

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05957

研究課題名(和文)分散MPPT機能を備えた電流リンク形PVシステム

研究課題名(英文)A new distributed MPPT technique using buck-only MICs linked with controlled string current

研究代表者

崔 通(SAI, TORU)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号：70633337

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光パネルを住宅の屋根などに設置した場合、障害物などにより一部の太陽光パネルが影になり太陽光発電システムの効率が悪化する問題(部分影の問題)がある。この問題を解決するには、各太陽光パネルにMIC(Module Integrated Converter, モジュール集積コンバータ)を接続し、各パネルの電力を最大化する必要がある。現在使用されている方式は、全て電圧リンク方式を利用するのでMICが複雑であり電解コンデンサがシステムの寿命を決めてしまう。提案構成は、電流リンク方式を利用することでMICをシンプルにでき、電流形インバータ(SiCを使用)を採用したことでシステムの信頼性を向上できる。

研究成果の概要(英文)：The operation of a distributed maximum power point tracking (DMPPT) photovoltaic (PV) system with a current source inverter (CSI) is confirmed. We proposed a current-linked distributed PV system instead of a voltage-linked one. All the previous studies of DMPPT PV systems use a voltage source inverter (VSI). The drawback of the power conditioning system (PCS) with a VSI is that it has to carry an electrolytic capacitor, which determines the life span of the PCS. By using a CSI, the reliability of the PCS is greatly improved; moreover, the module integrated converter (MIC) can consist of a buck-only converter. In this research, we implemented two cascaded MICs with a CSI and confirmed the operation of the entire current-linked distributed PV system. The experimental results agree strongly with the theory and it proves the validity of the proposed system.

研究分野：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：太陽光発電 PV 部分影 MPPT モジュール集積回路 MIC SiC 電流形インバータ

1. 研究開始当初の背景

太陽光発電は、メガソーラのみならず 1 MW 以下の小規模なシステムの市場が急速に拡大しつつある[引用文献]。小規模システムにおいては、図 1 のように、様々な屋根の形状に対応しなければならず、部分影の問題が必然的に生じる。



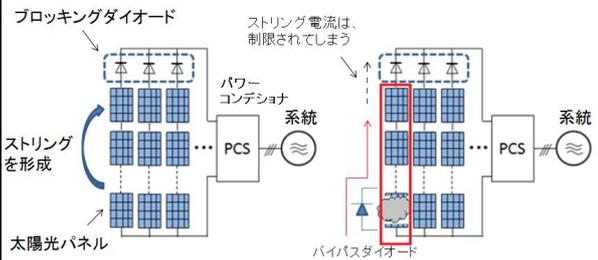
図 1. 住宅用太陽光パネル

2. 研究の目的

(1) 太陽光発電システムの効率を最大化するシステムの構築を目的とする。太陽光パネルを住宅の屋根やビルディングに設置した場合、日照条件や障害物により一部の太陽光パネルが影になり太陽光発電システムの効率が悪化する問題（部分影の問題）がある。この問題を解決するには、各太陽光パネルに MIC (Module Integrated Converter, モジュール集積コンバータ) を接続し、各太陽光パネルの電力を最大化する必要がある。現在使用されている方式は、全て電圧リンク方式を利用するので MIC が複雑であり電圧形インバータで用いられる電解コンデンサがシステムの寿命を決めてしまう。提案構成は、電流リンク方式を利用することで MIC をシンプルにでき、電流形インバータ (SiC を使用) を採用することでシステムの信頼性を向上できる。

