

2020年 10月 5日

## 2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	信州大学工学部
職位または役職	助教
氏名	佐藤 光秀

### 1. 研究題目

次世代型シリーズハイブリッド自動車用リニア発電エンジンにおける損失最小化制御の有効性検証

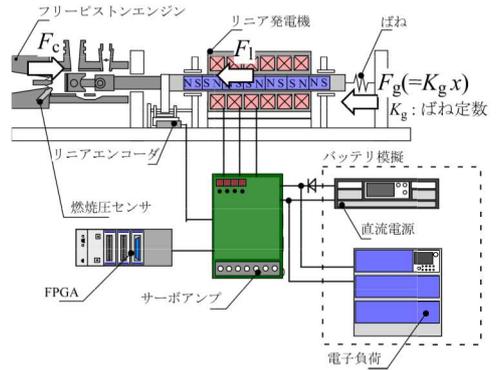
### 2. 研究目的

現行のシリーズハイブリッド自動車(総合効率 38%)よりもエネルギー変換効率の高い次世代の発電エンジンとして、フリーピストン式エンジン発電システム(FPEG)が期待されている。FPEG は機械損失や熱損失の低減に伴い、総合効率 45%の達成が期待されるものの、発電効率の低下が課題である。現行のシリーズハイブリッド車は、燃焼エネルギーがバランスウェイトにより平滑化されて回転形発電機に入力するのに対し、FPEG ではダイレクトにリニア発電機に入力する。また、回転形発電機では同一方向にほぼ一定速回転のまま発電を続けることが可能であるが、リニア発電機は往復運動しながら発電するため、速度ゼロ点が存在する。これらの特徴により、低効率の低速動作時間や高出力時間が増え、リニア発電機の損失は増加しやすい。即ち、次代の発電エンジンとしての期待に応え得る FPEG の実現には、リニア発電機の発電効率向上が不可欠である。これまでに申請者は、発電制動力を抑制し、エンジン燃焼行程に影響のない箇所ストロークを延長することで、銅損を低減する損失最小化制御を提案した。また、シミュレーションと簡易的な発電実験装置を用いて、発電効率が 3%程度向上することを確認した。そこで、本申請ではエンジン実験装置を用いて、損失最小化制御のエンジンに与える影響を把握するとともに、損失改善に対する有効性を実証し、次代のエンジン発電機としての実現性を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究内容及び成果

#### (1) 実験装置の構築

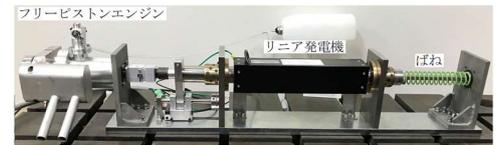
図 1 に FPEG の実験装置を示した。FPEG はフリーピストンエンジン、リニア発電機、ばねによって構成される。エンジンの燃焼力とばねの弾性力により可動子が往復運動する。可動子の往復運動を利用して発電を行い、発電時には発電制動力  $F_1$  が可動子に作用する。サーボAMP内のインバータによる電流制御により、発電制動力の制御が可能であり、これに合わせてバッテリーへの出力が制御される。フリーピストンエンジンは、クランク機構のピストンと比較すると機械的拘束がないため、制動力を調整することで、ピストン動作の制御が可能となる。この動作を模擬可能な実験装置を構築した。



(a) 全体構成

#### (2) 損失最小化制御

図 2 には、損失最小化制御の動作線を示した。損失最小化制御は以下の 2 点を考慮することで、銅損の低減を図る。(1)出力に対する銅損の割合が大きくなる動作端部の低速時の発電制動力を抑制する。(2)制動力が大きくなる燃焼後の膨張行程において、制動力の上限を設定し、発電制動力を抑制する。



(b) 可動部外観

図 1 FPEG 実験装置

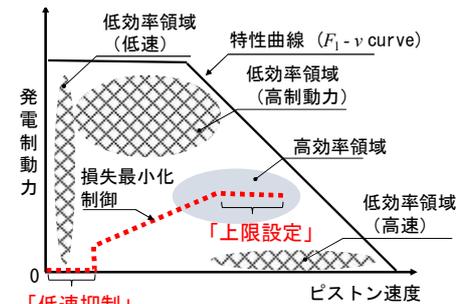


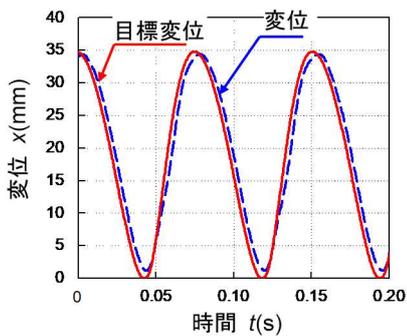
図 2 損失最小化制御の動作線

また、制動力の上限値を設定することで、膨張行程の燃焼エネルギーはばねの弾性エネルギーに蓄えられ、膨張行程の発電量は圧縮行程に分散される。これにより出力の最大値が低減し、発電機の小型化も可能となる。

