

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820118

研究課題名(和文) 少数個のスイッチで複数の低リップル出力を供給可能な太陽電池用部分影補償器の開発

研究課題名(英文) Single- or double-switch voltage equalizers with multiple low ripple-current outputs for partially-shaded photovoltaic modules

研究代表者

鵜野 将年 (Uno, Masatoshi)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：70443281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：少数個のスイッチで構成可能な太陽電池用部分影補償器の開発を行った。1)昇降圧コンバータ多段接続方式、2)共振形倍電圧整流回路方式、の主に2種類の部分影補償器を対象とし、詳細解析ならびに検証実験を実施した。いずれの方式でも部分影による悪影響を防止可能であり、本研究で開発した部分影補償器の有用性が確認された。また、共振形倍電圧整流回路を用いた部分影補償器は、補償器内のスイッチや磁性素子を共通部品として汎用PWMコンバータと統合し、「統合型コンバータ」としての動作も可能である。統合型コンバータは回路素子数の更なる削減のみならず、コンポーネント数削減によるシステムの簡素化も実現可能な方式である。

研究成果の概要(英文)：Voltage equalizers for partial-shading compensation that can be composed of a few switches were developed for series-connected photovoltaic modules. Detailed operation analyses and experimental verifications were performed for two major topologies: multi-stacked buck-boost converters-based and resonant voltage multiplier-based voltage equalizers. The detailed operation analyses and experimental results revealed that both equalizers can effectively preclude negative impacts of partial shading and the efficacy of the developed voltage equalizers was demonstrated. Furthermore, the resonant voltage multiplier-based equalizer can be integrated with an ordinary PWM converter by sharing switches and a magnetic component, deriving a novel integrated converter. The integrated converter not only further reduces the circuit element count but also realizes the system-level simplification by integrating a PWM converter and voltage equalizer into a single unit.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：太陽電池 部分影 昇降圧コンバータ 共振形倍電圧整流回路 統合型コンバータ

1. 研究開始当初の背景

太陽光エネルギーを最大限に活用するためには、パワーコンディショナ等を用いて太陽電池モジュールを最大電力点 (MPP: Maximum Power Point) で動作させる必要がある。複数のモジュールを直列に接続しストリングを構成して使用する場合、一部のモジュールに影がかかる「部分影」の影響により各モジュールの電気特性にアンバランスが生じる。特性のアンバランスはストリング全体としての利用可能電力の大幅な低下を招くのみならず、パワーコンディショナがストリングを真の MPP とは異なる非最適点で動作させてしまう恐れを引き起こす。

近年、部分影による特性劣化を防止可能な部分影補償器が大きな注目を集めている。部分影補償器は影の掛かっていないモジュールから部分影を有するモジュールへと電力伝送を行うことで擬似的に全てのモジュール特性を均一化させ、ストリング全体としてはあたかも部分影が発生していないように振る舞うことができる。各種の部分影補償器が提案されているが、いずれも下記のいずれかの課題を有している：モジュール毎に補償器が必要であり、且つ、各補償器内では複数個のスイッチが必要のため回路構成が複雑化する、電力伝送が隣接するモジュール間に限られているため、モジュールの直列数が多い場合には複数のモジュールを経由して電力伝送が行われる過程で損失が大きくなる。

2. 研究の目的

太陽光発電システムは十年以上に渡る長期運転が求められるため、信頼性確保が重要な課題となる。信頼性向上のためには回路構成の簡素化ならびに電解コンデンサレス化が必須であり、リップル電流の低減は電解コンデンサレス化に有効な手段である。

以上の背景を鑑みて、本研究では回路構成が簡素 (少数個のスイッチで構成可能) であり、且つ、ストリングを構成する各モジュールに対して低リップル電流を供給可能な新規の部分影補償器の開発を行う。

3. 研究の方法

高信頼性のためには回路構成の簡素化が重要である。一般的にスイッチつあたりに対し駆動回路用の多数の素子や補助電源が必要となるため、スイッチ数の削減は信頼性向上において有効な手段であると考えられる。よって、本研究では少数個のスイッチで構成可能であり、且つ、低リップル電流出力による電解コンデンサレス化を実現可能な部分影補償器に焦点を当てる。また、少数個のスイッチで複数の太陽電池モジュールに対する供給電流を適切に制御可能な制御手法の確立も行う。

