

ジャイロ型発電機高出力化の研究

086696 笠原 学
指導教員 保坂 寛 教授

Energy scavenging is one of the solutions for realization of wireless networks. A gyroscopic power generator which generates high speed rotation of permanent magnets using vibrations of human body in daily life is developed. A prototype generator and its fundamental characteristics based on the analysis of the rotor dynamics are presented. Various ways are tried in order to gain higher output power of the generator. High level potential of the generator and its availability for a mobile phone are verified. However, a gyroscopic power generator is difficult to maintain the rotation. Also, an initial velocity is needed for the rotor because it is a non-linear system. So we developed several ways to activate the rotor by external power automatically. The fact that the rotor can be accelerated to sufficient speed for stable rotation is verified.

Key words: Gyroscopic, Vibration, Generator, Prototype, Self activation

1 緒言

近年、光や熱など自然界に無駄に放出されるエネルギーを情報機器の電源に用いる energy scavenging の研究が盛んである¹⁾。機械的振動は潜在的エネルギー量が大きく最も研究例が多いが、人の運動など低周波の振動は利用が難しかった。

回転体の自転と歳差運動を組み合わせ、入力振動の数十倍の周波数の回転運動を発生し、保持する運動エネルギーを大幅に増大させる機構が Archie L. Mishler²⁾により考案されている。これに電磁誘導機構を組み込めば、高効率な発電機を実現できる可能性がある。エネルギーの取り込みに歳差運動による角運動量変化、すなわちジャイロ効果を利用することから、これをジャイロ型発電機と呼ぶことにする。

ジャイロ型発電機のロータ運動は非線形であり、起動時に初速度が必要であり、従来は手動で与えていた。

本研究では、発電機の試作を行い、高出力化を目指した。また、発電機をモータとして作用させることにより、ロータの回転の自己起動を、ロータ回転角の検出を要しないオープンループおよび回転角をホール素子により計測するクローズループの 2 種類の方法で実現した。また、消費電力の測定を行った。

2 ジャイロ型発電機

ジャイロ型発電機の構成を図 1 に示す。

y 軸回りに ω_y で回転するロータがあり、その軸はトラック上を転がるように支えられている。トラックとロータ軸の間にはわずかな隙間がある。トラックを x 軸回りに ω_x で回転させると、ロータに ω_z 方向のトルクが加わり、角運動量の法則により、ロータは z 軸回りの歳差運動 ω_z を始める。すると、ロータ軸には、トラックから摩擦力が加わり、ロータの自転 ω_y を増大するようなトルクが生じる。この結果、トラックを回転振動させることによって、ロータの回転数が増大する。

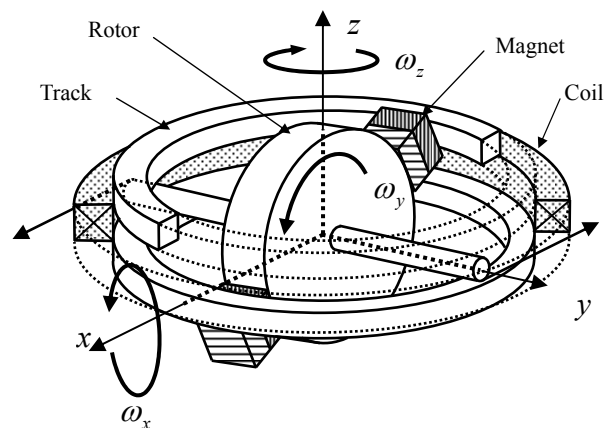


Fig.1 Gyroscopic power generator

3 理論解析

ロータは複雑な 3 次元回転をするため、種々の座標系を組合せて運動を解析する。トラックは、

$$\theta = \theta_0 \sin(\pi t) \quad (1)$$

で揺動回転するものとする。ここで θ_0 は振幅、 π は角周波数である。 θ は図 1 の ω_x に対応する。ロータの自転角速度を $\dot{\theta}$ (図 1 の ω_y に対応) とする。トラック半径を R_t 、ロータ軸半径を R_a 、両者の比を ξ とすれば次式が成り立つ。

