

# 単相昇圧コンバータを用いた 実用型 1kW スターリングエンジン発電システム

神田 修太\*, 高見 弘(芝浦工業大学)

Prototype 1kW Stirling Engine Generating System by Single-Phase Boost Converter  
Shuta Kanda, Hiroshi Takami (Shibaura institute of technology)

## 1. はじめに

スターリングエンジン(SEG)の発電状態は、温度や負荷によって大幅に変動する<sup>(1)(2)</sup>。そのため、安定かつ効率的な発電を継続するためには、発電状態に応じた昇圧コンバータによる適切な発電電力制御が不可欠である。

そこで、本研究では、ILQ 設計法<sup>(3)(4)</sup>を用いた電流制御による安定的な発電の実現し、実装を考慮した実用的なシステム構成について検討を行ったので報告する。

## 2. SEG 発電システムの構成と運転

SEG システムの構成を Fig.1 に、その仕様を Table 1 に示す。SEG の出力電圧は、昇圧 AC/DC コンバータにより DC400V まで昇圧し、DC 母線に印加される。以下に SEG の運転手順を示す。

- (1) AC100V を変圧器で AC200V に昇圧し、整流したのち DC 母線のキャパシタを予備充電する。
- (2) SEG を加熱して、十分な温度に到達後、SEG の出力電流を徐々に増加させ、ソフトに発電を開始させる。
- (3) SEG の出力電圧を昇圧 AC/DC コンバータにより DC400V に昇圧し、SEG の発電電力を制御する。
- (4) 降圧 DC/DC コンバータによって出力の定電圧または定電流制御を行い、バッテリー充電やパワーコンディショナなどへ発電電力を供給する。

なお、ダンパ抵抗を用いて、SEG の急激な出力変動時に不安定になるのを防いでいる。また、このシステムは複数台の SEG による並列運転も可能である。

コンバータの制御には浮動小数点デジタルプロセッサの Texas Instruments 社製 F28335 を使用した。

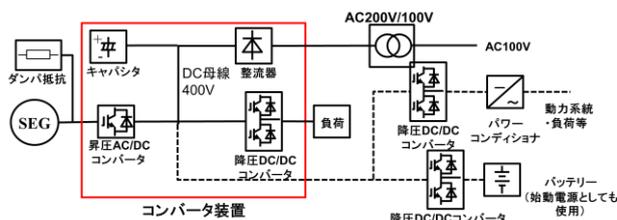


Fig.1. System configuration of the SEG

Table 1. Specifications of SEG and converter circuit

スターリングエンジン	
定格出力	1kW
定格電圧	230V
動作周波数	50Hz
昇圧 AC/DC コンバータ	
定格容量	1kW
コンバータ定格電流	10Arms(最大 25A)
直流中間電圧	250~500V
放電回路電流	5A(Average)
起動時電源	AC200V-10A(1kW)

## 3. ILQ(Inverse Linear Quadratic)最適制御

ILQ 設計法は、最適制御系設計の逆問題であり、簡単な極配置計算から最適解を求める手法で、各入出力間の伝達関数が漸近的に設定でき、最適解が解析的に得られ、現場でのゲイン調整が簡単であるといった特長をもつ<sup>(3)(4)</sup>。

本研究で用いた単相昇圧コンバータの等価モデルを Fig.2 に示す。ここで、 $v_1, i_1$  は SEG の出力電圧と出力電流、 $v_2$  は昇圧コンバータの入力電圧であり、 $v_{dc}$  は直流中間電圧である。各パラメータおよびそれらの値を Table 2 に示す。

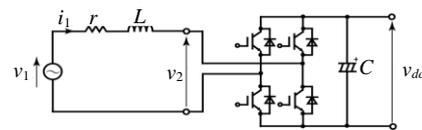


Fig.2. Construction of single phase boost converter circuit

Table 2. Parameters

巻線抵抗 $r$	0.03Ω
インダクタンス $L$	3.2mH
コンデンサ $C$	2350μF

状態方程式と出力方程式は、操作入力を  $u = \Delta v = v_1 - v_2$  とすれば、定常動作点に対する偏差系として次式で得られる。

$$\frac{d\Delta i_1}{dt} = -\frac{r}{L} \Delta i_1 + \frac{1}{L} \Delta v, \quad y = \Delta i_1 \quad (1)$$

ILQ 設計法に基づき<sup>(4)</sup>、基準最適ゲイン  $K_r^0, K_i^0$  およびゲイン調整パラメータ  $\sigma$  の下限値  $\underline{\sigma}$  は、次式となる。ただし、 $s_1$  は指定極である。

$$\begin{bmatrix} K_r^0 & K_l^0 \end{bmatrix} = [L \quad -s_1 L] \quad (2)$$

$$\sigma > \underline{\sigma} = 2(-s_1 L - r) / L \quad (3)$$

ここで、 $\sigma = 6850$ 、 $s_1 = -1300$ としている。

#### 4. 発電制御実験

<4・1>ILQ サーボシステムを用いた電流制御 出力電圧と出力電流が同相となるように制御したときの出力電圧  $v_1$  および電流  $i_1$  の波形を Fig.3 に示す。今回採用した ILQ サーボは I 型のため、 $i_1$  は  $v_1$  に対しわずかに遅れを生じているが、安定した発電が得られている。

