

견실 PID 제어기 조정기법 및 BLDC 모터의 속도제어기 설계에의 응용

김인수*, 이영진*, 박성준**, 박한웅***, 이만형****

Robust PID Controller Tuning Technique and Application to Speed Controller Design for BLDC Motors

In Soo Kim*, Young Jin Lee*, Sung Jun Park**, Han Woong Park***, and Man Hyung Lee****

ABSTRACT

This paper is a study on robust PID controller tuning technique using the frequency region model matching method. To design the robust PID controller satisfying disturbance attenuation and robust tracking property for a reference input, first an H_∞ controller satisfying given performances is designed using an H_∞ control method. And then, the parameters(proportional gain, integral gain and derivative gain) of the robust PID controller with the performances of the designed H_∞ controller are determined using the model matching method at frequency domain. In this paper, this PID controller tuning technique is applied to PID speed controller design for BLDC motors. Consequently, simulation results show that the proposed PID speed controller satisfies load torque disturbance attenuation and robust tracking property, and this study has usefulness and applicability for the speed control system design of BLDC motors.

Key Words : PID controller tuning (PID 제어기 조정), Model matching (모델매칭), BLDC motors (BLDC 모터), LMI-based H_∞ control (LMI에 기초한 H_∞ 제어)

1. 서론

PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어기는 최적제어, 견실제어, 적응제어 등의 현대제어 이론의 발전에도 불구하고, 그 구조가 단순하며 성능에 있어서 매우 실용적인 제어기로서 산업용 제어시스템에서 자주 사용된다. PID 제어기는 그 설계방식에 있어서 종래의 유압식, 공기압식, 전기식 등의 아날로그 방식을 거쳐 마이크로 프로세서에 의한 디지

털 방식으로 발전하였으며, 온라인 자동조정 방식의 PID 제어, 1-PD 제어, 2 자유도 PID 제어 등의 다양하고도 새로운 설계법들이 제안되어져왔다.⁽¹⁾ PID 제어기의 각 매개변수 조정 즉, 비례게인, 적분게인, 미분게인의 최적값 선정은 일반적으로 제어 대상인 플랜트의 특성과 설계자의 경험지식에 기초하여 시행착오법으로부터 이루어진다. 그러나, 현대 산업발전으로 인하여 플랜트는 더욱 복잡해지며, 이에 반하여 산업현장에서는 갈수록 고 정밀의

* 부산대학교 지능기계공학과
** 동명대학 전기과
*** 해군사관학교 전기공학과
**** 부산대학교 기계공학부

제어성능을 필요로 하게 된다. 따라서, 이를 위해서는 특히 시스템 성능에 큰 영향을 미치는 플랜트 파라미터의 변동으로 인한 모델링 오차나 외란 등의 불확실성에 대한 체계적인 PID 제어기 설계법에 대한 연구가 필수적이다.^(2,4) 본 논문에서는 플랜트에 불확실성이 존재하여도 주어진 성능을 만족하는 건설 PID 제어기 설계법에 관하여 연구하였다. 특히, 외란억제 성능 및 건설한 명령추종 성능을 만족하는 건설 PID 제어기 설계를 위하여 H_∞ 제어기법⁽⁵⁾을 이용하여 설계된 H_∞ 제어기에 모델매칭(model matching)법을 적용하였다. 제안된 건설 PID 제어기 설계법으로부터 본 논문에서는 BLDC 모터의 속도제어기를 설계하여 제안된 제어기 설계법을 평가하였다. 일반적으로, BLDC 모터의 속도제어기로는 PI 제어기와 피드포워드 제어를 이용한 2자유도 제어기가 가장 널리 이용된다. 그러나, 이러한 제어기법들은 부하토크가 발생하여도 만족스러운 폐루프계의 특성 및 주어진 기준입력에 대한 건설한 명령추종 등을 만족하도록 하는 적합한 제어기 이득과 성능을 얻을 수 없어서 고 정밀 제어특성 기대하기가 어렵다. 따라서, 본 논문에서 제안한 건설 PID 제어기 설계법으로부터 부하토크 외란에 대한 억제성능 및 기준입력에 대한 건설한 명령추종 성능을 만족하는 BLDC 모터의 속도제어기를 설계하였다. 이를 위하여, 우선 토크 외란에 대한 억제성능, 건설한 명령추종 성능을 가지는 BLDC 모터의 H_∞ 속도제어기를 LMI에 기초한 H_∞ 제어기법⁽⁶⁾을 적용하여 설계하였다. 설계된 H_∞ 속도제어기와 동일한 성능을 만족하는 건설 PID 제어기를 설계하기 위하여, H_∞ 제어기의 루프 전달함수와 설계할 PID 제어기의 루프 전달함수간에 주파수역 모델매칭법을 이용하여 선정하였다.⁽⁷⁾ 시뮬레이션 결과로부터 설계된 건설 PID 제어기의 성능은 기준입력에 대한 명령추종 성능과 토크 외란에 대한 억제성능을 만족함을 보였으며, 본 논문에서 제안된 건설 PID 제어기 조정기법의 BLDC 모터 속도제어 시스템 설계에 대한 응용가능성을 확인하였다.