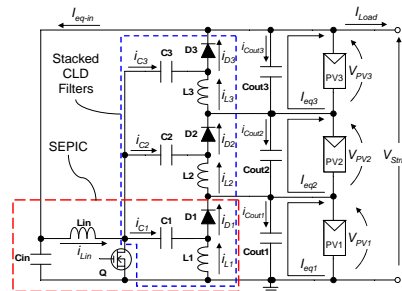
具体的には、昇降圧コンバータ多段接続方式、共振形多段倍電圧整流回路方式、の

2 種類の方式を基礎とした部分影補償器に焦点を当て、詳細解析ならびに検証実験を実施した。

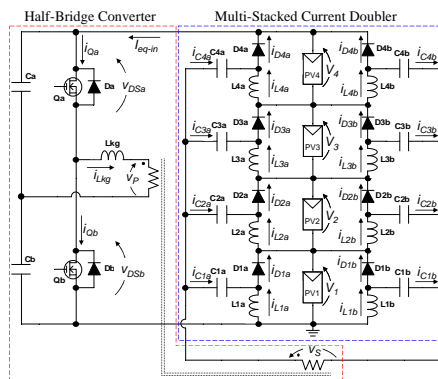
4. 研究成果

の昇降圧コンバータ多段接続方式では一石式もしくは二石式の回路構成が可能である。一石式回路では、汎用的な昇降圧コンバータ (例えば SEPIC) に対し C と L と D からなるフィルタ回路を多段接続した構成となる (Fig. 1(a))。後述の二石式と比較して各モジュールへの供給電流のリップルは大きくなる傾向にある。二石式回路では、トランスを用いて二次側回路を多段接続カレントダブルラとすることで各モジュールに対する供給電流の低リップル化を実現可能である反面、トランスが必要となるのに加えて素子数も大幅に増加する (Fig. 1(b))。各種検討の結果、一石式方式ではリップル電流吸収のために比較的容量の大きな平滑用セラミックコンデンサが必要となるが、部分影補償器に要求される電力容量ではセラミックコンデンサの容量増は大きな問題とはならず、回路構成の簡素性 (信頼性) やコストならびにサイズを含めた総合的観点では二石式よりも一石式回路の方が優れていると結論づけた。よって、各種制御手法に関する検討や実験は一石式方式に対して実施した。

一石式昇降圧コンバータ多段接続方式の部分影補償器では、部分影の発生しているモジュールのみに補償電流を供給するための新たな制御手法が必要となる。本研究では、A 電流制御方式と B 電圧差制御方式、の 2 つ



(a) Single-switch equalizer using multi-stacked SEPICs.



(b) Two-switch equalizer using multi-stacked current doublers.

Fig. 1. Developed voltage equalizers based on multi-stacked buck-boost converters.

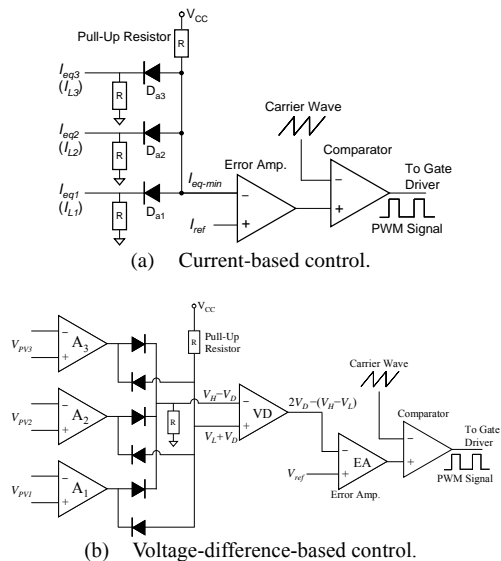


Fig. 2. Feedback control loops used for voltage equalization.

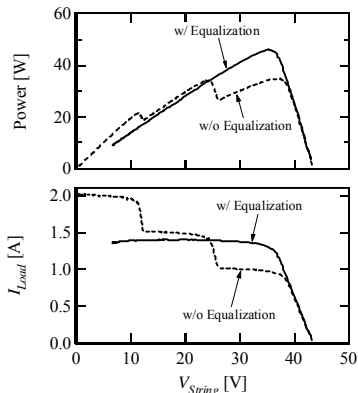


Fig. 3. Comparison between string characteristics with and without the single-switch voltage equalizer using the multi-stacked SEPICs with voltage-difference-based control.

