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

Effectiveness and Setting Operation Range of Resonant Output Distribution Control in Consideration of Spring Characteristics on a Free-Piston Engine Linear Generator System

佐藤 光秀^{*1,3}(学生員), 楡井 雅巳^{*2}(正員), 山中 雄一朗^{*3}, 村田 紘庸^{*3},
鈴木 樹^{*3}, 後藤 拓海^{*3}, ト 穎剛^{*3}(正員), 水野 勉^{*3}(正員)

Mitsuhide SATO (Stu. Mem.), Masami NIREI (Mem.), Yuichiro YAMANAKA, Hironobu MURATA,
Tatsuki SUZUKI, Takumi GOTO, Yinggang BU(Mem.), Tsutomu MIZUNO (Mem.)

A free-piston engine linear generator system is expected for use as a high-efficiency generator engine. The copper loss is decreased using resonant output distribution control which limits the maximum electric current and uses the mover inertia for power dispersion. But this causes iron loss and spring heat loss is larger due to stroke extension. Therefore, we confirmed that the total loss decrease by using its control in the theoretically calculation and simulation. Furthermore, the variable damper control is effective for decrease at generation time in using non-linear spring.

Keywords: linear generator, free-piston engine, resonant, generation control.

(2017 年 10 月 26 日受付, 2018 年 1 月 24 日再受付, 2018 年 2 月 1 日再々受付)

1 緒言

1.1 背景

近年, 自動車の持続可能社会の構築に向けた移動体用電動応用システムの技術開発が進められており[1], 2016 年には発電して航続距離を延ばすシリーズハイブリッド方式の自動車が市販を開始した。このシステムは, エンジンを発電専用とし, 回転形発電機で電力を取り出して走行する。回転形発電機では, 最適な回転数や出力を保ちながら動作させることができるため, 発電効率が低い[2]。一方で, 燃料から動力を取り出す熱効率の観点では, 従来のガソリン車と同等の 39%程度と試算され, システム全体としての効率向上の弊害となっている。

そこで, シリーズハイブリッド方式と同様に発電エンジンを有するフリーピストンエンジン発電(以下, FPEG)システムが注目される[3-6]。本システムは一般に, 往復運動式の内燃機関であるフリーピストンエンジンとリニア発電機とばねにて構成され, クランク機

械損失の低減が期待される。また, 排気損失の低減に伴う熱効率向上も期待される。一方, 発電時には, 可動子を往復運動させながら, リニア発電機を用いて電力を回収する。本システムは, 振動系特有の端部での速度低下や, 燃焼に対応させるための大制動力が起因して, 一方向のみに回転させながら適した状態で発電を続けられる回転形発電機よりも, 単純には発電効率が低下すると考えられる。一方, フリーピストンはクランク機構のように動作範囲が束縛されないため, 発電制動力の調整でピストン動作を制御可能である。つまり, FPEG システムは, 効率を考慮したピストン動作の制御が可能となれば, 自動車用発電エンジンの革新的技術となりうるポテンシャルを秘めている。

1.2 目的

これまでに筆者らは, FPEG システムにおいて, 共振系出力分散(Resonant Output Distribution)制御(以下 ROD 制御)を検討し, 銅損の削減に対する優位性を報告した[7]。ROD 制御は, 機械共振を考慮して発電制動力の設定を変え, ピストン慣性やばね反発力を利用しながら, 膨張・圧縮の各行程間の出力均一化を図るものと定義する。これにより, 一定出力を保ちながら, 高効率な状態で発電を続ける回転形発電機の動作に近づけることが可能となる。しかし, 発電制動力の設定に伴うピストンストロークの違いがエネルギー変換効

連絡先: 佐藤 光秀, 〒386-1211 長野県上田市下之郷 813-8,
長野県工科短期大学 電子技術科,
e-mail: mitsuhide@ele.pit-nagano.ac.jp

