

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12101  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2018～2020  
課題番号：18K04078  
研究課題名（和文）電気特性均一化により太陽電池システムの発電量向上を実現するモジュラー補償器の開発

研究課題名（英文）Modular Differential Power Processing Converter to Enhance Energy Yield of Photovoltaic Panels

研究代表者  
鵜野 将年（Uno, Masatoshi）  
茨城大学・理工学研究科（工学野）・准教授

研究者番号：70443281  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：多直列接続の太陽電池パネルで構成されるストリングに部分影が生じると、ストリング全体の発電量の大幅低下を招く。部分影による悪影響を解消する為に様々な部分影補償器が研究されているが、パネルの直列数変更の際には再設計を要するため拡張性に課題を有する。本研究では、パネルレベルとモジュールレベルの2レベルで補償を行い、モジュールを追加することで回路の再設計を要することなく任意にパネル数を拡張可能な補償器を開発した。試作回路を用いて部分影が発生した状況を模擬した屋内補償実験及びフィールドテストを行った結果、最大抽出電力の向上を確認したことから提案補償器の有効性が示された。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究のセルレベル補償器では、従来では無用の長物として扱われていたセルの拡散容量を積極利用する。この概念は他の補償器のみならず太陽電池用電力変換器への応用可能性を秘めており、その学術的意義は非常に高い。また、パネルレベル補償器で採用するSCCモジュラー手法は報告例のない独創的技術であり、様々な分野におけるSCCに応用可能なものである。本研究で開発した補償器を採用することで、小規模から大規模まであらゆる太陽光発電システムにおいて、部分影が発生した状況下で発電量を20%前後向上させることができる。

研究成果の概要（英文）：We developed the modular differential power processing (DPP) converter that consists of module- and panel-level converters. The proposed DPP converter system can be extended by adding modules and module-level converters without redesigning converters. Experimental tests using a prototype demonstrated the energy yield enhancement of partially-shaded photovoltaic strings.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：太陽電池 コンバータ 電力変換 部分影 スイッチトキャパシタ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一般的な太陽電池パネルは2~3のサブストリングにより構成される。パネルの一部に部分的に影が生じて各サブストリングの電気特性に差異が生じた場合、Fi. 1 左に示すように特性の最も劣るサブストリングによりパネル全体の発電量が著しく低下することが深刻視されている(10%面積相当の影や特性ばらつきにより30%程度の発電量低下)。

近年では太陽光エネルギーの更なる有効活用を目指し、PHEV 車体屋根やフレキシブルパネル等、湾曲面へパネルが適用され始めている (Fig. 2)。湾曲面ではサブストリングのみならずセルに対する太陽光入射角も異なり電気特性が常に不均一となるため、部分影と同様の問題が生じる。また、先進的用途 (Fig. 2 右のソーラーロード等) の多くでも部分影や湾曲に起因した問題が生じる。

部分影に起因する悪影響を回避するために「補償器」の研究が盛んに行われている (Fig. 1 右)。補償器は電力変換回路の一種であり、電気特性の不均一の程度に応じて補償器を介してサブストリング間で電力伝送を行うことで全サブストリングの電気特性を疑似的に均一化する。これによりパネルの発電量を飛躍的に向上できる(条件によっては30%以上の向上)。

従来では、主にパネル内のサブストリングの電気特性を均一化するための「サブストリングレベル」の補償器の研究が行われてきた。しかし、Fig. 2 のように太陽電池の急速な用途拡大に対応するためにはサブストリングよりも細かな単位で特性を均一化する「セルレベル」の補償器や、中大規模システム用には「パネルレベル」の補償器の開発が望まれている。

セル及びパネルレベル補償器の技術的課題について、3 サブストリング(72 セル)で構成される標準パネルを例に説明する。従来補償器をセルレベルおよびパネルレベル補償器へと応用する際の問題点を表 1 に纏める。各補償器ではサブストリング数に比例したインダクタやコンデンサ等の多数の受動素子が必要のため、セルレベル補償器へと応用するには受動素子数の増加に伴う回路の大型化・高コスト化が課題となる。また、電力伝送が隣接サブストリング間に限定される方式をパネルレベル補償器へ応用する場合、必然的に補償能力が低下してしまう。任意のサブストリング間で電力伝送が可能な方式は高い補償能力を有するものの、高耐圧化に伴う回路の大型化や性能低下が懸念される。また、システムで用いられるパネル枚数は用途により大きく異なるためパネルレベル補償器には拡張性が求められるが、従来補償器はパネル数に応じた設計変更が必要のため拡張性を損ねてしまう。このように、従来補償器をセルレベル及びパネルレベル補償器に応用しようとする