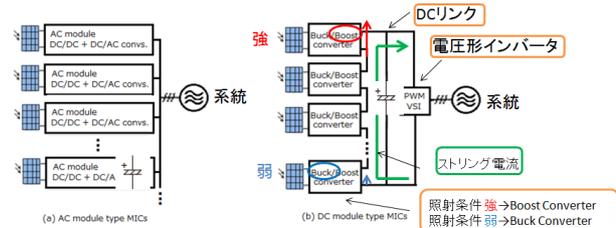
(2) 図 2 に標準的な太陽光発電システムを示す。図 2 (a) は、日照強度がバランスしている場合の図であり、図 2 (b) は、1 つのパネルに部分影が生じた場合の図である。図 2 (b) のように、1 つのパネルに部分影が生じた場合には、ストリングに流れる電流は部分影が生じたパネルの電流で制限されてしまう。これを解決するための最もコンベンショナルな方法は、各パネルにバイパスダイオードを接続し電流をパスする方法である。しかし、この方法では部分影が生じたパネルから電力を取り出せず、太陽光発電システムの電力を最大化できない。そのため、一般に図 3 のような分散方式が取られる。分散方式には AC モジュール方式と DC モジュール方式があり、本研究は DC モジュール方式をベースにしている。

従来方式は全て MIC とインバータとが制御電圧源でリンクされている電圧形インバータを前提としている。従来の電圧リンク DC モジュール方式[引用文献]の欠点は、図 3 (b) のように MIC が複雑で、寿命が短い電解コンデンサが必要な点である。



(a) 日照強度がバランスしている場合 (b) 一つのパネルに部分影が生じた場合

図 2. 標準的な太陽光発電システム



方式	ACモジュール：並列接続 (Enphase Energy社)	DCモジュール：直列接続 (Colorado University, Texas Instruments社)
特徴	各モジュールにDC/DCとDC/ACコンバータを持つ	DC/DCコンバータは、Buck/Boostコンバータを持つ
長所	増設が容易	高効率
短所	<ul style="list-style-type: none"> DCモジュール方式よりコストがかかり、効率も悪化 DC/ACコンバータに電解コンデンサが必要 	<ul style="list-style-type: none"> DC/DCコンバータにBuckとBoostが必要になり複雑 DCリンク用電解コンデンサが必要

図 3. 分散方式の従来技術

3. 研究の方法

(1) 第一段階

MIC 側の製作とその動作確認を行う

まず、MIC を 1 段構成のみとして、MIC をバックコンバータとマイコンで構成し、MPPT 動作が正常に行われていることを確認する。

次に、MIC を 2 段構成にして、負荷に CSI の代わりに電流負荷を使用して、MIC 側の動作が正常に行われていることを確認する。この時、MIC の立ち上がり順序が原因で、異常なバイアスポイントに収束していないか、異常な逆電流や素子耐圧を越えないかなど、イリーガルな動作をしないかを洗い出す。

最後に、1 段目の PV のパワーと 2 段目の PV のパワーの電力値の条件を変えることで様々な日照条件を模擬して、電流負荷側にそれぞれの PV パワーの加算値が得られているかパワーメータを用いて確認する。

(2) 第二段階

CSI 側の製作および全体動作確認

まず、SiC MOSFET を用いて、電流形インバータを試作する。インバータには、電圧形インバータと電流形インバータがある。これまで、電流形インバータは原理的には可能だが、低オン抵抗で逆耐圧の大きいトランジスタが存在せず、実用化されなかった。この点、SiC MOSFET や GaN FET のようなワイドバンドギャッププロセスは、オン抵抗が低く、逆耐圧が大きいので、Si MOSFET の代替品として最近注目を集めている。これまで、SiC を電圧形インバータに適用した例はあるが、電流形インバータに適用した例は世界にない。また、高効率化のために、SiC の基本特性を測

定し、適切なゲート駆動方法を備えた回路製作を行う。

次に、SiC を用いて試作した電流形インバータとバックコンバータを用いて試作した MIC 側を結合して、システム全体の動作確認を行う。

4. 研究成果

(1) 第一段階

まず初めに、提案構成である図4の動作原理を述べる。各 MIC はバックコンバータのみを持ち、系統連係用パワーコンディショナには電流形インバータを採用する。そして、以下の2つの制御ルールで動作させる。バックコンバータは、出力電力が最大となるように出力電圧最大化制御を行う。電流形インバータはトータルの太陽光発電の電力が最大となるように最適電流値に設定する。この結果、DC/DC コンバータのサイズを従来形に比べ半分以下にでき、インバータの入力にキャパシタも不要になる。