^{*1}長野県工科短期大学校 ^{*2}長野工業高等専門学校

^{*3}信州大学工学部

構を使用せずに動力を電力に直接変換できるため, 機

率に与える影響を考慮した理論は検討されていない。
また、ばね力の特性を考慮して動作範囲を設定する手法を検討することで、さらなる出力増が期待される。
そこで、本報では、理論計算とシミュレーションにより、以下の2点を明らかにすることを目的とした。

- 1) ばね損失を考慮した ROD 制御の有効性と有効範囲の判断方法
- 2) ばね反発力の特性を考慮して出力向上を図るための ROD 制御の範囲設定方法

2 システム構成とシミュレータ

2.1 物理モデル

FPEG システムの物理モデルを図1に示した。燃焼室ではエンジン燃焼力 F_c を作用させ、質量 m のピストンをばね反発室に向かって動作させる。ばね反発室では、ばね反発力 F_g が燃焼力と反対方向に作用し、ピストンを燃焼室に押し戻す。この動作を繰り返すことで往復運動させる。ピストンには永久磁石を取り付け、周囲にコイルを配置して磁石可動形リニア発電機とし、ピストンの往復運動を利用して発電させ、発電制動力 F_l を作用させる。運動方程式は式(1)である。

Fig.1 Physical models of the FPEG system.

Fig.2 Block diagram of the FPEG simulator.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_c - F_g - F_l \quad (\text{N}) \quad (1)$$

ここに、 x :ピストン位置(m)である。

2.2 効率シミュレータ

MATLAB-Simulink にて、運動方程式と回路方程式を連成させた図2の効率シミュレータを製作した。

(1)作用力

燃焼力 F_c は、時間変化する燃焼熱発生量を断熱変化のモデルに考慮した式(2)で求める。ばね反発力 F_g は式(3)の線形モデルと式(4)の非線形モデルを考慮する。

$$F_c(t) = A_c \left\{ p_c(t - \Delta t) \times \left(\frac{V_c(t - \Delta t)}{V_c(t)} \right)^\kappa + \frac{\Delta Q_c \times (\Delta t / \Delta t_Q) \times (\kappa - 1)}{V_c(t)} \right\} \quad (\text{N}) \quad (2)$$

$$F_{g(\text{linear})}(t) = K_g x(t) + F_a \quad (\text{N}) \quad (3)$$

$$F_{g(\text{non-linear})}(t) = A_g \times p_g(t - \Delta t) \times \left(\frac{V_g(t - \Delta t)}{V_g(t)} \right)^\kappa \quad (\text{N}) \quad (4)$$

ここに、 A_c :燃焼室断面積(m^2), p_c : 燃焼室圧力(Pa), V_c :燃焼室体積(m^3), ΔQ_c :熱発生量(J), κ :比熱比, Δt :サンプル時間(s), Δt_Q :熱発生量のサンプル時間(s), K_g :ばね反発定数(N/m), F_a :ばね反発オフセット(N), A_g :ばね反発室断面積(m^2), p_g :ばね反発室圧力(Pa), V_g :ばね反発室体積(m^3)である。

(2)発電制御

発電制御では、ROD 制御で生成される電流指令に基づき、電流 PI 制御、ベクトル制御を用いて、インバータに PWM 信号を入力し、発電制動力 F_l と発電出

Fig.3 The FPEG structure (unit: mm).

Fig.4 Efficiency map of the FPEG.

Fig.5 Energy flow of the FPEG system.

Table 1 The simulation conditions.

