逆位相運動機構をそなえた振動発電体の電気特性

Electrical Characteristics of Vibration Generator integrating an Opposite Drive Mechanism

小間 徹也^{*1}(正員), 十河 憲夫^{*2}

Tetsuya KOMA (Mem.), Norio SOGO

This paper proposes an electromagnetic induction type vibration generator using permanent magnets and coils. This proposal aims to improve the electromotive force by continuously moving the magnets and coils in opposite directions to increase the time rate of change of the magnetic field. To realize this continuous and opposite movement, a configuration using a “scissors type link mechanism” was examined. Furthermore, magnetic circuits, consisting of a magnetic flux around each cell of coils, were also used in conjunction to improve the electromotive force. A prototype implementing both of these characteristics was created to verify the actual effect of this configuration on its electromotive force and the generated magnetic attraction.

Keywords: vibration generator, opposite drive mechanism, induced electromotive force, magnetic attraction.

(2017 年 3 月 10 日受付, 2017 年 10 月 6 日再受付)

1 緒言

自動車サスペンションに生じる振動を利用して発電し、回生した電気をアクティブ制御などに利用する電磁ダンパの研究がおこなわれている。

電磁ダンパの制振および発電には、おもに回転モータ方式とリニア発電方式が検討されている。

回転モータ方式は、増速ギアを介することで発電量を比較的容易に高められる。例えばボールねじを組み合わせたもの[1]や、ラックピニオンギアと傘歯車を組み合わせたもの[2]などがある。しかしこれらは自動車の上下方向の振動を回転運動に変換する必要があり、機械損失が大きい。また往復ダンピング動作の反転時には、ギア歯に大きな集中荷重がかかるため、歯折れに対する配慮が必要である。

一方、リニア発電方式は運動方向が自動車のダンピング方向と一致し、運動方向変換機構が不要なためシンプルな構造で効率よく発電できる。リニア発電を応用した研究例では、三相巻線コイル構成とした可動コイルの設計例[3]や、可動磁石を Halbach 配列構成にして巻線コイル側への磁束を高めるもの[4]など、発電効率を向上させる検討が合わせておこなわれている。しかし自動車用サスペンションでは制振性を確保しつつ、短時間内により大きな発電量を得る工夫が必要である。

この場合、磁石の磁束を増やす、あるいはコイル巻数を増やせば発電量が高まるが、装置が大型化する課題がある。

そこで本研究では電磁ダンパ機能をそなえたリニア振動発電体（以下、振動発電体という）の発電量を改善する方法として、磁石とコイルとが常に逆位相運動して相対速度を高めるとともに、セル化コイルと磁気回路を併用した振動発電体を検討した。発電が大きくなればローレンツ力も高まり、制振に必要なダンピング力の確保が期待できる。

本稿では、その第一段階として、シミュレーションに基づき試作をおこない、実機評価により振動発電体の電気特性と機械的特性等の関係を明らかにする。

2 振動発電体の構造

提案する振動発電体の外観形状を Fig. 1 に示す。振動発電体の外観は、一般的な乗用車に搭載されているストラット式サスペンション形状をベースにしており、全長 415mm、外径 155mm で検討をおこなった。

Fig. 1 Diagram of proposed vibration generator.

連絡先：小間 徹也，〒921-8601 金沢市久安 2-270，金沢工業高等専門学校機械工学科，
e-mail: koma.tetsuya@neptune.kanazawa-it.ac.jp

^{*1} 金沢工業高等専門学校 ^{*2} 金沢工業大学

2.1 基本構造

振動発電体の発電部構造を Fig. 2 に示す。発電部はシャフトに固定するリング形永久磁石と、磁石の外側の円筒状シリンダに巻くコイルで構成する。磁石は軸方向に着磁したものを同極が向き合うように並べ、磁場がコイル側へ放射状に広がるように配置する。磁気回路の構成にはコイル間の隔壁とヨーク材に透磁率の高い炭素鋼を用いることで発電力を高め、セル化により単位コイルあたりの発電効率を上げる。

本研究ではコイルスロット数に対する誘導起電力と、機械的特性のうち磁気回路上で発生する磁気吸引力について検討する。

Fig. 2 Basic structure of the vibration generator.

