H[∞]制御による2慣性共振系の2自由度速度制御

正員 森 本 茂 雄 (大阪府立大)
正員 武 田 洋 次 (大阪府立大)
正員 平 紗 多賀男 (大阪府立大)

Two-Degrees-of-Freedom Speed Control of Two-Mass System Based on H[∞] Control
Shigeo Morimoto, Member, Yoji Takeda, Member, Takao Hirasa, Member
(University of Osaka Prefecture)

キーワード: 2慣性共振系, 軸ねじり振動, 振動抑制制御, H[∞]制御, 2自由度制御

1. まえがき

モータで負荷機械を駆動する場合, 軸の剛性が低いと2慣性共振系となり, 軸ねじり振動が発生する。このような機械系に対し, H[∞]制御理論を用いて補償器を設計し振動を抑制する方式が提案されているが, 重み関数の調整パラメータが多かったり, 外乱抑圧特性が良好でない場合がある(1)-(3)。本文では, 振動抑制, 外乱抑圧などのフィードバック特性を改善する補償器をH[∞]制御理論を用いて設計し, さらに目標値応答特性の改善も図るため2自由度制御系を構成しその有効性をシミュレーションで確認している。

2. H[∞]制御理論の2慣性系への適用

2慣性共振系の状態方程式は, 次式で与えられる。

$$\dot{x} = A_p x + B_p u + B_d \tau_L, \quad y_p = C_p x \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし,

$$x = \begin{bmatrix} \omega_M \\ \tau_F \\ \omega_L \end{bmatrix}, \quad A_p = \begin{bmatrix} -D_M/T_M & -1/T_M & 0 \\ 1/T_F & 0 & -1/T_F \\ 0 & 1/T_L & -D_L/T_L \end{bmatrix},$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 1/T_M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/T_L \end{bmatrix}, \quad C_p = [1 \ 0 \ 0],$$

$u = \tau_M$, $y_p = \omega_M$, T_M , T_L , T_F : モータ, 負荷, 軸の時定数, D_M , D_L : モータ, 負荷の粘性摩擦係数, ω_M , ω_L : モータ, 負荷の速度(pu値), τ_M , τ_L , τ_F : モータ, 負荷, 軸のトルク(pu値), $T_M = T_L = 0.0377$ s, $T_F = 0.00115$ s, $D_M = D_L = 0.005$, 共振周波数: 約34Hz

H[∞]制御理論を用いて補償器を設計するために, 重み関数を含めた一般化プラントを図1のように設定し,

$$W_d = 650 \frac{(s+150)^2}{(s+10^{-3})(s+10^5)}, \quad W_n = 100 \frac{s+50}{s+10^5} \quad \dots\dots (2)$$

のように重み関数を設定する。 $W_n(s)$ は高周波域において観測ノイズやプラントのモデル化誤差などの影響を除去するようにハイパス特性とし, $W_d(s)$ は低周波域において負荷外乱を抑圧し, かつ共振周波数付近でのゲイン特性を整形す

図1 H[∞]制御システム
Fig. 1. H[∞] control system.

図2 負荷外乱に対するゲイン線図
Fig. 2. Gain diagrams from load disturbance.

るよう選択している。得られたH[∞]補償器K(s)は4次となるが, 低次元化を行うと2次の補償器となる。この場合でも, 閉ループ系は内部安定であり, 重み関数で指定した設計条件を満足することおよび両補償器で特性に違いがないことを確認している。

図2にH[∞]補償器およびP I 補償器を用いた制御系の τ_L から ω_M までのゲイン特性(G_{Md})と ω_L までのゲイン特性(G_{Ld})を示す。P I 制御の場合, 共振周波数付近でゲイン

図3 2自由度制御系の構成

Fig. 3. Two-degrees-of-freedom control system.

(a)外乱抑圧特性 ($\tau_L: 0 \rightarrow 1.0 \text{ pu}$)

(b)目標値応答特性 ($\omega^*: 0 \rightarrow 1.0 \text{ pu}$)

図4 負荷速度の応答特性

Fig. 4. Dynamic responses of load speed.