Category	Item	Value
Generator	External dimensions	∅168×263 (mm)
	Dimensions of mover	∅128×130 (mm)
	Mass of mover	5.25 (kg)
	Number of coil turns	5
	Resistance of armature coil	108 (mΩ/phase)
	Inductance of armature coil	1.8 (mH/phase)
	Thrust constant	22 (N/A)
	Number of pole pairs	7
	Flux linkage of coil	0.065 (Wb)
Engine	Combustion scavenging position	67 (mm)
	Boa diameter of combustion	68 (mm)
	The volume of top dead center	389,000 (mm ³)

力 P_o を制御する[7]。PWM 信号はキャリア周波数 10kHz の三角波比較法で生成する。発電制動力は式 (5) で与える。ROD 制御の動作範囲設定のために、速度に比例する発電制動係数 K_1 を定義する。

$$F_1 = K_f i_q = K_1 v \quad (\text{N}) \quad (5)$$

ここに、 K_f : 推力定数(N/A), i_q : q 軸電流(A), v : ピストン速度(m/s)である。

(3) リニア発電機

電磁界解析ソフト JMAG-Designer を用いて、図 3 の表面磁石形リニア発電機を設計した[7]。図 4 はリニア発電機の銅損と鉄損を考慮した効率マップである。低推力領域で銅損の低減を達成し、ハルバツハ配列とすることで推力特性を向上させた[8]。シミュレーションで使用したパラメータを表 1 に示した。

(4) 損失

シミュレータのエネルギーフローを図 5 に示した。ガソリンエネルギーを入力とし、バッテリーの電力を出力とする。損失は、エンジンの熱損失 Q_1 、空気ばね損失 Q_g 、銅損 Q_c 、鉄損 Q_i を考慮する。

エンジンの熱損失は、上死点と掃気点 x_a に依存して決まるため、本検討ではほぼ一定となる。空気ばねの損失は、ピストンとシリンダの隙間から空気が流れ出ることによる粘性損失と、空気が圧縮されて温度上昇することによる熱損失に起因する。粘性損失は、隙間の大きさに依存するが、フリーピストンでは 0.01 mm と小さくすることができ、空気の漏れはほぼないため、熱損失のみを考慮する[9]。鉄損は等価鉄損抵抗 R_i を与える。

2.3 ROD 制御

図 4 の実線は ROD 制御の動作範囲である。点線で設定した比例制御の場合と比べて、銅損の削減が可能となる[7]。本制御法の特徴は以下である。

- 1) 低速域では出力が低下し、銅損の占める割合が大きく、効率が下がるため、低速域では制動力を作用させず、端部以外の中高速域で作用させる。
- 2) 損失の大きいエリアでの発電を抑制するために、制動力は $F_{1-\max}$ 以下として、最大電流を設定する。また、中速域では、共振系を実現し、発電制動力を速度に比例させて与え、発電制動係数 K_1 を抑制する。
- 3) 2) に伴い共振点を考慮して、ばね反発係数を設定し、ストロークを延長する。これにより、可動子慣性と弾性エネルギーを利用して、膨張行程で抑制した発電量を圧縮行程へ分散させることができる。つまり、最大出力は抑制され、銅損が改善される。

3 ROD 制御の有効性

ストロークの延長により銅損は改善するが、鉄損やばね損失に影響を与え、出力やシステム効率が変動する[5]。しかし、これまでにストローク延長や ROD 制御の有効な範囲について損失を考慮して理論的に判断した報告はない。ここでは、ストロークと損失についての理論的整理とシミュレーションを行う。

3.1 減衰強制振動モデル

ROD 制御の有効性の判断には、ストロークに依存する平均速度を把握する必要がある。そこで、FPEG の動作に類似した式(6)の減衰強制振動モデルで考える。定常状態における一般解は式(7)で与えられ、その時のストロークは式(8)となる。FPEG システムではピストンの往復動作に合わせて、燃焼を開始させるため、共振点付近での動作となり、角周波数は式(9)となる。よって、式(8)は式(10)に変形され、燃焼力を一定と考えると、ストロークは、発電制動係数すなわち減衰係数と、ばね定数に依存すると判断できる。また、FPEG システムのピストン動作に類似する正弦波を考えた場合には、平均速度は式(11)で与えられる。

$$m\ddot{x} + K_1'\dot{x} + K_g'x = f(t) = F_0 \sin \omega t \quad (\text{N}) \quad (6)$$

$$x = x_b \sin(\omega t + \delta) \quad (\text{m}) \quad (7)$$

$$x_b = \frac{1}{\sqrt{(K_g' - m\omega^2)^2 + (K_1'\omega)^2}} F_0 \quad (\text{m}) \quad (8)$$