と多くの課題に直面する。

2. 研究の目的

設計変更を要することなくシステムの規模や用途に応じて補償器を柔軟に拡張することが可能なセルレベル及びパネルレベル SCC 式モジュール補償器を開発する。セルレベル SCC 補償器では、太陽電池セルの拡散容量をコンデンサとして積極利用することで受動素子レスの回路構成を実現し、補償器の小型・低コスト化を実現する。一方、パネルレベル SCC 補償器は、モジュール方式の採用により素子の高耐圧化を招くことなくシステムを拡張することができ、様々な用途に柔軟に対応できる。

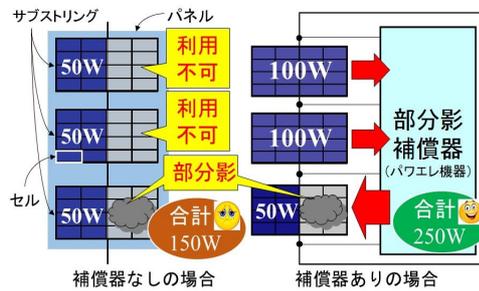


Fig. 1. 部分影による発電量低下 (左) と補償器による発電量向上 (右)

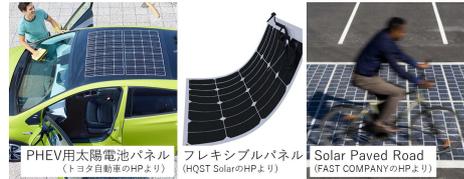


Fig. 2. 太陽電池パネルの用途拡大

Table 1. 従来方式の比較とセル/パネルレベル補償器へ応用する際の課題

方式	PWMコンバータ	Ladder SCC	Dickson SCC	多段接続コンバータ	LLC倍電圧回路
回路構成					
電力伝送	隣接サブストリングの間	隣接サブストリングの間	任意のサブストリング間	任意のサブストリング間	任意のサブストリング間
セルレベル	多数のインダクタによる大型化	多数のコンデンサが必要	多数のコンデンサが必要	多数のインダクタによる大型化	多数のコンデンサが必要
パネルレベル	補償性能低下	補償性能低下	素子の高耐圧化	素子の高耐圧化	素子の高耐圧化
拡張性	○	○	△	△	×

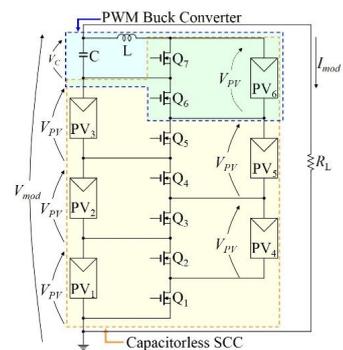


Fig. 3. セルレベル補償器

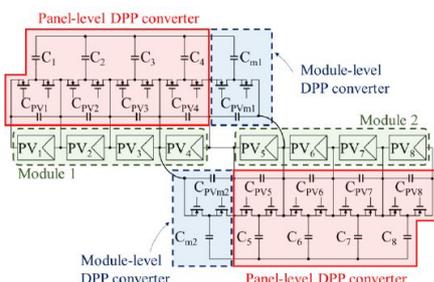


Fig. 4. パネルレベル補償器

### 3. 研究の方法

#### (1) セルレベル補償器

Table 1 で示したように、セルレベル補償器ではセル数に比例した多数の受動素子が必要のため、これらの小型化もしくは点数削減が重要である。本研究では小型化・部品点数削減の究極形態として、セルの拡散容量を利用することで受動素子レスの回路を実現するセルレベル SCC 補償器を開発する。一般的に太陽電池セルは拡散容量と呼ばれる寄生素子を有しており、その容量は数十  $\mu\text{F}$ ~数  $\text{mF}$  程度である。これを SCC のコンデンサとして利用することで受動素子レスの補償器を構成し、小型・低コスト化を実現する (Fig. 3)。

