磁気軸受の制御ゲイン変更による危険速度通過*

Passing Through Critical Speeds by Changing the Control Gain of Magnetic Bearings

我妻 隆夫*¹
朝倉 啓*³斉藤 忍*²
金子 幸男*⁴Takao AZUMA, Ishikawajima-Noise Control Co., Ltd., 1-15-18, Hyakunin-Chou, Shinjyuku-Ku, Tokyo
Sinobu Saito, Hiroshi Asakura and Yukio Kaneko, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

In order to pass through critical speeds of the free-free mode of a flexible rotor, a method of changing the control gain of magnetic bearings depending on rotational speed is proposed in this paper. Some preliminary tests are done by applying this method to a rigid rotor. Two critical speeds of rigid mode are passed through by changing the control gain of rigidity depending on rotational speed even without the controller damping effect. The maximum amplitude can be maintained at less than 10 μm within the whole range of test speeds.

Key Words: Vibration of Rotating Shaft, Magnetic Bearing, Critical Speed, Unbalance Response, Active Vibration Control, PD Controller, Rigid Rotor

1. まえがき

近年、磁気軸受が広範囲にわたって使われるようになり、磁気軸受による防振の手法も活発に研究されている。ロータダイナミクスの観点から磁気軸受の制御を考えた研究も数多く成されている。たとえば、松下ら¹⁾は磁気軸受のばね定数に連成項をもたせることによって軸系の安定化を図っている。金光ら²⁾はDSPを用いたIIRフィルタにより弾性ロータの一次危険速度を通過することに成功している。野波ら³⁾はフィードバック制御に加えて、不釣り合い自身を状態変数とみなして拡大方程式を導き、オブザーバによって不釣り合い力を推定し、これを相殺するフィードフォワード制御を適用し弾性ロータの危険速度を通過している。

筆者らは、磁気軸受のばね定数、減衰定数などを軸の回転数に対して適宜に変化させることによって、見かけ上運転範囲に危険速度が存在しないような磁気軸受の制御方法を考えた。すなわち、回転速度が軸系の危険速度に近付いたとき、磁気軸受のばね定数を急激に変えて軸系の振動特性を変化させ、当面問題の危険速度を回避しようというものである。この手法を弾性ロータの危険速度通過に適用することが目的であるが、本報はまず剛性ロータを用いて実験を行い良好な結果を得たのでこの結果について報告する。

2. 制御方法

図1にここで用いた制御方法の考え方を示す。図は軸系の危険速度線図に軸受のばね定数をプロットしたものである。軸の回転数に対して、図の点線で示すように軸受ばね定数を変化させれば、定格回転数まで不釣り合い振動が増大することなく運転できるはずであるというのが基本的な考え方である。

図2に制御装置のブロック図を示す。基本的には変位と速度のフィードバック制御である。変位および速度それぞれのフィードバックゲイン K_1 、 K_2 の回転数に対する値がRAMに記憶されており、回転パルスの周波数に対応してその周波数における K_1 、 K_2 の値がコントローラに読み込まれる。 K_1 、 K_2 は、あらかじめ振動計算により最適値を求めその値を用いるが、運転による学習でその値を変更することも可能である。

図1 制御方法の考え方

* 原稿受付 平成2年6月22日。

*¹ 正員、石川島防音工業(株) (〒169 東京都新宿区百人町1-15-18)。*² 正員、石川島播磨重工業(株)技術研究所 (〒135 東京都江東区豊洲3-1-15)。*³ 正員、石川島播磨重工業(株)汎用機械事業部 (〒135 東京都江東区豊洲3-2-16)。*⁴ 石川島播磨重工業(株)汎用機械事業部 (同上)。