2. 건설 PID 제어기

PID 제어기의 조정은 설계된 H_∞ 제어기로부터 이루어진다. 즉, 주파수역에서의 모델매칭법을 이용하여 PID 제어기의 비례, 적분, 미분게인이 조정된다. 그 기본 원리를 서술하면 다음과 같다.

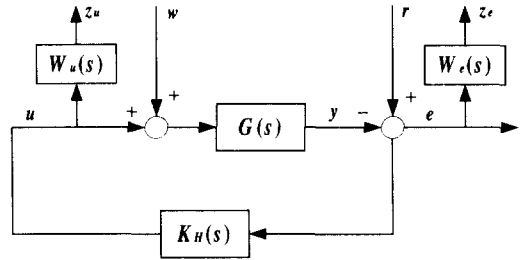


Fig. 1 H_∞ control system

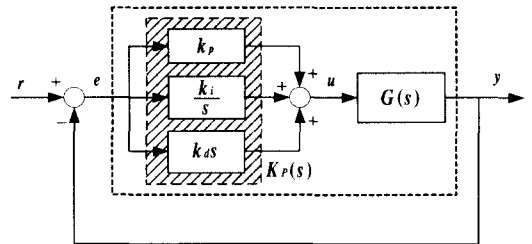


Fig. 2 PID control system

PID 제어기를 포함하는 루프 전달함수를 모델 매칭을 위한 기준모델이 되는 H_∞ 제어기를 포함하는 루프 전달함수와 비교하게 되며, 이 때 PID 제어기 각 매개변수들은 임의의 주어진 주파수역에서 두 루프 전달함수가 동일한 주파수 응답을 가지도록 조정되는 것이다. 우선, 외란억제 성능을 가지며, 기준입력에 대한 건설한 명령추종 성능을 만족하는 H_∞ 제어기를 설계하기 위하여, Fig. 1과 같이 플랜트 $G(s)$ 의 입력측으로 외란 w 가 인가되는 경우를 고려하기로 한다. 여기서 H_∞ 제어문제는 식 (1)과 같이 w 에서 제어량 z_u 와 z_e 까지의 페루프 전달함수 $G_{zw}(s)$ 의 H_∞ 노름(norm)이 임의의 설계 사양 γ 보다 적도록 하고, 페루프 시스템을 내부안정하게 하는 제어기 $K_H(s)$ 를 설계하는 것으로 정의된다.

$$\|G_{zw}(s)\|_\infty < \gamma \quad (1)$$

여기서 r, y, u 는 각각 기준입력, 관측출력, 제어입력을 가리킨다.

설계된 H_∞ 제어기로부터 PID 제어기 각 매개변수를 계산하는 알고리즘은 다음과 같다. 우선, 설계하고자 하는 PID 제어기 $K_P(s)$ 는 Fig. 2와 같이 구

성되며, 식 (2)와 같은 일반적인 형태로 주어진다.

$$K_P(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (2)$$

여기서 k_p, k_i, k_d 는 각각 비례계인, 적분계인, 미분계인을 가리킨다.

