

201 パルス駆動による高温超電導浮上モータの開発

Pulse Motor with High Temperature Superconducting Levitation

正 長屋 幸助 (群馬大) 学 鈴木 孝明 (群馬大)
 ○学 高橋 則昭 (群馬大) 学 小林 洋之 (群馬大)

Kosuke NAGAYA, Gunma University, Tenjinchou1-5-1, Kiryu, Gunma
 Takaaki SUZUKI, Gunma University
 Noriaki TAKAHASHI, Gunma University
 Hiroyuki KOBAYASHI, Gunma University

A high-speed motor with high temperature superconducting levitation is presented. In the motor, a high temperature superconductor supports the lower end of the shaft, but a pair of permanent magnets supports the upper end. In order to increase the rigidity, the attractive force between the permanent magnets applies in the downward direction. The driving system consists of six coils and eight poles magnet in which the poles are arranged as N-S-N... The driving method of the motor is presented. It is difficult to pass through the critical speeds, so that a vibration control system is also presented. The control system consists of four coils that give the magnetic forces to the levitation magnet of the shaft. A control method has been given. Both the theoretical and experimental results are obtained for the proposed system.

Key Words: Motor, High Speed, Levitation, Superconductor, Vibration Control

1 緒言

高温超電導浮上系は、浮上方向とその直角方向に安定であるため、非接触浮上を実現でき、その性質を利用し、電力貯蔵ホイールや磁気軸受の開発が盛んに行われている。しかし、これらの従来の浮上方式では、システムの複雑化・コストがかかるといった欠点が存在した。

そこで、構造が簡単で安価な高温超電導浮上系を、駆動方法としてはパルス駆動を提案する。また、発生した振動振幅は、まず磁気ダンパにより減衰力を与え、つぎに制御用のコイルを用いる2段階制御システムを提案する。制御方法としては外乱相殺とPDフィードバックの複合制御を提案する。

本論では以上のような高温超電導浮上モータおよびそのモータの制御方法を提案し、理論解析および実験を行いその妥当性を検証した。

2 モータの構造

当研究室では前報において、下端を高温超電導体の浮上力で、上端を2個の永久磁石間の垂直上方向吸引力を併用する浮上方法を提案した。しかし、この系において水平方向の剛性は高まるものの、垂直方向の剛性は上端に永久磁石がない系と比較してかえって低下した。そこで、本論では、Fig.1に示すように、軸上端の固定側環状永久磁石内に浮上体の軸を貫通させ、その上部に軸上端永久磁石を取り付ける。すなわち、軸上端に作用する吸引力を垂直下方向に作用させることで、水平方向のふれまわり、ビッチングを抑制し、また、垂直方向の剛性も向上する浮上系（本系と呼ぶ）を提案する。

また、前報においては4個の円錐鉄片と6個の電磁石によるパルス駆動を提案した。しかしこの駆動方式では、回転角を制御するには有効であるものの、駆動力が弱く最高回転数は約20rpmとかなり低速であった。そこで本論では、8極の永久磁石と6個の空芯コイルによるパルス駆動を提案する。この場合の駆動力は、吸引力と反発力の両方が作用するため駆動力は大きく、安定高速な回転が得られる。本論では、今回提案する駆動方式のみを前報の浮上系および本浮上系に適用し、両浮上系の安定性・高速性について検証する。

3 理論解析

本論の理論解析で使用する超電導モータの運動方程式を示す。モータに作用する外力として、高温超電導体による復元力 k_{r1} , k_{z1} , k_{θ} 、上端永久磁石対による復元力 F_x , F_y , F_z 、コイル電流による垂直方向電磁力 $Q_z(i, t)$ 、コイル電流によるモーメント、偏心による遠心力 f_{xe} , f_{ye} をそれぞれ仮定・近似すると以下になる。

$$\begin{aligned}
 m \frac{d^2 x}{dt^2} + c_r \frac{dx}{dt} + k_{r1} x &= f_x & m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_r \frac{dy}{dt} + k_{r1} y &= f_y \\
 m \frac{d^2 z}{dt^2} + c_z \frac{dz}{dt} + k_{z1} z &= f_z \\
 J \frac{d^2 \theta_y}{dt^2} - J_p \omega \frac{d\theta_x}{dt} + c_{\theta} \frac{d\theta_y}{dt} + k_{\theta} \theta_y &= T_y \\
 J \frac{d^2 \theta_x}{dt^2} + J_p \omega \frac{d\theta_y}{dt} + c_{\theta} \frac{d\theta_x}{dt} + k_{\theta} \theta_x &= T_x
 \end{aligned} \quad (1)$$

