

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14714

研究課題名（和文）デュアル型フリーピストン式発電機における出力最大化のための可動子挙動の解明

研究課題名（英文）Effect of Mover Movement on Output Maximization in Dual-type Free-piston Engine Generator

研究代表者

佐藤 光秀 (Sato, Mitsuhide)

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：80793968

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、デュアルシリンダ型フリーピストンリニア発電機の燃焼変動時に回生運転を継続可能とするピストン運動制御法について解析および実験を通して検証を行った。断続的速度制御の適用により、連続した燃焼変動時に回生運転を継続可能となることを確認した。また、断続的速度制御の制御パラメータである制御動作範囲、目標速度の振幅および制御ゲインを適切に設定することで発電効率の向上および安定した運転の継続が実現できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フリーピストンリニア発電機はクランクなどの運動変換機構を利用しないため、ピストンは機械的な制約を受けない。そのため、リニア発電機の電流をインバータ制御で調整することで、ピストンの運動を自在にコントロール可能となる。一方、左右にシリンダを使用するデュアルシリンダ型機構はエンジンの燃焼変動が発生しやすいため、左右の上死点位置を高精度に維持しながら力行運転せずに発電運転のみで燃焼を継続することが求められている。本研究では、断続的に速度制御をオンオフを切り替えることで、発電運転のみで一定の上死点位置精度を維持可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：This research confirms the influence of intermittent speed control on power running suppression in a dual-cylinder FPEG. Experimental results indicate that this control suppresses power timing and enables continuous combustion. In addition, simulation and experimental results clarify the effects of the control range of intermittent speed control on power generation efficiency.

研究分野：電気機器

キーワード：リニア発電機 フリーピストンエンジン 発電制御 速度制御

1. 研究開始当初の背景

図1のフリーピストンエンジン発電機(FPEG)は、クランク式エンジン発電機に比べて40%以上の摩擦損失を低減することが可能である。また、回転運動変換機構を利用しないため、インバータを利用した発電制御を行うことでピストン運動を自在にコントロールすることが可能となり、熱効率の向上が実現できる。一方で、機械的な制約がないことでピストンの上死点位置が変動し易い。この上死点位置に起因してエンジン筒内の圧縮比が変化するため、各サイクルで燃焼力も変動する。ここで、一般的な位置フィードバック制御を用いてピストン運動を制御するとリニア発電機で力行が生じてしまう。

力行が生じると図2に示すようにバッテリーに蓄えた電力の一部がピストンの運動エネルギーに変換され、再度電気エネルギーに変換されるエネルギーの循環が生じるため損失が増加する。特に、図1のデュアルシリンダ型FPEGはリニア発電機を挟むようにエンジンを対向させた構造となっているため、燃焼力の変動はエネルギー変換効率に与える影響が大きい。近年、この上死点位置の変動を抑えて安定した連続燃焼を実現する研究が盛んに行われている。その中で、申請者は上死点位置の変動に起因した燃焼変動が生じたときにも回生運転の継続を可能とする制御手法について検討を行った。

