磁気軸受におけるロータ・アキシャル方向への 不釣り合い振動補償器の適用の試み*

齋 藤 大 史** 涌 井 伸 二***

Trial of Applying Unbalance Vibration Compensator to Axial Position of the Rotor with Active Magnetic Bearings

Daishi SAITO and Shinji WAKUI

In industry, Turbo molecular pump (TMP) is utilized to make highly vacuum in the chamber. The rotor supported by the active magnetic bearings (AMB) in TMP vibrates caused by the unbalance of the mass of the rotor. This vibration is transmitted to casing of TMP and gives harmful influence on the device attached to TMP. As methods to suppress this vibration, Peak-of-Gain Control (JIS B 0913-1, Unbalance Force Counteracting Control: UFCC), Automatic Balancing System (JIS B 0913-1, Unbalance Force Rejection Control: UFRC) and Phase-Variable Control (PVC) have been reported. However, these methods have been applied to only radial direction of the rotor even though vibration with same cycle as unbalance vibration occurs in axial direction of the rotor. Additionally, conventional unbalance vibration compensator can not be applied to the three axes bearing which supports the rotor by AMB in only axial direction. Accordingly, in this paper, unbalance vibration compensators for axial direction are proposed. Through experiments, the proposed compensators are applied to the axial direction and exhibit effect of suppression of unbalance vibration.

Key words: turbo molecular pump, magnetic bearing, unbalance vibration, peak-of-gain control, automatic balancing system

1. 緒 言

能動形磁気軸受 (Active Magnetic Bearing : 以下, AMB) は電磁石に電流を通電することにより吸引力を発生させ, ロータを非接触で支持する。そのため, 機械軸受に比べ摩擦損失がなく, オイル・メンテナンスフリーで半永久的に使用できるメリットがある¹⁾。

AMBはターボ分子ポンプ (Turbo Molecular Pump: 以下, TMP) に広く利用されている²⁾。この TMP のロータを回転させる際, 不釣り合い振動が発生する。同振動は幾何中心と慣性中心が異なるロータを回転させることにより発生する³⁾。この振動はケーシングに伝達し, TMP が取り付けられた機器の振動環境に悪影響を与える。そこで, 不釣り合い振動の補償として, 適応制御法⁴⁾やノッチフィルタを用いた手法⁵⁾が報告されている。また Peak-of Gain Control (JIS 規格では Unbalance Force Counteracting Control : UFCC を以下, PGC と略記), Auto-Balancing System (JIS 規格では Unbalance Force Rejection Control : UFRC を以下, ABS と略記), そして Phase-Variable Control (以下, PVC と略記) のトラッキングフィルタを用いた補償法が報告されている^{6,7)}。同フィルタを用いた補償法はラジアル方向の不釣り合い振動を抑制する。一方, ロータのアキシャル方向にも回転周波数成分をもつ振動が発生している。これをアキシャル方向の不釣り合い振動と呼ぶ。本稿では, この振動を抑制する。具体的な応用は3軸磁気軸受を想定している。産業界ではラジアル方向に永久磁石を用い, アキシャル方向に対してのみ AMB を用いる磁気軸受も広く用いられているが, 従来のラジアル方向に対する不釣り

合い振動補償器はそのままでは適用することはできない。この振動を抑制する一手法として動吸振器がある⁸⁾。しかし, これは TMP を取り付ける機器が変わるごとにパラメータ調整を要する。よって TMP それ自体の振動を抑制する必要がある。

本稿では所有の 5 軸能動形磁気軸受におけるロータのアキシャル方向に専用の不釣り合い振動補償器を適用する。この補償器はアキシャル方向にのみ能動的制御が施される 3 軸磁気軸受にも適用できる。本稿の構成は以下のとおりである。2 章では 5 軸能動形磁気軸受の構造と従来のラジアル方向に対する不釣り合い振動補償器について説明する。3 章ではアキシャル方向に対する不釣り合い振動補償器を提案する。4 章ではこの補償器を実機に適用した結果を示す。最後に 5 章で結論を述べる。