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{K_g'}{m}} \quad (\text{rad/s}) \quad (9)$$

$$x_b = \frac{1}{K_1'} \sqrt{\frac{m}{K_g'}} F_0 \quad (\text{m}) \quad (10)$$

$$v_{\text{ave}} = 4fx_b = \frac{2F_0}{\pi K_1'} \quad (\text{m/s}) \quad (11)$$

ここに、 K_1' :強制振動モデルの減衰係数(N/m/s), K_g' :強制振動モデルのばね定数(N/m), F_0 :外力の最大値(N), x_b :ストローク(m), ω :外力の角周波数(rad/s), δ :位相差(rad), v_{ave} :ピストン平均速度(m/s), f :運動周波数(Hz)である。

3.2 損失の傾向

(1)鉄損

鉄損を簡易的に求めるには、式(12)のとおり、渦電流損失 Q_{ie} とヒステリシス損失 Q_{ih} を合計する。すなわち、ピストン速度 v が早いほど鉄損は大きくなる。ROD 制御ではストローク量を伸ばすためには発電制動係数を小さくする必要があり、式(11)より、平均速度は増

加し、鉄損が増大する傾向にある。各係数は JMAG-Designer を用いて試算した。

$$Q_i = Q_{\text{ie}} + Q_{\text{ih}} = 1.94 \times v^2 + 6.45 \times v \quad (\text{W}) \quad (12)$$

(2)ばね損失

空気ばね熱損失 Q_g は式(13)-式(15)の非燃焼時のピストン熱損失モデルを用いて計算する[9]。熱伝達率 α とばね反発室温度 T_g はストロークとピストンの平均速度に依存するため、ストロークが伸びるほど、損失は増大する傾向にある。

$$Q_g = \alpha S_g (T_g - T_s) \quad (\text{W}) \quad (13)$$

$$\alpha = 3.26 d_c^{-0.2} p_g^{0.8} T_g^{-0.55} (2.88 v_{\text{ave}})^{0.8} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (14)$$

$$T_g = T_{g0} \left(\frac{V_{g0}}{V_g} \right)^{\kappa-1} \quad (\text{K}) \quad (15)$$

ここに、 S_g :ばね反発室表面積(m^2), T_s :周囲温度(K), d_c :シリンダ径(m), v_{ave} :ピストン平均速度(m/s), T_{g0} :ばね反発室初期温度(K), V_{g0} :ばね反発室初期体積(m^3)である。

(3)銅損

ROD 制御における銅損の低減効果について、図 6 の銅損マップを用いて考える。図 6 の線 b は線 a よりも発電制動係数 K_1 を低く設定し、高速領域で最大制動力を設定している。これにより、式(10)からストロークが伸び、線 a よりも線 b のピストン平均速度が大きくなる。しかし、ピストンを往復動作させるには、式(16)の作用仕事 W_1 が等しくなる必要があるため、ストロークの延長に伴い、最大制動力が小さくなり、q 軸電流が抑制される。銅損は q 軸電流の二乗に比例するため、本条件では、最大制動力の二乗に比例し、ストロークの二乗に反比例して削減される。以上から、ストロークの増加に伴い、最大制動力が抑制され、銅損は削減される。

$$W_1 = \int F_1 dx \quad (\text{J}) \quad (16)$$

3.3 有効範囲の判断

3.2 節の理論を用いると、ROD 制御では、各損失がトレードオフの関係になると予想される。そこで、減衰強制振動モデルを用いて、平均速度における損失を理論的に求めた結果を図 7 に示した。合計損失 Q_{total} はストロークに依存し、最適値が存在する。すなわち、ROD 制御が有効となる範囲の存在が示唆される。また、本制御においてストロークに大きく影響されるのは銅損である。つまり、銅機械では銅損の割合が高まり、より明確な最適点が現れると見込まれる。

