負荷トルクオブザーバを用いたイナーシャ推定法

准 員 佐 藤 宏 和 (名古屋工大)

正 員 松 井 信 行 (名古屋工大)

Estimation of Inertia by Torque Observer

Hirokazu Sato, Associate, Nobuyuki Matsui, Member (Nagoya Institute of Technology)

キーワード：イナーシャ，トルクオブザーバ，同定，DD モータ，オートチューニング，摩擦トルク

1. ま え が き

負荷イナーシャは，速度 PI ループのゲインやオブザーバの設計において重要な要素であるばかりでなく，時には制御特性を大きく変化させる要因となる。それゆえ，様々なロバスト制御法が考案されている。トルクオブザーバを速度ループに用いると，ロバストな系が実現できるが，オブザーバの設計には推定トルクに現れる雑音とのからみからもイナーシャの真値が必要となる⁽¹⁾。しかし，一般にイナーシャは測定法が確立されておらず，専ら形状からの計算によって求めているのが実状で，複雑な機械系ではその計算さえ困難な場合もある。本報告は，トルクオブザーバの出力をモニタとして用い，イナーシャと摩擦トルクの自動推定を行う方法について述べたものである。

2. イナーシャ推定の理論

Gopinath の手法を用い最小次元でトルクオブザーバを構成し，速度制御ループに組込んだものを図 1 に示す⁽¹⁾。図より，負荷トルク τ_L およびトルクオブザーバで推定されるトルク $\hat{\tau}_L$ はそれぞれ次式で記せる。

$$\tau_L = K_T i_q - J s \omega_m - D \omega_m \dots \dots \dots (1)$$

$$\hat{\tau}_L = \frac{1}{1+sT} \{ K_T i_q - J_n s \omega_m - D_n \omega_m \} \dots \dots \dots (2)$$

ここで， J ：負荷イナーシャ， D ：粘性摩擦係数， K_T ：トルク定数， i_q ：トルク電流， ω_m ：速度， T ：オブザーバ時定数（添字 n はノミナル値）

イナーシャを推定することを目的としているので， $K_T = K_{Tn}$ ， $D = D_n$ とすると，(1)，(2)式より

$$\hat{\tau}_L = \frac{1}{1+sT} \{ \tau_L + (J - J_n) s \omega_m \} \dots \dots \dots (3)$$

となる。(3)式は，イナーシャのノミナル値と真値の

Gc(s)：電流ループの伝達関数

図 1 トルクフィードフォワードループをもつ速度制御系構成図

Fig.1. Block diagram of speed control system with torque feedforward loop.

間に差がある場合， $s\omega_m \neq 0$ のとき，つまり過渡時に推定トルクへその影響が現れることを示している。また，その誤差分は $s\omega_m$ が一定であれば $J - J_n$ に比例する。従って，ステップ状の速度指令に対するトルクオブザーバの応答をモニタとしてとらえ，これを定常時のそれと比較することによってイナーシャの推定が可能となる。

3. 実験結果

実験は，定格 38.6 V，0.85 A，17.6 W，43 rpm，8 極 24 スロットの同期機形 DD モータに慣性負荷を取付けたものを対象に行った。図 2 に速度制御系において，指令を 10→20 rpm とステップ変化させたときの応答波形と， $J_n = 70 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ （計算値 94.6 $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ ）でトルクオブザーバを設計したときの $\hat{\tau}_L$ を示す。摩擦分がオフセットとして出力されており，過渡時の $\hat{\tau}_L$ にイナーシャの誤差分が現れていることがわかる。しかし，推定トルクには検出器の分解能に起因する雑音やコギングトルクが重畳するため⁽²⁾⁽³⁾，イナーシャの誤差により生じる $\hat{\tau}_L$ のピークの測定がこのままでは困難である。そこで，これらの影響を低減す

図 2 速度ステップ応答
Fig. 2. Speed step response.

図 3 データメモリー内のトルク推定値
Fig. 3. Estimated torque in data memory.

るため同じ実験を数回行い、推定トルクの平均をとる。具体的には、ステップ入力後 0.2 秒分の $\bar{\tau}_L$ をデータメモリーへ保管して数回のデータに対する平均処理を行う。このとき、実験の奇数回と偶数回とで速度指令の変更点をコギングトルクの半周期分ずらす。これによりコギングトルクの影響は相殺され、平均処理によって検出器の分解能に起因する白色雑音のレベルも小さくできる。図 3 は、平均処理を行う前と後を比較したもので、平均処理を行ったものはイナーシャの誤差分によって生ずる $\bar{\tau}_L$ のピークを明確にとらえていることがわかる。図 4 は、イナーシャのノミナル値を 70 から 160 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ まで 10 ずつ変化させて設計したオブザーバの出力のピークをとったものと、データメモリーへ保管した $\bar{\tau}_L$ の後半の 0.1 秒分の平均をとることで算出した摩擦トルクを示したもので、両直線の交点が求めるべきイナーシャの値である。90~120 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ では、雑音とピークの差をとらえることはできないが、イナーシャの値は 113.0 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ と読取れる。計算値は 94.6 $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$ であり、20% 程度の差となっている。従って、速度ステップに対して $\bar{\tau}_L$ に変化が生じたとき、

- (i) 変化分 > 0 なら J_n を増加
- (ii) 変化分 < 0 なら J_n を減少

図 4 $\bar{\tau}_L(\text{peak})$ - J_n 特性
Fig. 4. $\bar{\tau}_L(\text{peak})$ vs. J_n .

と J_n の値を変えれば、 J_n は真値に収束しイナーシャの自動推定が可能となる。しかし、図 4 から明らかなようにイナーシャの推定には摩擦トルクが重要で、前記の摩擦トルクの算出方法では、低周波のトルクリブルに対しての問題が残っている。

4. あとがき

制御系の設計にとって重要である機械系のイナーシャの測定に対し、実質的なオートチューニングシステムの完成をみた。

御討論いただいた慶応大学 大西公平助教授に誌面を借りて謝意を表す。(平成 3 年 8 月 26 日受付)

文 献

- (1) 牧野・佐藤・松井：「トルクオブザーバを用いた DD モータの脈動自動補償システム」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-91-7 (平 3)
- (2) 神谷・報行・牧野・松井：「DSP による同期機形 DD モータの高精度トルク制御」, 電学論 D, 110, 117 (平 2-2)
- (3) 岩崎・松井：「検出器の雑音に対するトルクオブザーバの特性とその設計法」, 平 2 電気学会産学大会, No. 103

佐藤 宏 和 (准員)

研究に従事。

昭和 44 年 1 月生。平成 3 年 3 月名古屋工業大学電気情報工学科卒業。同年 4 月同大学大学院博士前期課程電気情報工学専攻入学。DD モータの制御に関する

松井 信 行 (正員)

昭和 18 年 5 月生。43 年 3 月名古屋工業大学大学院修士課程修了。同年 4 月同大学助手。60 年同電気情報工学科教授。工学博士。計測自動制御学会, IEEE 会員。