$$\xi = \frac{R_t}{R_a} \quad (2)$$

また、ロータには自転速度に比例する抵抗 (電磁力など) が働くとし、その係数を σ とすると、定常回転するための条件は、

$$\sigma \leq \frac{I_1 \theta_0 \tau}{2\xi} \quad (3)$$

で表される。ここで I_1 はロータの軸回りの慣性エネルギーである。式(3)において等号が成り立つ時が安定限界となる。

ロータの仕事がすべて発電に使われるとすれば、式(3)から得られる安定限界時の σ の値を用いることにより、理論上の最大発電量 P が求まる。

$$P = \sigma \xi^2 \tau^2 = \frac{I_1 \tau^3 \theta_0 \xi}{2} \quad (4)$$

4 試作機の製作

4.1 試作機の概要

運動遊具として市販されている Dynabee を基に、試作機を製作した。外観を図 2 に示す。発電機全体の直径は約 68mm、 ξ は 32.9 である。トラック外側の赤道上にエナメル線を巻き、ロータ内部の空間にネオジウム磁石を図 3 のような配置で取り付けた。

発電機に外部から振動を加えるとロータが回転し、電磁誘導により、コイルには図 4 に示すような交流電圧が発生する。このときの周波数はロータの自転回転数と等しい。



Fig.2 Prototype generator

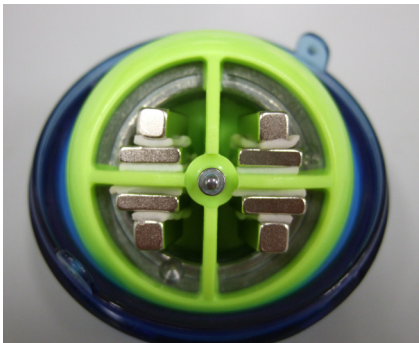


Fig.3 Alignment of the magnets

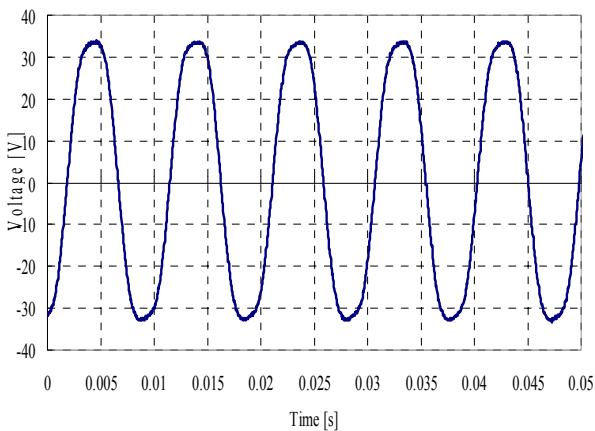


Fig.4 Generated voltage

4.2 高出力化の検討

発電機の出力を増加させるため、まずはロータ内部の空間容積限界までネオジウム磁石の体

積を増加させた。

次に、発電機の外側に鉄枠を取り付け、磁気回路を閉磁路とした。これにより、磁気効率が向上することは確認されたが、コギングトルクにより安定回転させることが不可能になり、電力は取り出せなかった。

さらに、鉄心にエナメル線を巻いたコイルを縦方向に複数個取り付けて組み合わせることにより、コイルの巻き数の増加を試みた。発電量は増加したが、同様に安定回転が難しくなった。

以上の検討をふまえて、図 2 の構造を最適形状とした。高出力化のために検討した方法について、着眼点、利点、欠点などを Table1 にまとめた。

Table1 Attempts to get higher power output

形状			
着眼点	(標準形)	磁石体積の増加	磁気回路を閉磁路とする
利点	製作が容易	磁気効率の向上	磁気効率の向上
欠点	磁気効率があまり良くない	アンバランスの増加	コギングトルクにより回転が不安定
総合評価	△	○	△

形状			
着眼点	磁気回路を閉磁路とする	縦方向にコイルを取り付ける	縦方向に複数コイルを取り付ける
利点	磁気効率の向上	コイル巻き数の増加	コイル巻き数の大幅増加
欠点	コギングトルクにより回転が不安定 製作に手間	発電機体積の増加	コギングトルクにより回転が不安定
総合評価	△	○	△

