

氏名	梅谷 和弘
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	総博甲第104号
学位授与年月日	平成27年9月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
文部科学省報告番号	甲第547号
専攻名	総合理工学専攻
学位論文題目	Lagrangian Analysis Methodology for Power Electronics and Its Application to Industry (ラグランジュ形式によるパワーエレクトロニクスの解析手法とその産業応用)
論文審査委員	主査 島根大学准教授 山本 真義 島根大学教授 神宮寺 要 島根大学教授 増田 浩次 島根大学教授 横田 正幸

論文内容の要旨

近年のパワーエレクトロニクスの発展に伴い、産業の様々な場面に電力変換技術が適用されるようになってきた。これまで、パワーエレクトロニクスでは、インダクタ・コンデンサ・スイッチから成る基本的な電力変換回路や、線形的な電気特性を有する基本的なモータを研究の対象とすることが多かった。したがって、これまでパワーエレクトロニクスが扱ってきた機器は電気回路として表現することが容易であり、解析手法として電気回路理論が主に用いられてきた。しかし、パワーエレクトロニクスの応用先が広がるにつれ、電気回路として扱うことが難しい技術に対しても関心が高まっている。たとえば、誘導加熱や複合磁気部品のように電磁場の働きを利用する技術や、スイッチトリラクタンスモータのように強い非線形性を利用する技術、ハイブリッド自動車のように電力変換・モータ等の電気系のシステムと駆動輪・エンジン等の機械系システムが高度に連携するシステムなどは、従来の電気回路理論による解析が困難となっている。

そこで、本論文では上記のような新しいパワーエレクトロニクスの対象に対しても解析が容易な解析技術の確立をめざした。本論文では、解析力学に着目し、解析力学に基づくパワーエレクトロニクス理論を構築した。解析力学は、これまでほとんどパワーエレクトロニクスの解析に用いられてこなかった。しかし、解析力学は、電磁気学や力学を含む物理学のあらゆる分野を基礎づける基本理論であり、エレクトロニクスと機械工学に対して共通して利用できることが期待できる。しかも、本論文第四章に示したように、解析力学は非線形な電磁界の特性に対しても適用することができる。したがって、解析力学は、電磁場を応用するシステムや、強い非線形特性を持つシステム、機械系と連携するシステムなど、旧来の電気回路理論の適用が困難な対象にも容易に適用できる可能性がある。

本論文は、解析力学によるパワーエレクトロニクス解析手法を構築する第一部と、構築された解析手法を実用的な電力変換技術に応用する事例を紹介する第二部から構成される。第一部では、解析力学による解析手法を4つ提案し、それぞれが電気回路理論では解析が困難とされる対象に対して、解析力学を用いると容易に解析が可能となることを示した。その内容は次のとおりである。

1. 電力変換回路一般に対して、解析力学モデルの構成法を提案し、このモデルを用いて回路動作を機械的に導出できることを示した。提案する構成法は、電気回路理論と異なり、電気回路と磁気回路の両方に対して適用するため、複合磁気部品を含む回路を直接モデル化できることを示した。

2. 複雑な磁気回路を持つ磁気部品に対して、解析力学を応用することで機械的な手順によって簡単な等価回路を導出できる手法を提案できた。Integrated Winding Coupled Inductor を用いたケーススタディーにより、提案手法は、他手法より簡単な等価回路が得られることを実証できた。
3. 解析力学を応用することで、双対変換を行う新手法を提案できた。双対変換は新しい回路方式を導出するためにパワーエレクトロニクス研究で良く用いられる技術であるが、電気回路理論に基づく従来手法では、非平面的回路に対して双対変換を直接適用できなかった。これに対して、提案手法では非平面的回路に対しても双対変換が可能であることを実証することができた。
4. スイッチトリラクタンスモータを解析するための解析力学モデルを構成する手法を提案できた。スイッチトリラクタンスモータは非線形性が強いいため、電気回路によって特性を表現することが困難であり、インバータなど電気による駆動回路と同時にモデル化して解析することが困難であった。これに対して、提案手法では、モータ、インバータ、負荷のラグランジアンモデルの和を取ることで、システム全体の解析力学モデルを容易に構成でき、システム全体の動作を機械的に解析できることを示した。