2.2 逆位相運動機構

Fig. 3 は振動発電体中心の断面図である。本研究の逆位相運動機構は装置上部に「はさみ形リンク」をそなえる。リンクは本体と共締めするピンを中心に回転する。リンク両端部には、磁石とコイルを接続棒を介して接続する。外部から振動が加わるとリンクが回り、磁石とコイルが案内軸上を逆方向に動くしくみとなっている。

このようなリンク機構の構成により、磁石コイルを滑らかに駆動でき機械損失を抑えることができる。さらにリンクの腕長さの調節により、Fig. 3 に示すような磁石とコイルの可動量に差をつけて増速させることが容易におこなえ、設計自由度が高い構成にしていることにより、逆位相運動との相乗効果による発電性能の向上を検討する。

3 シミュレーション

3.1 シミュレーション方法

Fig. 3 Cross-sectional view of central axis of the vibration generator.

実機製作にあたり、誘導起電力と磁気吸引力の挙動を検討するためにシミュレーションを実施した。振動発電体の軸対象の回転体モデルを作り、有限要素法による電磁界解析ソフトウェア FEMM(Finite Element Method Magnetics Ver4.2)を使い、静的な磁場解析をおこなった。検討するモデルの磁石は、実機実験を想定して外径 20mm×内径 10mm×厚み 20mm のネオジム磁石とし、保磁力は $979 \times 10^3 \text{ A/m}$ とした。またコイル銅線の径は 0.29mm とした。解析データから発電特性と振動ダンパとしての磁気吸引力の機械的特性の 2 点を評価した[5]。

3.2 発電特性の検討

3.2.1 起電力計算法

振動発電体のコイルに発生する誘導起電力は、コイルの巻き数を N (回)、磁石の磁束を ϕ (Wb)、時間を t (s) とすると次式で表わされる。

$$V_{\max} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

そこで(1)式を使って、時間変動に伴う磁石およびコイルの位置に応じた静的な磁場解析に基づく磁場変動を時間で除して発電電圧を求めた。磁石を動かす動力は、実験計測装置を想定してスライダクランク機構により与えるものとし、(2)式で、磁石の移動速度を模擬した。

$$v = r\omega \left(\sin \theta + \frac{\rho}{2} \sin 2\theta \right) \quad (2)$$

ここで、磁石の速度： v (rad/s)，スライダクランクの半径： r (mm)，角速度： ω (rad/s)，クランク角度： θ (rad)，磁石の最大可動域： ρ (mm)である。磁石の最大可動域は 45mm とし、コイルの最大可動域は 84mm とした。各スロットのコイル巻き数は 3200 回とした。また自動車のばね上固有振動数は 0.5～2.5Hz 程度であり [6]，今回は低域 0.83Hz の速度条件で検討をおこなった。

3.2.2 シミュレーション法検証

Fig. 4 は磁場解析の例である。ここでは解析方法の妥当性を確認するために、まずヨークがなく隔壁をアルミ製とした磁気回路のない簡素化モデルで実施した。磁石の移動ステップを 1mm とし、区間ごとに平均速度から移動時間を計算して、これと磁場解析で得られる磁束変化値から誘導起電力を求めた。解析値は Fig. 4 の A1～A9 の 9 箇所の誘導起電力平均値を算出している。磁石を Fig. 3(a)の上限から図 3(b)の下限位置まで移動させた時の単位コイルの誘導起電力を実機計測値とともに Fig. 5 に示す。この結果、シミュレーションの精度が確認でき、本研究の提案の逆位相運動とコイルのセル構造化の検討をおこなった。

Fig. 4 Example of magnetic field analysis of a simplified model without the magnetic circuit.

Fig. 5 Comparison of the induced electromotive force in the simplified model without the magnetic circuit.

