C13 熱音響発電への適用を目指したリニア発電機の研究

Development of High-Efficiency Linear Alternator for Thermoacoustic Engine

○正 星野 健(JAXA) 納富 信(早大)
鈴木 啓史(早大) 吉原 正一(JAXA)

Takeshi HOSHINO, Japan Aerospace Exploration Agency, Jindaiji-Higashi 7-44-1, Chofu, Tokyo
Makoto NOHTOMI, Waseda University
Keishi SUZUKI, Waseda University
Shoichi YOSHIHARA, Japan Aerospace Exploration Agency

Test models of free piston Stirling engine (FPSE) converter have been developed as heat-to-electricity power converters for a demonstration of solar heat energy utilization at the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), for future aerospace applications. In the case of the FPSE, the output power of the working gas is directly used as the linear alternator input and then converted into electrical power. Therefore, the linear alternator is one of the most important devices in the FPSE. On the other hand, thermo-acoustic engine (TAE) is a technology that uses high-amplitude sound waves induced by a temperature difference. The work of the sound waves can be converted to electricity by a highly efficient linear alternator. Therefore, the linear alternator is also a key component for the TEA. To realize efficient linear alternators that are suitable for the TAE, several types of linear alternators have been designed and developed based on JAXA's FPSE technology. In this study, the performance evaluations of the linear alternators were conducted.

Key Words: Free Piston Stirling Engine, Linear Alternator

1. はじめに

フリーピストンスターリングエンジンは、クランクやカムなどのメカニズムを用いることなく、ピストンに直接負荷を取り付けることによって、直線運動をそのまま利用することが可能なスターリングエンジンである。発電システムとして考えた場合、リニア発電機を組み合わせることにより、パワーピストンに作用する動作ガスの出力を直接的に発電機入力として用いることが可能であり、通常のカネマティックエンジンと比較して高い総合効率が期待できる。そのため、JAXA では、将来の宇宙用の熱発電機の一つとして研究開発を続けてきた。特に、リニア発電機は、システム全体の特性や効率を支配する重要なコンポーネントのため、その研究開発を継続して実施している¹⁾。

一方、熱音響エンジンは、スターリングエンジンと同様に温度差によって引き起こされる、動作ガスの自励振動による圧力変化を利用して動力を取り出すことが可能である。一般に動作周波数はスターリングエンジンよりも高く、いわゆる音波と言われる領域である。出力を電力として取り出すためには、音波から電力に高効率に変換可能なリニア発電機が必要である。したがって、フリーピストンスターリングエンジンの場合と同様にリニア発電機は重要なコンポーネントである。ただし、これまで、実際にリニア発電機を用いて出力を電力として取り出した研究は、あまり行われていない。その理由は、高効率でかつ熱音響エンジンに適したリニア発電機の実現が、簡単ではないためであると考えられる。

そこで本研究では、これまでのフリーピストンスターリングエンジン用のリニア発電機の研究開発で蓄積した技術を元に、熱音響エンジンに適したリニア発電機を試作した。また、リニア発電機の性能を詳細に検証できる、リニア発電機試験装置を用いて、その性能の把握を試みた。

2. 熱音響発電機の概要

本研究の対象とする熱音響エンジンは、早稲田大学で研究が実施されているループ式熱音響エンジン²⁾である。その概略を図1に示す。

全長 4200mm のループ式熱音響発電振器であり、動作ガスはアルゴンで、圧力は 300~600kPa である。加熱は、内部に設置した電気ヒータによって行っている。また、スタック材料は、SUS304 のスクリーンメッシュを積層して用いている。循環流の防止のためゴム膜等の挿入が可能となっている。

これまでの研究により熱から音波（圧力振動）への変換効率は、11%以上を達成している。標準的な実験条件での発振周波数は 75Hz 程度であるためリニア発電機はそれに合わせたものとした。

Fig. 1 Outline of thermoacoustic engine

3. 仕様・設計

3.1 リニア発電機の仕様

まず、全体構成であるが、リニア発電機の場合、その原理上、可動子の振動が発生するために、システム全体に振動による影響を与えることがある。そのため、通常は動吸振器などを取り付け、振動を低減化する対策が採られる。熱音響共振器の周波数は、さまざまな条件によって変化するため、動吸振器による振動低減化は困難であり、二台のリニア発電機を対向して設置することにより、振動を発生させない構成とした。

