

称号及び氏名	博士（工学） 川上 太知
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 31 日
論文名	「小型化・高電力密度化を実現する車載用電力変換器の 制御系設計に関する研究」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 石亀 篤司 副査 小西 啓治

論文要旨

近年、エネルギー資源の枯渇化や地球温暖化といった地球環境問題が大きく取り上げられている。このような背景により、2015年には第21回国連気候変動枠組条約締約国会議(COP21)において、京都議定書に代わる2020年以降の温室効果ガス削減等のための新たな国際枠組みとして、パリ協定が採択された。また、同年の国連総会においても「持続可能な開発のための2030アジェンダ」に記述された2030年までの17の世界的目標であるSDGs (Sustainable Development Goals) が採択された。そのうち、「7:すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセスを確保する」及び「13:気候変動及びその影響を軽減するための緊急対策を講じる」が達成すべき目標として掲げられている。日本においてもこれらの目標を達成すべく、様々な検討がされている。温室効果ガスの主要因である二酸化炭素の排出において約2割を運輸部門が占めており、さらにその大半を自動車占めており、パリ協定の締結を境に各国政府や各自動車メーカーが電動化へのシフトを加速している。その電動化における車載用電力変換器は小型化・高効率化・高電力密度化が要求されており、これらの要求の実現はSDGsの目標達成にも大きく貢献する。

電気自動車やハイブリッドカーのパワートレインシステムは走行性能の向上のためのモータの高出力化を実現するため、バッテリーとインバータの間に昇圧型DC-DCコンバータが搭載されたパワートレインシステムが一般的になりつつある。この昇圧型DC-DCコンバータの小型化・高効率化・高電力密度化が強く求められる。

本要求に対して、車載用電力変換器は大電力駆動のため、マルチフェーズ方式が採用されることが多い。この方式は単相DC-DCコンバータを並列に多段接続し、スイッチングの位相をシフトさせるインターリーブ動作を行っている。これにより、スイッチング周波数を上げることなくキャパシタの充放電に伴う電荷変動が低減できる。従って、静電容量の低いキャパシタでの設計が可能となるため、回路の容積増加の主要因の一つであるキャパシタの小型化が実現できる。さ

らに、インダクタ電流が各相に均等に分流するため、1相あたりの導通損が低減できるだけでなく、パワー半導体デバイスに流れる電流も相数分低くなる。そのため、従来よりも定格電流の低いパワー半導体デバイスを使うことが可能となる。さらに、電力を単相から各相に分割することもできるため、設計可能な電力レンジを単相時から相数倍にすることも可能となる。

しかし、回路トポロジを改良することは電力変換器の小型化・高効率化・高電力密度化について有効だが、電源の制御系において二つの問題点を有している。一つは制御系のモデリングが非常に複雑になってしまうことである。駆動相数の増加に伴い、制御モデルが複雑化してしまうため、電源の解析をするにあたって障壁となってしまふ。もう一つは昇圧型 DC-DC コンバータ自身の制御系に不安定要素を含んでいるということである。この不安定要素は重負荷であるほど不安定になるため、車載用電力変換器のような大電流アプリケーションにおいては非常に問題となる。

そこで、本論文では車載用電力変換器に用いられる昇圧型 DC-DC コンバータの小型化・高電力密度化を実現するための制御系を研究の対象とした。

まず、マルチフェーズ方式における制御モデリングに関する研究である。DC-DC コンバータの制御系モデリング手法として用いられている「状態平均化法(状態空間平均化法)」は回路方程式(微分方程式)を状態方程式と出力方程式に変形し、回路の動作モードの割合で加重平均をするという手法である。そのため、単相では ON と OFF の 2 パターンで加重平均を行うが、2 相の場合は ON/ON, ON/OFF, OFF/ON, OFF/OFF の 4 パターンで加重平均を行わなければならない。さらに、状態方程式及び出力方程式の次数も増加してしまうため、導出した伝達関数モデルが 3 次系を有することになる。相数が増加するとこの次数は更に増加してしまい、シミュレータの演算コストを増加させるだけでなく、本来生じるはずのない高次要素が現れてしまい、制御系設計にも影響を及ぼしてしまう。そこで、本研究では相数の増加に依存しない低次元化モデリング手法を提案した。本手法は、出力平滑キャパシタを等価回路変換し、1 つだった出力平滑キャパシタを各相に配置することで、「 n 相 DC-DC コンバータのモデリング」から「単相 DC-DC コンバータ $\times n$ 段のモデリング」に置き換えることが可能となる。これにより、相数の増加に依存しなくなるため、演算コストを抑えつつ、高次要素を除去する低次元化モデリングを実現している。