4.3 理論上の最大発電量との比較

赤道上に直径 0.2mm のコイルを 200 回巻き、入力振動数 τ を約 2.8Hz とした時、接続した 130 Ω の抵抗の両端で、1W を超える電力を取り出すことができた。

一方、式(4)に発電機各パラメータと振動させた条件を代入することにより、理論上の最大発電量は約 6W と計算される。このような差が出た理由としては、コイルの巻線抵抗やロータ・トラック間の摩擦、ロータを安定限界で回転させていないこと、などが考えられる。

4.4 携帯電話への充電

ジャイロ型発電機によって生み出された 1W の発電量は、携帯電話の充電に十分な発電量である。ジャイロ型発電機から発生した電圧をショットキーバリアダイオード (SBD)、電解コンデンサ、積層セラミックコンデンサ、3 端子レギュレータを用いて直流一定電圧に整流し、実際に携帯電話の充電が可能であることを確認した。充電の概要図を図 5 に示す。

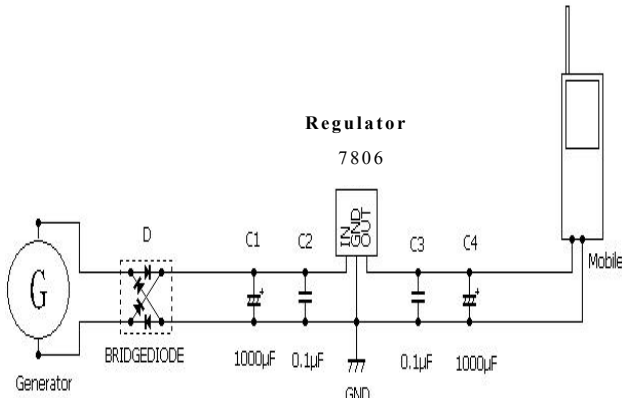


Fig.5 Mobile charging

5 ロータの自己起動

5.1 自己起動の必要性

ジャイロ型発電機のロータ運動は非線形であるため、起動時に初速度が必要であり、従来は手で与えていた。また、ロータの回転を安定常回転まで増幅させるためには、多少の熟練が必要であった。さらに、一度不安定回転まで回転数が減少してしまうと、再び安定化させることは不可能であった。ロータの回転が不安定であることは、ジャイロ型発電機の最大の問題点であった。

5.2 オープンループによる自己起動

永久磁石の入ったロータを持つジャイロ型発電機の周囲にコイルを巻き、周波数の変化する正弦波電圧を加えるものである。構成を図6に示す。発電機として作用させる場合、コイルの出力は充電回路に繋がるが、自己起動の場合は交流電源に接続する。

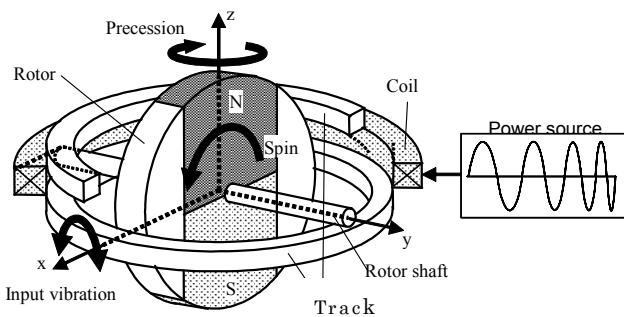


Fig.6 Self activation by open-loop

回転の原理を図7に示す。(a)のようにロータ回転角 γ が $-90^\circ < \gamma < 90^\circ$ のときコイル磁界が上向き、(b)のように $90^\circ < \gamma < 270^\circ$ のときコイル磁界が下向きになれば、ロータは反時計周りの連続回転を行う。電源周波数を 0.1Hz 程度から 50Hz 程度まで、徐々に増加させると自動的にこの状態を得られる。

