す。

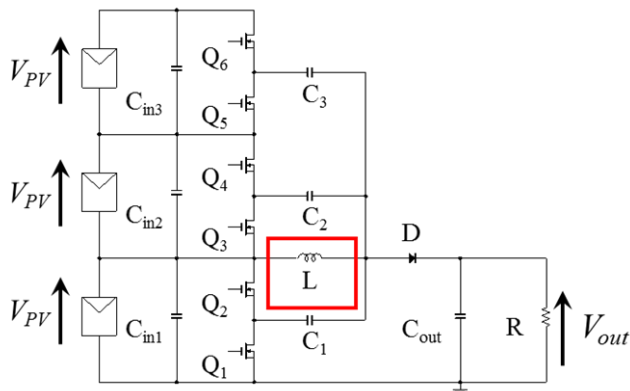


Fig. 4. インダクタの位置を変更した統合型コンバータ.

3. 各種解析結果

3. 1. 電力制御機能

本統合型コンバータの入力電圧 V_{in} と出力電圧 V_{out} の関係はローサイドスイッチ Q_{2i-1} のデューティ比 D を用いて表すことができる。ここで、カップリングコンデンサの電圧を V_c 、各 PV モジュールの電圧を V_{mod} とする。この時、スイッチング一周期 T_s におけるインダクタの電圧時間積が 0 になるという関係を Fig. 2 に示す統合型コンバータに適用することで次式を得る。

$$(3V_{mod} - V_c - 2V_{mod})DT_s = (V_{out} - 3V_{mod})(1 - D)T_s \quad (1)$$

$$V_{out} = \frac{1}{3}(3+D)V_{in} \quad (2)$$

また、2段目の単位回路にインダクタを接続した時の入出力電圧の関係は次式で与えられる。

$$V_{out} = \frac{1}{3}(2+D)V_{in} \quad (3)$$

同様に、Fig. 4 に示した1段目の単位回路にインダクタを接続した回路構成においては次式となる。

$$V_{out} = \frac{1}{3}(1+D)V_{in} \quad (4)$$

式(2)~(4)で表される電圧変換比の D 依存性をFig. 5に示す。本統合型コンバータは D によって電圧変換比の調整が可能であり、また、単位回路に接続するインダクタ L の位置によって電圧変換比の範囲を変更できることがわかる。

3.2. 部分影補償機能

本統合型コンバータにおける部分影補償機能の有効性について検討を行う。3直列のモジュールにより構成されるistringにおいて、部分影がかかった状態を模擬した際のシミュレーションによる P - V 特性をFig. 6に示す。部分影補償無しの場合、複数の最大電力点が生じている。それに対し、補償器を用いることで P - V 特性上の最大電力点は一点に収束し、且つ、得られる電力値も大幅に向上していることから本統合型コンバータの部分影補償機能の有効性が示された。

4. 検証実験の結果

Fig.7に示す試作回路を用いた検証実験を行った。試作回路における単位回路の段数は3段である。また、Fig. 2と同様でインダクタは単位回路の3段目に接続されている。

4.1. 電力変換効率

入力電圧 $V_{in} = 40$ V、スイッチング周波数 $f_s = 50$ kHzの条件のもと、本統合型コンバータの電力変換効率 η を測定した。出力電圧 V_{out} を42~44 Vに固定した場合の電力変換効率 η の測定結果をFig. 8に示す。出力電力 P_{out} が10~40 Wまでの範囲において95%以上の効率が得られた。

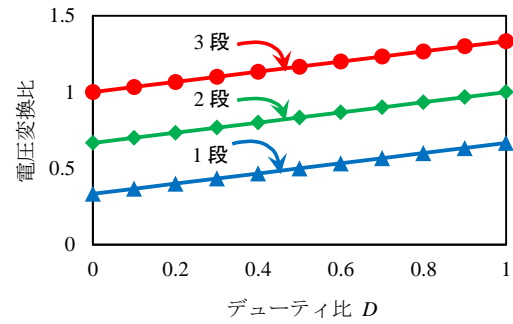


Fig. 5. 統合型コンバータの入出力電圧変換比.