第二部では、第一部で示した解析手法を適用することによって新しい実用技術を三つ発明し、その有効性を提案できた。その内容は次のとおりである。

1. EMCノイズフィルタを小型化する新しいフィルタ部品構造を提案できた。提案部品構造は、ノーマルモードチョークとコモンモードチョークを一体化する技術である。実機検証により、提案技術による一体化で体格31%低減を実証した。また、他の一体化技術に比べて、試算により体格41%低減が見込まれることを示した。
2. 単方向昇圧チョッパに対して、複合磁気部品を適用することで、小型に実装できる新しいソフトスイッチング技術を提案できた。実機検証により、提案技術の適用によって0.6%の効率向上を確認できた。
3. 同期整流降圧コンバータに対して、負荷電流の変動に対して出力電圧の変動を抑制できる新しい制御法を提案できた。提案制御法は、これまで出力電圧変動の抑制に優れた制御とされてきたスライディングモード制御を改良した技術である。シミュレーションにより、提案制御法によってスライディングモード制御に比べてより一層出力電圧変動に高い抑制効果が得られることを示した。

論文審査結果の要旨

本論文では新しいパワーエレクトロニクスを対象に対しても解析が容易な解析技術の確立をめざしている。本論文では、解析力学に着目し、解析力学に基づくパワーエレクトロニクス理論を構築した。解析力学は、電磁場を応用するシステムや、強い非線形特性を持つシステム、機械系と連携するシステムなど、旧来の電気回路理論の適用が困難な対象にも容易に適用できる可能性がある。本論文は、解析力学によるパワーエレクトロニクス解析手法を構築する第一部と、構築された解析手法を実用的な電力変換技術に応用する事例を紹介する第二部から構成される。

第一部では、解析力学による解析手法を4つ提案し、それぞれが電気回路理論では解析が困難とされる対象に対して、解析力学を用いると容易に解析が可能となることを示した。その内容は次の通りである。1) 電力変換回路一般に対して、解析力学モデルの構成法を提案し、このモデルを用いて回路動作を機械的に導出できることを示した。提案する構成法は、電気回路理論と異なり、電気回路と磁気回路の両方に対して適用するため、複合磁気部品を含む回路を直接モデル化できることを示した。2) 複雑な磁気回路を持つ磁気部品に対して、解析力学を応用することで機械的な手順によって簡単な等価回路を導出できる手法を提案できた。Integrated Winding Coupled Inductor を用いたケーススタディーにより、提案手法は、他手法より簡単な等価回路が得られることを実証できた。3) 解析力学を応用することで、双対変換を行う新手法を提案できた。双対変換は新しい回路方式を導出するためにパワーエレクトロニクス研究で良く用いられる技術であるが、電気回路理論に基づく従来手法では、非平面的回路に対して双対変換を直接適用できなかった。これに対して、提案手法では非平面的回路に対しても双対変換が可能であることを実証することができた。4) スイッチトリラクタンスモータを解析するための解析力学モデルを構成する手法を提案できた。提案手法では、モータ、インバータ、負荷のラグランジアンモデルの和を取ることで、システム全体の解析力学モデルを容易に構成でき、システム全体の動作を機械的に解析できることを示している。

第二部では、第一部で示した解析手法を適用することによって新しい実用技術を三つ発明し、その有効性を提案できた。その内容は次のとおりである。1) EMCノイズフィルタを小型化する新しいフィルタ部品構造を提案できた。実機検証により、提案技術による一体化で体格31%低減を実証した。また、他の一体化技術に比べて、試算により体格41%低減が見込まれることを示した。2) 単方向昇圧チョッパに対して、複合磁気部品を適用することで、小型に実装できる新しいソフトスイッチング技術を提案できた。実機検証により、提案技術の適用によって0.6%の効率向上を確認できた。3) 同期整流降圧コンバータの負荷電流の変動に対して出力電圧の変動を抑制できる、これまで出力電圧変動の抑制に優れた制御とされてきたスライディングモード制御を改良した制御を提案している。シミュレーションにより、提案制御法によってスライディングモード制御に比べてより一層出力電圧変動に高い抑制効果が得られることを示した。

この様に本論文は、パワーエレクトロニクス分野において全く新しい解析力学の視点を適用することで、エネルギーをベースに磁気設計、機電一体システム設計、制御系構築が実現

できることを明確化し、学术界に新しい技術潮流を生み出した。博士論文を構築する基盤となる学術論文数も 5 件（電気学会英語論文誌 4 件，IEEE 1 件）と多く，質，量共に，本学の学位授与の規定を十分に満たしていると判断し，本論文を博士授与のための論文として合格とした。