入力電圧の周期が長い時(数秒)は、磁石はコイルの磁界と平行な向きまで回転し、残留振

動したのち停止する。

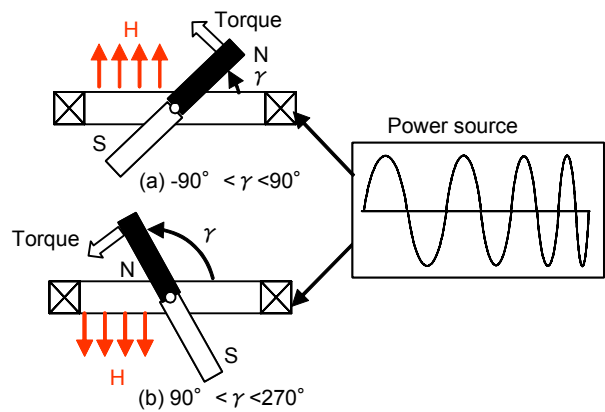


Fig.7 Mechanism of open-loop activation

周期が短くなり(1秒程度)、磁石の反転と同時間で磁界が反転するようになると、磁石が停止する前に次の磁界反転が起こる。すると、慣性力によって、同一方向に回転を続ける。この後入力周波数を徐々に高めると、磁石はコイル磁界に追従して回転数を高めていく。

5.3 クローズドループによる自己起動

図8のようにロータと平行な位置にホール素子を設置し、ロータの磁界を検出する。ロータの磁界の極性が $\gamma = 90^\circ, -90^\circ$ の位置で反転した瞬間に、コイルの磁界を反転させる。これは、通常のブラシレスモータと同様の原理である。

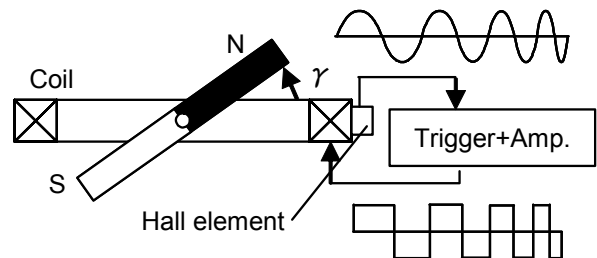


Fig.8 Self activation by closed-loop

5.4 消費電力の測定

ロータを 0Hz (停止状態) から 50Hz (安定常回転) まで加速させた場合の2つの起動法における消費エネルギーを測定した。

オープンループの場合に、コイルに加えた入力電圧波形を図9に示す。

同時にコイルに流れる電流を電流プローブにより測定し、両者の積から消費電力を求めた。計算結果を図10に示す。回転数が徐々に高まるにつれて消費電力が減り、一時的には負の値をとっている。これは、磁石の回転による逆起電力によると考えられる。 50Hz に加速するまで11秒かかり、 94J を消費した。

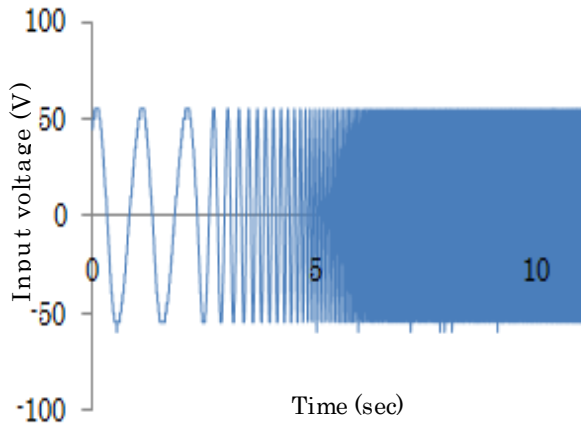


Fig.9 Input voltage (open-loop)

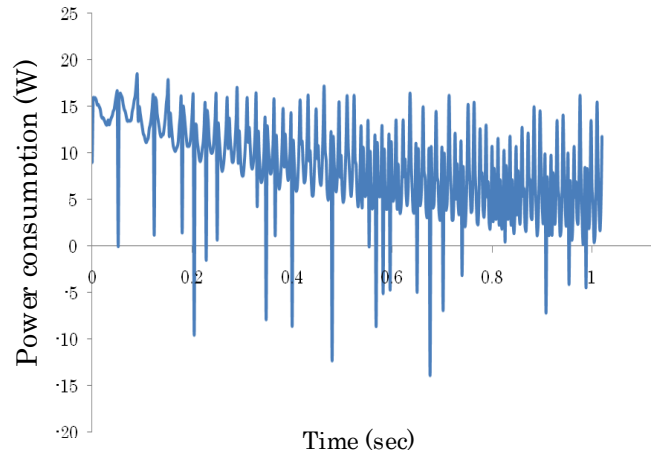


Fig.12 Power consumption (closed-loop)