2. 5 軸能動形磁気軸受とラジアル方向に対する 不釣り合い振動補償器

実験で用いる 5 軸能動形磁気軸受の構造と, 既知のトラッキングフィルタを用いた不釣り合い振動補償法を簡単に述べる。

2.1 5 軸能動形磁気軸受

図 1 に実験で用いる TMP の外観, 図 2 に TMP 内部のロータと 5 軸 AMB の構造, そして図 3 にその上面図を示す。図 2 中央に位置するロータは AMB によって, 支持されている。ブラシレス DC モータはロータを回転させる。 $(x_h, y_h), (x_b, y_b)$ はそれぞれ, ラジアル方向の上部, 下部の位置信号を示す。また, z はアキシャル方向の位置信号を, θ はロータの回転角度を表す。サンプリング周波数 10 kHz の Digital Signal Processor (以下, DSP) をコントローラとして用いる。

図 4 に 5 軸 AMB の制御系を示す。ラジアル方向では, モータ抽出により回転, 並進モードに分離された信号をそれぞれ PI 補償, PD 補償, 位相進み補償を行い, さらにモード分配により駆動指令を出力している。アキシャル方向には, ロータを安定

* 原稿受付 平成 29 年 6 月 2 日

掲載決定 平成 29 年 9 月 20 日

** 学生会員 東京農工大学大学院工学府 (東京都小金井市中町 2-24-16)

*** 正会員 東京農工大学大学院工学研究院

浮上させるために、擬似積分器、位相進み補償器、そして PD 補償器を適用した。従来、ラジアル方向に図 4 の破線部で囲んだ不釣り合い振動補償器が適用される。本稿では新たに同補償器をアキシャル方向用に改良した。これを図 4 の太線部で囲んだ部分に適用し、不釣り合い振動を抑制する。

Fig.1 Overview of TMP

Fig.2 Structure and coordinate system of five-axes AMB in TMP

Fig.3 Top view of rotor and AMB system

Fig.4 Block diagram of five-axes AMB and controller with axial unbalance vibration compensator

Fig.5 Block diagram of tracking filter

Table 1 Parameters of tracking filter

Parameters	Unit	Description
x_{in}, y_{in}	V	Input position signals
x_{out}, y_{out}	V	Output signals
ω_r	rad/s	Rotational angular velocity
τ	s	Time constant of LPF

2.2 ラジアル方向に対する不釣り合い振動補償器

回転時には周期的な外力が働くことによりロータが振れ回る。これが不釣り合い振動を招く。同振動は回転周波数に同期する。ロータの定格回転時とそれに至るまでの過渡状態においても不釣り合い振動は発生するため、これを抑制するには回転周波数に追従するトラッキングフィルタを用いた補償法が有効になる。

図 5 に同フィルタのブロック線図を示す。同図で使用した各記号を表 1 にまとめた。トラッキングフィルタは狭帯域バンドパス型であり、中心周波数は回転周波数に同期する。詳細は文献 7) を参照されたい。なお、同フィルタを用いた PGC、ABS、そして PVC による補償法は 3.2 節において後述する。

3. アキシャル方向に対する不釣り合い振動補償器

従来のトラッキングフィルタを用いた不釣り合い振動補償法をアキシャル方向に適用する方法と、同方向における PGC、ABS、そして PVC の各特徴を述べる。次に PGC が内部モデル原理に基づいた外乱抑制手法であることを示す。これを踏まえ、高調波振動を抑制する PGC を導出する。最後に、ロータのアキシャル方向に発生する非整数次の 1/3 次分数調波を抑制する PGC を導出する。

3.1 2 軸トラッキングフィルタの変換

ラジアル方向に対するトラッキングフィルタは x, y 方向の 2 入力 2 出力系である。一方、アキシャル方向に対する同フィルタは z 方向の 1 入力 1 出力にする必要がある。そこで図 6 に示すように、従来の 2 入力 2 出力の干渉系であるトラッキングフィルタを図形的に太線部分の信号の経路をたどることにより、1 入力 1 出力のフィルタとした。なお、特許 3072994 号⁹⁾において、このフィルタと等価な 1 入力 1 出力のものがトラッキングフィルタの原理として説明される。しかし、式展開のみでブロック線図による具体的なフィルタの構造は示されていない。さらに提案するフィルタは文献 10) のノッチフィルタとほぼ同一の構造をもつ。提案するフィルタは内部にローパスフィルタをもつ。一方、文献 10) のノッチフィルタはこのローパスフィルタが積分器に置き換わっている。ただし、同文献ではこのノッチフィ

ルタを x , y 方向それぞれに独立に適用している。つまり、本稿で提案するアキシャル方向への適用ではない。図 6 の太線で示す信号の経路を具体的に書き直したのが図 7 である。