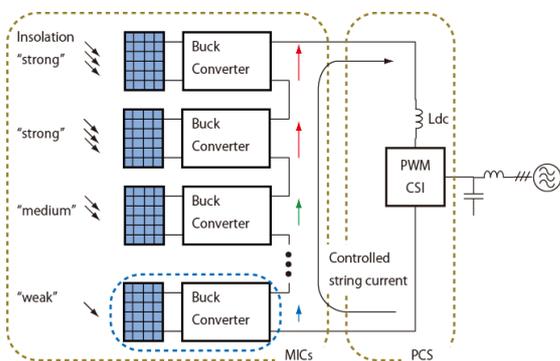


図4. 提案回路

図5に第一段階の実測回路ブロック図を示す。太陽光パネルは Solar Panel Simulated Power Supply で模擬した。第一段階では、CSI の代わりに定電流源 (Programmable DC Electric Load) を使用して、MIC の基本動作を確認した。

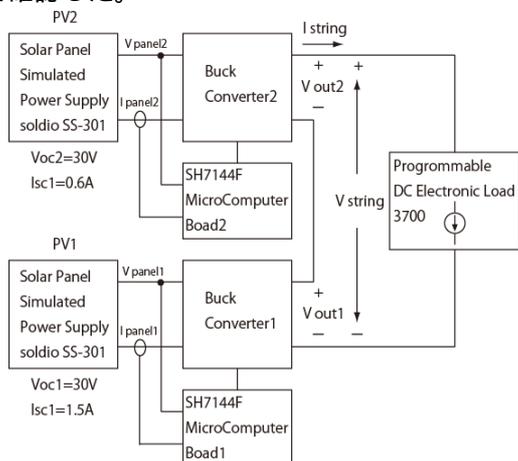


図5. 実測回路ブロック図

図6に試作した MIC の写真を示す。

MPPPT(Maximum Power Point Tracking)制御はマイコン (SH7144) を用いて山登り法を使用した。MIC はバックコンバータで構成されている。

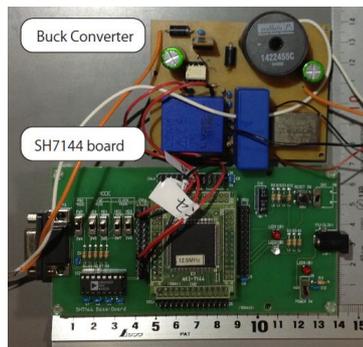


図6. 第一段階で試作した MIC

実測結果の一例を示す。あらかじめ、PV1, PV2 の値を任意に設定しておく。図7は、 $P_{max}(PV1)=31.1W$, $P_{max}(PV2)=14.1W$ に設定されている。これらの加算値が、図5の Vstring 端子で得られているかチェックする。定電流源の電流を 0~3.5A まで振り、最大電力点をチェックした。図8から、最大電力は、41.8W となり $P_{max}(pv1) + P_{max}(pv2) = 45.2W$ とほぼ一致している。 $P_{max}(string)$ が小さいのは、バックコンバータの損失によるものがある。以上より、MIC の基本動作が確認でき、第一段階の目的を達成した。

