他励直流機の I-PD 形速度制御における 外乱抑圧特性に関する一考察

玉 置 研 二*・大 石 潔**・大 西 公 平*・宮 地 邦 夫*

Study of Disturbance Suppression on I-PD Speed Control of DC Motor

Kenji TAMAKI*, Kiyoshi OHISHI**, Kouhei OHNISHI* and Kunio MIYACHI*

1. ま え が き

近年, PID 制御方式に比べて外乱に対する抑圧効果が優れている I-PD 制御方式が注目されている。PID 制御方式では制御対象の遅い極を制御装置の零点によって相殺することにより設定値に対する速応性を得る傾向があるため, 外乱に対しては遅い極が励起されてしまうことがある。これに対して, I-PD 制御方式では現代制御理論における状態フィードバックと等価的に制御系全体の極配置を調整して速応性を得ているため外乱抑圧特性が優れているとされている¹⁾。本稿では, 他励直流機の色度制御に I-PD 制御方式を適用すると, 上記の理由による外乱抑圧特性の向上に加えて, 負荷トルク外乱からのフィードフォワードループが等価的に形成されることにより外乱抑圧特性がさらに強化されることを明らかにし, 設定値制御系からこのループを分離することにより設計の自由度を増す方式を示す。

2. 本 論

他励直流機の色度 I-PD 形速度制御系のブロック図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 を等価変換すると, 局所フィードバックループが

$$(K_P + K_D s)\omega_r = \{K_P - (D/J)K_D\}\omega_r + (K_T/J)K_D I_a - (1/J)K_D T_{load} \quad (1)$$

Fig. 1 Block diagram of I-PD control system for DC motor

Fig. 2 Equivalent block diagram of I-PD control system (Type-I optimal control system with feedforward loop)

と表わされることから1型最適制御系に外乱からのフィードフォワードループを付け加えた Fig. 2 と等価であることがわかる。I-PD 制御系はこの外乱からのフィードフォワードループが等価的に存在することにより, 外乱抑圧特性において優れていることになる。ここで, I-PD 制御系の積分ゲイン K_I , 比例ゲイン K_P , 微分ゲイン K_D は, 設定値応答仕様を重視する立場から, たとえば最適制御問題を解くことによって²⁾ モータ定数と最適フィードバックゲインにより以下のように求まる。

* 慶応義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

** 大阪工業大学 大阪市旭区大宮 5-16-1

* Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama

** Osaka Institute of Technology, Osaka

(Received March 29, 1986)

(Revised August 6, 1986)

Key Words: I-PD control, DC motor control, feed forward control

$$K_I = F_3 \quad (2)$$

$$K_P = F_1 + (D/K_T)F_2 \quad (3)$$

$$K_D = (J/K_T)F_2 \quad (4)$$

このとき、等価変換された系におけるフィードフォワードゲイン G_F は以下のように一意に定まる。

$$G_F = K_D/J = F_2/K_T \quad (5)$$

しかし、外乱抑圧仕様を重視する立場からは、上記のゲインが必ずしも望ましいわけではなく、たとえば電気極が十分速いと仮定すれば G_F を

$$G_F = (R + F_2)/K_T \quad (6)$$

とすることによってフィードフォワードループのみで外乱補償に必要な操作量を与えることができ、外乱抑圧特性を向上することができる。そこで、設定値応答仕様と外乱抑圧仕様を独立に定めることができるようにするため Fig. 3 に示すように電流マイナーループを導入する。この電流マイナーループを付加することにより、Fig. 3 のシステムは等価的に Fig. 2 のフィードフォワードゲイン G_F を自由に設定することができるので、Fig. 2 のシステムより更に外乱抑圧特性を強化させることができる。このとき、各ゲインはモータ定数、最適フィードバックゲインおよびフィードフォワードゲインにより以下のように定めればよい。

