

ア-メド イスマイル モハマド アリ

氏 名 AHMED ISMAIL MOHAMED ALI

学 位 の 種 類 博士 (工学)

学 位 記 番 号 博第1236号

学位授与の日付 2022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 Transformer-Based Single-Stage Differential and Multilevel Converter Topologies and Its Control Techniques
(変圧器を用いたシングルステージ差動およびマルチレベルコンバータの構成と制御)

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 countries replaced the traditional energy sources with Renewable Energy Sources (RES) utilization to produce clean and efficient energy with global warming reduction. RES provides energy to a vast number of residential, industrial, commercial customers by utilizing the utility grid's transmission lines in the residential areas and separate lines in the remote areas from the utility grid. Among the different RESs, Photovoltaic (PV) has proven its effectiveness in different applications for many fundamental reasons. In addition, grid-integrated applications have become more popular due to the vast enhancement PV penetration and their emerging structures. As well, this success is encouraged by a considerable reduction in PV installation cost, storage batteries, inverters, and system controllers. Hence, PV structures form one of the most hopeful assets for creating required huge energy chunks for humankind, which paved the way for power electronics evolution.

DC-AC inverters form one of the most important parts of the PV system architectures. Different PV inverter structures have been presented for different purposes in the last decades. Microinverters offered an alluring solution for module integrated grid-tied operation under various climatic conditions, i.e.; module mismatch and partial shading conditions of solar arrays. Along these lines, numerous microinverter-type PV-inverters are introduced in the ongoing years that fulfill dependability requirements, compactness, ease, and decreased footprint. However, this solution has many severe problems, such as the double-line frequency component and its electrolytic capacitors. These issues disturb the

interconnection between the PV system and grid. Hence, three-phase microinverters are the most attractive topologies to mitigate double-line frequency issues as well as large electrolytic capacitor elimination.

This project surveys many of recent single-phase and three-phase inverters structures for grid-tied applications. Between these architectures, single-stage differential-based inverters have been selected., which replace the VSI legs with DC-DC converters. The configuration of these inverters provides many features such as; single-stage operation, voltage boosting-bucking capability, modularity, and galvanic isolation for grid protection requirements. In addition, it simplifies the power extension (scalability) by adding parallel converter modules utilizing the same control scheme.

This project proposes an isolated single-stage three-phase differential-based flyback inverter (DBFI) for grid-integrated PV applications. The proposed DBFI offers many features compared with existing converters such as; high power density, low cost, galvanic isolation, circuit structure and control simplicity. The proposed DBFI reduces the required number of low-side driven power MOSFETs and passive elements compared with the buck-boost based inverter topologies, which decreases the required compensator order for system stability that directly simplifies the controller specifications. Moreover, harmonic compensation strategy is utilized for second-order negative sequence harmonic compensation (SO-NSHC). The high-frequency transformer of the DBFI is presented based on nanocrystalline core for inverter compactness. In addition, a loss study is performed based on the derivation of the mathematical loss model for each component in terms of the time and the system parameters. The proposed DBFI has been validated by theatrical analysis, simulation, and experimental findings over a grid-tie closed-loop current control operation via 200 V, 1.6 kW, and switching frequency of 50 kHz laboratory prototype.

The project also proposes an isolated single-phase single-stage DC-AC cascaded transformer-based multilevel inverter (CTMLI) with its sinusoidal PWM switching technique considering minimum components count per output voltage level. The proposed CTMLI converts the input DC voltage to 19-level AC voltage at the output terminals using three full-bridge circuits and three cascaded transformers. Detailed mathematical model of the CTMLI is presented considering optimal transformer turn's ratio. Furthermore, cost estimation model for the MLI is introduced in details in order to investigate the cost reduction in the CTMLI. In addition, a detailed comparison with recent MLI is presented to confirm the CTMLI merits. The proposed CTMLI has been investigated experimentally using laboratory prototype (220V, 1.2kW) controlled with dspace DS-1103 digital controller in stand-alone grid-tied applications.

論文審査結果の要旨

再生可能エネルギー源として太陽光発電が今後も普及していくと予想される。太陽光発電システムの発電電力を電力系統へ送るには、DC-AC電力変換器である系統連系用インバータが必要になる。一般的には、三相インバータ装置が用いられるが、安全のために変圧器絶縁をする場合には、系統周波数の変圧器が用いられ大型になる。この変圧器の小型化のために、高周波変圧器を用いたさまざまな回路構成が提案されている。太陽光発電の直流電圧を高周波電圧に変換し、整流して直流電圧に再変換し、さらに系統周波数の電圧に変換する3回の電力変換が必要になる。また、電力系統への接続においては、高調波電流規制があり、高調波電流の抑制が必要になる。

本研究では、高周波絶縁型インバータとして、直流から直接系統周波数の電圧に電力変換する三相差動フライバックインバータを提案している。この回路は1回の電力変換回路のため、小型、低損失を実現できる。また、電力系統の高調波電流を抑制する大電力インバータ回路として絶縁型単相シングルステージのインバータを三段カスケード接続したマルチレベルインバータを提案している。提案回路の制御法と実験による有効性検証をしている。

第1章では、本研究の背景と目的、本論文の概要について説明する

第2章では、太陽光発電システムを電力系統に連系する小型電力変換器として三相差動フライバックインバータを提案している。回路動作解析と制御法を明らかにしている。差動インバータ特有の問題として、系統に二次高調波電流が流れ、系統電流がひずむ。この対策として、電源の2倍周波数で回転する座標で電流高調波制御をすることで、二次高調波電流を抑制できる理論を提案している。

第3章では、提案した三相差動フライバックインバータのモデルに基づいた設計法を示し、各回路素子の特性を確認する実験とその損失解析をしている。さらに、効率向上のための変圧器コアの選定など、設計の詳細と損失評価をしている。

第4章では、三相差動フライバックインバータのシミュレーション解析をし、実験波形との比較により、提案回路の理論の妥当性を示している。

第5章では、大電力用のインバータとして絶縁型単相シングルステージのインバータを三段カスケード接続したマルチレベルインバータを提案している。疑似正弦波電圧を出力して出力高調波電流抑制すると共に変換器損失低減を実現するために、三段インバータは、高圧低周波電圧、中圧中周波数電圧、低圧高周波電圧を組み合わせている。提案マルチレベルインバータの波形制御と実験検証による特性評価を行っている。

第7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 ISMAIL MOHAMED ALI 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3編（全て審査有り）および国際会議論文4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。