#### (2) パネルレベル補償器

Table 1 で示したように、パネルレベル補償器として望ましい特性は、任意のサブストリング間で電力伝送が可能で素子の高耐圧化を回避でき、且つ、拡張性に富む方式である。これら全ての要求を満たすために、本研究ではモジュラー式パネルレベル SCC 補償器を開発する。Fig. 4 は Dickson SCC を基礎としたモジュラー式パネルレベル補償器を 4 パネルから 8 パネルへ拡張する様子を示したものである。

回路構成は Table 1 の Dickson SCC (任意サブストリング間での電力伝送が可能) に相当し、これを単位回路として用いつつ「接続回路」を介して単位回路を多段接続することで多直列パネルに対応できる。接続回路の採用によりコンデンサの高耐圧化を回避できるため、従来方式と比べて大幅な小型化を実現できる (理論的に 5 分の 1 程度)。また、モジュラー構成により、単に単位回路を介して多段接続するだけでシステムの大規模化にも対応することができる。即ち、補償器単体の設計変更を行うことなくシステムを拡張できるため、様々な用途に柔軟に応用できる。

### 4. 研究成果

#### (1) セルレベル補償器

6 セル用試作回路を製作し、PV1 に約 50% の影が掛かった状態を模擬してフィールドテストを実施した。スイッチング周波数を 40 kHz、 $d = 0.1$  とした場合のモジュール特性を Fig. 5 に示す。比較のため、補償器を用いない場合 (全セルを直列接続し、バイパスダイオードを使用) のモジュール特性も併せて取得した。補償器無しの場合では複数の MPP が発生し、最大抽出可能電力は 5.38 W であった。一方、提案補償器を用いることで MPP は 1 点に収束し、且つ、最大抽出可能電力は 6.73 W まで増加したことから、提案補償器の有効性が示された。

PV<sub>2</sub> と PV<sub>5</sub> に約 30% の影が掛かった状態を模擬してフィールドテストを実施した。Fig. 6 にその実験系を示す。2 重最大電力点追尾 (MPPT) 制御の実験結果を Fig. 6 に示す。MPPT 制御には山登り法を採用した。デューティは電圧及び電流の変動に合わせておよそ 3 レベルで変化する一方、 $d$  は  $0.3 < d < 0.45$  の範囲で変化し、その時の電力は 10.2 W であった。2 重 MPPT 制御の有効性を示すために、後半は補償器を  $d = 0.1$  の固定値で動作させ、昇圧コンバータのみに対して MPPT 制御を行った。補償器の非最適  $d$  での動作により損失は増加し電力が 9.8 W まで低下したことから、2 重 MPPT 制御の有効性が示された。

#### (2) パネルレベル補償器

Fig. 8 に示す 60 W 試作回路を製作した。本回路は 1 モジュール 4 パネル構成を想定したものである。モジュラー構成で用いる場合、モジュール間はケーブルで接続する。電力変換効率と出力特性の取得、屋内補償実験とフィールドテストにおいて試作回路は駆動周波数を 100 kHz、デューティ  $d = 0.5$  に設定した。