が上昇しているが、H[∞]制御の場合 W_d^{-1} によって G_{Md} 、 G_{Ld} が周波数整形されるため共振周波数付近のゲインの増加が抑制されている。その結果、軸ねじり振動は抑制され、外乱抑圧特性も向上する (図4(a))。

3. 2自由度速度制御

フィードバック特性はH[∞]補償器で指定できたので、つぎに目標値応答特性を指定するために図3に示すような2自由度速度制御系を構成する⁽⁴⁾。 $C_A(s)=G_m(s)$ 、 $C_B(s)=P(s)^{-1}G_m(s)$ と置くと目標値応答は $K(s)$ とは無関係に規範モデル $G_m(s)$ で決まる。 $G_m(s)$ は、 $P(s)^{-1}G_m(s)$ が安定でプロパーとなり、 $G_m(0)=1$ を満たすように選択する必要がある。 $G_m(s)$ を2慣性系 $P(s)=C_p(sI-A_p)B_p=g_z(s)/g_p(s)$ の虚軸に近い極を実軸上に極配置したモデルとして与えると $C_A(s)$ 、 $C_B(s)$ は次式となる。ただし、 $n \geq 3$ とする必要がある。

$$C_A(s)=G_m(s)=\frac{\omega_m^n g_z(s)}{(s+\omega_m)^n}, C_B(s)=\frac{\omega_m^n g_p(s)}{(s+\omega_m)^n} \dots\dots (3)$$

このとき目標値応答速度は ω_m で自由に指定でき、良好な

目標値応答特性が得られる (図4(b))。

また、 $C_A(s)=\omega_m/(s+\omega_m)$ 、 $C_B(s)=0$ と設定すると補償器の次数が低減できる。この場合、 ω_m の値によってはオーバーシュートや整定時間が増加するものの ω_m を適切に選択すれば良好な特性が得られる (図4(b))。

4. あとがき

軸ねじり振動が発生する2慣性共振系に対して、振動抑制および外乱抑圧特性を改善する補償器をH[∞]制御理論を用いて設計した。さらに、目標値応答特性も改善するため2自由度制御系を構成し、シミュレーションにより良好な応答特性が得られることを確認した。提案した制御系は、最低3次の補償器で実現でき実用性も高いと考えられる。

(平成5年3月10日受付)

文 献

- (1) S.G.Kulkarni and Y.Hori, "H[∞] Approach for Vibration Suppression in 2-mass System," *National Convention Record I.E.E. Japan, IAS*, pp.E.29-E.32 (1991)
- (2) M.Takano et al., "Application of H[∞] Control to Motor Speed Control System," *Proc. of IECON'91*, pp.839-842 (1991)
- (3) 大内, 美多: 「電動機のH[∞]制御」, 電気学会研究会資料, IIC-92-11 (1992)
- (4) 杉江: 「サーボ系の設計理論とH[∞]制御性能」, システム/制御/情報, Vol.35, No.2, pp.80-87 (1991)

森本 茂雄 (正員) 昭和34年6月28日生。59年3月大阪府立大学大学院修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。63年7月大阪府立大学助手、平成5年7月同講師。工学博士。主として、モータドライブシステムの研究に従事。

武田 洋次 (正員) 昭和18年11月10日生。43年3月大阪府立大学大学院修士課程修了。同年4月同大学助手、62年4月同講師、平成2年7月同助教授、5年4月同教授。工学博士。主として、電動機の変速制御システムの研究、リニアアクチュエータの研究に従事。

平紗 多賀男 (正員) 昭和5年5月13日生。28年3月大阪府立大学工学部卒業。同年4月同大学助手、36年6月同講師、41年4月同助教授、51年9月同教授、平成5年7月同学長。工学博士。この間、主として、サイリスタモータ、PMモータ、低速大トルクアクチュエータ、リニアモータの研究に従事。