Fig. 1에서 개루프 전달함수 $L_H(s)$ 를 $G(s)K_H(s)$ 로 나타내고, 임의의 주파수 대역 $[\omega_{\min} \omega_{\max}]$ 에서의 $L_H(s), G(s), K_P(s)$ 의 주파수 응답 $L_H(j\omega), G(j\omega), K_P(j\omega)$ 을 식 (3)과 같이 각각 실수부와 허수부로 표현하도록 하자.

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= G_r(\omega) + jG_i(\omega) \\ L_H(j\omega) &= L_{Hr}(\omega) + jL_{Hi}(\omega) \\ K_P(j\omega) &= K_{Pr}(\omega) + jK_{Pi}(\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $K_{Pr}(\omega)$ 와 $K_{Pi}(\omega)$ 는 각각 식 (4)와 같다.

$$K_{Pr}(\omega) = k_p, K_{Pi}(\omega) = k_d\omega - k_i\frac{1}{\omega} \quad (4)$$

이 때 $L_H(j\omega)$ 와 PID 제어기의 개루프 전달함수와의 오차함수 $E(j\omega)$ 를 식 (5)과 같이 나타내도록 하자.

$$E(j\omega) = L_H(j\omega) - G(j\omega)K_P(j\omega) \quad (5)$$

모델매칭은 주파수 대역 $[\omega_{\min} \omega_{\max}]$ 에서 각 주파수 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$ 에서의 $E(j\omega)$ 의 제곱의 합을 최소화하는 것을 의미하며, 이를 이용하여 PID 제어기의 각 매개변수를 선정할 수 있다. 즉, N 개의 주파수 대역에 대하여 식 (6)과 같이 주어지는 평가함수 J 를 최소화하는 해를 구하면 된다.

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^N |E(j\omega_i)|^2 \\ &= \sum_{i=1}^N |L_H(j\omega_i) - G(j\omega_i)K_P(j\omega_i)|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$E(j\omega)$ 의 주파수 응답을 실수부와 허수부인 $E_r(\omega)$ 와 $E_i(\omega)$ 로 구분하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} E_r(\omega) \\ E_i(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{Hr}(\omega) \\ L_{Hi}(\omega) \end{bmatrix} - \Phi(\omega) \begin{bmatrix} k_p \\ k_i \\ k_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $\Phi(\omega)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi(\omega) = \begin{bmatrix} G_r(\omega) & G_i(\omega)\frac{1}{\omega} & -G_i(\omega)\omega \\ G_i(\omega) & -G_r(\omega)\frac{1}{\omega} & G_r(\omega)\omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (7)로부터 식 (6)은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^N [E_r(\omega_i)^2 + E_i(\omega_i)^2] \\ &= (\beta - \Lambda \alpha)^T (\beta - \Lambda \alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 행렬 Λ, α, β 는 각각 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Lambda &= [\Phi(\omega_1) \Phi(\omega_2) \dots \Phi(\omega_N)]^T \\ \beta &= [L_{Hr}(\omega_1) \dots L_{Hr}(\omega_N)] \\ \alpha &= [k_p \ k_i \ k_d]^T \end{aligned} \quad (10)$$

J 를 최소화하는 PID 제어기 최적 매개변수 α 는 최소자승법으로부터 계산되며, 식 (11)과 같다.

$$\alpha = (\Lambda^T \Lambda)^{-1} \Lambda^T \beta \quad (11)$$

3. BLDC 모터의 속도제어기 설계

3.1 BLDC 모터의 모델링

일반적으로 BLDC 모터는 동기 모터와 그 구조가 같고, 고정자는 3상으로 되어 있으며, 회전자가 영구자석으로 이루어져 있다. BLDC 모터의 속도제어를 위한 제어모델은 기존의 DC 모터와 유사하게 주어지며, 이는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 속도제어기 설계를 위한 BLDC 모터의 모델을 상태공간 모델로 표현하면 다음 식 (12)와 같다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & -K_E/L_a \\ K_T/J_m & -B_m/J_m \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1/L_a \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J_m \end{bmatrix} w \quad (12)$$

여기서, $J_m, B_m, K_T, K_E, R_a, L_a$ 는 각각 관성 모멘트, 점성 마찰계수, 토크 상수, 역기전력 상수, 전기자 저항, 전기자 인덕턴스를 가리킨다. 상태변수 $x = [i_a \ \omega_m]^T$ 는 전기자 전류 i_a 와 모터의 각속도 ω_m 로 주어지며, 제어입력 u 는 모터 입력 전압 V_a , 외란 w 는 부하토크 T_L 을 나타낸다.