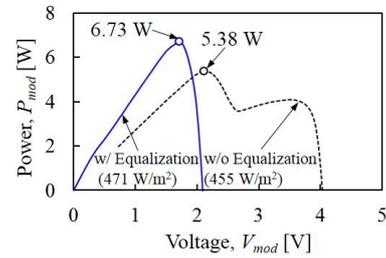


Fig. 5. セルレベル補償器の実験結果

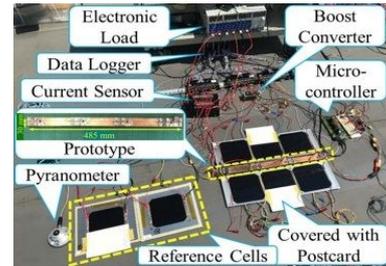


Fig. 6. セルレベル補償器の実験系

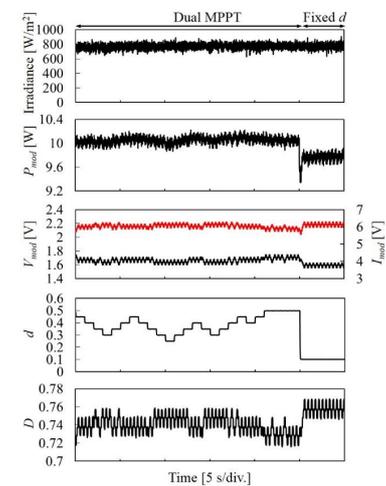


Fig. 7. セルレベル補償器を用いた 2 重 MPPT 制御実験結果

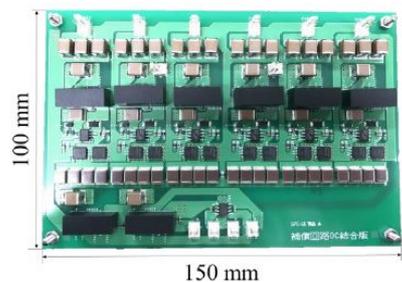


Fig. 8. パネルレベル補償器の試作回路

昇圧コンバータのみに対して MPPT 制御を行った。補償器の非最適  $d$  での動作により損失は増加し電力が 9.8 W まで低下したことから、2 重 MPPT 制御の有効性が示された。

パネルの電気特性を模擬可能なソーラーアレイシミュレータ（パネルの電気特性を模擬可能なソーラーアレイシミュレータ（Keysight Technologies、E4361A）を用いて屋内補償実験を行った。

Fig. 9 に補償器の有無によるストリングの特性を示す。赤線が補償器無し、黒線が補償器有りの時のストリング特性を表している。補償器を用いない場合、最大抽出電力は 868 W であったのに対し、補償器を用いることで MPP が 1 点に収束し、1048 W に向上した。これは電力向上率 20.7% に相当し、最大抽出電力の割合を表すパネルの利用率は 99.6% (= 1048/1052 W) に到達した。

12 直列パネルで構成されるストリングを形成しフィールドテストを行った (Fig. 10)。フィールドテストは 2019 年 5 月 30 日の 13 時頃で天気は快晴であった。日射計 (ES-602、EKO) で計測した実験時の平均日射量は 898 W/m<sup>2</sup> (補償無し) と 911 W/m<sup>2</sup> (補償有り) であった。モジュール内、モジュール間で特性にばらつきが生じるように養生テープを用いて部分影を模擬した。

補償器の有無により取得したストリングの特性を Fig. 11 に示す。赤色の点線が補償器無し、黒色の実線が補償器有りの時のストリング特性を表している。補償器を用いない場合、MPP が複数個発生し、最大抽出電力は 2127 W であった。一方で、補償器を用いることで MPP が 1 点に収束し 2405 W に向上した。これは電力向上率 13.1% に相当する。これよりフィールドテストにおいて提案補償器の有効性を確認した。