の制御手法を提案し、実験による検証を行った。それぞれの制御手法を用いた際のフィードバック制御ループを Fig. 2 に示す。A の電流制御方式では、補償器から日照モジュール（影なしのモジュール）に供給される補償電流が微小値となるよう制御を行うことで、影モジュールに十分な補償電流を供給しつつ日照モジュールに供給される不要な補償電流を最低限に抑制するものである。この制御手法では全モジュールの電圧はほぼ完全に均一化されるため優れた補償性能を実現可能である反面、モジュール数と同数の電流センサが必要となるためコストの観点では望ましくない。B の電圧差制御方式では補償時において日照モジュールと影モジュールの電圧差が任意の一定値となるよう制御を行う。補償時においてもモジュール間には電圧差が残存するため A の電流制御方式と比較して補償性能は若干劣るが電流センサが不要となるためコストの点で有利であり、より実用的な制御方式であると考えられる。

各種実験により提案回路方式の動作ならびに制御手法の妥当性を確認した。一例として、Fig. 1(a)の一石式部分影補償器に Fig. 2(b)

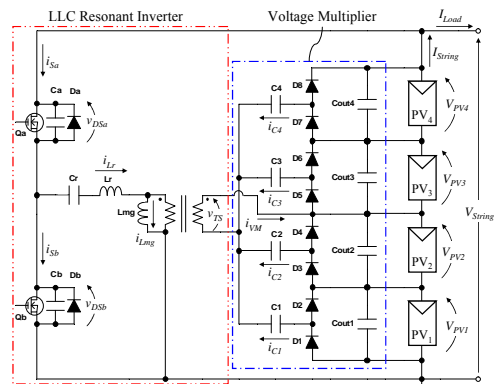


Fig. 4. Developed two-switch voltage equalizer using LLC resonant inverter and voltage multiplier.

の電圧差制御を適用した際における補償時ストリング特性を Fig. 3 に示す。補償器を用いることでローカル MPP は消滅し抽出可能電力は大幅に向上していることから、本部分影補償器の有効性が確認された。

の共振形倍電圧整流回路を用いた部分影補償器は二石式回路であるのに加えて必要な磁性素子もトランス一つのみであり、且つ、フィードバック制御も不要とすることができるため、非常に簡素な回路で補償器を構成することができる。この部分影補償器には各種の共振回路を用いることができるが、Fig. 4 に示す LLC 共振方式を採用することで全てのスイッチング動作をソフトスイッチング化可能なため高効率を達成することができる（ピークの電力変換効率 95%）。共振形倍電圧整流回路を用いた方式では、トランス二次側に対称型倍電圧整流回路を採用することで低リップル化を実現可能ではあるが、素子数の大幅な増加を招く。部分影補償器に要求される電力容量では低リップル化による平滑用セラミックコンデンサの低容量化よりも対称型回路採用による素子数増加に伴う高コスト化やサイズ増大による負の側面の方が大きいため、各種実験や詳細解析は Fig. 5 に示した非対称型の倍電圧整流回路に対して実施した。

二石式 LLC 共振形倍電圧整流回路を用いた部分影補償器の実験結果を Fig. 5 に示す。

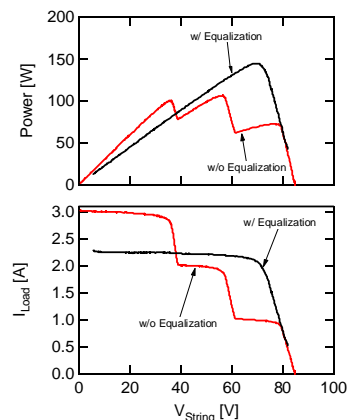


Fig. 5. Comparison between string characteristics with and without the two-switch equalizer using the LLC resonant voltage multiplier.

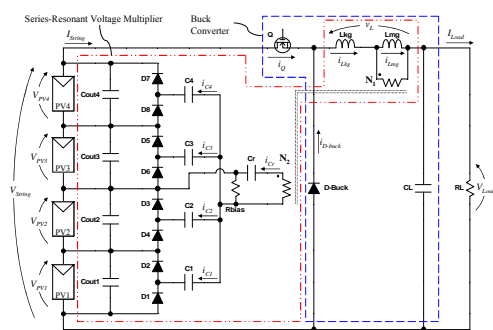


Fig. 6. PWM buck converter integrating series-resonant voltage multiplier for series-connected PV modules.