この 1 軸トラッキングフィルタの伝達関数 $G_{UTF}(s)$ を導出する。図 7 中の $z_{LPF1}(s)$ と $z_{LPF2}(s)$ はオイラーの公式とラプラス変換により式(1)になる。

$$\begin{aligned} z_{LPF1}(s) &= \frac{1}{2(\tau s + 1)} \{z_{in}(s - j\omega_r) + z_{in}(s + j\omega_r)\} \\ z_{LPF2}(s) &= -\frac{1}{2(\tau s + 1)} \{z(s - j\omega_r) - z_{in}(s + j\omega_r)\} \end{aligned} \quad (1)$$

また、 $z_{out}(s)$ はオイラーの公式とラプラス変換により式(2)になる。

$$\begin{aligned} z_{out}(s) &= \frac{1}{2} \{z_{LPF1}(s - j\omega_r) + z_{LPF1}(s + j\omega_r)\} \\ &\quad - \frac{1}{j2} \{z_{LPF2}(s - j\omega_r) - z_{LPF2}(s + j\omega_r)\} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)に(1)を代入することで、 $G_{UTF}(s)$ を得る。

$$G_{UTF}(s) = \frac{z_{out}(s)}{z_{in}(s)} = \frac{\frac{1}{\tau} s + \frac{1}{\tau^2}}{s^2 + \frac{2}{\tau} s + \omega_r^2 + \frac{1}{\tau^2}} \quad (3)$$

式(3)のボード線図を図 8 に示す。ここではロータの回転数は

Fig.6 Modified block diagram of tracking filter

Fig.7 Block diagram of uniaxial tracking filter

Fig.8 Bode plots of uniaxial tracking filter

1000, 3000, 5000 rpm である。同図より、1 軸トラッキングフィルタは回転周波数を中心周波数とした狭帯域バンドパス型である。よって、ラジアル方向の同フィルタと同様の周波数特性をもつ⁷⁾。

3.2 1 軸トラッキングフィルタ使用の不釣り合い振動補償器

1 軸トラッキングフィルタを用いた PGC, ABS, そして PVC が、ラジアル方向に適用されるそれらの周波数特性と同一であることを確認する。

(A) PGC: PGC は回転周波数における軸受剛性を大きくし、ロータの振動を積極的に抑制する。PGC のブロック線図を図 9 に示す。同図では、1 軸トラッキングフィルタ内のローパスフィルタ前後で位相差を設けてある。これにより PGC 後段に別途、位相進み補償器を適用する必要がないといわれている⁹⁾。これ以外は位相差を設けない PGC の特徴と変わらない。この PGC の伝達関数 $G_{UPGC}(s)$ は次式になる。

$$\begin{aligned} G_{UPGC}(s) &= 1 + K_{PGC} G_{UTF1}(s) \\ &= \frac{s^2 + \left(\frac{2 + K_{PGC} \cos \phi_{PGC}}{\tau} \right) s + \left(\omega_r^2 + \frac{1 + K_{PGC} (\cos \phi_{PGC} - \omega_r \tau \sin \phi_{PGC})}{\tau^2} \right)}{s^2 + \left(\frac{2}{\tau} \right) s + \left(\omega_r^2 + \frac{1}{\tau^2} \right)} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 K_{PGC} は PGC のゲインである。式(4)のボード線図を図 10 に示す。ロータの回転数は 3000 rpm である。ここでは、トラッキングフィルタ内の位相差 ϕ_{PGC} を 0, 30, 60 deg とした。同図より回転周波数を中心周波数とする逆ノッチフィルタである。また、 ϕ_{PGC} の指定を大きくすると回転周波数における位相がより進む。

(B) ABS: ABS は回転周波数における軸受剛性を小さくすること

Fig.9 Block diagram of uniaxial PGC

Fig.10 Bode plots of uniaxial PGC

Fig.11 Block diagram of uniaxial ABS

Fig.12 Bode plots of uniaxial ABS

で、ロータを慣性主軸まわりに回転させて振動を抑制する。図 11 に ABS のブロック線図を示す。PGC が 1 軸トラッキングフィルタをフィードフォワードで接続する。一方、ABS はフィードバックで接続する。この伝達関数 $G_{UABS}(s)$ は次式である。

$$G_{UABS}(s) = \frac{1}{1 + K_{ABS} G_{UTF2}(s)}$$

$$= \frac{s^2 + \left(\frac{2}{\tau}\right)s + \left(\omega_r^2 + \frac{1}{\tau^2}\right)}{s^2 + \left(\frac{2 + K_{ABS} \cos \phi_{ABS}}{\tau}\right)s + \left(\omega_r^2 + \frac{1 + K_{ABS} (\cos \phi_{ABS} - \omega_r \tau \sin \phi_{ABS})}{\tau^2}\right)} \quad (5)$$

