

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K11991

研究課題名(和文) 発電量最適化のための太陽光発電システムの接続トポロジー再構成に関する研究

研究課題名(英文) Research on Topology Reconfiguration for Maximum Power Generation in Photovoltaic Systems

研究代表者

井上 美智子 (Inoue, Michiko)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：30273840

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)：接続トポロジーが動的に再構成可能な太陽光発電システムにおいて、発電量を最適化するためのオンライン接続再構成アルゴリズムの研究を行った。研究では、1)標準的な太陽光パネルと外部に配置したスイッチ回路を用いた再構成メカニズムの提案、2)トポロジー再構成によって、個々のパネルまたはパネル群の発電能力を推定する手法、3)発電量が最適となるトポロジーを求めるアルゴリズムの提案、を行った。提案するアルゴリズムは、組み込みシステムとして実装可能な単純なアルゴリズムであり、シミュレーションによる実験では、総当たり法と比較して平均750倍以上高速で、99%以上の精度で最適解を求めることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We have investigated online algorithms to reconfigure topologies of photovoltaic systems to maximize power generation. We have proposed 1) a mechanism of reconfiguration using standard PV panels and a switching circuit, 2) a method to estimate power generation ability (or I-V curve) of each PV panel or a group of panels, 3) an algorithm to obtain a topology to maximize power generation. The proposed algorithm is simple enough to be used in embedded systems. In an evaluation by simulation, it is more than 750 times faster than a brute force method while obtaining optimum solutions with probability of more than 99%.

研究分野：情報学基礎、計算機システム

キーワード：太陽光発電 接続トポロジー 再構成 発電量最適化

1. 研究開始当初の背景

太陽光発電システムは、複数の太陽電池モジュールを接続して構成され、個々の太陽電池モジュールは太陽電池セルを接続して構成されている。太陽電池セルの電圧電流特性は、日射強度や温度に依存し、太陽電池モジュールや太陽光発電システムの電圧電流特性はセルやモジュールの接続トポロジーにも依存する。例えば、4セルを並列接続したセルグループを4つ直列に接続した $4 \times 4 = 16$ 個の均一なセルからなるモジュール(図1)では、1個のセルが故障により発電できない場合、故障なしの場合に比べ発電量が16.5%減少すること、また、故障セルを除外して $3 \times 5 = 15$ セルからなるモジュールに再構成することで発電量が10%回復することが報告されている[X. Lin et al., IEEE Design & Test, May/June 2014]。

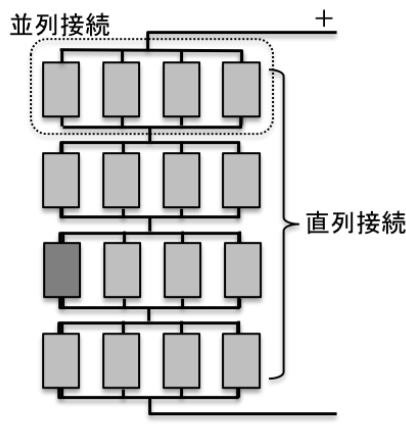


図1. モジュール内セル接続

セル接続およびモジュール接続の再構成は配線接続を切り替えるスイッチを導入することで可能である。また、出力電力を最大化するには、並列接続では出力電圧の均一化、直列接続では出力電流の均一化が重要となる。現在、多くの太陽光発電システムでは最大電力点追従(MPPT)装置が導入されており、環境によって変化する電圧電流特性に応じて出力電圧を調整する事が可能である。そこで、MPPTを用いた個々のモジュールの出力電圧の観測と調整、セル接続およびモジュール接続の再構成を組み合わせることで、太陽光発電システムの実出力電力の最大化が可能であるという着想を得た。応募者は、グラフ理論や最適化アルゴリズム、LSIでの消費電力解析などの研究実績があり、それらの研究から得た知見を本研究テーマに応用可能であると考えている。

2. 研究の目的

太陽光発電システムの発電量は、個々の太陽電池セルへの日射強度、温度だけでなく、セルやモジュールの出力電流や電圧の均一性、接続トポロジーなどに依存する。本研究では、