補償器によりローカル MPP は消滅し、抽出電力は大幅に増加していることから、本部分影補償器の有効性が確認できた。

共振形倍電圧整流回路を用いた部分影補償器は、スイッチや磁性素子を共通部品として汎用 PWM コンバータと統合することも可能である。Fig. 6 に示すように、部分影補償器と PWM コンバータを統合した「統合型コンバータ」ではトランスの励磁インダクタンスを PWM コンバータにおけるフィルター用インダクタとして活用する一方、漏洩インダクタンスは共振用インダクタとして機能する。PWM コンバータのスイッチングノードで発生する矩形波電圧を用いて共振回路を駆動させることで、部分影補償器自体としてはスイッチレスの回路として振る舞う。統合化により回路素子数ならびにシステム内のコンポーネント数を削減できるため、回路レベルのみならずシステムレベルでの簡素化が可能となる。

統合型コンバータに関する研究発表は、国内で 1 件、海外で 1 件の合計 2 件の論文発表賞を受賞しており、学術的価値の非常に高いものであると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

M. Uno and A. Kukita, "Single-switch voltage equalizer using multi-stacked buck-boost converters for partially-shaded photovoltaic modules," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 6, pp. 3091–3105, Jun. 2015. (査読有)

M. Uno and A. Kukita, "Two-switch voltage equalizer using an LLC resonant inverter and voltage multiplier for partially-shaded series-connected photovoltaic modules," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2, pp. 1587–1601, Mar./Apr. 2015. (査読有)

〔学会発表〕(計 9 件)

鶴野将年、久木田明夫, "昇降圧コンバータを多段接続した一石式部分影補償器の提案とその制御手法に関する検討" 電気学会全国大会、2015 年 3 月 24 日、東京都市大学 (東京都・世田谷区)

M. Uno and A. Kukita, "Single-switch

single-magnetic PWM converter integrating voltage equalizer for series-connected photovoltaic modules under partial shading," *IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE)*, Sep. 18, 2014, Pittsburg (USA)

鶴野将年、久木田明夫, "直列共振形多段倍電圧整流回路を用いた部分影補償器を統合した一石一磁性素子 PWM コンバータ" 電気学会産業応用部門大会、2014 年 8 月 28 日、東京電機大学 (東京都・足立区)

M. Uno and A. Kukita, "Single-switch PWM converter integrating voltage equalizer for photovoltaic modules under partial shading," *IEEE ECCE-Asia, IPEC Hiroshima*, May. 21, 2014, 広島国際会議場 (広島県・広島市)

M. Uno and A. Kukita, "Two-switch voltage equalizer based on half-bridge converter with multi-stacked current doublers for series-connected batteries," *IEEE ECCE-Asia, IPEC Hiroshima*, May. 20, 2014, 広島国際会議場 (広島県・広島市)

鶴野将年、久木田明夫, "PWM コンバータと部分影補償器を統合した一石式太陽電池用コンバータの提案" 電気学会全国大会、2014 年 3 月 20 日、愛媛大学 (愛媛県・松山市)

M. Uno and A. Kukita, "Two-Switch Partial shading compensator using resonant-inverter and voltage multiplier for series-connected photovoltaic modules," *ISAS Space Energy Symposium*, Feb. 14, 2014, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原市)

M. Uno and A. Kukita, "Single-switch voltage equalizer using multi-stacked SEPICs for partially-shaded series-connected PV modules," *IEEE Int. Telecommun. Energy Conf. (INTELEC)*, Oct. 16, 2013, Hamburg (Germany)

M. Uno and A. Kukita, "Two-switch voltage equalizer using series-resonant inverter and voltage multiplier for partially-shaded series-connected photovoltaic modules," *IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE)*, Sep. 19, 2013, Denver (USA)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称: 共振形インバータと多段倍電圧整流回路を用いた太陽電池部分影補償装置

発明者: 鶴野将年、久木田明夫

権利者: 宇宙航空研究開発機構

種類: 特許

番号: 特開 2015-056003 (特願 2013-188658)

出願年月日: 2013 年 9 月 11 日

国内外の別: 国内

名称：昇降圧コンバータを多段接続した太陽電池部分影補償装置
発明者：鶴野将年、久木田明夫
権利者：宇宙航空研究開発機構
種類：特許
番号：特開 2015-76528 (特願 2013-212217)
出願年月日：2013 年 10 月 9 日
国内外の別：国内

名称：コンバータと多段倍電圧整流回路を併用した、部分影補償機能を付加した統合型太陽電池用コンバータ
発明者：鶴野将年、久木田明夫
権利者：宇宙航空研究開発機構
種類：特許
番号：特願 2014-036983
出願年月日：2014 年 2 月 27 日
国内外の別：国内

[その他]

受賞 (計 2 件)

2015 年 電気学会全国大会優秀論文発表賞、発表題目「PWM コンバータと部分影補償器を統合した一石式太陽電池用コンバータの提案」

ECCE 2014 Oral Session Winner,
Presentation Title “Single-switch single-magnetic PWM converter integrating voltage equalizer for series-connected photovoltaic modules under partial shading”

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鶴野 将年 (UNO, Masatoshi)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：70443281

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し