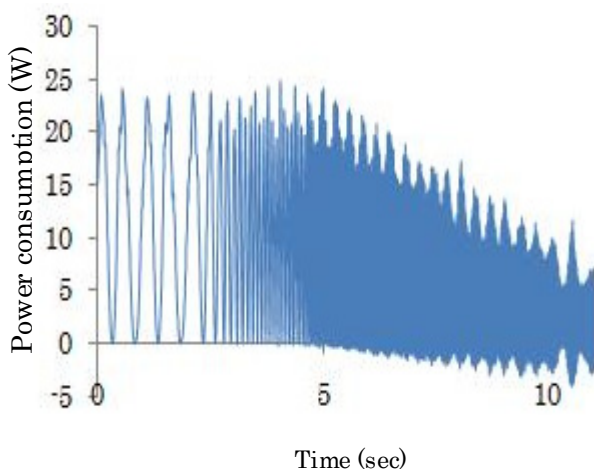


Fig.10 Power consumption (open-loop)

次に、クローズドループの場合のコイル入力電圧を図 11 に示す．入力周波数が徐々に増加していることから、回転数が自動的に増加していることが分かる．消費電力を図 12 に示す．50Hz に加速するまで 1 秒かかり、8.9J を消費した．

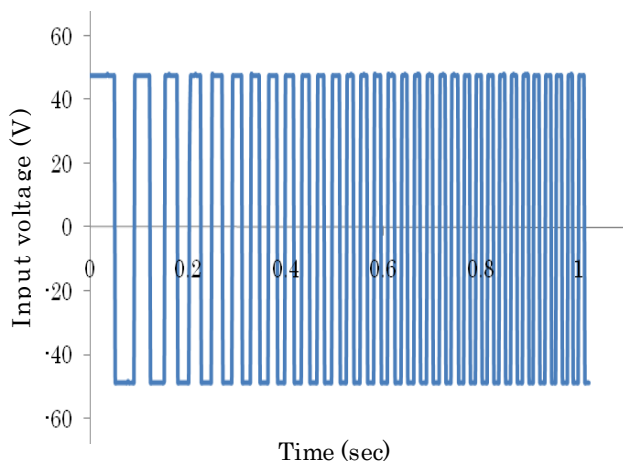


Fig.11 Input voltage (closed-loop)

以上を比較すると、クローズドループはオープンループに比べ、起動時間は 11 分の 1、消費電力も 11 分の 1 であり、かなり高効率な起動法であることがわかる．

また、ロータの回転に必要な運動エネルギーは、6.9J と計算された．このことから、クローズドループによる起動法の効率が良いことがわかる．

6 結言

本研究では、ジャイロ型発電機の高出力化のために種々の磁気回路を製作し、発電機の最適な構成を決定した．

また、1W 以上の発電量が得られ、実際に携帯電話への充電が可能であることを確認した．

さらに、ジャイロ型発電機の最大の問題である不安定回転の解決のために、2 種類のロータの自己起動法を提案し、消費電力の比較を行った．

文献

- 1) S. Roundy, P. Kenneth, J. M. Rabaey: Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with Special Focus on Vibrations, Kluwer Academic Publishers, Nowell (2004).
- 2) Archie L. Mishler: Gyroscopic Device, United States Patent 3726146, Apr. 10, (1973).
- 3) 石井智裕, 後藤裕治, 小川達也, 保坂寛: ジャイロ型振動発電機の研究, 精密工学会誌, 74, 7, pp.764-768 (2008).
- 4) M. Kasahara, H. Yoshida, H. Hosaka, and K. Sasaki: Study on Gyroscopic Power Generator-1st Report, Prototype and its fundamental characteristics, MIPE2009, 09-204, pp.295-296 (2009).