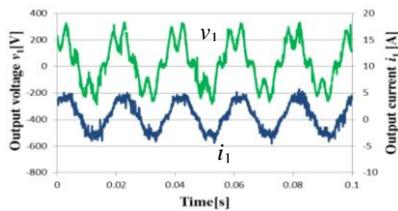


Fig.3. Experimental results of current control

<4・2>発電シーケンス 前に述べた発電シーケンスに基づき、運転モードを次のように定義する。

- (1) 待機モード：発電が可能になる温度まで待機する。
- (2) 始動モード：始動電流を印加し SEG を始動する。
- (3) 発電モード：発電開始後エンジンが過振・停止状態にならないように電流を制御する。

上記の 3 モードを自動で判定し、切換できるようにプログラムを作成した。その実験結果を Fig.4 に示す。実験において、始動時、衝撃による劣化を抑えるために、電流を徐々に増加するソフトスタート制御を導入している。発電開始は出力電圧の平均値により判定を行った。発電モードへは発電開始 30[s]後に移行させている。また、ダンパ抵抗は不安定になりやすい始動時に小さくし、定常運転では発電電力の 5%程度に設定している。以上のシーケンスにより、待機モードから発電モードまで、不安定になることなく発電できた。

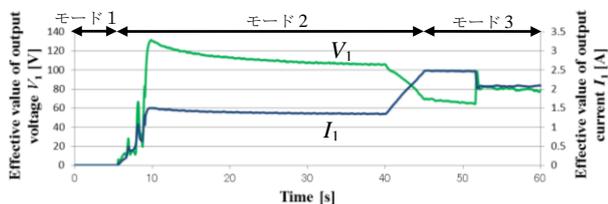


Fig.4 Experimental results of start sequence

<4・3>SEG の定常発電制御 SEG のヘッド温度に対して、過振状態あるいは停止状態等で不安定にならない電流  $i_1$  の上限、下限となる実効値についての測定結果を Fig.5 に示す。結果より、ヘッド温度に対して不安定となる電流の上限、下限値はそれぞれ比例関係にあることが分かる。そこで、上限と下限の平均値を電流指令として制御を行った。発電開始から SEG のヘッド温度が 270℃になるまで発電したと

きの出力電圧  $v_1$  と出力電流  $i_1$  の実効値、発電電力および SEG の温度について、測定値の推移を Fig.6 に示す。実験結果より、電圧、電流ともに大幅な変動は少なく、安定して発電していることが確認できる。

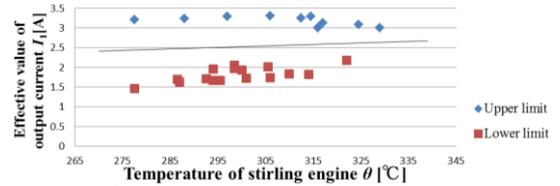


Fig.5. Current-temperature characteristics

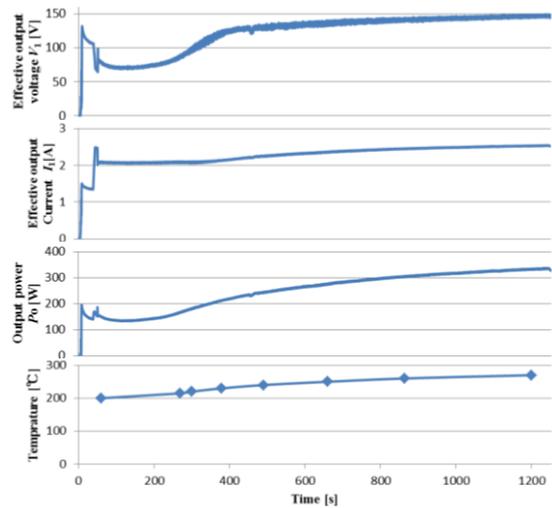


Fig.6. Results of power generation experiment

#### 5. まとめ

本実験により、ILQ 最適制御を用いた電流制御によってスターリングエンジン発電の安定化を実現することができた。今後、II 型 ILQ 最適制御系<sup>(5)</sup>を適用することによる高力率制御について検討、実験を行う予定である。

終わりに、本研究を進めるにあたり、ご協力を頂いた京葉プラントエンジニアリング株式会社、株式会社プロマテリアル、SEC エレベータ株式会社および東京精電株式会社の関係者各位に深謝致します。

#### 文献

- (1) 一色尚次：「スターリングエンジンの開発 再浮上した夢のエンジン」, 株式会社工業調査会(1982).
- (2) 兵働努・米田裕彦：「スターリングエンジン—その生い立ちと原理—」, 株式会社パワー社(2009).
- (3) TAKAO FUJII, “A New Approach to the LQ Design from the Viewpoint of the Inverse Regulator Problem”, IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-32, NO.11, p.995~1004 (1987).
- (4) 木村英紀・藤井隆雄・森武宏共著：「ロボスタ制御」, コロナ社(1994).
- (5) S.Aumted, S.Kanda, H.Takami, S.Tatsuno, “Optimal Voltage Control for Single-Phase Inverter with Resonant LC Filter via Type-2 ILQ Servo-Control by 2<sup>nd</sup>-Order Polynomial”, Advanced Materials Research vols.622-623, p.1514~1518(2013).