

学位論文の審査結果の要旨

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向上を目的に以下2点について取り組んだ結果を論じている。

- (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ている。

第2章では、FPEGの構造、原理を詳述し、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述べている。リニア発電機には、燃焼エネルギーがダイレクトに入力し、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。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、としている。

第3章では、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検討している。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)を提案している。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。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、効率マップ上で最大効率96%が実現され、この特性を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った。

第4章では、出力分散化が効率向上に有効であることを実証している。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。発電制動係数を下げ、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、

銅損は23%低減した。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。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いることから、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ことが可能であり、提案手法は出力最大化に有効である、としている。

第5章では、本論文を総括し、FPEGは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ある、としている。

本学位論文は査読付き原著論文4編に基づいて記述されており、学術的に十分な高い評価を得ている。また、今後の自動車システムへの貢献が期待される。したがって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値がある、と審査委員会全会一致で判断した。

公表主要論文名

- ・ 佐藤 光秀, 楡井 雅巳, 山中 雄一朗, 鈴木 樹, 後藤 拓海, ト 穎剛, 水野 勉: 「フリーピストンエンジンリニア発電システムにおける出力分散を利用した銅損低減効果」, 電気学会D論文誌, Vol. 139, No. 1, pp. 69-75, 2019 (2019年1月発行に掲載)
- ・ Mitsuhide Sato, Masami Nirei, Yuichiro Yamanaka, Hironobu Murata, Yinggan g Bu, Tsutomu Mizuno: “Operation Range of Generation Braking Force to Achieve High Efficiency Considering Combustion in a Free-Piston Engine Linear Generator System”, IEEJ Jour. Ind. Appl., Vol. 7, No. 4, pp. 343-350, 2018 (2018年7月発行に掲載)
- ・ Yuichiro Yamanaka, Masami Nirei, Mitsuhide Sato, Hironobu Murata, Yinggan g Bu, Tsutomu Mizuno: “Design of a Linear Synchronous Generator and Examination of the Driving Range for a Free-Piston Engine Linear Generator System”, IEEJ Jour. Ind. Appl., Vol. 7, No. 4, pp. 351-357, 2018 (2018年7月発行に掲載)
- ・ 佐藤 光秀, 楡井 雅巳, 山中 雄一朗, 村田 紘庸, 鈴木 樹, 後藤 拓海, ト 穎剛, 水野 勉: 「フリーピストンエンジンリニア発電システムにおけるばね特性を考慮した共振系出力分散制御の有効性と動作範囲の設定」, 日本AEM学会誌, Vol. 1. 26, No. 2, pp. 268-273, 2018 (2018年6月発行に掲載)