ここで、 K_{ABS} は ABS のゲインである。式(5)のボード線図を図 12 に示す。ロータの回転数は 3000 rpm である。ここではトラッキングフィルタ内の位相差 ϕ_{ABS} を 0, -30, -60 deg とした。同図より、回転周波数におけるゲインを小さくするノッチフィルタになる。また、 ϕ_{ABS} をマイナス方向に大きくすると、回転周波数における位相がより進む。

(C) PVC: ラジアル方向に対する PGC と ABS は周知の補償法である。一方、PVC は筆者の一人ほかが提案したものである。これは軸受剛性を変化させることなく、回転周波数における位相を進めることでロータに減衰を与え、振動を抑制する。PGC と ABS が軸受剛性を変化させるゲイン安定化手法とすれば、PVC は位相安定化手法に相当する⁷⁾。図 13 にアキシャル方向に適用する PVC のブロック線図を示す。トラッキングフィルタ内に位相差を設けた位相可変型 PGC と ABS を直列接続している。この伝達関数 $G_{UPVC}(s)$ は次式である。

$$G_{UPVC}(s) = \frac{1 + K_{PGC} G_{UTF1}(s)}{1 + K_{ABS} G_{UTF2}(s)}$$

$$= \frac{s^2 + a_1 s + a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \quad (6)$$

Fig.13 Block diagram of uniaxial PVC

Fig.14 Bode plots of uniaxial PVC

ただし、 $a_1 = \frac{(2 + K_{PGC} \cos \phi_{PGC})}{\tau}$,

$$a_0 = \omega_r^2 + \frac{1 + K_{PGC} (\cos \phi_{PGC} - \omega_r \tau \sin \phi_{PGC})}{\tau^2},$$

$$b_1 = \frac{(2 + K_{ABS} \cos \phi_{ABS})}{\tau},$$

$$b_0 = \omega_r^2 + \frac{1 + K_{ABS} (\cos \phi_{ABS} - \omega_r \tau \sin \phi_{ABS})}{\tau^2}$$

式(6)のボード線図を図 14 に示す。ロータの回転数は 3000 rpm である。このとき、PVC 内における PGC と ABS のゲインとトラッキングフィルタ内の位相差はそれぞれ、 $K_{PGC}=K_{ABS}=1.0$ と $\phi_{PGC}=\phi_{ABS}=0, 30, 60$ deg である。このとき、回転角周波数におけるゲインは変化しない。一方、 ϕ_{PGC} ($=-\phi_{ABS}$) の指定を大きくするとより位相が進む。

3.3 内部モデル原理に基づく高調波の抑制

PGC は、内部モデル原理に基づく外乱抑制方法と解釈されている¹¹⁾。このことを応用し、先行研究においてラジアル方向に発生する不釣り合い振動の整数倍の周波数成分をもつ高調波振動を抑制した¹¹⁾。ここでは、この PGC を Harmonic-type PGC (以下、HPGC) と呼ぶ。アキシャル方向に発生する高調波振動についてもラジアル方向と同様の抑制効果が期待できる。よって、アキシャル方向に対する HPGC の導出過程を示す。

まず、繰り返し制御器¹²⁾の極配置を踏まえて、同制御器が内部モデル原理に基づく外乱抑制手法であることを述べる。このブロック線図を図15に示す。伝達関数 $G_{RC}(s)$ は次式となる。

$$G_{RC}(s) = \frac{1}{1 - e^{-Ls}} \quad (7)$$

L は外乱周期である。外乱角周波数 ω_0 は L を用いて表すと、 $\omega_0 = (2\pi)/L$ となるので、繰り返し制御器の極は式(7)より次式となる。

$$s = \pm j \frac{2n\pi}{L} = \pm j n \omega_0 (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

