

タップトインダクタにより昇圧比を任意に決定可能な、PHEV 用湾曲太陽電池パネルの発電量を向上させる統合型コンバータの実機検証

鈴木 匠* 佐々木 優介 鵜野 将年 (茨城大学)

Experimental Verification of Integrated Converter Utilizing Tapped-Inductor with Arbitrary Voltage Step-Up Ratio to Enhance Energy Yield of Curved Roofs of PHEVs

Takumi Suzuki*, Yusuke Sasaki, Masatoshi Uno, (Ibaraki University)

The characteristics mismatch of photovoltaic substrings in solar roofs of PHEVs triggers not only a significant reduction in power generation but also malfunction of maximum power point (MPP) tracking due to the occurrence of multiple MPPs. This paper proposes an integrated converter based on a differential power processing converter and a step-up converter to prevent negative influences of characteristic mismatch. The proposed converter can achieve arbitrary voltage step-up ratio thanks to a tapped inductor. Experiments using a 200-W prototype for seven-substring solar roofs were performed emulating mismatched conditions, and results demonstrated the step-up power conversion capability and enhanced power yield.

キーワード：補償器，統合型コンバータ，太陽電池パネル，タップトインダクタ，昇圧比

(Differential power processing converter, integrated converter, photovoltaic panel, tapped inductor, voltage step-up ratio)

1. はじめに

太陽電池 (PV: Photovoltaic) パネルを車体屋根に搭載した PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) の開発が多くの自動車メーカーで進められている。一般的な PV パネルは 2~3 直列のサブストリングで構成される一方、PHEV 用パネル (例、プリウス PHV) は Fig. 1 に示すように 7 直列のサブストリングにより構成される。

PHEV 用パネルは湾曲した形状であるため、各サブストリングの日射量に差が生じる。その結果、Fig. 2(a)に示すように日射量の低下したサブストリング (以下、低出力サブストリング) の短絡電流は他のサブストリングと比較して低下し、電気特性にばらつきが発生する。この状況において、低出力サブストリングの供給能力を上回る電流がパネル内に流れる場合、Fig. 2(b)に示すようにバイパスダイオードが導通し低出力サブストリングである PV1 は発電に寄与しなくなる。これと同様の現象が PV パネル上に部分的な影が生じた際にも起こることが知られている⁽¹⁾。電気特性がばらつくと、Fig. 3 に示すようにパネルの電力-電圧 ($P-I$) 特性に複

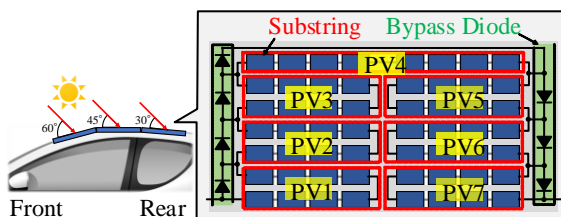


Fig. 1. PHEV equipped with solar roof.

数の最大電力点 (MPP: Maximum Power Point) が発生し、発電電力が大幅に減少する。

電気特性ばらつきを解消する一手法として補償器が提案されている。補償器を介してサブストリング間で電力融通を行い、全てのサブストリング特性を疑似的に均一化することで特性ばらつきの悪影響を防止する。双方向コンバー

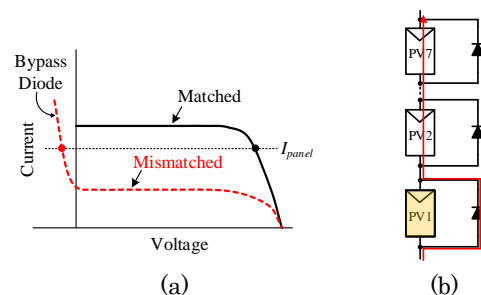


Fig. 2. (a) Substring characteristics under uneven irradiance, (b) current flow when PV1 is weak substring.

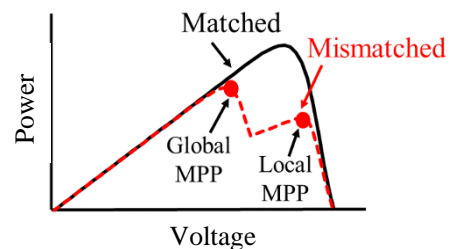


Fig. 3. Panel characteristics under mismatch or partial shading conditions.