出力は、現在の実験結果では 75Hz において数十ワット程度である。今後の改良により出力の増加が見込まれているため、最大出力は 100W とした。ただし、上に述べたように対向型としたために、発電機 1 台の出力は 50W である。

リニア発電機の方式は、通常の可動磁石型リニア発電機とした。可動コイル型の方が、スピーカとしても利用されているなど一般的である。しかし、可動磁石型と比較して効率が 70% 程度しか見込めず、かつ容積も大型になるため、可動磁石型を選択した。目標効率は 90% 以上である。

可動磁石型でも、磁石と磁気回路を形成する鉄芯を一体構成の可動子とする場合と、磁石のみを可動子とする場合があり、それぞれ一長一短があるが、今回は、純粋に磁石だけを可動子とした。これは、振動の周波数が高くても発電機が対応できるようにできるだけ、可動子の重量を軽くするためである。概略を図 2 に示す。

可動子は希土類永久磁石であり、フレクシャースプリングによって支持されており、摺動部は存在しない構成である。固定子は、軟磁性材料であり、渦電流損失を小さくする構成となっている。可動子のストロークは、低格である 75Hz において 5mm とした。

これらの仕様をまとめて、表 1 に示す。

Fig. 2 Configuration of the linear alternator.

Table 1 Specifications of the linear alternator

Type	Moving magnet Opposed piston configuration
Working gas	Argon, Air
Mean pressure	300-600kPa
Rated frequency	75 Hz
Piston stroke	5 mm
Magnet material	Nd-Fe-B type
Output power	50 W at 5mm/75Hz 50 W at 3.5mm/150Hz
Target efficiency	90%

3.2 リニア発電機の設計

リニア発電機の電磁気回路の設計について述べる。基本設計では、バーミアンス法により簡単に概略寸法を求め、詳細設計は有限要素法解析ソフトウェアを用いて行った。有限要素法解析は 2 次元軸対称の動解析で行い、形状と効率の最適化を行った。

先に述べたように、可動子はフレクシャースプリングで支持されているが、可動子の永久磁石と固定子の間には、磁力によるかなり強力な吸引力が生ずる。そのため、フレクシャースプリングは、この吸引力に対抗できるだけの十分な強度が必要である。また、あまり過大な力がかかると寿命に大きな影響を与える。そのため、フレクシャースプリングの機械強度についても、電磁場解析と同様に有限要素法解析を行った。電磁場解析によって求められた吸引力を、機械強度解析の入力とし、フレクシャースプリングの設計を行った。

また、可動子の振動周波数は動作ガスの自励振動の周波数によって決まるが、出力の取り出しに重要な位相遅れは、発電機の固有振動数が大きな要因となる。この固有振動数は、そのときの負荷抵抗などによっても変化し、機械系（可動子重量、フレクシャースプリングのばね定数など）と電磁気系（コイルのインダクタンス、負荷抵抗など）を同時に考慮する必要がある。この解析は、既報のように、電磁気系を等価質量、等価減数定数などに置き換えることによって実施した。

図 3 に、設計したリニア発電機の断面図を示す。本発電機は、600kPa 程度の圧力環境で運転されるため圧力容器に封入される構成となっている。ただし、発電機ユニットと圧力容器は独立としており、簡単に取りはずすことが可能な設計となっている。

Fig. 3 Cross section of linear alternator
(First generation)

4. 試作と予備試験

4.1 試作

次に、試作と予備試験を行った。試作したリニア発電機と熱音響エンジンとのインターフェイスユニットの外観を図4に示す。

発電機コアは、可動子、固定子、コイルおよびフレクシャースプリングから構成されており、ピストンや圧力容器と独立した構造となっている。発電機コアの両端にあるフレクシャースプリングが可動子磁石を支持している。

この発電機コアに、ピストンを取り付け、圧力容器に挿入したものが発電機ユニットである。発電機ユニットには、計測用の圧力計と熱電対が取り付けられている。また、可動子のストロークを計測するために作動トランスが内蔵されている。この作動トランスは、通常のリニア発電機よりも高速で動作する本発電機に対応した、位相遅れのほとんど無い高速タイプである。