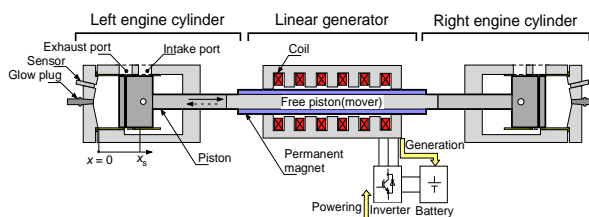


図1 デュアルシリンダ FPEG の基本構造

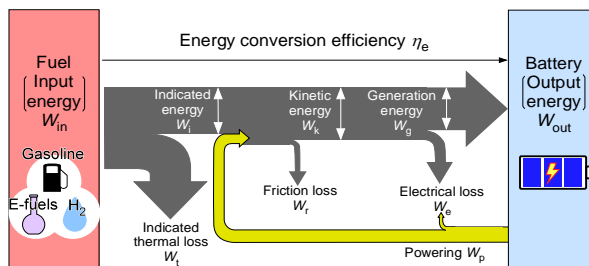


図2 FPEG のエネルギーフロー

2. 研究の目的

本研究の目的は、連続した燃焼変動時に回生運転の継続を可能とし、エネルギー変換効率の向上を実現するための制御法を解析および実験により、検証する。加えて、制御パラメータが発電効率や上死点位置の変動に与える影響について明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、燃焼変動時に回生運転を継続させるための制御法として断続的速度制御の適用を検討した。断続的速度制御はピストンストロークの中央付近でのみ制動力を作用させ、上死点および下死点付近ではピストンに自由運動をさせる制御法である。図3に断続的速度制御の原理を示した。この制御方法は速度制御を基本とし、目標速度および動作範囲を設定することによって上死点および下死点位置を制御する。本研究ではこの断続的速度制御をデュアルシリンダ型FPEGに適用し、燃焼変動時に生じる力行電力量の低減効果を明らかにする。

実験装置の外観を図4に示した。実験装置は市販のリニア発電機および2ストロークエンジンを用いて構築した。実験装置のエンジンはグロープラグを用いた着火方式としているため、燃焼変動が起きやすい。解析はMATLAB/Simulinkで実験装置を模擬して行う。解析では、与える熱発生率を変化させ、燃焼変動を簡易的に模擬した。

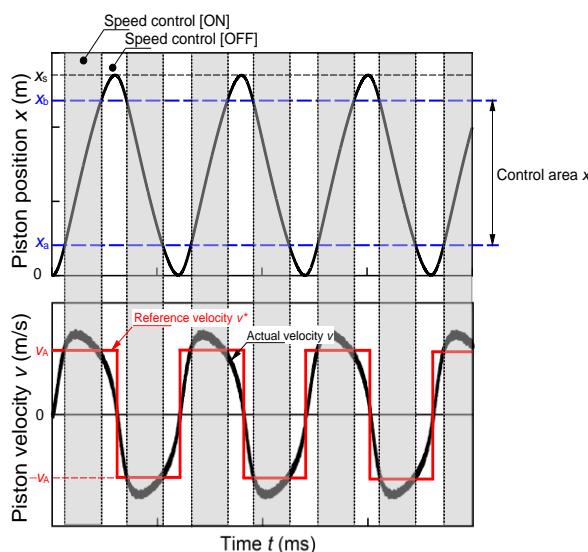


図3 断続的速度制御の原理

解析では、与える熱発生率を変化させ、燃焼変動を簡易的に模擬した。

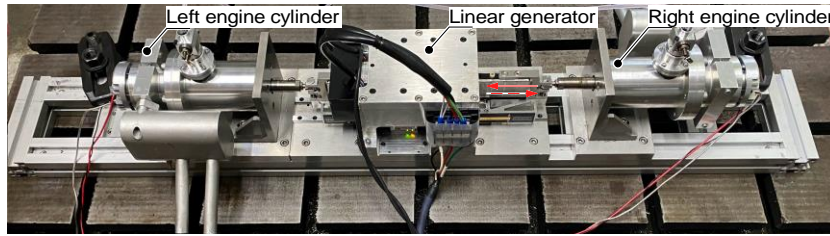


図4 デュアルシリンダ FPEG 実験の外観

4. 研究成果

(1) 力行電力量低減効果の解析検証

図5に燃焼変動が生じた場合に位置フィードバック制御を適用したときの解析結果を示した。図5(a)の筒内圧力のように各サイクルで燃焼力の変動を模擬できている。また、図5(b)のピストン変位より燃焼力が変動する場合でもピストン変位は目標波形に追従していることが確認できる。しかし、図5(c)の出力電力波形は複雑に正負が変化し、運転中に力行していることが明らかである。