タ⁽²⁾や絶縁型双方向コンバータ⁽³⁾等を用いた様々な補償器が提案されており、中でもスイッチトキャパシタコンバータ (SCC: Switched Capacitor Converter) ^{(4),(5)}を用いた方式は小型軽量化の観点で優位である。SCC を用いた補償器の一例としてディクソン SCC⁽⁵⁾が挙げられる。この方式は、離れたサブストリング間の電力伝送が可能のため、PHEV 用パネル等のサブストリング数の多い用途に適する⁽⁵⁾。

PHEV 用 PV システムでは、パネル電圧を所望の電圧に昇圧しつつ、パネルを MPP で動作させるための昇圧コンバータが必要となる。つまり、従来の PV システムでは補償器と昇圧コンバータが個別に必要となるため、システムの複雑化や高コスト化を招く。

PV システムの簡素化と低コスト化を目的に、ディクソン SCC 補償器と昇圧型 PWM コンバータを 1 台に集約した統合型コンバータが提案されている⁽⁶⁾。しかし、サブストリング数の増加に伴い昇圧比が低下するため、7 直列サブストリング構成の車載用途には適さない。

本稿では従来の統合型コンバータにタップトインダクタ (TI: Tapped-Inductor) を採用し、TI の巻数比の調節により任意の昇圧比を達成可能な PHEV 用統合型コンバータを提案する。定格電力 200 W の 7 直列サブストリング用試作回路を用いた実機検証により、8.3%の発電量向上を達成し提案回路の有効性を実証したため報告する。

2. 提案回路

〈2・1〉 回路構成 ディクソン SCC 補償器と昇圧型 PWM コンバータを 1 台に集約しつつ、TI を採用した 7 直列サブストリング用統合型コンバータを Fig. 4 に示す。SCC 部は平滑コンデンサ $C_{PV1} \sim C_{PV7}$ 、カップリングコンデンサ $C_1 \sim C_7$ 、スイッチ $Q_1 \sim Q_{14}$ から成り、昇圧型 PWM コンバータ部はスイッチ $Q_{13} \sim Q_{14}$ 、TI、ダイオード D 、コンデンサ C から成る。また、SCC 部と昇圧型 PWM コンバータ部は、スイッチ Q_{13} と Q_{14} を共有する。 Q_{14} が接続される巻線を TI の 1 次巻線、ダイオード D に接続される巻線を 2 次巻線、奇数番号スイッチのデューティを d と定義する。

〈2・2〉 特徴 スイッチ Q_{13} と Q_{14} を共有しつつ SCC 部と昇圧型 PWM コンバータ部を 1 台に統合することで、回路の小型化及び低コスト化、また、システムの簡素化を達成する。提案回路は TI の励磁インダクタンスを利用することでパネル電圧を昇圧しつつ、任意の d での動作で自動的にサブストリング特性を均一化する。昇圧比は TI の巻数比 ($N = n_2/n_1$) を調整することで任意に決定できる。理論昇圧比の導出は 3.2 節で説明する。

3. 提案回路

〈3・1〉 動作モード デットタイムは無視できるものとし、回路中の全ての素子は理想的であるとする。理論動作波形と電流経路を Fig. 5 及び Fig. 6 にそれぞれ示す。

Mode 1 [Fig. 6(a)]: 奇数番号スイッチがオン、偶数番号スイッチがオフとなる。PV1 の電圧 V_{PV1} は C_1 と C_2 の電圧 V_{C1}

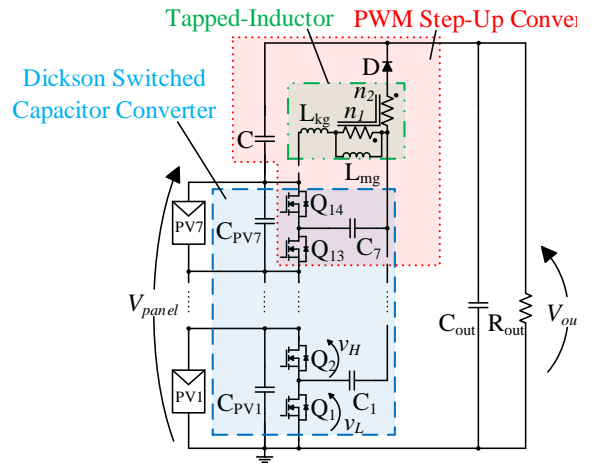


Fig. 4. Proposed converter for seven substrings.