式(8)より、繰り返し制御器は外乱に相当する生成モデルを極にもつ。同制御器を閉ループ内に適用することにより、外乱による定常応答の偏差を零にする。

次に、アキシャル方向に適用する PGC が繰り返し制御器と同様に、内部モデル原理に基づく外乱抑制法であることを説明する。PGC の伝達関数は式(4)に示したとおりである。これより、PGC の極は

$$s = -\frac{1}{\tau} \pm j\omega_r \quad (9)$$

となる。 $1/\tau$ は実用上、ロータの回転角周波数の変動をカバーするため、 ω_r に比べ非常に小さく設定する。よって、PGC の極は $s = \pm j\omega_r$ と近似でき、ロータの回転角周波数成分の外乱モデル、つまり、不釣り合い振動のモデルを生成する。よって、PGC は繰り返し制御器と同様に、内部モデル原理に基づく外乱抑制手法といえる。

先行研究では、繰り返し制御器が外乱の整数倍の振動を抑制することと、PGC が同制御器と同様に内部モデル原理に基づいた外乱抑制法であることから、ラジアル方向における不釣り合い振動の2次高調波振動を抑制する HPGC を導出している。そこで、ラジアル方向と同様にアキシャル方向の同振動を抑制する HPGC を導出する。このブロック線図を図16に示す。同図中の K_{HPGC} は HPGC のゲインである。HPGC の正弦波、余弦波のブロックは回転角周波数 ω_r の2倍に設定している。このとき HPGC の極は $s = -(1/\tau) \pm j2\omega_r$ となる。 $1/\tau$ は既述のとおり、 ω_r に比べ非常に小さい。よって、 $s = \pm j2\omega_r$ と近似される。同制御器は2次高調波振動成分の生成モデルとなるために、同成分に対する振動抑制効果をもつ。

Fig.15 Block diagram of repetitive controller

Fig.16 Block diagram of uniaxial HPGC

3.4 1/3 次分数調波の抑制

ロータの回転時に発生するアキシャル方向の 1/3 次分数調波振動を抑制する。図17にアキシャル方向の振動のパワースペクトルを示す。回転数は 1000 rpm である。不釣り合い振動にあたる 16.6 Hz 成分に加え、その 1/3 倍の周波数成分の 5.55 Hz 付近の振動が大きい。文献13)ではラジアル方向において、この 1/3 次分数調波振動が発生することを確認している。一方、所有の TMP において同振動はラジアル方向には現れず、アキシャル方向に確認された。同振動が発生する要因として、軸受の非線形性にあることが知られている¹⁴⁾。繰り返し制御器は基本波の整数倍成分に対応するもので、分数調波成分は抑制対象ではない。しかし、内部モデル原理にしたがえば、分数調波成分も抑制できるはずである。よって、分数調波振動を抑制する Subharmonic type PGC (以下、SPGC) を導出する。

SPGC のブロック線図を図18に示す。同図中の K_{SPGC} は SPGC のゲインである。分数調波振動と同一のモデルを SPGC の極にもたせるために、回転角周波数 $1/3\omega_r$ の正弦および余弦波を生成する必要がある。ここで、図16に示す HPGC は正弦波と余弦波のブロックに 2 倍の回転角周波数を代入することで高調波成分をもつ正弦および余弦波を生成した。一方、SPGC は 1/3 倍の回転角周波数を代入しても分数調波成分をもつ正弦および余弦波は生成されない。図18では、機能を理解しやすいように 1/3 倍の回転角周波数を代入しているが、実際は別途に 1/3 次分数調波用の正弦および余弦波の生成器が必要になる。この説明のために図19に TMP から出力されるパルスと DSP で生成される正弦波を示す。同図(a)のパルスはロータが 1 回転するごとに立ち下がる。これを DSP 上で処理することにより回転角周波数 ω_r をもつ正弦および余弦波を得る。また、パルスが立ち下がる時、これ以前の正弦波の生成は止まり、この時点におけるロータの回転角周波数に基づく正弦波を生成しはじめる。つまり、パルスの立ち下がり時は正弦波の値が初期値の零をとる。同図(b)の PGC は生成される正弦波が 1 周期経過した時点で初期値に戻る。また、同図(c)で示すように HPGC は固有角周波数が PGC の 2 倍であるため、2 周期経過した時点で初期値に戻る。一方、同図

Fig.17 Power spectrum of axial position

Fig.18 Block diagram of uniaxial SPGC

Fig.19 Pulse and sine waves of unbalance vibration compensator

(d)の固有角周波数がPGCの1/3倍のSPGCは1/3周期経過した時点で、パルスの立ち下がりにより初期値に戻る。よって、HPGCと同様の手法では1周期分の波形を得られない。そこでパルスの後段にフリップフロップ回路を用いた3進カウンタを適用する。これにより、図19(a)に示すパルスが3回立ち下がったとき、1回立ち下がる。よって、同図(e)に示すようにSPGCの正弦波は1周期経過した時点で初期値に戻り、同周期分の波形を得る。