図6に燃焼変動が生じる場合に断続的速度制御を適用したときの解析結果を示した。図6(b)はピストン変位を表しており、燃焼力が変動する場合でも連続運転が継続された。さらに、図6(c)より断続的速度制御を適用することで、力行はなくなり発電のみで運転可能である。したがって、燃焼力の変動時にも力行せずに発電のみで連続的に上死点に到達して運転が継続できた。

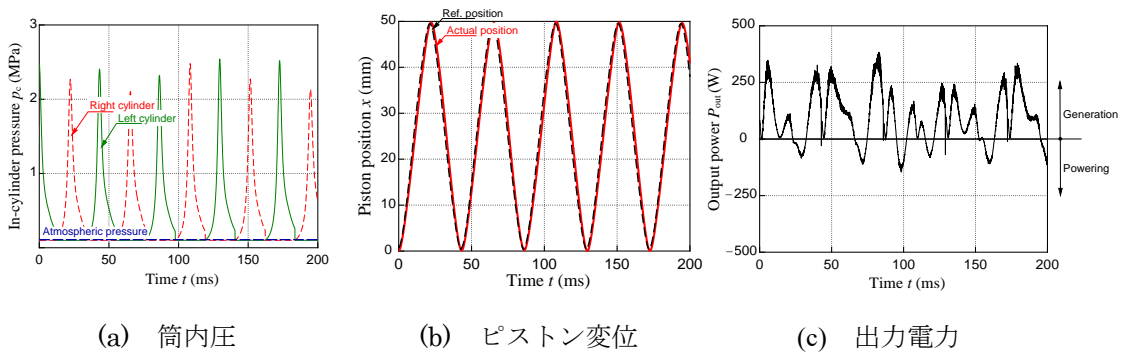


図5 位置制御適用時の解析結果

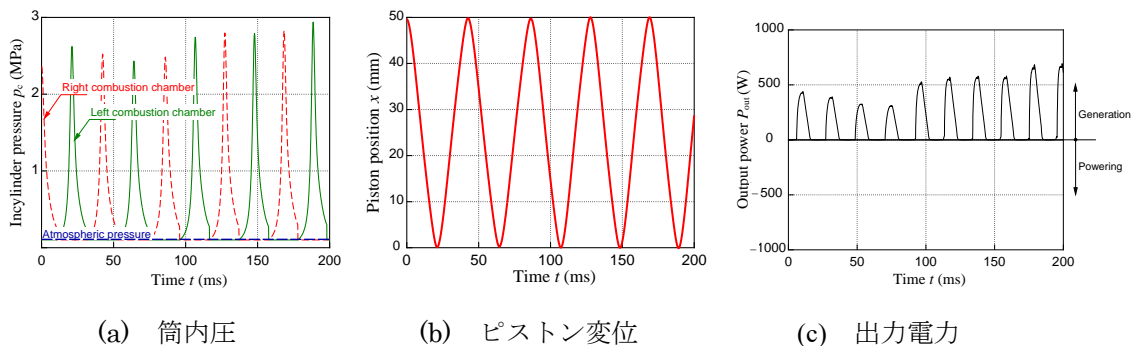


図6 断続的速度制御適用時の解析結果

(2) 力行電力量低減効果の実験検証

図7に位置フィードバック制御を適用したときの実験結果を示した。図7(b)のピストン変位より、実測と目標波形との間には偏差が生じており、ストロークは標準ストローク 50 mm に対して 46.4 mm となった。図7(c)の出力電流は図5(c)の解析結果と同じように、燃焼変動に伴い回生・力行が複雑に変化している。

図8に断続的速度制御を適用したときの実験結果を示した。燃焼力が変動する場合でも断続的速度制御を用いて運転を継続可能であった。また、図8(c)の出力電力より、断続的速度制御適用時はほとんどが回生のみで運転が継続された。回生後に瞬時的に力行が生じているのは、本実験では安全性を考慮して制御ゲインを大きくしたことによる。位置フィードバック制御の適用時と比べて、大幅に力行電力量を低減した。