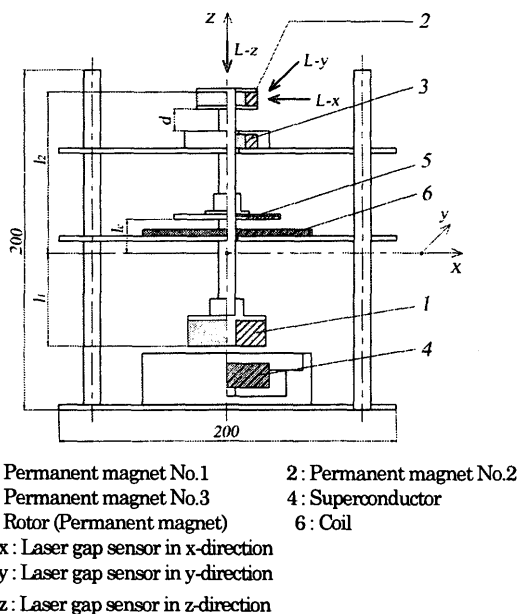


Fig.1 Geometry of the present motor

ここで、 m は質量、 J は慣性モーメント、 J_p は極慣性モーメント、 ω は軸の角周波数、 c_r , c_z , c_θ は水平・垂直方向並進運動と回転運動の外部粘性係数であり、 k_{r1} , k_{z1} , k_θ は水平・垂直方向並進運動と回転運動のはね定数であり以下のような関係がある。

$$\begin{aligned} k_{z1} &= \alpha_z \{1 + \beta_z (1 - e^{-\gamma_z \omega})\}, \\ k_{r1} &= \alpha_r \{1 + \beta_r (1 - e^{-\gamma_r \omega})\}, \\ k_{\theta 1} &= \alpha_\theta \{1 + \beta_\theta (1 - e^{-\gamma_\theta \omega})\} \end{aligned}$$

4 制御

無制御の実験結果より、本系の水平方向変位は垂直方向の変位と比較して大きく、水平方向の制御を考える。制御システムは、まず浮上体上端永久磁石対とアルミプレートからなる磁気ダンパにより減衰力を与え、つぎに浮上体上端永久磁石側面付近にコイルを置き、レーザ変位計からの信号をDSPで処理し、出力された電圧により x, y 方向を独立に制御するような2段制御を使用する。本軸の制御方法として、長屋らが提案した慣性力等の外乱を直接相殺することで、低振動域の振動を大幅に低減できる外乱相殺法とPD制御の複合制御を用いる。

外乱相殺では本系を1自由度系と近似して制御し、残留振動についてはPD制御で制御することを考える。そのときの制御コイルに印加する制御電圧 V は以下になる。

$$V = \frac{-R}{Ka} \left(m_e \frac{p^2}{\alpha} u + f_1 u + f_2 \dot{u} \right) \quad (2)$$

ここに、 u は水平方向変位、 k は軸上端水平方向ばね定数、 K はパワーアンプ倍率、 R はコイル抵抗、 a は電流と力の間の係数、 m_e は等価質量、 f_1, f_2 は変位・速度フィードバック係数であり、 $p = \sqrt{(k + f_1)/m_e}$, $\alpha = 1/(1 - \omega^2/p^2)$ という関係がある。式(2)の制御電圧 V を制御コイルに印加することにより、振動を抑制できる。

また、効果的な制御を行うためには、系に対して最適な変位と速度のフィードバック係数が必要となる。そこで本論では、水平方向の変位振幅 $|x|$ と $|y|$ および速度振幅 $|\dot{x}|$ と $|\dot{y}|$ について、限界回転周波数までを含むように Ω を定め、次のような周波数空間での水平方向変位と速度による非線形評価関数を考える。

$$J = \int_0^\Omega \{w_1(|x| + |y|) + w_2(|\dot{x}| + |\dot{y}|)\} d\omega \quad (3)$$