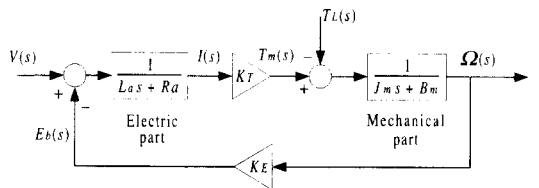


Fig. 3 Block diagram of the BLDC motor system for speed control

3.2 BLDC 모터의 속도제어기 설계

본 논문에서는 부하토크 외란에 대한 억제성능 및 기준입력에 대한 명령추종 성능을 만족하는 BLDC 모터의 H_∞ 속도제어기를 설계하였고, 설계된 제어기로부터 모델매칭법을 이용하여 건설 PID 제어기의 각 매개변수를 구하고자 하였다. 본 논문에서 고려한 BLDC 모터의 사양은 다음 Table 1과 같다.

3.2.1 H_∞ 속도제어기

BLDC 모터의 속도 제어기 설계를 위하여 외란 억제와 같은 페루프계 응답특성 기준입력에 대한 건설한 명령추종에 적합한 제어기 설계법으로 제안된 LMI에 기초한 H_∞ 제어 기법을 적용하였다. 제어기 설계를 위한 일반화 플랜트는 Fig. 4와 같이 구성된다. 여기서 $G(s)$ 는 BLDC 모터의 공칭모델, $W_{z1}(s)$ 과 $W_{z2}(s)$ 는 각각 플랜트 입력측과 출력측에 대한 가중함수, $K_H(s)$ 는 설계될 H_∞ 속도제어기를 가리킨다.

Table 1 Specifications of the BLDC motor

정격 출력	400 W
정격 회전속도	3000 rpm
관성 모멘트(J_m)	3.7×10^{-4} kgf · cm · s ²
점성 마찰계수(B_m)	0.7 kgf · cm · s ²
토크 상수(K_T)	4.9 kgf · cm/A
진기자 저항(R_a)	1.07 Ω

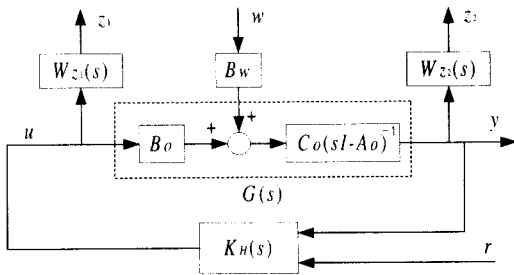


Fig. 4 Block diagram of the H_∞ speed controller for the BLDC motor

w 와 u 에서 z 와 y 까지의 일반화 플랜트의 전달함수는 식 (13)과 같고, $G(s)$, $E(s)$, $W_{z1}(s)$, $W_{z2}(s)$ 를 식 (14)와 같이 실현하면, 일반화 플랜트는 식 (15)와 같은 상태공간 모델식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & W_{z1}(s) \\ W_{z2}(s)E(s) & W_{z2}(s)G(s) \\ E(s) & G(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$G(s) = \left[\begin{array}{c|c} A_o & B_o \\ \hline C_o & 0 \end{array} \right], \quad E(s) = \left[\begin{array}{c|c} A_o & B_w \\ \hline C_o & 0 \end{array} \right]$$

$$W_{z1}(s) = \left[\begin{array}{c|c} A_{z1} & B_{z1} \\ \hline C_{z1} & D_{z1} \end{array} \right], \quad W_{z2}(s) = \left[\begin{array}{c|c} A_{z2} & B_{z2} \\ \hline C_{z2} & D_{z2} \end{array} \right] \quad (14)$$