4. 回転実験

実機にアキシャル方向の不釣り合い振動補償器を適用する。まず、3.2節で述べたPGC、ABS、そしてPVCを用い、不釣り合い振動の基本波振動を抑制する。次にHPGCを用い、ロータの定常振動に発生する不釣り合い振動の2次高調波振動を抑制する。またSPGCを適用し、アキシャル方向にのみ確認される1/3次分数調波振動を抑制する。最後に、5軸能動形磁気軸受への応用として、従来のラジアル方向に対する不釣り合い振動補償器とアキシャル方向の同補償器を同時に適用し、さらなる抑制効果を示す。

4.1 不釣り合い振動の基本波成分抑制

3.2節で述べたPGC、ABS、そしてPVCを実機に適用し、アキシャル方向に発生するロータの不釣り合い振動の基本波振動を抑制する。

(A) PGCの適用：PGCを適用した際のアキシャル方向におけるロータの時間応答と、これに対するパワースペクトルを図20に示す。回転数は低回転の1000 rpmである。PGCのゲイン K_{PGC} は0.5, 1.0, 1.5とし、トラッキングフィルタ内の位相差は零である。同図左側の時刻0 sから2秒間をPGC適用前の定常振動、そして、時刻3.0 sでPGCによる制御に切り替えて1秒間の過渡現象を除外した時刻4.0から6.0 sまでをPGC適用後の定常振動としてパワースペクトルを求めた。同図左側より、PGCを適用すると、ロータの振動が抑制される。この振動成分は同図右側より、回転周波数成分の不釣り合い振動といえる。よって、アキシャル方向のPGCは同方向の振動抑制に効果がある。なお、アキシャル方向におけるロータの位置にオフセットが存在する。この理由は図4に示すようにラジアル方向とアキシャル方向ともに、完全積分器が実装されていないためである。これは通常、磁気軸受を用いるとき、ロータが固定子と接触しないことのみを要求されるためである。

(B) ABS: ABSを適用した際のアキシャル方向におけるロータの時間応答を図21左側に、そしてABSの適用前と適用後の各定常振動に対するパワースペクトルを図21右側に示す。ABSはロ

Fig.20 Time responses and power spectrums of axial position with uniaxial PGC (1000 rpm)

Fig.21 Time responses and power spectrums of axial position with uniaxial ABS (3000 rpm)

ータの閉ループ応答の帯域周波数外で適用される。よって、回転周波数を3000 rpmにして実験を行った。ABSのゲイン K_{ABS} は1.0, 1.5, 2.0とし、トラッキングフィルタ内の位相差は零である。パワースペクトルは(A)と同様に求めた。同図左側より、ABSを適用する場合、振動の振幅が小さくなる。また、同図右側より回転周波数50 Hzの不釣り合い振動成分がABSを適用することで減少している。よって、アキシャル方向のABSは同方向の不釣り合い振動の抑制効果をもつ。

(C) PVC: 回転数が1000 rpmにおけるPVCの振動抑制効果を説明する。PVCを適用した際のアキシャル方向におけるロータの時間応答を図22左側に示す。このときPVCのゲインは $K_{PVC} = K_{ABS} = 1.0$ とし、トラッキングフィルタ内の位相差は $\phi_{PGC} = -\phi_{ABS} = 60, 90, 120 \text{ deg}$ である。位相差が零のPVCを適用すると振動は抑制されない。一方、位相差を与えると抑制される。位相差が大きくなると、振動の抑制効果も大きくなる。なお、60 degより大きくなると抑制量に変化が見られなくなった。図22左側の時間応答に対するパワースペクトルを同図右側に示す。パワースペクトルの求め方は(A)と同様である。図22右側より、位相を進めたPVCを適用すると回転周波数成分の不釣り合い振動が抑制される。よって、PVCはアキシャル方向の同振動の抑制効果をもつ。次に、回転数が3000 rpmの際の抑制効果を説明する。図22と同様に、PVCを適用した際の振動の時間応答と、この振動のパワースペクトルを図23に示す。同図左側より、位相差を設けたPVCを適用すると振動の振幅が小さくなる。同図右側より、抑制された振動成分は回転周波数の50 Hzである。よって、PVCにより不釣り合い振動が抑制された。