ここで、 J は評価関数、 w_1, w_2 は重みである。

この評価関数を最小とするように、各係数 f_1, f_2 を決定する。これにより、軸の水平方向変位を最小とするコントローラが得られることになる。しかし、式(3)は非線形であり、またこれを最

小とするためのパラメータを理論的に求めることは困難である。そこでこれらを求めるため、本論では最急降下法を適用した。すなわち、

$$X_i = X_{i-1} - \frac{\partial J}{\partial X_i} \quad (4)$$

ここで、 X_i はコントローラの各係数を表す。

係数の数に相当する方程式を順次計算し、この計算を繰り返すことにより最適な係数を決定することができる。以上の制御方法を用いた場合、制御コイルによる x, y 方向の制御力 Q_x, Q_y は次のようになる。

$$Q_x = -m_e \frac{p^2}{\alpha} x_2 - f_1 x_2 - f_2 \dot{x}_2 \quad (5)$$

$$Q_y = -m_e \frac{p^2}{\alpha} y_2 - f_1 y_2 - f_2 \dot{y}_2 \quad (6)$$

ただし、 x_2, y_2 は浮上体上端の x, y 方向変位である。

5 実験

モータの駆動実験は、無制御では2つのレーザ変位計により浮上体の水平・垂直方向の変位を測定した。また、制御時には水平方向の x, y 軸の変位を測定した。

本論で提案したパルス駆動を用いることにより約1250rpmと高速回転が得られた。

制御回転時の周波数応答をFig. 2に示す。無制御、ダンパのみ、ダンパ・PDの2段制御、ダンパ・PD・外乱相殺(DCM)の2段複合制御の実験値を比較すると、無制御時と比較して制御時の方が振動振幅を減少していることがわかる。さらに、ダンパのみの場合とダンパに制御を加えた場合を比較すると、ダンパに制御を加えた2段制御の方が振動を抑制していることがわかる。すなわち、本論で提案した磁気ダンパおよび制御コイルと浮上の安定化に利用している軸上端永久磁石からなる2段制御システムの有用性が確認できた。特に本制御システムが一次共振点の乗り越しに有効であることを確認した。

また、最急降下法により算出した最適なフィードバック係数を用いたところ、他のフィードバック係数と比較して制御の効果が大きかった。すなわち、本論で提案した最適制御による共振点の乗り越しの有用性を確認できた。

6 結言

本論では、高温超電導体の浮上力と永久磁石間の吸引力を併用した高温超電導浮上モータの安定した高速回転方法を提案した。また、このモータの安定性の改善と共振点の乗り越しをするための制御方法を提案した。以上の浮上・駆動方法および制御方法の妥当性を実験および理論解析により検証した。内容を要約すると、

(1) 浮上体上端に垂直下方吸引力を作用させることで、垂直上方向吸引力を作用させる場合よりも、水平および垂直の両方向により安定な浮上が得られることを確認した。特に、垂直方向には約2倍の剛性が得られた。

(2) 駆動力として、8極の永久磁石と6個の空芯コイルを用いたパルスモータを提案し、その駆動方法の妥当性を確認した。

(3) 磁気ダンパおよび制御コイルと浮上の安定化に利用している軸上端永久磁石からなる2段制御システムを提案し、そのシステムの有用性を実験と理論より確認した。特に本制御システムが一次共振点の乗り越しに有効であることを確認した。

(4) 本論で提案した最適制御による共振点の乗り越しの有用性を確認した。

(5) 超電導モータの応答について理論解析を行い、系の各パラメータを同定し、理論解析の結果と実験結果を比較し、本論の理論解析の妥当性を確認した。

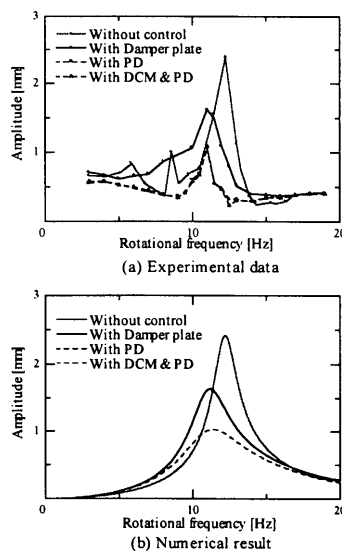


Fig. 2 Frequency response with control