3.2.3 発電性の改善検討

まず、本研究モデルの誘導起電力に対する逆位相運動の効果をシミュレーションにより 5 スロットで検討した。検討項目は、①コイルを固定して磁石のみが動くもの②磁石とコイルの双方が逆方向に 45mm 動くもの③リンクの腕長さを不等長化して磁石可動量 45mm に対してコイルが逆方向に 84mm 動くものの 3 種類でおこなった。Fig. 6 はこれらを 0.83Hz で半周期動かしたときに単位コイルに生じる誘導起電力波形である。①の開放電圧実効値 5.2V に対して、②の場合には 10.2V となった。さらに③の場合には 14.6V が得られた。以上の結果から、提案するリンク機構をもちいた逆位相運動の効果によって誘導起電力を高められることが確認された。

次に上記③について、コイルスロット数と誘導起電力の関係を求め、セル化の効果を検討する。検討項目は、磁石数 11 に対しコイルスロット数 5～10 個を組み合わせた 6 種とした。コイルの全長と直径は変えず、スロット数増加に伴う容積の減少分はコイルの巻き数で調整した。Fig. 7 は振動発電体を半周期動かしたときの単位コイルに生じる誘導起電力波形である。また Table 1 にはコイルスロット数ごとの誘導起電力計算結果を示す。スロット数が少ないほど 1 セルあたりの巻き数が増え、誘導起電力は高まっている。

一方、1 巻あたりの誘導起電力を比較すると、Table 1 に示すようにスロット数が多いほうが高い。この結果からコイル配置構成としてはセルを細分化したほうが

発電効率が上がることがわかる。

Fig. 6 Comparison of the induced electromotive forces for the opposite drive mechanism. (5 coil slot)

Fig. 7 Influence on induced electromotive force due to difference in slot combination.

Table 1 Winding specification and calculation result for each analysis model.

Number of coil slot	5	6	7	8	9	10
Number of turns of coil per one slot	3200	2600	2200	1800	1600	1450
Effective value of the open voltage of the bottom side coil slot (V)	14.6	13.9	12.8	11.0	10.2	9.6
Open voltage per one turn ($\times 10^{-3}$ V)	4.6	5.4	5.8	6.1	6.4	6.6

3.3 磁気吸引力

本研究では、発電部に磁気回路を形成することにより誘導起電力を高める構造としている。このため磁束が集中する磁石間とコイル隔壁との間で磁気吸引力が働くものと考えられる。

そこで、先に実施したスロット数の異なる6種のモデルを用いてそれぞれで発生する磁気吸引力をシミュレーションで求め、その影響をしらべた。Fig. 8 に振動発電体の磁気吸引力波形を、Table 2 にその最大値を示す。スロット数を6から9とした場合に磁気吸引力は低く、それらの波形もほぼ同一であった。Fig. 9 は最も高い磁気吸引力を示した5スロットモデルの磁場解析図である。このスロット数の場合、磁石とコイル配列とのピッチが同一となるため、磁力線が集中し磁気吸引力が重畳する。Fig. 9(a)の位置条件ではピッチが揃い磁気回路が構成される。Fig. 9(b)では半ピッチずれて磁気回路が構成されていないことにより、磁気吸引力に大きな脈動が出ている。したがって Fig. 8 で示されるように磁石とコイルのピッチ間隔の偏差により磁気吸引力が影響を受け、ダンピング特性に影響する。

Fig. 8 Influence on magnetic attraction due to difference in slot combination.

Table 2 Magnetic attraction calculation result for each analysis model.

Number of coil slot	5	6	7	8	9	10
Magnetic attraction (N)	184	25.6	25.9	25.6	25.9	116

(a) Maximum force position (b) Minimum force position

Fig. 9 Pulsation phenomenon mechanism due to magnetic attraction. (5 coil slot)

4 試作機と試験装置

シミュレーションによれば、コイル数を6から9にすることで磁気吸引力が低減することが示された。また、これらのコイル数においては、磁気吸引力への影響に対する優劣はない。実機の磁気吸引力について荷重計測器にて事前確認した時点で、シミュレーションと同等の荷重値が発生していることを確認している。

試作機はコイル数7で製作した。逆位相運動リンクはシミュレーションで効果があった不等長化形状を採用した。実験は Fig. 10 に示す往復作動試験機にておこなった。装置はモータ動力をスライダクランクにて往復運動に変換し、発電体を連続的に動かすしくみとなっている。

Fig. 10 Reciprocating test machine.