Fig.22 Time responses and power spectra of axial position with uniaxial PVC (1000 rpm)

Fig.24 Time responses and power spectra of axial position with uniaxial HPGC (1000 rpm)

Fig.23 Time responses and power spectra of axial position with uniaxial PVC (3000 rpm)

Fig.25 Time responses and power spectra of axial position with uniaxial SPGC (1000 rpm)

4.2 高調波と分数調波振動の抑制

HPGC を適用し、アキシャル方向に発生する不釣り合い振動の 2 次高調波振動を抑制する。HPGC を適用した際のロータの振動の時間応答と、これに対するパワースペクトルを図 24 に示す。ここでは、回転数は 1000 rpm、HPGC のゲイン K_{HPGC} は 1.0、そしてトラッキングフィルタ内の位相差 ϕ_{HPGC} は 0, 30, 60 deg である。同図では高調波振動の変化を明瞭にするために、あらかじめ PGC を適用し、不釣り合い振動の基本波振動を抑制してある。同図左上段より HPGC のトラッキングフィルタ内の位相差を零としたとき、振動振幅が大きくなる。この成分は同図右上段より 2 次高調波である。悪化の理由は制御器の演算処理と DSP の入出力の際の A-D 変換、D-A 変換、センサ、そしてパワーアンプの位相遅れにより HPGC がロータの高調波成分に負の減衰を与えたことである。これらの位相遅れを補償するために、トラッキングフィルタ内に位相差を設けた HPGC を適用した結果が同図中段と下段である。位相差が零のときに比べ、30 deg のときは振動が悪化しない。さらに位相差を大きくした 60 deg のとき、高調波振動が抑制される。したがって、繰り返し制御と同様に基本周波数の整数倍に対応する周期信号を生成する HPGC は不釣り合い振動をさらに抑制する。

次に、SPGC を用いて 1/3 次分数調波を抑制する。SPGC を適用した際のロータの位置信号の時間応答を図 25 左側に、そして、この時間応答に対するパワースペクトルを図 25 右側に示す。ここでは、回転数は 1000 rpm、SPGC のゲイン K_{SPGC} は 1.0, 2.0, 4.0 である。同図では高調波振動の抑制のときと同様、分数調波振動の変化を明瞭にするために、あらかじめ不釣り合い振動の

基本波振動を抑制してある。同図左側より SPGC を適用すると振動が抑制された。この振動は同図右側より 1/3 次分数調波成分である。よって、内部モデル原理に基づく補償器を適用すると、不釣り合い振動の高調波に限らず、分数調波についても抑制できる。

4.3 ラジアルおよびアキシャル方向への不釣り合い振動補償器の同時適用

5 軸能動形磁気軸受への応用として、従来のラジアル方向に対する不釣り合い振動補償器に加えて、アキシャル方向の同補償器を適用する。アキシャル方向の振動をさらに抑制することで、この補償器の有用性を示す。図 26 上段に不釣り合い振動補償をしない場合、中段にラジアル方向に同補償器を適用した場合、そして下段にラジアルおよびアキシャル方向に同補償器を適用した場合のロータのアキシャル方向における定常振動を示す。ここでは回転数は 1000 rpm、ラジアル方向の不釣り合い振動補償器はゲイン $K_{PGC}=2.0$ の PGC、そしてアキシャル方向の同補償器はゲイン $K_{HPGC}=1.0$ でトラッキングフィルタ内の位相差 $\phi_{HPGC}=60$ deg の 2 次高調波振動を抑制する HPGC である。同図より、ラジアル方向の PGC を適用するとアキシャル方向の振動が抑制される。ここでアキシャル方向に HPGC を追加すると、さらに振動が抑制される。図 27 に各定常振動のパワースペクトルを示す。同図よりラジアル方向の PGC を適用すると、ラジアル方向に加えアキシャル方向の不釣り合い振動の基本波振動が抑制される。しかし、2 次高調波振動は残存する。この振動はラジアル方向では基本波振動に比べ、非常に小さい。よって、ラジアル方向の HPGC を適用してもアキシャル方向の同振動は抑制できない。ラジアル方向の PGC とアキシャル方向の HPGC を

Fig.26 Time responses of axial position without and with PGCs (1000 rpm)

Fig.27 Power spectrums of axial position without and with PGCs (1000 rpm)