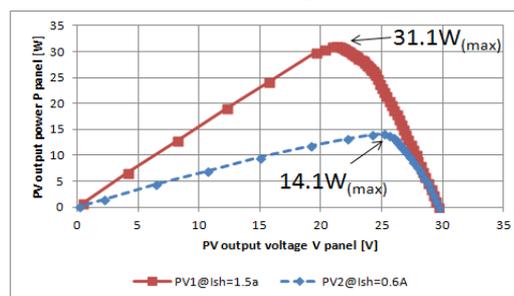


図7. $P_{max}(PV1)=31.1W$, $P_{max}(PV2)=14.1W$

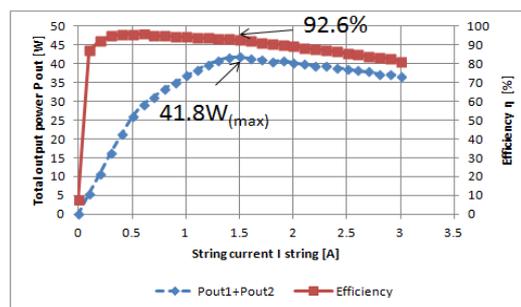


図8. Vstring 端子の最大電力

(2) 第二段階

第二段階では、MIC を 2 段直列に接続し MIC の負荷側に電流形インバータを接続した。バックコンバータとマイコンは各 PV の電力が最大となるように、それぞれ MPPT 制御を行う。コンパレータ CMP はキャリア

信号 V_c と正弦波 V_r を比較して変調信号 m をオーバラップ回路に供給する。変調率 m を変えることで、 $i_{L,dc}$ を振りトータル電力 P_{out} が最大となる点を探索する(最適電流探索制御)。CSI の $Mn1 \sim Mn4$, $D1 \sim D4$ は SiC を使用した。

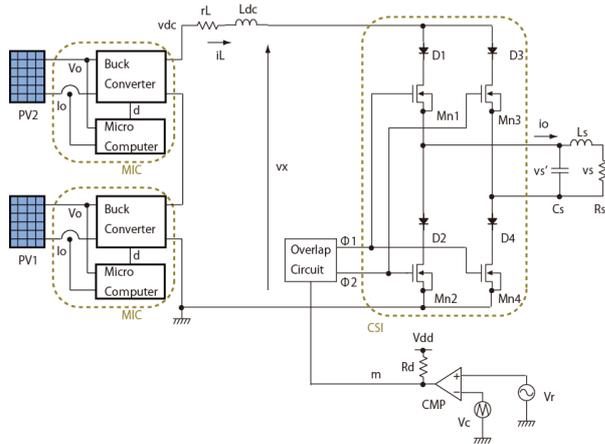


図 9 . MIC と CSI

図 10 に第二段階の実測回路ブロック図を示す。

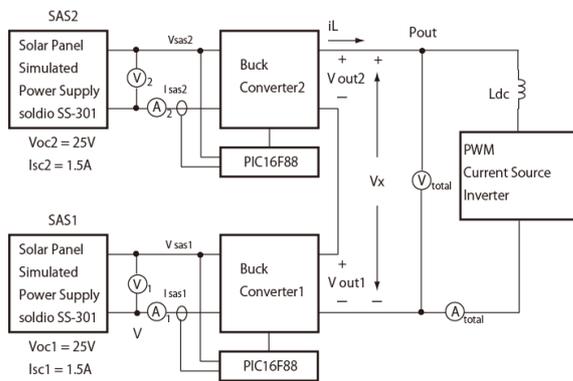


図 10 . 実測回路ブロック

図 11 に第二段階で試作した MIC を示す。第二段階ではマイコンを (SH7144) から PIC マイコンに置き換えて MIC をワンボード化した。

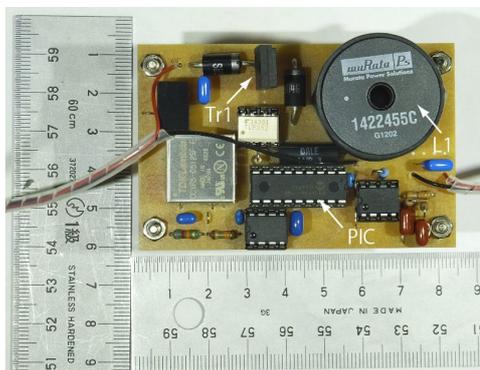


図 11 . 第二段階で試作した MIC

実測結果の一例を示す。あらかじめ、 $PV1$, $PV2$ の値を任意に設定しておく。図 12 では、

$P_{max}(PV1)=17.4W$, $P_{max}(PV2)=8.3W$ に設定した。これらの加算値が、図 10 の P_{out} 端子で得られているかチェックする。 V_r の振幅を変えて i_L を 3A まで振り、 P_{out} の最大電力点をチェックした。図 13 から、最大電力は、 $24.3W$ となり $P_{max}(PV1) + P_{max}(PV2) = 25.7W$ とほぼ一致している。