接続トポロジーが動的に再構成可能な太陽光発電システムにおいて、発電量を最適化するためのオンライン接続再構成アルゴリズムを考案する。具体的には、以下の研究を行う。
 (1)各セルの日射強度、温度が既知の場合に発電量を最大化する再構成アルゴリズムの提案
 (2)トポロジー再構成と出力電圧・電流の観測を組み合わせ、各セルまたはセルグループの日射強度と温度(またはそれらから決定される電圧電流特性)を推定する手法の提案
 (3) (2)の結果を利用して発電量を最大化する再構成アルゴリズムの提案

3. 研究の方法

以下の項目に関し、研究を推進した。
 (1)太陽光発電システムの再構成手法を検討し、再構成メカニズムを提案する。
 (2)電気回路シミュレーションを用いて評価を行う実験環境を構築する。
 (3)太陽光発電パネル(以下、PVパネル)またはPVパネル群の発電能力を推定するアルゴリズムを提案する。
 (4)発電量最適化のためのトポロジー再構成アルゴリズムを提案する。

4. 研究成果

(1)太陽光発電システムの再構成手法の検討および再構成メカニズムの提案

研究開始当初は、モジュールやセルの再構成を検討していたが、より大規模である太陽光発電アレイにおける太陽光発電パネル間の接続トポロジーの再構成問題に取り組むことにした。その理由は、太陽光発電パネルは製品として標準化しており、外部への接続端子を2個有することから、パネル群の外部にパネル間の接続を制御するスイッチを設けることにより、容易に再構成が可能であることがわかったからである。図2に、提案するトポロジー再構成メカニズムを示す。

提案メカニズムでは、PVパネルの直列接続であるストリング群を並列に接続する太陽光発電アレイのトポロジー再構成が可能である。

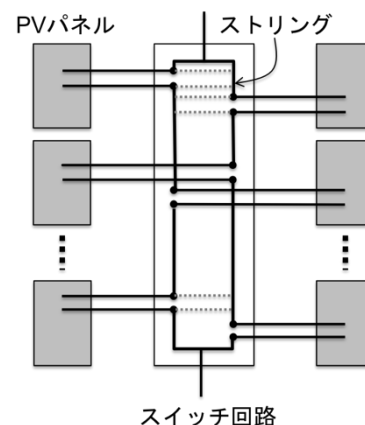


図2. トポロジー再構成メカニズム

図2に示すように、各PVパネルがどのストリングにも接続可能とすることで、任意のトポロジーが構成可能である。提案メカニズムは、標準的なPVパネルを用いて構成可能であるため、汎用性の高いメカニズムであると考えている。

(2)電気回路シミュレーションを用いて評価を行う実験環境の構築

電気回路シミュレーションツールであるSPICE (LTspice, アナログ・デバイセズ) を用いて、発電量をシミュレーションする環境を構築した。図3に、接続トポロジーを指定して、発電特性をシミュレートした結果を示す。

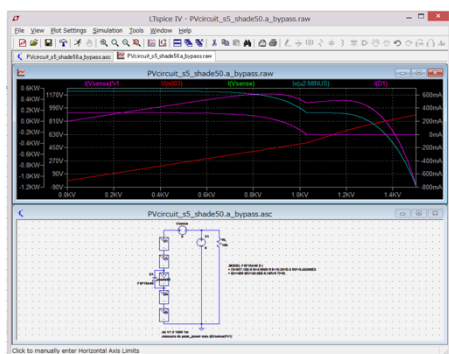


図3. 発電特性のシミュレーション

(3)太陽光発電パネル(以下、PV パネル)またはPV パネル群の発電能力の推定

提案するスイッチを用いることで、任意のストリングを構成することができ、構成したストリングを最大電力点追従 (MPPT) 装置に接続し、制御電力を変化させながら出力電流を観測することで、ストリングの出力電流-出力電圧カーブ(以下、I-V カーブ)を得ることができる。このI-Vカーブを解析することで、ストリング中の複数の太陽光発電モジュールの発電能力を推定することが可能であることがわかった。