適用すると、基本波に加え 2 次高調波振動が抑制される。結果より、5 軸磁気軸受において、ラジアル方向に加えアキシャル方向の不釣り合い振動補償器を適用すると、さらなる振動抑制効果が得られる。なお、所有のターボ分子ポンプではラジアル方向に不釣り合い振動補償を施したとき、同方向に加え、アキシャル方向の振動が抑制される。一方、アキシャル方向の同補償を適用してもラジアル方向の振動に変化はない。

5. 結 言

本稿の結論は以下のとおりである。

- (1) 能動形磁気軸受において周知の不釣り合い振動補償は半径方向に施される。本稿では同補償をアキシャル方向にはじめて適用した。
- (2) 従来の 2 入力 2 出力系のロータのラジアル方向に対するトラッキングフィルタを用いた不釣り合い振動補償器をブロック線図から信号の経路をたどることにより、1 入力 1 出力のアキシャル方向に適用する同補償器を導出した。ま

た 5 軸能動形磁気軸受のアキシャル方向に同補償器を適用した。

- (3) ラジアル方向の PGC が内部モデル原理に基づく外乱抑制手法であることが既に報告されている。このことを踏まえ、本稿で導出したアキシャル方向の PGC も同原理に基づく抑制手法であることを示した。これを応用し、不釣り合い振動の高次波と分数調波成分を抑制する HPGC と SPGC を導出した。
- (4) 5 軸能動形磁気軸受において、従来のラジアル方向の PGC とアキシャル方向の高次振動を抑制する HPGC を同時に適用した。
- (5) アキシャル方向の不釣り合い振動補償により、同方向の不釣り合い振動の抑制効果を得た。さらに、アキシャル方向における不釣り合い振動の高次波振動と分数調波振動をそれぞれ HPGC と SPGC を用いることにより抑制した。また、従来のラジアル方向の不釣り合い振動補償器とアキシャル方向の同補償器を同時に適用することにより、アキシャル方向の振動がラジアル方向における単独の補償に比べさらに抑制された。これらをもって、アキシャル方向の不釣り合い振動補償器の有用性を示した。

参 考 文 献

- 1) 進士忠彦: 磁気軸受の現状と高精度化, 精密工学会誌, **67**, 7 (2001), 1086.
- 2) 上山拓知: ターボ分子ポンプ用磁気軸受の最近の開発動向, ターボ機械, **32**, 7 (2004), 432.
- 3) R. ガッシュ, H. ビュッツナー: 回転体の力学, 森北出版, (2004), 4.
- 4) Liu, Zi-he, Kenzo Nonami, and Yuichi Ariga: Adaptive unbalanced vibration control of magnetic bearing systems with rotational synchronizing and asynchronizing harmonic disturbance, JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, **45**, 1 (2002) 142.
- 5) Herzog, R., Buhler, P., Gahler, C., and Larssonneur, R: Unbalance compensation using generalized notch filters in the multivariable feedback of magnetic bearings, IEEE Transactions on control systems technology, **4**, 5 (1996) 580.
- 6) H. Habermann, M. Brunet, and P. Joly: Device for damping the critical frequencies of a rotor suspended by a radial electromagnetic bearing, United States Patent 4128795(1978).
- 7) 中村泰貴, 涌井伸二: 5 軸能動形磁気軸受の不釣り合い振動補償器に対する一設計法, 日本機械学会論文集, **81**, 824(2015).
- 8) 日本電子: 除振機構, 特開 2012-032004(2012)
- 9) 高木亨之, 松下修己, 平井洋武: トラッキングフィルタ付制御回路, 特開 2-246510(1990).
- 10) Zheng, S., Chen, Q., and Ren, H.: Active balancing control of AMB-rotor systems using a phase-shift notch filter connected in parallel mode, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **63**, 6 (2016) 3777.
- 11) 中村泰貴, 涌井伸二: 5 軸能動形磁気軸受における不釣り合い振動補償群の関係性とそれを活用した振動抑制, 日本機械学会論文集, **82**, 837 (2016) 15-00607.
- 12) 原辰次, 繰返し制御: 計測と制御, **25**, 12 (1986) 1111.
- 13) 稲垣瑞穂: 高速回転体の非線形振動解析, 豊田中央研究所 R&D レビュー, **30**, 1 (1995) 1.
- 14) 高橋直彦, 三浦治雄, 福島康雄: 高速ターボ圧縮機用磁気軸受制御系の設計と試験結果, 日本機械学会論文集 C 編, **72**, 721 (2006) 2912.