次に、昇圧型 DC-DC コンバータの応答性の改善に関する研究である。昇圧型 DC-DC コンバータは制御系の伝達関数の中に「右半平面の零点」と呼ばれる不安定要素を有している。この右半平面の零点は変曲点においてゲインを増大させつつ、位相を遅れさせる成分を有している。そのため、制御系の安定性の指標であるゲイン余裕と位相余裕の両方に影響を及ぼしてしまう。従って、ゲイン余裕と位相余裕の両方を確保するためにはゲインクロスオーバー周波数を低下させなければならない。このゲインクロスオーバー周波数は制御系の速応性を決定する要因であり、昇圧型 DC-DC コンバータは右半平面の零点の影響で高周波に設定することができない。すなわち、出力電圧の変動に対応できなくなるため、キャパシタの容量の増加、ひいては回路の小型化・高電力密度化を妨げてしまう。さらに、極零相殺を行う場合、右半平面の極を用いなければならない。右半平面の極は制御系に存在するだけで発振してしまう不安定要素なため、適用することができない。その上、重負荷になるほど変曲点が低周波側にシフトするため、さらにゲイン余裕と位相余裕が悪化してしまう。そのため、通常の電源の制御に用いられるフィードバック制御系では制御性能が抑制されてしまう。そこで、本研究では制御系の速応性とロバスト性を改善する電力平衡モード制御を提案した。本手法は、従来の制御手法である電流モード制御に入出力電力を一致させる制御を組み込んだ新たな制御手法である。そのため、入出力電力が大きく異なる場合に、両者を一致させる制御はフィードフォワード制御、定常状態において出力電圧を一定に保つ制御はフィードバック制御となっており、それらを組み合わせた 2 自由度制御系が構成される。これにより、速応性を向上させるゲインクロスオーバー周波数を高周波に設定することなく従来制御手法よりも応答性を大幅に改善することが可能となったため、速応性とロバスト性の両方の改善を実現している。

本論文では、以上に示したように、車載用電力変換器において、小型化・高電力密度化を実現

するための制御系設計に関する研究をまとめたものである。本論文は、緒論、結論を含め全5章で構成される。

第2章では、単相昇圧型 DC-DC コンバータの制御系について詳細に説明した。本章ではまず、状態平均化法による各種伝達関数の導出過程について説明した。次に、最も基本的な電源の制御手法である電圧モード制御について説明した。最後に、電圧モード制御に電流制御ループを追加した電流モード制御について説明した。

第3章では、制御系のモデリングの複雑化を改善する低次元化モデリング手法を提案した。このモデリング手法により、電力変換器の駆動相数が増加しても単相と同様に解析することができるため、モデルの生成コストやシステムの複雑化を解消することが可能となる。本章ではまず、提案手法による数学モデルの低次元化を数式で示し、相数の増加に依存せずに伝達関数を導出できることを明らかにした。次に、2相及び10相における伝達関数の周波数特性を高次元モデルと提案手法で導出した低次元化モデルで比較し、両者が一致することを確認した。最後に、両者のモデルでステップ応答特性も比較し、こちらも両者が一致することを確認し、提案するモデリング手法の有効性を確認した。

第4章では、簡単な仕組みで制御性能を大幅に改善する電力平衡モード制御を提案した。この制御手法により制御系の速応性とロバスト性を改善することが可能となる。さらに、制御系の仕組みは簡単なため、その他の電力変換器にも適用が可能となる。本章ではまず、電力平衡モード制御の動作原理及び設計手法について説明した。次に、電力平衡モード制御のベースとなる電流モード制御と周波数特性の比較を行い、定常状態において両者が一致することを確認した。さらに、電圧モード制御も含めた上で負荷過渡応答特性を比較し、電力平衡モード制御の有効性を確認した。

最後に、第5章では、結論として本論文についての総括をしている。

審査結果の要旨

本論文は、電気自動車やハイブリッドカーのパワートレインシステムにおいて、バッテリーとインバータの間に搭載される車載用電力変換器に用いられる昇圧型 DC-DC コンバータの小型化・高電力密度化を実現するための制御系について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 単相 DC-DC コンバータを並列に多段接続し、スイッチングの位相をシフトさせるマルチフェーズ方式昇圧型 DC-DC コンバータの低次元化モデリング手法を提案し、相数の増加に依存せずに伝達関数を導出できることを明らかにした。
- (2) 提案した低次元化モデリング手法で導出した2相及び10相のマルチフェーズ方式 DC-DC コンバータの低次元化モデルと高次元モデルについて、伝達関数の周波数特性やステップ応答特性を比較検討し、提案する低次元化モデリング手法の有効性を確認した。
- (3) 昇圧型 DC-DC コンバータの制御系の速応性とロバスト性を大幅に改善する電力平衡モード制御を提案した。本手法は、従来の制御手法である電流モード制御に入出力電力を一致させる制御を組み込んだ新たな制御手法であり、入出力電力が大きく異なる場合に両者を一致させる制御はフィードフォワード制御、定常状態において出力電圧を一定に保つ制御はフィードバック制御となっており、それらを組み合わせた2自由度制御系が構成される。シミュレーションおよび実験結果より、提案した電力平衡モード制御の有効性を確認した。

以上の諸成果は、自動車の電動化が加速している中で、小型化・高効率化・高電力密度化が要求されている車載用電力変換器において、昇圧型 DC-DC コンバータの小型化・高電力密度化を実現するための制御系の速応性・ロバスト性の向上など高性能化に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。