図4に、ストリングの発電特性の例を示す。図は、バイパスダイオード付きの3つのモジュールが直列に接続する標準的なPVパネルを2つ直列に接続したストリングである。個々のモジュールは、部分影や劣化による発電能力低下により、異なる発電特性を持つとする(図中の左側の発電特性グラフ)。この場合、ストリングに対してMPPTにより発電特性を解析すると、図中右側のような発電特性が得られ、この特性から、ストリング内のモジュールの発電特性の内訳が推定できる。

提案する推定法では、個々のモジュールの発電能力を特定するのではなく、どの程度の発電能力を有するモジュールが何個であるかというストリングの発電能力の推定を行う。最終的に提案する、トポロジー再構成アルゴリズムでは、この情報を用いて再構成するトポロジーを求める。

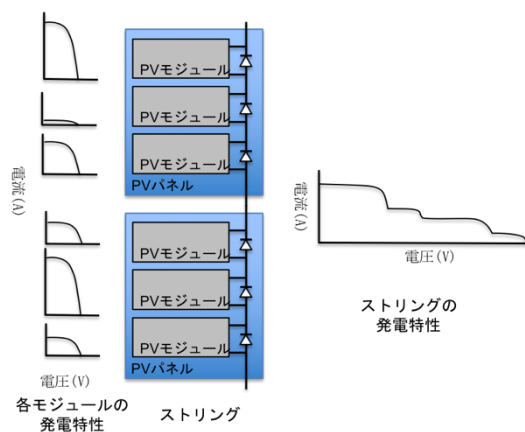


図4. スtringの発電特性

(4)発電量最適化のためのトポロジー再構成アルゴリズムの提案

発電量最適化のためのトポロジー再構成アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムでは、以下のフローで発電量が最適となるトポロジーを求める。

- ① (3)で述べた手法で、各PVパネル内のPVモジュールの発電性能の内訳を求める。
- ② PVモジュール間の接続に制約がないと仮定して、発電量が最適となる接続トポロジーの候補を求める。
- ③ 候補となる接続トポロジーで、発電量が大きい順に、ストリングの構成が可能かどうかを判定し、最初に構成が可能であったものを最適な接続トポロジーとして出力する。

② 接続トポロジーの候補の求め方

図4に示すように、ストリングの発電特性は、出力電圧が小さい場合、出力電流が大きなモジュールの出力電流となり、出力電圧を大きくすると、出力電流の小さなモジュールの出力電流となる。これは、出力電圧が小さい範囲では、発電能力の小さなPVモジュールではバイパスダイオードに電流が流れ、発電に貢献しないためである。そこで、発電に貢献するモジュールをアクティブモジュールと呼ぶ。図4の例では、電圧が大きくなるにつれ、アクティブモジュール数が、2、3、5、6個と増加している。この例では、最大出力電流が最も大きいモジュールが2個であるため、最大の電流量を得るには、アクティブモジュール数が2個となり、出力電圧は小さくなる。

提案手法では、まず、電圧、電流とアクティブモジュール数の関係だけから、構成可能な接続トポロジーを求め、その発電量を推定し、発電量が大きい接続トポロジーを、発電量を最大化する候補とする。ここでは、(1)で提案した再構成メカニズムに従い、複数のモジュールを直列接続したストリングを並列接続するトポロジーを考える。

③ スtringの構成が可能かどうかの判定

②で候補とした接続では、PV パネル間の接続を考慮していない。しかし、実際の接続では、同じパネルに属するモジュールは、同じStringに属する必要がある。そこで、②で候補となる接続トポロジーが、実際に、PV パネルの直列接続として可能かどうかを判定するアルゴリズムを提案した。

提案するアルゴリズムは、組み込みシステムとして実装可能な単純なアルゴリズムであり、シミュレーションによる実験では、総当たり法と比較して平均 750 倍以上高速で、99% 以上の精度で最適解を求めることを確認した。

現在、提案法の評価を進めており、研究成果発表の準備を行なっている。平成 30 年中に、学会発表を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 美智子 (INOUE, Michiko)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：30273840