図2 制御装置のブロック図

本図は5軸制御のうちの1軸分を示しており、制御ゲイン K_1, K_2 は各軸独立に設定することができる。

3. 実験結果およびその考察

3. 1 試験装置

図3に実験に用いた試験装置の概要を、図4にこの軸系の危険速度線図を示す。軸端に円板を有する高周波モータ軸が4対(X1, Y1, X2, Y2)のラジアル磁気軸受と1対のスラスト磁気軸受で支持される5軸制御形の磁気軸受試験装置である。インバータによって回転数を変えることができる。軸受部にそれぞれギャップセンサが取り付けられており、各軸受部の相対変位を検出している。センサ信号は磁気軸受制御装置に入力される。一方、パルスピックアップにより検出される回転パルスも制御装置に入力され、この信号によりRAMに書き込まれたゲイン K_1, K_2 が読み出される。乗算形DA変換器を用い入力された信号に K_1 を乗じた値と変位信号を微分しこれに K_2 を乗じた値の和の信号でパワーアンプを駆動して磁気軸受を制御する。PIDコントローラの処理スピードは $20\mu\text{sec}$ となる。

図3 磁気軸受試験装置

っている。コイル電流を検出しパワーアンプ側で電流補償を行っている。図4の点線は制御装置のゲイン K_1 に対して実現される磁気軸受のばね定数を示す。本装置の場合、曲げモードの危険速度が $100,000\text{rpm}$ となっており、ここに述べる手法でこの危険速度を通過するためには少なくとも軸受のばね定数を 10^8N/m 程度までは高くできなくてはならない。しかしながら、本装置ではこれを実現できなかったため、剛体モードの危険速度を通過する実験のみを行った。

3. 2 周波数応答の測定結果

軸を磁気軸受によって浮上させ、回転させない状態で電気信号により制御系をスイープ加振し、非回転時の周波数応答(閉ループ伝達関数)を測定した。制御ゲイン k_1 をパラメータとし、 k_2 は 0.01 とした(X1, X2, Y1, Y2の4軸とも同一の値に設定した)。X2軸を加振し、X2軸の応答を測定した結果を図5に示す。 k_1 の値は軸受のばね定数を示しており、当然のことながらこの値を大きくするほど共振点が高くなり、また共振点より低い周波数範囲における応答レベルも下がっている。 k_1 の値が小さい場合は k_2 の効果(減衰の効果)によって軸系の特性が過減衰となっているが、 k_1 の値が大きくなるにつれて減衰比が小さくなっていることがわかる。

この結果をもとに、ゲイン k_1 を4軸とも同時に図6のように変化させ、周波数応答を測定した。ただし k_2 の値は 0 とした。すなわち 0 から 80Hz の間は $k_1=1.0$ の場合

図4 試験軸系の危険速度線図

合の振動特性に従うため、80Hz近傍で $k_1=1.0$ の特性における共振点（100Hz）のすそ野にかかってくる。80Hzにおいて k_1 を1.0から0.4に変化させることによって系の特性は $k_1=0.4$ の振動特性に急変する。 $k_1=0.4$ の場合80Hzではもはや共振点を過ぎゲインが十分に低下しているためさらに周波数を上げてゲインが増加することはないとの考えにもとづくものである。

X2軸を加振し、X2軸の応答を測定した結果を図7に示す。最大ゲインは4dBで K_1 を変化させない場合の15から20dBに比べ10dB以上振動の最大レベルが低減している。また、 K_2 を0としていることは軸受の減衰が0であることを意味しており、このために K_2 を0.01とした場合に比べ高周波数域におけるゲインが下がっているものと考えられる。

このように、剛体モードの固有振動に関しては変位のフィードバックのみで（軸受に減衰を与えなくても）その共振点を通過することができた。

3.3 回転試験

まず制御ゲイン k_1 をパラメータとして、軸系の回転試験を行った。高周波モータの電磁力干渉の影響を除くために、インバータにより15000rpmまで回転を上昇させ、その状態でインバータの電源を切り、フリーラン回転下降時の振動を測定した。 k_2 のゲインは0.01とした。図8は k_1 の値を一定にして回転させた場合の軸受部振動X2の測定結果である。 k_1 の値が大きいほど危険速度通過時の振幅は減少するが、 k_1 を1.6程度以上大きくすると危険速度通過時に発振する現象がみられた。危険速度および危険速度通過時の振幅は、 k_1 が0.6, 1.0および1.2の場合それぞれ3700rpm, 50 μ m, 5900rpm, 13 μ m, および6600rpm, 10 μ mであった。また k_1 が1.6の場合の危険速度は約8000rpmと考えられた。