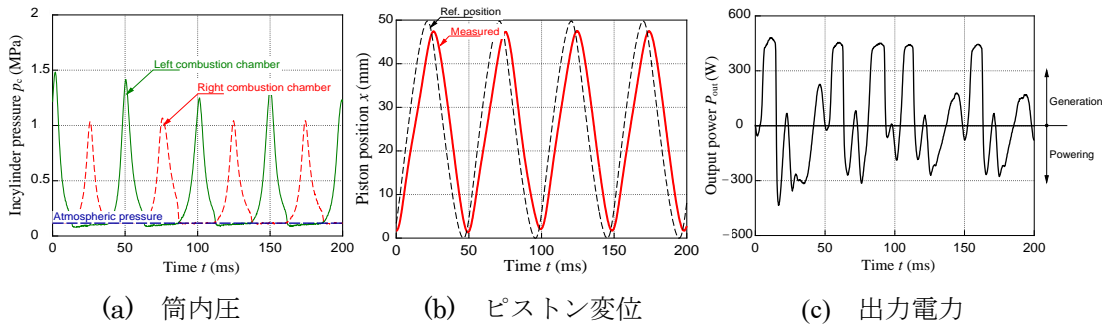


図 7 位置制御適用時の実験結果

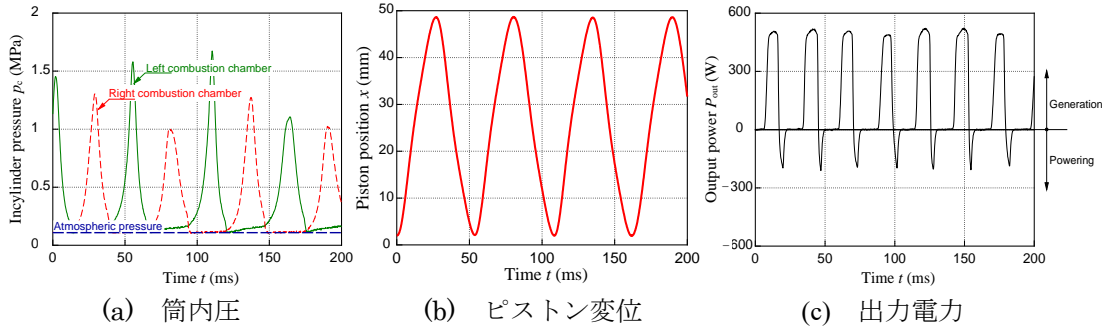


図 8 断続的速度制御適用時の実験結果

(3) 制御動作範囲が上死点変動に与える影響

図 9 に制御動作範囲と発電効率との関係を示した。横軸はピストンの運動範囲全体に対する制御動作範囲の比率であり、縦軸が発電効率を示している。発電効率は制御動作範囲の拡大に伴い向上することを確認した。

図 10 に制御動作範囲と上死点位置の標準偏差との関係を示した。横軸はピストンの運動範囲全体に対する制御動作範囲の比率であり、縦軸が上死点位置の標準偏差を示した。制御動作範囲の拡大に伴い上死点の変動が大きくなった。

以上の結果より、制御動作範囲の拡大に対して、発電効率と上死点位置偏差は二律背反の関係となる。したがって、上死点変動の許容範囲内で可能な限り制御動作範囲を拡大することで、高効率で安定した連続運転を実現できる。

