

アハメイド シャウキ モハメド ホセイン

氏 名 **AHMED SHAWKY MOHAMED HUSSEIN**

学位の種類 博士（工学）

学位記番号 博第1196号

学位授与の日付 2021年3月31日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 Single-Stage Three-Phase Differential Inverter Utilizing
Single-Ended Primary-Inductor Converters
(SEPICコンバータを用いたシングルステージ三相差動インバータ)

論文審査委員 主査 教授 竹下 隆晴
教授 水野 幸男
教授 森田 良文
教授 野口 敏彦
(静岡大学)

論文内容の要旨

In recent years, the world is moving toward Renewable Energy Sources (RES) to produce clean and efficient energy and reduce global warming introduced by CO₂ emissions. RES provides power to vast numbers of residential, commercial, and industrial customers using the utility grid's transmission lines. Among many exciting RES types, Photovoltaic (PV) has proven its competencies for many fundamental reasons. Grid-connected applications are becoming more popular due to fast PV penetration and new architectures, such as PV module architectures. This success has been stimulated by a considerable cut in PV installed price of PV modules, storage batteries, inverters, and other controllers.

DC-AC inverters are among the most critical parts of the PV module architectures. They are vital players for successful operation by converting the Direct Current (DC) power of the PV to Alternating Current (AC) power needed by the grid. Many categories of inverters with different ratings were proposed in the last three decades. Single-phase inverters are conventional in many applications, such as centralized, string, and micro-inverters. However, this solution has many severe problems, such as the double-line frequency component and its electrolyte capacitors. This issue disturbs the normal connection between the PV modules and the grid. Nowadays, three-phase micro-inverters are the best topology to solve double-line frequency. The balance between DC and AC power exists, and no electrolyte capacitors are required.

This project surveys many three-phase inverters topologies for grid-connected applications. Between dozens, single-stage differential-based inverters have been selected. Differential inverters replace every leg of traditional VSI inverter with a DC-DC converter. This configuration gives many properties such as single-stage, modularity, and isolation using isolated DC-DC converters. One DC-DC converter's connection per phase provides the inverter's uniform operation and enhances power density. It facilitates the power extension (scalability) by adding parallel converters without adding control complexity. They have step-up/down voltage gain with bi-directional power ability by utilizing the appropriate DC-DC converters.

This project contemplates a single-stage three-phase isolated differential inverter utilizing Single-Ended Primary-Inductor Converters (SEPIC). The SEPIC includes two power switches, one inductor, a single High-Frequency Transformer (HFT), and two small Film capacitors. This low number of components produces a compacted and cheap inverter. According to differential characteristics, each SEPIC converter possesses one-third of the total power. Therefore, small components with low power ratings are utilized. The SEPIC converter has the lowest energy storage of passive elements. Finally, it provides voltage isolation and continuous input current with no extra components.

The project develops a simple control strategy for injecting active power at the utility grid. It is depend on the d-q synchronous frame and achieves little Total Harmonic Distortion (THD). The Negative Sequence Harmonic Component (NSHC) is a common issue in differential inverters and generating from the circulating currents between the DC-DC converters. That is because the alternating output voltage is greater than the input DC voltage. A NSHC detection circuit has been proposed by adding a three-stage Low Pass Filters (LPF) to mitigate this issue. The proposed controller's feasibility with NSHC compensation is proven by using a real-time Power Simulator (PSIM). Finally, a simple DSP board has been programmed for the proposed control because it has a small computational burden.

The project also develops a three-phase Modular Differential Inverter (MDI) by utilizing three SEPIC converters per phase. It processes a triple power by using identical nine SEPIC converters. A mismatch of $\pm 20\%$ in each SEPIC converter parameters has been investigated to confirm the inverter performance and its modular feature. The proposed MDI utilizes the proposed control strategy without extra circuits. Finally, the proposed inverter utilizes Silicon Carbide (SiC) MOSFET devices for better operation at a high switching frequency. A laboratory prototype validates the proposed inverter with 200V grid-side voltage, 100V DC, 1.6kW, and 50 kHz switching frequency.

論文審査結果の要旨

近年、CO₂排出による地球温暖化抑制のために、クリーンで効率的な再生可能エネルギー源への移行が進められている。再生可能エネルギー源の中で、太陽光発電システムは、さまざまな容量が用意され、屋根などのデッドスペースの有効利用ができ、電力配電システムへの接続もインバータを用いて容易にでき、このように多くの利点から広く普及している。単相インバータでは、電源周波数の2倍の電力脈動を発生し、この電力脈動の平滑化のために大容量電解コンデンサが用いられている。この解決方法として、瞬時的に一定電力制御ができる三相インバータ構成が小型、高効率化に望ましい。

本研究では、太陽光発電の系統連系用の三相インバータの小型、高効率システムを扱う。安全性を確保するための絶縁型三相インバータ回路としては、高周波絶縁型DC/DCコンバータと三相電圧形インバータの2段回路構成が一般的である。本研究では、電力変換回数を1段とする高周波絶縁型のSEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converters) と差動インバータ回路を組み合わせた回路方式を提案している。SEPICと差動インバータ回路方式を用いることで、電力変換回数を1回にし、小型、高効率化を実現する。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた後、本論文の概要について説明する。

第2章では、1段方式の三相インバータを中心に種類と特徴をまとめ、提案方式のSEPICおよび差動インバータの位置づけを明らかにしている。

第3章では、SEPICおよび差動インバータ回路システムの回路構成、回路解析、スイッチング制御であるパルス幅変調法を説明している。次に、定格出力および入出力電圧・電流の仕様から各素子やパラメータの設計法を導出している。さらに、シミュレーションと試作システムによる実験で本提案回路の基本動作を確認している。

第4章では、SEPICおよび差動インバータ回路システムの制御法を提案している。各相における電源周波数の2倍周波数の電流高調波低減法を提案している。また、低損失化のためのソフトスイッチング技法や制御特性を明らかにしている。さらに、試作システムを用いた実験による提案回路の効率特性を求めている。

第5章では、大容量化の回路構成としてモジュラー回路への展開を検討している。並列モジュール化による大容量化を提案している。提案回路に対するシミュレーションと実験で動作確認をし、基本特性を示している。

第6章では、本論文で得られた成果、今後の課題、今後の展望について述べる。

Ahmed Shawky Mohamed Hussein 氏の博士論文で論じられている上記研究の成果は、学術論文2編（全て審査有り）および国際会議論文1編（審査有り）に公表されている。これらの学術的な価値から、博士論文として十分な内容と判断され、博士（工学）の学位に適格であると認める。