ついでゲイン k_1 を回転数に対して4軸同時に図9に示すように変化させ、このときの振動を測定した。 k_2 は0とした。結果を図10に示す。

図5 周波数応答の測定結果
(制御ゲイン一定の場合)

図6 加振周波数に対する制御ゲインの変化

図7 周波数応答の測定結果

図8 不つりあい振動の測定結果
(制御ゲイン一定の場合)

Case1 は4200rpm以上で $k_1=0.8$, 4200rpm以下で $k_1=1.6$ となるようゲイン k_1 を変化させた場合である。回転が下降し $k_1=0.8$ の場合の危険速度(4600rpm)を通過した直後の4200rpmで k_1 を1.6(この場合の危険速度は約8000rpm)に変化させたため4600rpmで大きなピークを示した後4200rpmにおいて振幅が急激に小さくなっている。

Case2 は4800rpm以上で $k_1=0.5$, 4800rpm以下で $k_1=1.6$ となるようゲイン k_1 を変化させた場合である。この場合回転が5000rpm付近まで下降すると $k_1=0.5$ の場合の危険速度(3200rpm)の影響を受け振幅が増加し始めるが、4800rpmで k_1 を1.6に変化させているため危険速度に達する前に急激に振幅が減少している。

Case3 は6000rpm以上で $k_1=0.8$, 6000rpm以下で $k_1=$

1.6となるようゲイン k_1 を変化させた場合である。

Case1と比べ $k_1=0.8$ の場合の危険速度(4600rpm)より高い回転数においてゲインを変化させているため振幅は余り成長せず、6000rpmで k_1 の変化にともない急減している。

Case4は6000rpm以上で $k_1=0.7$ 、6000rpm以下で $k_1=1.6$ となるようゲイン k_1 を変化させた場合である。6000rpm以上では k_1 の値がCase3と比較して小さく、このため危険速度もCase3に比べ低くなっており(4200rpm)したがってゲインを切り替える6000rpmにおける振幅もCase3に比べ小さい。6000rpmで k_1 を1.6に変えた後はCase3と同様の特性を示している。

Case2, Case3およびCase4はいずれも制御がうまくいった場合であり $k_2=0$ 、すなわち減衰0の条件でも最大振幅 $10\mu\text{m}$ 以下で剛体モードの危険速度以上の回転数まで回転させることができたことになる。

X方向とY方向で応答が異なっているのは、ジャイロ効果の影響やラジアル軸受とスラスト軸受の取付け上の直角度誤差による両軸受の連成、上下のラジアル軸受の通り心の誤差による連成などの影響によって非等方性の軸受特性となったため考えられる。

k_1 を急変させる時点で軸系の固有振動数に相当する自由振動がみられたが、振幅も小さく有害な振動とはならなかった。適当な速度フィードバックによってこの振動は消滅するはずである。

4. あとがき

磁気軸受制御装置の変位フィードバックゲインを回転数に対して変化させることにより、回転数に対して磁気軸受のばね定数を変化させることができる。試験装置を用い、フィードバックゲインを変化させることにより剛性ロータの危険速度を通過する実験を行った。ゲインの変更を軸系の振動特性に対して最適に行うことにより、軸系に減衰がない場合でも剛体モードの危険速度を容易に通過することができた(剛体モードの危険速度以上の回転数まで軸を回転させることができた)。この結果、本手法により曲げモードの危険速度を通過できる見通しが得られ、今後この試験を実施することにしたい。

曲げモードの危険速度を通過するためには磁気軸受のばね定数を軸の剛性に対して相対的に高くできることが必要であり、このためには磁気軸受の特性と軸系の振動特性の両者の関係から最適な軸系の形状を決めることが必要であると考えられる。

おわりに、制御装置の設計および実験に協力いただいた(株)アイ・エス・イーの鈴木三智矢氏、田中曉氏に感謝の意を表する次第である。

図9 回転数に対する制御ゲインの変化

図10 不つりあい振動の測定結果
(回転数に対して制御ゲイン K_1 を変化させた場合)

参考文献

- (1) 松下ほか, 機論, C編, 53, 496, (昭62), 2453
- (2) 金光ほか, エバラ時報, 143, 1989-4
- (3) 野波ほか, 東海支部講演会論文No. 89-0200A(平2)