ここで、実際にピストン動作を考慮するため図2のシミュレータを用いて損失を試算した。図6の線aと線bで動作させた場合の損失を表2に示した。ピストンの熱損失は、ばね反発室の圧力損失として考慮した。ROD制御を用いてストロークを増加させることで、膨張行程から圧縮行程に発電を分散し、銅損が抑制された。一方で、鉄損と空気ばね熱損失は増加し、これは理論計算の傾向と合致する。つまり、ストロークの最適化によって合計損失の削減が達成可能であると判断される。また、FPEGシステムは減衰強制振動モデルで近似でき、簡易的に損失とストロークの傾向を見積もることが可能である。実環境においても傾向は同様になると見込まれるが、実機では3次元的に熱が拡散

Fig.6 Effect of Copper loss reduction with mechanical resonant control.

Fig.7 Relationship of the loss in a theoretical model.

Table 2 The comparison of the loss.

Item	Symbol	Line-a $K_1=201.3$ $F_{l-max}=non$	Line-b $K_1=194.7$ $F_{l-max}=1287$
Stroke (mm)	x_b	122.10	132.02
Copper loss (W)	Q_c	131.62	111.07
Iron loss (W)	Q_i	69.35	74.28
Spring heat loss(W)	Q_s	185.96	197.01
Total loss (W)	Q_{total}	386.94	382.37

し、外部温度や壁面などの条件が異なるため、機器の特性による絶対値を考慮して、最適値を判断する必要がある。

4 ばね特性を考慮した動作範囲の設定

4.1 ばねの特性

一般的な線形ばねのばね反発力は式(2)の一次比例で与えられる。空気ばねを用いて線形性を保つには、ピストンの振幅よりも空気室の断面積を非常に大きくすることにより実現できるが[10]、自動車搭載を考慮した場合には、寸法上の制約で難しい。そこで、式(4)の非線形ばねの特性について考える。

線形ばねと非線形ばねでは、上死点付近の動作端部において、ばね反発力の挙動が異なる。図8は線形ばねと非線形ばねで動作させた場合のばね反発力の状態である。非線形ばねでは、上死点近傍においてばね力が1kN以下の低い状態で長く作用している。これにより、動作端部で低速で移動する時間が長く、ROD制御における発電抑制の時間が増え、発電量が低下すると推定される。具体的に発電抑制の時間を比較すると、線形ばねは2.6ms、非線形ばねは3.9msであった。すなわち、非線形ばねでは、発電制動力の与え方を工夫することが望ましい。

4.2 発電抑制時間の短縮

端部での発電抑制時間を短縮させる手法として、中速時に発電制動力を増加させて素早く減衰させることを考える。そこで、減衰性が高く、広範囲のエネルギー吸収が可能な、可変ダンパーの考え方を取り入れた発電制御を検討する。可変ダンパーは、折れ曲がり点であるリリース速度 v_{relief} を境界に減衰勾配が折れ曲がるバイリニア型と速度に指数乗で減衰力を与える指数型があり、ほぼ等価であることが示されている[11]。

Fig.8 Differences of the spring repulsive force.

Fig.9 Simulation results of the control for high output.