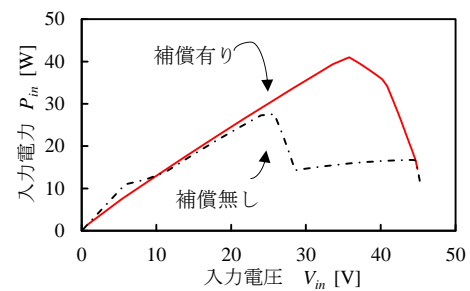


Fig. 6. シミュレーションにおける部分影補償の有無によるistring特性の比較

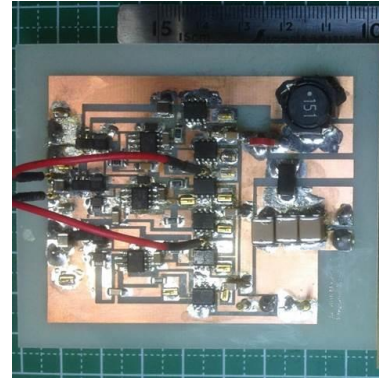


Fig. 7. 統合型コンバータの試作回路.

4.2. 電力制御機能

試作回路における入力電圧 V_{in} 、出力電圧 V_{out} の関係はダイオードの順方向電圧降下 V_{Df} を考慮した場合、次式で表される

$$V_{out} = \frac{1}{3}(3+D)V_{in} - V_{Df} \quad (5)$$

D をスイープすることで得られた V_{out} の特性を Fig. 9 に示す。測定値と式(5)の理論値はよい一致を示した。

D が高い領域において若干の差異が観察されたがその差は 2% 程度と小さく、式(5)の妥当性が示された。

4.3 電圧バランス機能

先に示した試作回路と太陽電池模擬装置を用い、1つのモジュールに影が掛かった部分影条件を模擬して実験を行った。実験で使用した各 PV モジュールの特性を Table 1 に示す。出力電圧 V_{out} を定電圧負荷により 42 V に固定しつつ、 D を手動で変化させることでストリング特性のスイープを行った。また、本統合型コンバータの部分影補償機能の有効性を検証するために、部分影補償を行わない場合のストリング特性も合わせて取得した。

ストリング特性の取得結果を Fig.10 に示す。部分影補償を行うことで抽出可能電力が増加したことから、本統合型コンバータにおける部分影補償機能の有効性が示された。

5. まとめ

本研究では太陽電池システムにおける電力制御用コンバータと部分影補償器を統合した PWM コンバータを提案し、その有効性を示した。本統合型コンバータにより 2 台の変換機（すなわち電力制御用コンバータと部分影補償器）を 1 台へと集約できるため、電源システムの大幅な簡素化を実現することが可能である。また、本統合型コンバータはトランス必要とせず、且つ、原理的にインダクタを小型化できる回路方式であるため、従来の PWM コンバータと比較して回路を大幅に小型化できる特徴を有する。以上のことから、本統合型コンバータは宇宙機電源システムの更なる小型軽量化に貢献できるものと期待できる。

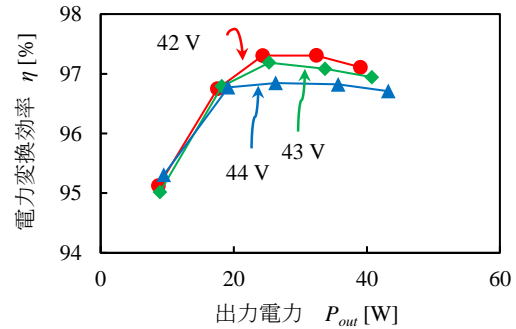


Fig. 8. 電力変換効率.

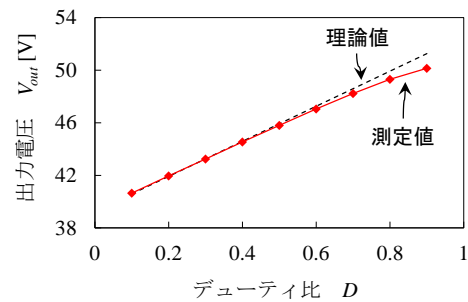


Fig. 9. 出力電圧特性.

Table 1. 各太陽電池モジュールの特性.

	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]
影無し	12.4	0.95
影有り	12.4	0.76

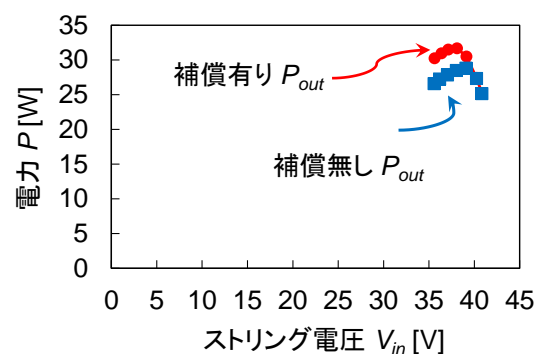


Fig. 10. 実験における部分影補償の有無によるストリング特性の比較