5 実機特性とシミュレーションの比較

5.1 発電特性

往復作動試験装置を用いて試作機を速度 0.83Hz で半周期作動させた場合に、単位コイルに発生する誘導起電力を実機とシミュレーション値で比較したものを Fig. 11 に示す。実測値は作動開始時に差異がみられるものの、シミュレーション値と同様の傾向を示し、その開放電圧実効値は 8.6V が得られた。

Fig. 11 Comparison of the induced electromotive force for the simulation value and experimental value for an optimized model.

5.2 発電電力

振動発電体のコイルに負荷をつなぎ、その負荷を変えながら実機で得られる最大電力を計測した。試験機を速度 0.83Hz で動作させたときの、単位コイルにおける電流-電圧特性を Fig. 12 に示す。実験の結果、最大電力が得られる最適負荷は 100Ω であった。その時に抵抗の両端にかかる電圧は 13.6V で、最大電力は 1.85W が得られた。同じ条件で逆位相運動をしない場合では、最大電力は 0.22W であった。

ここで振動発電体を評価するにあたり、実験装置の駆動入力モータの電力と出力電力の関係を Fig. 13 に示す。全 7 コイルには 100Ω の負荷を接続し、実効電力を計測した。入力電力値と比較すると逆位相運動ありの場合、およそ 3 倍出力が高い。これは逆位相運動の効果により発電効率が上がることを示している。

Fig. 12 Current-voltage characteristics.

Fig. 13 Input - Output electric power characteristics.

5.3 充電特性

振動発電体においては制振するための電力を蓄電するために、得られた電力をコンデンサに蓄電し、必要に応じ使用するシステムが有効であると考えられる。そこで全7コイルの出力を全波整流し、出力値が最大となるよう各コイルに 100Ω の抵抗を接続してコンデンサに充電できる回路を構成した。コンデンサは合成容量 $1.67F$ の電気二重層コンデンサを使用し、コンデンサと各コイルは並列に接続した。

振動発電体を作動させたときのコンデンサ両端電圧の変化を Fig. 14 に示す。作動開始から 10 分後のコンデンサ両端電圧は、逆位相運動ありの場合には

13.9V となり、逆位相運動なしの場合は 4.5V であった。電気量に換算するとそれぞれ、23.3C, 7.5C を蓄電したことになる。

本研究の提案の逆位相運動機構をそなえた振動発電体でおよそ 3 倍の発電量を得た。

Fig. 14 Charging rate of the electric double-layer capacitor.

6 結言

永久磁石とコイルとが逆方向に移動する振動発電体を検討し、シミュレーションと試作機により、その効果を計測して次のような結果を得た。

- (1) はさみ形リンク機構による逆位相動作と、リンクの腕長さの不等長化によって増速化をはかることで、従来の磁石単動方式にくらべておよそ 3 倍の発電電力が得られる。
- (2) 磁気回路を形成したセル化コイル構造によって、誘導起電力を高めることができる。
- (3) 磁石とコイル配列とのピッチを不等間隔にすることによって、磁気吸引力が低減できる。
- (4) 今後は発電過程で生じるローレンツ力を振動減衰に利用する検討をおこない、適用の可能性を見極めたい。

参考文献

- [1] Y. Suda, K. Suematsu, and K. Nakano, Study on Electromagnetic Suspension for Automobiles-simulation and Experiments of Performance, *Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, pp. 699-704, 2000.

- [2] Z. Li, L. Zuo, G. Luhrs, L. Lin, and Y.-X. Qin, Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, No. 3, pp. 1065-1074, 2013.
- [3] B. L. J. Gysen, T. P. J. van der Sande, J. J. H. Paulides, and E. A. Lomonova, Efficiency of a Regenerative Direct-Drive Electromagnetic Active Suspension, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 4, pp. 1384-1393, 2011.
- [4] J. Wang, W. Wang, and K. Atallah, A Linear Permanent-Magnet Motor for Active Vehicle Suspension, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 55-63, 2011.
- [5] 小間, 十河, 小型ビークル用振動発電装置の試作, 第 32 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 591-594, 2016.
- [6] 野崎, 基礎自動車工学, 東京電機大学出版局, 2011.