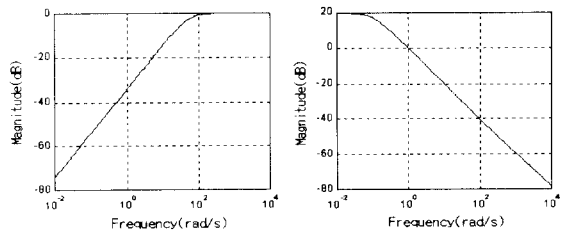
$$\dot{x} = \begin{bmatrix} A_{z1} & 0 & 0 \\ 0 & A_{z2} & B_{z2}C_o \\ 0 & 0 & A_o \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_w \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} B_{z1} \\ 0 \\ B_o \end{bmatrix} u$$

$$z = \begin{bmatrix} C_{z1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{z2} & D_{z2}C_o \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} D_{z1} \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \ 0 \ C_o]x + [0]w + [0]u \quad (15)$$

$W_{z1}(s)$ 는 제어입력의 크기 제한을 위하여 저주파역에서 게인이 적도록 선정하였고, $W_{z2}(s)$ 는 외란 억제 성능과 기준입력에 대한 명령추종 성능을 고려하여 선정하였다. 각 가중함수는 안정한 주파수역 유리함수로 주어지며, Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에서 나타내었다. 선정된 가중함수와 BLDC 선형모델로 구성된 일반화 플랜트로부터 설계된 H_∞ 속도제어기 $K_H(s)$ 는 식 (16)과 같이 주어진다.

$$K_H(s) = \frac{-201.0s^5 - 2.90 \times 10^7 s^4 + 1.43 \times 10^{10} s^3 + 2.26 \times 10^{12} s^2 - 7.16 \times 10^{14} s - 4.38 \times 10^5}{s^6 + 3.82 \times 10^4 s^5 + 7.19 \times 10^8 s^4 + 6.51 \times 10^{12} s^3 + 3.05 \times 10^{14} s^2 + 3.74 \times 10^{12} s} \quad (16)$$



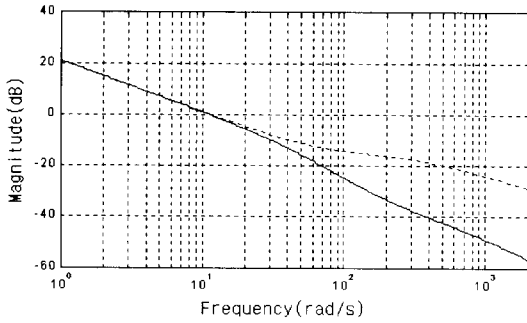
(a) $W_{z1}(s)$

(b) $W_{z2}(s)$

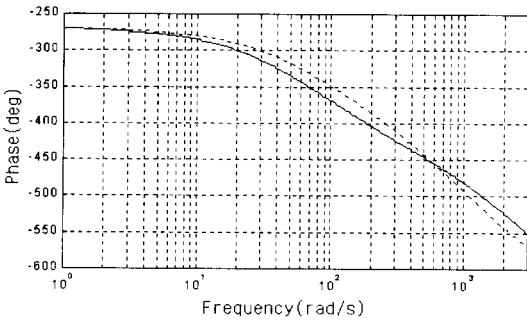
Fig. 5 Weighting functions

Table 2 PID controller parameters

매개변수	계산된 값
k_p	0.036
k_i	2.340
k_d	0.000027



(a) Magnitude plot

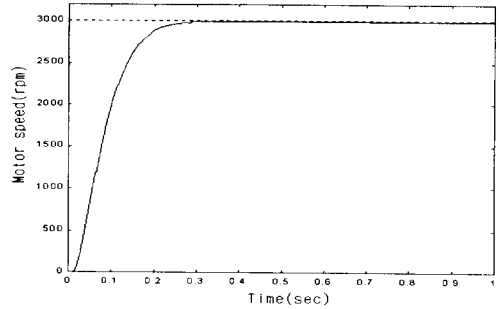


(b) Phase plot

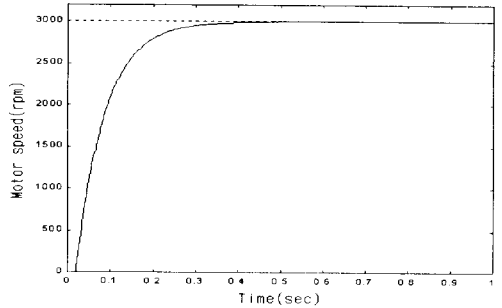
Fig. 6 Bode plot of $L_H(s)$ and $G(s)K_P(s)$