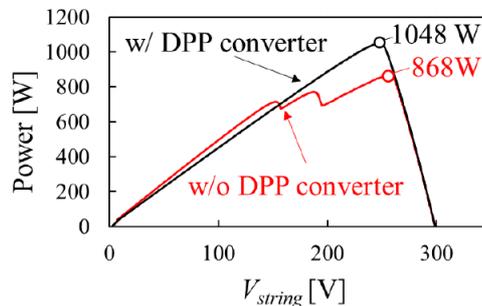


Fig. 9. パネルレベル補償器を用いた屋内実験結果



Fig. 10. パネルレベル補償器を用いたフィールドテスト

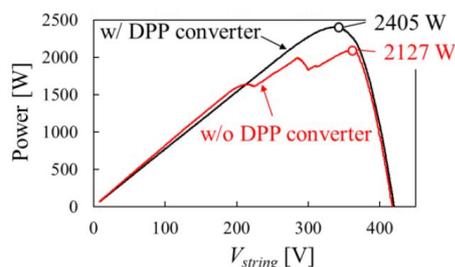


Fig. 11. パネルレベル補償器を用いたフィールドテスト結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masatoshi Uno, Masaya Yamamoto, Hayato Sato, Susumu Oyama	4. 巻 35
2. 論文標題 Modularized differential power processing architecture based on switched capacitor converter to virtually unify mismatched photovoltaic panel characteristics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power Electronics	6. 最初と最後の頁 1563-1575
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPEL.2019.2922504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masatoshi Uno, Toru Nakane, Toshiki Shinohara	4. 巻 8
2. 論文標題 LLC resonant voltage multiplier-based differential power processing converter using voltage divider with reduced voltage stress for series-connected photovoltaic panels under partial shading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/electronics8101193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masatoshi Uno, Yota Saito, Shinichi Urabe, Masaya Yamamoto	4. 巻 vol. 34, no. 11
2. 論文標題 PWM Switched Capacitor-Based Cell-Level Power Balancing Converter Utilizing Diffusion Capacitance of Photovoltaic Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power Electronics	6. 最初と最後の頁 10675-10687
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPEL.2019.2895767	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masatoshi Uno, Yusuke Sasaki	4. 巻 vol. 10, no. 1
2. 論文標題 PWM boost converter integrating differential power processing converter to enhance energy yield of photovoltaic panels under characteristic mismatch conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 91-99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejia.20007561	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masatoshi Uno, Hayato Sato, Tatsuaki Ishikawa	4. 巻 vol. 69, no. 12
2. 論文標題 Differential power processing converter enhancing energy yield of curved solar roofs of plug-in hybrid electric vehicles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 14689-14700
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2020.3034715	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masatoshi Uno, Kazuma Honda	4. 巻 1
2. 論文標題 Panel-to-substring differential power processing converter with embedded electrical diagnosis capability for photovoltaic panels under partial shading	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power Electronics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPEL.2021.3064706	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 佐々木優介、佐藤颯人、鶴野将年
2. 発表標題 太陽電池パネルの発電量を向上可能な、過電流保護機能付き直列共振形モジュラー補償器
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木優介、佐藤颯人、鶴野将年
2. 発表標題 太陽電池パネルの発電量を向上可能な、過電流保護機能付き直列共振形モジュラー補償器の開発
3. 学会等名 電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤颯人、鶴野将年
2. 発表標題 太陽電池パネルの電気特性ばらつきを補償可能なDCモジュラースイッチトキャパシタコンバータとその制御アルゴリズムの提案
3. 学会等名 電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤颯人、鶴野将年
2. 発表標題 太陽電池パネルの電気特性ばらつきを補償可能なDC モジュラースイッチトキャパシタコンバータ
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤颯人、鶴野将年
2. 発表標題 太陽電池パネルの電気特性ばらつきを補償するモジュラースイッチトキャパシタコンバータ
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤陽太、鶴野将年、浦部心一
2. 発表標題 太陽電池セルの拡散容量を利用したスイッチトキャパシタ式セルレベル部分影補償器とその最大電力点追尾制御手法の開発
3. 学会等名 電子通信エネルギー技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤陽太、鶴野将年、浦部心一
2. 発表標題 太陽電池セルの拡散容量を利用したスイッチトキャパシタ式セルレベル部分影補償器の直流等価回路による詳細解析
3. 学会等名 電気学会茨城支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yota Saito, Masatoshi Uno, Masaya Yamamoto, Shinichi Urabe
2. 発表標題 Loss analysis and field testing under various partial shading conditions for switched capacitor-based cell-level power balancing utilizing diffusion capacitance of photovoltaic cells
3. 学会等名 IEEE 18th Int. Conf. Power Electron.Motion Control
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masatoshi Uno, Masaya Yamamoto
2. 発表標題 Modularized Equalization Architecture Based on Switched Capacitor Converter to Virtually Unify Mismatched Photovoltaic Panel Characteristics
3. 学会等名 International Power Electronics Conference (IPEC), ECCE-Asia
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masatoshi Uno, Yota Saito, Masaya Yamamoto, Shinichi Urabe
2. 発表標題 Dual MPPT Control and Field Testing for Switched Capacitor-Based Cell-Level Power Balancing Utilizing Diffusion Capacitance of Photovoltaic Cells
3. 学会等名 International Power Electronics Conference (IPEC), ECCE-Asia
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------