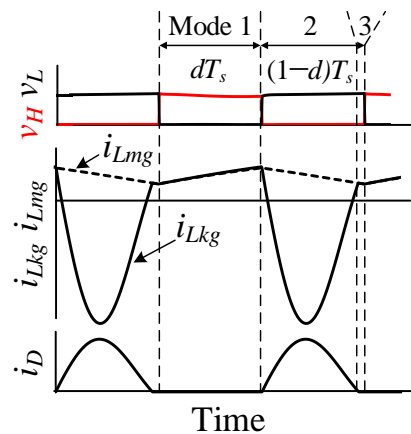


Fig. 5. Theoretical key operation waveforms.

と V_{C2} を用いて次式で表すことができる。

$$V_{PV1} = V_{C1} - V_{C2} \dots \dots \dots (1)$$

励磁インダクタンス L_{mg} の電圧 v_{Lmg} は、サブストリング PV7 の電圧 V_{PV7} と C_7 の電圧 V_{C7} を用いて次式で表せる。

$$v_{Lmg} = V_{PV7} - V_{C7} \dots \dots \dots (2)$$

L_{mg} の電流 i_{Lmg} は直線的に増加し、TI はエネルギーを蓄える。 D は導通せず、TI の 2 次側に電流が流れないため i_{Lmg} と漏れインダクタンス L_{kg} の電流 i_{Lkg} は等しくなる。

Mode 2 [Fig. 6(b)]: 奇数番号スイッチがオフ、偶数番号スイッチがオンとなる。PV2 の電圧 V_{PV2} は V_{C1} と V_{C2} の和に等しくなり、以下で表される。

$$V_{PV2} = V_{C1} + V_{C2} \dots \dots \dots (3)$$

式(1), (3)より

$$V_{PV1} = V_{PV2} \dots \dots \dots (4)$$

同様の原理で全てのサブストリング電圧が等しくなるため、電気特性は疑似的に均一化される。

$$V_{PV1} = V_{PV2} = \dots = V_{PV7} \dots \dots \dots (5)$$

また、 L_{mg} と C_7 は並列接続されるため、

$$v_{Lmg} = -V_{C7} \dots \dots \dots (6)$$

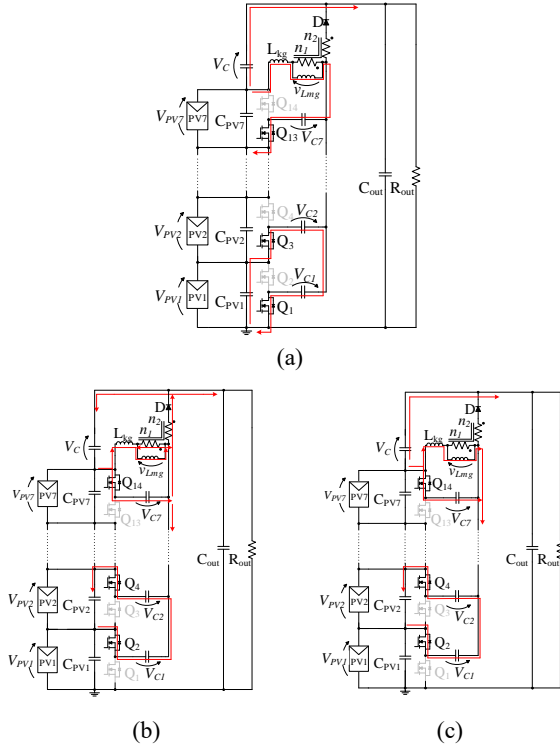


Fig. 6. Current flow directions in (a) Mode 1, (b) Mode 2, and (c) Mode 3.

v_{Lmg} の極性は Mode 1 と反転するため、 i_{Lmg} は直線的に減少し、TI はエネルギーを放出する。 L_{kg} と C_1 ~ C_7 が共振し、 i_{Lkg} は正弦波状に変化する。また、D が導通することで TI の 2 次側に電流が供給される。TI の 2 次巻線電圧は 1 次巻線の N 倍となる。

Mode 3 [Fig. 6(c)]: D は導通せず i_{Lkg} と i_{Lmg} の値が等しくなり、どちらも直線的に減少する。SCC 部の電流経路は Mode 2 と同じである。奇数番号スイッチがオン、偶数番号スイッチがオフとなることで Mode 1 に戻る。