以上より、CSI 込みの動作が確認でき、第二段階の目的を達成した。

(3) 以上より、第一段階で、バックコンバータのみを使用した MIC を実現した。また、提案構成の基本動作を確認した。第二段階で、SiC を用いて CSI を設計した。MIC と組み合わせて提案構成の有効性を確認した。CSI, MIC に電解コンデンサを使用しないので、システムの信頼性が向上できる。

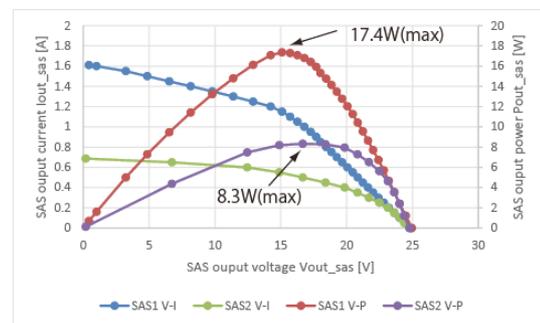


図 12 . $V_{oc1} = 25 V$, $I_{sh1} = 1.5 A$,
 $V_{oc2} = 25 V$, $I_{sh2} = 0.7 A$.

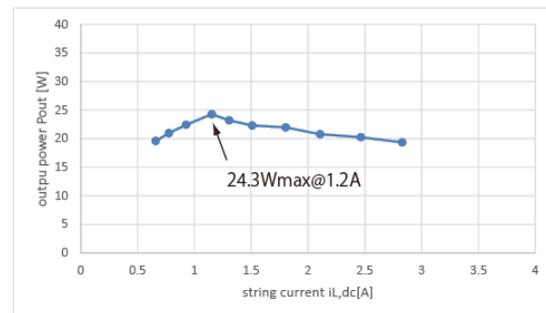


図 13 . $V_{oc1} = 25 V$, $I_{sc1} = 1.5 A$,
 $V_{oc2} = 25 V$, $I_{sc2} = 0.7 A$.

<引用文献>

Kazuhiko Ogimoto, Izumi Kaizuka, Yuzuru Ueda, and Takashi Oozeki "A Good Fit: Japan's Solar Power Program and Prospects for the New Power System," pp. 65-74, Power and Energy Magazine, IEEE (Volume:11, Issue:2), March, 2013.

L. Linares, R. Erickson, S. MacAlpine, and M. Brandemuehl, "Improved energy capture in series string photovoltaics via smart distributed power electronics," in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 904 -910, Feb. 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Mikihiko Matsui, Toru Sai, Byung-Gyu Yu, Xiang-Dong Sun, "A new distributed MPPT technique using buck-only MICs linked with controlled string current," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.4 No. 6, pp. 647-680, November 2015.

〔学会発表〕(計1件)

Toru Sai, Akira Kitamura, Byung-Gyu Yu, Xiang-Dong Sun, and Mikihiko Matsui, "A distributed MPPT PV system with current source inverter," IEEE IECON, pp. 2059-2064, November 2015.

〔特許〕(計1件)

特開 2014-170331(P2014-170331A)

【公開日】平成 26 年 9 月 18 日(2014.9.18)

【発明の名称】電力制御システム

【発明者】松井幹彦、崔通

〔その他〕展示会出展(計1件)

PV Japan2015, 太陽光発電協会主催, 2015 年 7 月.

東京工芸大学連携最先端技術研究センター
崔通.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

崔通 (SAI Toru)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号：7 0 6 3 3 3 3 7

(2) 連携研究者

松井 幹彦 (MATSUI Mikihiko)

平成 27 年度退職 東京工芸大学・教授

研究者番号：3 0 1 4 3 6 8 9

(3) 研究協力者

Xiang-Dong Sun

中国西安理工大学・パワエレセンター長

(4) 研究協力者

Byung-Gyu Yu

韓国公州国立大学・准教授