発電機ユニットは、インターフェイスを介して、熱音響エンジンに接続される。インターフェイスの両側に発電機ユニットを取り付けられる構造となっており、対向型とすることにより振動をキャンセルしている。

4.2 予備試験と改良

次に、予備試験を行った。予備試験は、発電機ではなくアクチュエータとしてモータリングさせることにより、その入力仕事を計測し、各種の損失を把握した。

その結果、いくつかの問題点が明らかになった。その最大のもの、ピストンとシリンダの接触であった。可動部全体はフレクシャースプリングで支持されているため、ピストンはシリンダとほとんど接触しない構成であるが、高速で動作させると、横方向の振動が発生し、ピストンがシリンダに接触し、最悪の場合融着することがあった。そのため、中空のSUS製であったピストンおよびその取り付け部材を樹脂製のものに再設計を行った。改良したピストンを図5に示す。

これにより、接触はほとんど発生せず、また、発生しても融着の危険は排除された。なお、可動子の重量が大幅に変化したため、フレクシャースプリングを再設計した。

また、電磁気系にもいくつかの改良を行った。可動子の永久磁石の固定方法を改良したこと、コイルの巻き方を見直して、線積率を向上したことが、主な改良点である。

Fig. 5 Design modification of piston material

4. 性能試験

4.1 リニア発電機の試験方法

まず、リニア発電機単体での性能試験を実施した。この試験には、リニア発電機試験装置³⁾を用いた。用いた計測システムの外観を図6に示す。

性能試験ではリニア発電機に接続した負荷抵抗の値を設定値に固定し、徐々に可動子ストロークを増加させることによって行った。本来ならば定格である5mmまでの計測を実施すべきであったが、今回の試験では、4.5mmまでとしている。これは5mmを超えると可動子とストッパーが接触し、

Fig. 4 Configuration of linear alternator

破損する場合があったためである。これは単独で運転している場合は問題ないが、リニア発電機試験装置によって機械的に外部から駆動する場合、ストッパーに接触しても、試験装置が強制的に駆動してしまうためである。

運転周波数は、定格周波数である 75Hz を中心に前後の周波数でのデータを取得した。また、今回は、エアベアリングは用いずにリニア発電機のフレクシャースプリングをそのまま用いて、可動子を支持している。

Fig. 6 Schematics of the linear alternator test system

4.2 リニア発電機の試験結果

図7は可動子ストロークとリニア発電機出力の関係を示したものである。周波数は75Hzで負荷抵抗の値は60, 80, 130, 150Ωである。それぞれについて、チューニングキャパシタを抵抗と直列に挿入している。出力はストロークの二乗に比例して増加しており、負荷抵抗が定格の80Ωとき、ストローク4.6mmにおいて47Wの出力を達成した。得られた出力より、定格ストローク5mmのときの設計出力50Wは到達可能と考えられる。また、図8は効率の測定結果である。効率は、ほとんどの場合で80%を超えており、定格周波数75Hz、負荷抵抗80Ωのときの効率は、89%であった。これはわずかに目標を下回っており、さらに改良が必要である。

5. 結論

熱音響エンジンに組み込むためのリニア発電機の設計と試作を行った。その性能試験によって以下の結果が得られた。

- 1) ストローク4.6mmにおいて47Wの出力を達成した。定格ストローク5mmにおいて、目標の50Wは達成可能と考えられる。
- 2) 定格における効率は、89%であり、目標の90%をわずかに下回った。

本発電機は、熱音響エンジンに組み込むことが前提のため、実際にエンジンに組み込んでシステム全体としての評価や最適化が必要であり、早期に取り組む予定である。

Fig. 7 Correlation between stroke and power output.

Fig. 8 Correlation between stroke and efficiencies.

[謝辞]

[参考文献]

- 1) Hoshino, T., et al., Development of Linear Alternator for Free Piston Stirling Engine, ISEC2007, D18, pp. 300-305, 2008.
- 2) 例えば 納富 他, ループ型熱音響エンジンの高効率化と車両搭載に向けた研究, 第46回 日本伝熱シンポジウム 講演論文集, pp.116-117, 2009
- 3) 星野 他, 新形式リニア発電機の性能試験, 第10回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, A15 pp. 109-112, 2006.