本システムでの減衰勾配は発電制動係数と最大制動力で定義され、図6の線bはバイリニア型と判断される。そこで、発電制動力の動作面積を等価とし、最大速度における制動力を近づけ、図6のc線を設定する[11]。指数乗型を用いることで、ばね種類の変更時でも端部での速度変化を大きく確保することができる。また、制動にかかる係数を細かく調整せずに、適切な発電制動力を容易に求められることも期待される。

線cの指数乗型におけるシミュレーション結果を図9に示した。(a)はピストン動作履歴である。指数乗型の制動力を作用させてもピストンは往復動作できている。(b)は発電制動力の履歴である。バイリニア型と指数乗型で発電制動力が異なる。高速域ではバイリニア型が大きく、中速域では指数乗型で大きく制動力が与えられ、期待される制動力が作用している。(c)は出力履歴である。動作端部での発電抑制時間が0.5ms削減され、出力は約70W向上した。これは、指数乗型を設定したことで、中速域での制動力が大きく作用し、低速移動時間が減り、発電量が増加したことが大きく起因している。ばね反発力の特性の違いを考慮し、可変ダンパーと同様に制御することは、発電量の増大に有効であると言える。また、バイリニアを等価換算した指数乗型を利用することで、発電にかかる諸係数を細かく設定せずとも、適切な状態を容易に求められた。

5 結言

FPEGシステムにおけるROD制御の有効性を理論的に確認した。シミュレーションでは、発電制動力の動作範囲を変えることで合計損失が約5W低減し、理論計算と傾向が合致することを確認した。また、ばね反発力の特性を考慮し、適切な動作範囲を設定することで出力向上に対する効果を確認した。

謝辞

本研究の一部は、(公財)TAKEUCHI 育英奨学会の研究助成費にて実施した。ここに御礼申し上げる。

参考文献

- [1] 移動体エネルギーストレージシステムの活用調査専門委員会, 電気学会技術報告第1380号 移動体用エネルギーストレージシステムとその応用, 電気学会, 2017.
- [2] 水谷 良治, 立花 武, 森本 雅之, 赤津 観, 星 伸一, 自動車の低燃費化に貢献する電動化技術, 電学論 D, Vol. 135, No. 9, pp. 884-891, 2015.
- [3] 小坂 英雅, 秋田 智行, 守屋 一成, 後藤 成晶, 堀田 義博, 梅野 孝治, 中北 清己, フリーピストン発電システムの構築(第1報)ーシステムの基本動作検討ー, 自動車技術会論文集, Vol45, No.4, pp.683-689, 2014.
- [4] 守屋 一成, 後藤 成晶, 小坂 英雅, 秋田 智行, 堀田 義博, 梅野 孝治, 中北 清己, フリーピストン発電システムの構築(第2報)ー発電制御方法の検討ー, 自動車技術会論文集, Vol45, No.4, pp.691-697, 2014.
- [5] 守屋 一成, 後藤 成晶, 小坂 英雅, 秋田 智行, 堀田 義博, 中北 清己, フリーピストン発電システムの構築(第3報)ーピストン運動の安定化と高効率化を実現する発電制御方法ー, 第26回内燃機関シンポジウム講演論文集, 40-20158053, 2015.
- [6] C. Yuan, H. Feng, Y. He and J. Xu, Combustion characteristics analysis of a free-piston engine generator coupling with dynamics and scavenging, Energy, Vol. 102, pp. 637-649 2016.
- [7] 佐藤 光秀, 楡井 雅巳, 山中 雄一朗, 村田 紘庸, ト 穎剛, 水野 勉, フリーピストンエンジンリア発電システムの総合効率の最適化, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-17-034, 2017.
- [8] 仲岩 浩一, 脇若 弘之, 田代 晋久, 小型円筒リニアモータの推力と高調波歪みに関する研究と考察, 日本 AEM 学会誌, Vol. 22, No. 2, pp.164-168, 2014.
- [9] 高井 元弘, 非燃焼時のシリンダ内圧力を用いた TDC 位置の正確な決定法について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 46, No. 3, pp.148-153, 2011.
- [10] 日本機械学会, 振動のダンピング技術, 養賢堂, 1998.
- [11] 渡邊 信也, 山崎 久雄, 高山 峯夫, 笠井 和彦, 免震層の応答予測に用いる非線形粘性ダンパーのエネルギー評価法ーその1 バイリニア粘性型と非線形粘性型の等価則の確認ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.235-236, 2010.