

氏名	張 劍韜
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 9379 号
学位授与年月日	令和2年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	Performance Improvement of Discontinuous Current Mode Grid-Tied Inverters with Model-Based Control (モデルベース制御を適用した電流不連続モード系統連系インバータの性能向上に関する研究)

主査	筑波大学准教授	博士(工学)	磯部高範
副査	筑波大学教授	博士(工学)	岩室憲幸
副査	長岡技術科学大学教授	博士(工学)	伊東淳一
副査	筑波大学教授(連携大学院)	博士(工学)	山口浩

## 論 文 の 要 旨

太陽光発電の方式の一つとして、パネル毎に電力変換器をもつマイクロインバータ方式が注目されている。複数のパネルを直並列に接続する方式と比べ、パネル単位で最大電力点運転が可能なることから、設置枚数・条件に制約がある住宅用などにおいてシステム効率を向上させるなどのメリットがある。本論文ではマイクロインバータに必要とされる小容量の単相系統連系インバータの性能向上を可能とする電力変換器の変調方式を提案し、さまざまな視点から分析・評価を行った結果を報告している。

本論文の第2章では系統連系インバータにおける電流制御の方式についてさまざまな点からの分類を行い、また文献調査の結果を報告している。この中で、電流連続モード(CCM: continuous current mode)で動作するように設計されたインバータをフィードバック制御によって電流制御するという従来の方式の課題として、スイッチングの高周波化による受動部品の小型化に限界があることをあげている。これはスイッチング周波数を高くしても、外乱抑制の点から系統連系インダクタのインダクタンス値を一定以下にすることができないという制御上の課題である。これに対し本論文では、電流不連続モード(DCM: discontinuous current mode)を用いることで、モデルベース制御が可能であることを解決策の一つとして提案している。DCMではモデルの不完全性によって生じる誤差は蓄積されないため、フィードバック制御を用いなくても電流制御ができ、フィードバック制御に起因する上記の課題が回避できるためである。しかしながら DCM の採用によって更なる高周波化をすると、これまで考慮されてこなかったモデルの不完全性により電流に高調波が発生し、それが高周波化による変換器の高性能化を阻害する1つの要因となることを指摘している。

本論文の第3章では、電圧ゼロクロス位相付近での歪みの発生を抑制する変調方式の提案を行っている。これは、電圧ゼロクロス時の歪みは発生しにくい、電流のピーク値が大きく損失が大きい Bipolar 変調と、電流のピーク値が小さくスイッチング回数も少ないため損失が小さい、電圧ゼロクロス時の歪みが大きい Asymmetry unipolar 変調のハイブリッド方式である。両者の特徴をいかに、交流電圧位相によりモードを遷移させることで、歪みの低減と損失の低減の両立を図るものである。論文において、制御および設計法の詳細が述べられている。SiC-MOSFET を用いた 480 W 単相系統連系インバータにおける実験結果が報告されている。提案方式により Asymmetry unipolar 変調に比べゼロクロス付近での歪みが低減されること、また Bipolar 変調に比べ損失が低減できることを実証している。また損失の分析を行い、損失の低減が主にピーク電流が低減されたこととスイッチング電流が低減されることによるものだと示している。

本論文の第4章では、半導体デバイスの寄生容量によって発生する高調波の問題を取り扱っている。寄生容量は従来の DCM の変調においては考慮されていないため、特にスイッチング周波数を高めた設計においては、モデルと異なる挙動を示し高調波発生の原因となることが知られている。本論文では、このことにより、小容量の系統連系インバータにおいてはさらなる高周波化によるインダクタの小型化を妨げること、またオン抵抗は低い寄生容量が大きい半導体デバイスによる高効率化が難しくなることを指摘している。これに対し、寄生容量による共振現象をモデルに組み込み、これを考慮した変調法を適用することを提案している。本論文では2つの方式を提案し、それぞれの制御および設計法の詳細を示し、また400Wの単相系統連系インバータにおける実証結果を報告している。提案の一つは Bipolar 変調と Unipolar 変調を組み合わせた TPCM (Trapezium Current Mode) によって変調の自由度を確保し、共振現象を考慮したスイッチングタイミングとするものである。この方式は、第3章で示されたものと同じ理由により損失の低減も同時に可能であるが、半導体デバイスの寄生容量の大きさとスイッチング周波数の向上についてトレードオフの関係があるということ、シミュレーションおよび実験によって示している。またもう一つの提案方式は、スイッチング周波数を可変にして変調の自由度を確保し、共振現象を考慮したスイッチングタイミングとするものである。この方式は損失の低減効果は無いものの、上記トレードオフはなく、非常に高いスイッチング周波数、あるいは寄生容量の大きいデバイスの利用も可能であることを、シミュレーションおよび実験によって示している。