Mode 1 から Mode 3 を繰り返すことで、サブストリングの電気特性は自動的に均一化され、パネルの発電量を向上させることができる。

〈3・2〉 昇圧比の導出 提案回路の理論昇圧比は L_{mg} の電圧時間積により求まる。式(2), (6)より、 L_{mg} の電圧時間積は d を用いて次式で表せる。

$$d(V_{PV7} - V_{C7}) + (1 - d)(-V_{C7}) = 0 \dots\dots\dots(7)$$

Fig. 6(b)に示すように、C は C_7 と TI の 2 次巻線との直列接続により D を介して充電される。TI の 2 次巻線電圧は NV_{C7} と表せるため、C の電圧 V_C は次のように求まる。

$$V_C = NV_{C7} + V_{C7} \dots\dots\dots(8)$$

全サブストリングの電圧は等しいため、パネル電圧 V_{panel} は

$$V_{panel} = 7V_{PV7} \dots\dots\dots(9)$$

式(7), (8), (9)より V_C は次式で表せる。

$$V_C = \frac{d(1+N)V_{panel}}{7} \dots\dots\dots(10)$$

V_{panel} と V_C の電圧の和は出力電圧 V_{out} と等しいことから、昇

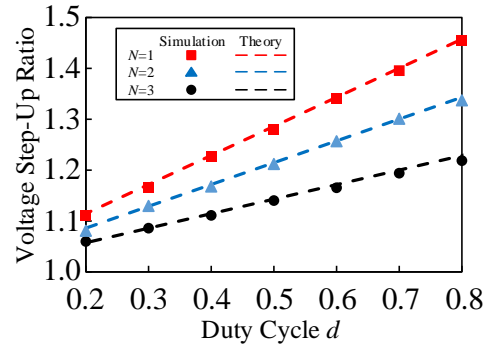


Fig. 7. Theoretical and simulated voltage step-up ratios as a function of duty cycle d .

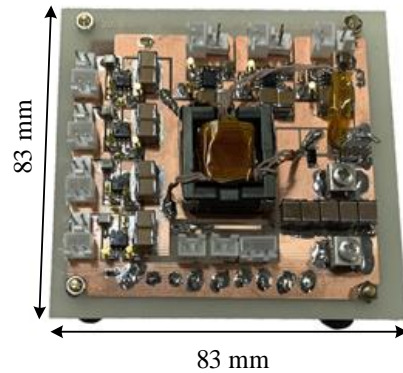


Fig. 8. Photograph of 200-W prototype for seven substrings.

圧比は以下のように求まる。

$$\frac{V_{out}}{V_{panel}} = 1 + \frac{d(1+N)}{7} \dots\dots\dots(11)$$

式(11)における分母の 7 は、パネルを構成するサブストリング数を表し、サブストリング数の増加に伴い昇圧比が低下することがわかる。一方、 N を大きくすることで昇圧比を任意に上昇させることができるため、従来統合型コンバータと比較して高い昇圧比を得ることができる⁽⁶⁾。

式(11)から得た理論昇圧比とシミュレーション結果の比較を Fig. 7 に示す。シミュレーション結果が理論特性と良い一致を示すことから、提案回路の昇圧範囲は TI の N を変更することで任意に調節可能であることが示された。

4. 実機検証

〈4・1〉 試作回路 定格電力 200 W の 7 直列サブストリング用試作回路を Fig. 8 に示す。使用した素子を Table 1 に示す。実車に搭載される補器類用バッテリーを想定し、 V_{out} は 48 V とした。 $d=0.5$ においてパネルが MPP 電圧 38 V で動作するよう、式(11)から TI の N は $3(=18/6)$ とした。

〈4・2〉 補償実験 ソーラーアレイシミュレータ (Keysight Technologies, E4360A) を使用し、PV1 に 15% の

Table 1. Component values.

Component	Value
$C_{PV1-C_{PV7}}$	Ceramic Capacitor, 220 μF
C_1-C_7	Ceramic Capacitor, 15 $\mu\text{F} \times 2$
C_{out}	Ceramic Capacitor, 22 $\mu\text{F} \times 4$
C	Ceramic Capacitor, 100 $\mu\text{F} \times 3$
D	Schottky Barrier Diode $V_f = 0.44 \text{ V}$
Tapped-Inductor	$n_1:n_2 = 6:18$, $L_{kg} = 0.22 \mu\text{H}$, $L_{mg} = 29.4 \mu\text{H}$
MOSFET	FDS6990A, $R_{DS(ON)} = 31 \text{ m}\Omega$
Gate Driver	UCC27201D

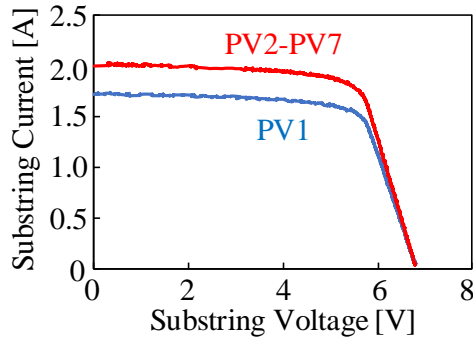


Fig. 9. Individual substring characteristics.