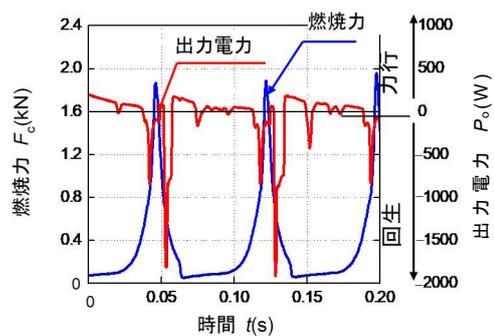
さらに、クランクエンジンの正弦波状のピストン動作と比較すると、損失最小化制御を適用した FPEG ではピストンの挙動が変化するため、エンジン燃焼に影響を与える可能性がある。そこで、実験装置を使用し、損失最小化制御を適用した場合のピストン動作履歴におけるエンジンの燃焼可否を検証した。

#### (3) 損失最小化制御の実験検証

図 3 に実験結果を示した。(a)はピストン変位履歴である。シミュレーションで損失最小化制御を適用した結果を目標変位として、位置制御を行った。ピストン変位は目標変位に追従して動作した。(b)はエンジンの燃焼力と出力電力である。ピストンが上死点に達すると、燃焼力がインパルス状に作用している。損失最小化制御の適用時にも、エンジンの燃焼が継続可能であることを確認した。また、損失最小化制御非適用時は、ストロークが 30 mm であり、発電効率は 12.0 %であった。一方、損失最小化制御を適用することで、圧縮行程に発電量が分散し、ストロークは 35 mm となり、発電効率は 38.7 %まで向上した。本実験では、市販のリニアモータをリニア発電機として利用したため、発電効率は低い。低損失のリニア発電機を利用することでさらなる効率改善が見込まれる。



(a) ピストン変位



(b) 燃焼力, 出力電力

図 3 実験結果

#### 4. 今後の研究の見通し

---

##### (1) エンジン始動のためのリニアモータ制御

FPEG のエンジン始動時には、リニア発電機をリニアモータとして駆動力を作用することで、燃焼を開始させるように可動子を動作させる必要がある。そこで、モータの電力消費を最小限とするようなエンジン始動方法を検討し、損失最小化制御と組み合わせた動作制御方法を明らかにしたい。

##### (2) デュアルエンジン型における発電効率の改善

ばねを利用せずに 2 基のエンジンでリニア発電機を挟み込んだデュアルエンジン型は、熱発生分散化、ばね損失の改善などが可能となるため、総合的な効率の改善に期待される。そこで、本申請で明らかにしたシングルエンジン型の損失最小化制御をデュアルエンジン型に応用した可動子動作制御方法を明らかにしたい。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

##### < 学術論文 (査読有) >

- [1] Mitsuhide Sato, Kaname Naganuma, Masami Nirei, Yuichiro Yamanaka, Tatsuki Suzuki, Takumi Goto, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno: “Improving the Constant-Volume Degree of Combustion Considering Generatable Range at Low-speed in a Free-Piston Engine Linear Generator System”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 14, No. 11, pp. 1703-1710, 2019
- [2] Mitsuhide Sato, Masami Nirei, Yuichiro Yamanaka, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno: “High power density by combining of a double stator and an opposite-magnets linear generator in a dual-type free-piston engine generator”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 65, No. 2, pp.1-16, 2020

##### < 国際会議論文 >

- [1] Jianping Zheng, Kaname Naganuma, Masami Nirei, Shoma Irie, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno: “Improvement of Thermal Efficiency via High-Frequency Driving of Mover in Free-Piston Engine Linear Generator”, Proc. 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020), 2020 年 11 月発表予定

##### < 国内学会論文 >

- [1] 鄭 建平, 楡井 雅巳, 長沼 要, 鈴木 樹, 後藤 拓海, ト 穎剛, 佐藤 光秀, 水野 勉: 「フリーピストン式エンジン発電機における熱効率改善のための可動子駆動の高周波化の検討」, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-20-009, pp.1-6, 2020
- [2] 後藤 拓海, 楡井 雅巳, 長沼 要, 鈴木 樹, 鄭 建平, ト 穎剛, 佐藤 光秀, 水野 勉: 「フリーピストン式エンジン発電機のばね共振を利用した始動方法」, 令和 2 年電気学会全国大会, 5-005, pp.1-2, 2020