Fig. 3 Block diagram of two-degrees-of-freedom I-PD control system for DC motor

Fig. 4 Decoupling control system of feedback and feedforward loop (Type-I optimal control system with torque observer)

$$K_I = F_3 \quad (7)$$

$$K_P = F_1 + DG_F \quad (8)$$

$$K_D = JG_F \quad (9)$$

$$K_{P'} = F_2 - K_T G_F \quad (10)$$

以上のように設計された I-PD 形速度制御系は、設定値応答仕様と外乱抑圧仕様を独立に定めることができるという意味において 2 自由度制御系であるといえよう。この 2 自由度制御系には、基本的に設定値応答をフィードフォワード補償で、外乱応答をフィードバック補償で速応性を得ようとするものもあるが³⁾、本論文における 2 自由度 I-PD 制御系では、設定値応答をフィードバック補償で、外乱応答をフィードフォワード補償で速応性を得ようとしている。

実際に、この 2 自由度 I-PD 形速度制御系を実現する際、微分値が状態変数フィルタなどによって

$$s\omega_r \doteq \{s/(τs+1)\}\omega_r \doteq \{1/τ - 1/(τs+1)\}\omega_r \quad (11)$$

のように疑似微分演算によって得られる。(11)式において、センサの性能やノイズレベルなどの理由により $τ$ を十分に小さく設定できない場合には、伝達関数の上で疑似微分演算の極が分離されていないことから設定値応答にフィードフォワードループが干渉を起こす

(a) PI control (b) Type-I optimal control

(c) I-PD control (d) Two-degrees-of-freedom I-PD control

Fig. 5 Experimental results of the response of the motor speed to the step load torque

Table 1 Parameters of tested DC motor

Rated output	0.75 kw	Rated speed	1500 rpm
Armature inductance		Rotor inertia	
L	44.3 mH	J	$3.38 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Armature resistance		Viscosity damping	
R	2.25 Ω	D	$2.47 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$
Back e. m. f. constant		Torque constant	
K_e	0.581 V·s	K_T	0.581 N·m/A

恐れがある。そのような場合には、微分信号だけでなくフィードフォワードループを構成する比例信号も1次遅れフィルタに通すことにより非干渉化を図ればよい。このとき、最小実現を考慮すれば Fig. 4 に示す系が得られ、以上の考察が負荷トルク外乱を推定するオブザーバの構成と等価であることがわかる。このように、オブザーバや状態変数フィルタを用いて、フィードフォワード補償を行うと、時定数 τ の動作遅れを生じるが、この時定数 τ を制御されるプラントシステムの最小時定数より十分小さく取れば、実用上問題にならない⁴⁾。本論文の実験では、電気時定数の 1/10 の 1 ms に τ を取っている。

Fig. 5 は、Table 1 に示される他励直流機に対して行った負荷トルク応答の実験結果を示す。なお、各ゲインは Table 2 に示すとおりであり、設定値応答は 80 ms に統一されている。Fig. 5 から、フィードフォワードゲインを任意に定めることができるように

Table 2 Gain of controllers

PI	TYPE-I	I-PD	2-I-PD
$K_P=3.0$	$F_1=6.91$	$K_I=100$	$K_I=100$
$K_I=15.0$	$F_2=1.70$	$K_P=6.92$	$K_P=6.93$
	$F_3=100$	$K_D=0.10$	$K_D=0.23$
			$K_{P'}=-2.25$

した 2 自由度 I-PD 形速度制御系が外乱抑圧特性に優れていることがわかる。

3. む す び

他励直流機の I-PD 形速度制御における外乱抑圧特性をフィードフォワード補償の視点から考察し、設定値応答仕様と外乱抑圧仕様を独立に定める方式を示した。

参 考 文 献

- 1) 北森：PID 制御システムの設計論，計測と制御，19-4，382/391 (1980)
- 2) 武田，北森：線形多入出力最適追従制御系の一設計法，計測自動制御学会論文集，14-4，359/364 (1978)
- 3) 荒木：2 自由度制御系-I-PID・微分先行型・I-PD 制御系の統一の見方などについて，システムと制御，29-10，649/656 (1985)
- 4) 大石，大西，宮地：状態観測器を用いた他励直流機の一制御法，電気学会論文誌 B，104-B-6，373/379 (1984)
- 5) 玉置，大石，大西，宮地：I-PD 制御方式による他励直流機の世界速度制御，昭和 59 年電気学会全国大会講演論文集 [7]，634/635 (1984)