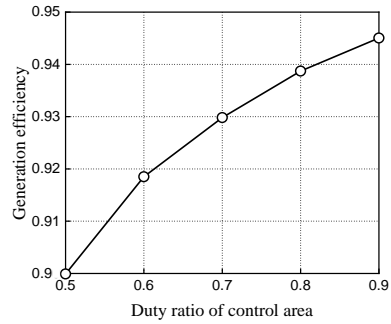


図 9 制御動作範囲と発電効率

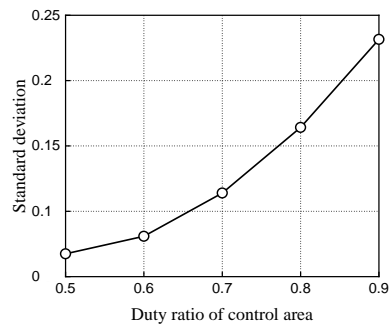


図 10 制御動作範囲と上死点位置の標準偏差

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Shoma Irie, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno, Fumiya Nishimura, Kaname Naganuma	4. 巻 15
2. 論文標題 Effect of Nonlinear Spring Characteristics on the Efficiency of Free-Piston Engine Generator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en15207579	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 佐藤 光秀	4. 巻 10
2. 論文標題 電気自動車の航続距離・電費改善を支える技術開発：自動車の省エネに向けたフリーピストンエンジンリニア発電システム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊車載テクノロジー	6. 最初と最後の頁 35-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mitsuhide Sato, Shoma Irie, Jianping Zheng, Tsutomu Mizuno, Fumiya Nishimura, Kaname Naganuma	4. 巻 10
2. 論文標題 Generator design considering mover action to improve energy conversion efficiency in a free-piston engine generator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 2142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/electronics10172142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Mitsuhide Sato, Takumi Goto, Jianping Zheng, Shoma Irie	4. 巻 13
2. 論文標題 Resonant Combustion Start Considering Potential Energy of Free-Piston Engine Generator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 5754
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en13215754	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Mitsuhide Sato, Masami Nirei, Yuichiro Yamanaka, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno	4. 巻 65
2. 論文標題 High power density by combining of a double stator and an opposite-magnets linear generator in a dual-type free-piston engine generator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 355-370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-190158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 入江 渉馬, 佐藤 光秀, 水野 勉, 長沼 要
2. 発表標題 フリーピストンエンジン発電機における燃焼変動外乱時に回生運転を継続する制御法
3. 学会等名 電気学会 リニアドライブ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 入江 渉馬, 佐藤 光秀, 水野 勉, 西村 郁弥, 長沼 要
2. 発表標題 4ストロークエンジンを用いるためのクアッド型フリーピストンリニア発電機の提案
3. 学会等名 電気学会 リニアドライブ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoma Irie, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno, Fumiya Nishimura, Kaname Naganuma
2. 発表標題 Quad-Cylinder Structure for Electrical Loss Reduction in Free-Piston Engine Linear Generator with Four-Stroke Engine
3. 学会等名 SPEC 2022 (IEEE Southern Power Electronics Conference) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 入江 渉馬, 鄭 建平, 佐藤 光秀, 水野 勉, 西村 郁弥, 長沼 要
2. 発表標題 デュアル型リニア発電エンジンにおける可動子動作履歴の変化に伴う損失低減効果
3. 学会等名 電気学会 リニアドライブ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江 渉馬, 鄭 建平, 佐藤 光秀, 水野 勉, 西村 郁弥, 長沼 要
2. 発表標題 リニア発電エンジンのエネルギー変換効率最大化のための可動子動作を考慮したシステム構築法
3. 学会等名 SEAD33(第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江 渉馬, 佐藤 光秀, 水野 勉, 西村 郁弥, 長沼 要
2. 発表標題 リニア発電エンジンの総合効率の向上を目的とする非線形ばね特性を考慮した駆動周波数の設定方法
3. 学会等名 電気学会 リニアドライブ研究会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Jianping Zheng, Kaname Naganuma, Masami Nirei, Tatsuki Suzuki, Takumi Goto, Mitsuhide Sato, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno
2. 発表標題 Improvement of Thermal Efficiency via High-Frequency Driving of Mover in Free-Piston Engine Linear Generator
3. 学会等名 ICEMS2020(International conference on Electronic Magnetics Systems) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shoma Irie, Jianping Zheng, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno, Fumiya Nishimura, Kaname Naganuma
2. 発表標題 Loss-Reduction Effect with the Variation in the Mover Motion in a Dual-Sided Free-Piston Engine Generator System
3. 学会等名 LDIA2021 (International Symposium on Linear Drives for Industry Applications) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関