短絡電流低下が生じた状況を模擬した。実験で使用した各サブストリングの電気特性を Fig. 9 に示す。パネルの開放電圧を 47.6 V に設定し、 $d = 0.5$ において負荷 R_{out} を短絡から開放状態まで変化させることでパネル特性を走査した。

補償実験時の動作波形を Fig. 10 に示す。Fig. 5 の理論動作波形と良い一致を示したことから、試作回路の正常な動作を確認した。

取得した提案回路の有無によるパネルの $P-V$ 特性を Fig. 11 に示す。提案回路を用いない場合、2つの MPP が観測され、最大電力は 58.8 W であった。一方、提案回路を用いることで MPP は 1 点に収束し、発電電力は 64.1 W に上昇した。これは 8.3% の発電量向上に相当する。以上の結果より、提案回路は電気特性ばらつきの悪影響を解消可能であることが示された。

5. まとめ

ディクソン SCC 補償器と昇圧型 PWM コンバータを 1 台に集約しつつ、TI を採用した PHEV 用統合型コンバータを提案した。提案回路は TI の N を調整することで任意の昇圧比を実現する。加えて、2つのスイッチを共有しつつ 2 台のコンバータを 1 台に統合することで、回路の小型化、低コスト化、システムの簡素化を達成する。

定格電力 200 W の 7 直列サブストリング用試作回路を用いて、1つのサブストリングに 15% の短絡電流低下を模擬した補償実験を行った。提案回路を用いることで MPP が 1 点に収束し 8.3% の発電量向上を達成した。

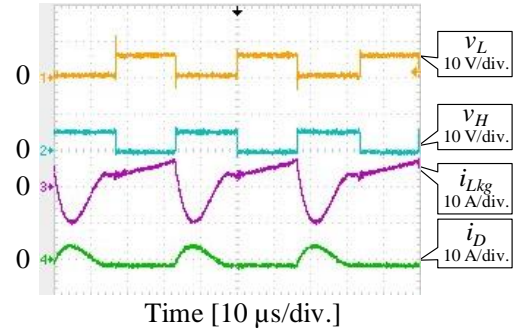


Fig. 10. Measured waveforms.

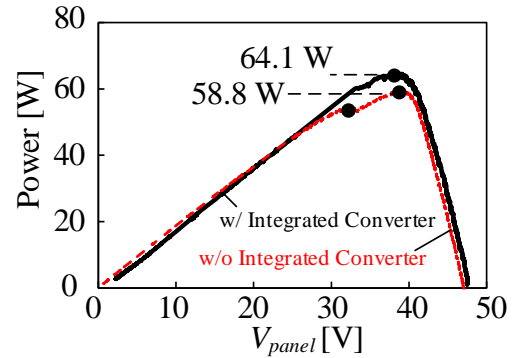


Fig. 11. $P-V$ characteristics of the panel with/without proposed converter.

文 献

- (1) F. Wang, T. Zhu, F. Zhuo, H. Yi, and Y. Fan: "Enhanced simulated annealing-based global MPPT for different PV systems in mismatched conditions," *J. Power Electron.*, Vol. 17, No. 5, pp. 1327-1337 (2017)
- (2) H. J. Bergveld, D. B uthker, Castello, T. Doorn, A. D. Jong, R. V. Otten, and K. D. Waal: "Module-level DC/DC conversion for photovoltaic systems: the delta-conversion concept," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 4, pp. 2005-2013 (2013)
- (3) C. Olalla, D. Clement, M. Rodriguez, and D. Maksimovic: "Architectures and control of submodule integrated DC-DC converters for photovoltaic applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 6, pp. 2980-2997 (2013)
- (4) J. T. Stauth, D. Seeman, and K. Kesarwani: "Resonant switched-capacitors for sub-module distributed photovoltaic power management," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 3, pp. 1189-1198 (2013)
- (5) Y. Shang, B. Xia, F. Lu, C. Zhang, N. Cui, and C. C. Mi: "A switched-coupling-capacitor equalizer for series-connected battery strings," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, No. 10, pp. 7694-7706 (2017)
- (6) M. Yamamoto and M. Uno: "Transformerless PWM converter integrating voltage equalizer for battery and photovoltaic systems," *IEICE*, Vol. 116, No. 329, pp. 5-10 (2016)