本論文の第5章では、論文全体をまとめるとともに、本論文で提案した手法の位置づけについて述べている。小容量系統連系インバータのさらなる高性能化のために有望な手法であるといえる DCM について、スイッチング周波数の高周波化による小型化と、オン抵抗の低いデバイスの採用による高効率化を進めるための新たな技術の提案ができたとしている。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

容量が数百ワットである小容量の系統連系インバータは近年太陽光発電向けのマイクロインバータとして注目されているが、それまでは応用先が少なく研究事例は多くなかった。一方、同じ程度の容量のパワーエレクトロニクス機器としては、古くから AC アダプタやスイッチング電源に用いられる PFC コンバータ (高力率整流回路) があり研究事例が多く、その中でしばしば使われる BCM (臨界電流モード) または

DCM(電流不連続モード)を系統連系インバータにも適用するという研究が近年報告されつつある。本論文は、PFC コンバータおよび系統連系インバータにおける電流制御についてのこれまでの先行研究をよく調査し分析している。その上で、スイッチングの高周波化によりインバータの高性能化を図る際に問題となる制御上の課題を解決できる方式として、モデルベース制御を採用した DCM をとりあげている。近年 SiC-MOSFET や GaN-HEMT などの次世代半導体デバイスにより高周波スイッチング化が進みつつある中で、これらデバイス技術の発展をシステム性能の向上に結びつけるための回路・制御上の課題を解決する研究であり、今取り組むべき重要な研究課題であるといえる。

本論文ではモデルベース制御される DCM インバータにおけるさらなる高性能化のための課題として、不完全なモデルによる高調波の発生を取り上げている。ここで取り上げている課題自体は、それぞれ PFC コンバータなどにおいて過去指摘されてきたことであるが、本論文で提案する解決手法はいずれも過去報告例の無い新規性のある提案である。また、実際に実装可能で課題の解決が十分に可能な有用性がある提案であると認められる。本論文では、それぞれの提案手法について制御および設計法の詳細が理論的に述べられており、また実験による実証を通じてその有用性を示している。課題としては、量産時の部品特性のばらつきや、経年変化・温度特性等に対するロバスト性が挙げられる。しかしいずれの提案手法についても本論文により一定の有用性は示されており、学術的価値があると認められる。それぞれが国際会議論文または学術雑誌論文として掲載または掲載が決定していることもそれを裏付けている。

本論文では、提案したそれぞれの手法をまとめて、DCM インバータにおいてスイッチング周波数の高周波化による小型化と、オン抵抗の低いデバイスの採用による高効率化を進めるため技術と位置づけている。一般に電力変換器の性能指標としては電力密度(小型化)と効率が挙げられ、トレードオフ関係にあるこれら二変数の最適曲線を向上させることが電力変換器の性能向上であるといわれている。本論文の成果は、小容量系統連系インバータのさらなる高性能化のために有望な手法であるといえる DCM を用いたインバータについて、この性能向上を実現するための変調法を提案し、分析・実証したことであり、博士論文として1つのまとまった成果を得たといえる。

以上のように、本論文で示された研究成果は、学術的に価値の高いものであると認められ、本論文は学位論文として価値のある論文であると結論付けられる。

#### [最終試験結果]

令和2年2月14日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

#### [結論]

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。