

氏名	佐藤 光秀
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	甲 第706号
学位授与の日付	平成31年3月20日
学位授与の要件	信州大学学位規程第5条第1項該当
学位論文題目	フリーピストン式エンジン発電機の高効率化に関する研究
論文審査委員	主査 教授 水野 勉 教授 佐藤 敏郎 准教授 田代 晋久 准教授 ト 穎剛 教授 長沼 要 (金沢工業大学)

論文内容の要旨

近年、自動車の持続可能社会実現が求められ、世界各国で燃費向上に向けた研究が盛んに進められている。その中でも、電気自動車の充電問題や電力需給の観点から、シリーズハイブリッド方式の自動車が注目を集めている。本論文では、次代の自動車用エンジン発電機として期待されるフリーピストンエンジンリニア発電システム(FPEG)に着目し、エネルギー変換効率の向上を目的に以下2点について取り組んだ結果を論じた。

- (1) 発電効率を改善するためのピストン動作の検討
- (2) 制動力のみの作用によるピストンの位置精度向上に向けた検討

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を述べた。

第2章では、FPEGの構造、特徴を詳述し、自動車用エンジン発電機として期待される点と課題について記載した。FPEGは、燃焼力とばね力を利用して、フリーピストンを往復動作させ、リニア発電機で発電する。本システムのエネルギー変換効率は、主に熱効率と機械効率、発電効率に依存する。また、FPEGは、クランクレスであり、インバータを利用した発電制御が可能であるため、フリーピストンの動作は任意に制御可能という特徴を有する。これらの特徴を活かすことで、従来のクランクエンジンでは難しい熱効率改善のための燃焼技術の適用が期待される。さらに、クランクエンジンに比べて摩擦損失が小さいことも報告されており、機械効率の向上に対しても期待が大きい。一方、リニア発電機には、燃焼エネルギーがダイレクトに投入し、往復運動により常に速度が変わるという特徴がある。これらは制動力の増大や低速域の発電につながり、発電効率を低下させる要因となる。また、フリーピストンはクランクに拘束されないため、燃焼の継続には、リニア発電機の推力作用を利用して上死点の位置精度を保つ必要がある。このとき、力行はバッテリーの電力を消費し、出力低下につながるため、回生のみでフリーピストンを上死点に回帰させることが望ましい。以上より、発電効率の改善と回生のみで上死点位置精度を維持するためのピストン動作の検討が必要であると判断された。

第3章では、第2章で述べた課題に対する対策方法を提案し、シミュレーションにより有効性を確認した。発電効率の低下と上死点位置精度の確保という課題に対して、共振系出力分散動作(ROD(Resonant Output Distribution))を提案した。本手法は、システムの機械共振系を活かして、掃気点以降のピストン動作をロングストローク化し、発電出力を膨張行程から圧縮行程に分散させるものである。これにより、発電出力のピーク値は抑制し、銅損を低減することで発電効率が改善される。さらに、上死点近傍の低速時には発電出力を0とする。これは、低効率領域での発電を避ける狙いだけでなく、上死点近傍におけるピストン速度を可変化する領域を残すことで、熱効率向上のための燃焼技術の適用を可能と

する副次的な狙いもある。また、上死点位置精度の確保のために、熱力学則とエネルギー保存則を用いて、燃焼開始位置の速度を理想に近づける ROD 動作の設定法を提案した。提案手法の有効性を確認するため、運動方程式と回路方程式を連成した FPEG シミュレータを MATLAB-Simulink で構築した。自動車搭載を考慮したリニア発電機は JMAG-Designer を用いて設計し、得られた特性を FPEG シミュレータで使用した。シミュレーションの結果、銅損が大幅に削減され、発電効率は 95%まで向上することを確認した。さらに、上死点の誤差は 0.02mm となり、力行状態を使用せずに位置精度の維持が可能であることが確認された。以上より、発電効率の改善と回生のみによる上死点位置精度の維持を可能とするピストン動作の設定法が明らかとなった。

第 4 章では、第 3 章で述べた動作制御法の中で、最も効率改善に影響すると想定される出力分散化が有効であることを実験により確認した。実験装置は、2 つのリニアサーボモータを用いて、それぞれ燃焼と発電を模擬し、低出力で FPEG の動作を模擬した。発電制御係数を下げ、掃気点以降のストロークを 4mm 増大させることにより、膨張行程と圧縮行程間の発電量が分散化され、銅損が 23%低減することを確認した。実機での FPEG は高出力であり、鉄損よりも銅損の割合が高いと想定されることから、出力分散化は有効であると判断された。一方で、ストロークの増大に伴う摩擦損失の増加により、出力の低下が懸念された。これに対し、FPEG では、下死点近傍の摩擦損失は非常に低くなることが報告されており、掃気点以降のストローク増加による銅損の低減効果を得る提案手法は、出力最大化に対して期待が大きいものと推察された。

第 5 章では、本論文を総括し、結論を述べる。

以上より、本論文では、FPEG に関して、エネルギー変換効率の向上を実現し、次代の自動車用エンジン発電機としての高いポテンシャルが示された。