3.2.2 견실 PID 속도제어기

외란억제 성능 및 견실한 명령추종 성능을 만족 하도록 설계된 H_∞ 속도제어기로부터 모델매칭을 이용하여 계산된 PID 제어기의 각 매개변수는 Table 2와 같이 선정되었다. 모델매칭을 위한 주파수 대역은 $\omega_{\min} = 1\text{rad/s}$, $\omega_{\max} = 2000\text{rad/s}$ ($N = 2000$)로 설정하였으며, $L_H(s)$ 와 $G(s)K_P(s)$ 의 크기 및 위상선도를 Fig. 6에서 나타내었다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에서 실선은 $L_H(s)$ 의 크기와 위상, 점



(a) Motor speed(H_∞ controller)



(b) Motor speed(robust PID controller)

Fig. 7 Step response without load torque

선은 $G(s)K_P(s)$ 의 크기와 위상을 각각 나타낸다. 크기선도에서는 100rad/s 이상의 고주파 대역에서 다소 큰 오차가 존재하였으며, 이는 PID 제어기 파라미터를 구하기 위하여 적용한 최소자승법에서의 수치적인 오차로 인한 것으로 사료된다. 위상선도에서는 전반적으로 두 개루프 전달함수간의 위상에 있어서 큰 오차는 없었다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계된 H_∞ 및 견실 PID 속도제어기의 스텝응답 결과를 Fig. 7에서 나타내었다. 3000rpm 의 기준속도에 대하여 H_∞ 제어기의 모터 속도응답은 0.2초에서 정상상태에 도달하였으며, 정상상태응답이 기준속도에 대하여 0.1%의 오차를 가지는 매우 정확한 추종성능을 나타내었다. 견실 PID 제어기의 정상상태응답은 H_∞ 제어기에 비하여 다소 늦은 0.48초에서 도달하였으나, 기준속도에 대한 정상상태응답과의 오차는 0.1% 이내로 H_∞ 제어기보다 정확한 명

령추종 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 부하토크 외란에 대한 억제성능을 나타내기 위하여, 일반적으로 모터에 인가되는 부하토크 형태로서 스텝형 부하토크를 고려하였다. 주어진 모터의 정격토크는 13kgf·cm이며, 따라서 1~13kgf·cm범위의 크기를 가지는 부하토크가 각각 발생하였을 때의 H_{∞} 제어기와 견실 PID 제어기의 모터 속도응답에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

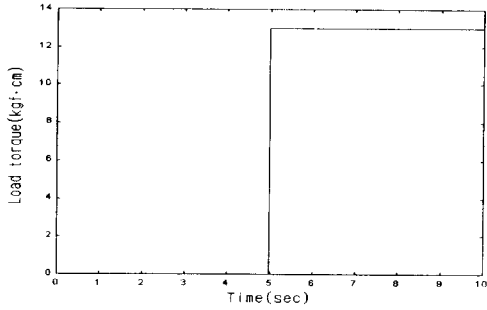
Fig. 8(a)와 같은 크기 13kgf·cm의 스텝형 부하토크 발생에 대한 H_{∞} 제어기의 모터 속도응답을 Fig. 8(b)에서 나타내었다. Fig. 8(b)에서 13kgf·cm의 부하토크가 발생한 시점인 5초에서 1985rpm으로 속도가 감소하였으나, 기준속도와의 오차가 0.1% 이내로 줄어드는 시점은 0.34초 이후로써 외란에 대한 빠른 억제성능을 가짐을 알 수 있었다. Fig. 8(c)에서는 견실 PID 제어기의 속도응답을 나타내었다. 부하토크가 발생한 시점인 5초에서 모터 속도는 1970rpm으로 떨어졌으나, 기준속도와의 오차가 0.1% 이내로 도달하는 시점은 0.37초 이후로써 외란억제 성능면에 있어서 매우 우수한 성능을 나타내었다. H_{∞} 제어기와 견실 PID 제어기의 응답에 있어서 이와 같은 응답 차이가 발생하는 것은 모델매칭법에 있어서 PID 제어기의 각 매개변수 계산인 최소자승법에서 수치적인 오차로 인한 것으

로 사료된다. 1~13kgf·cm크기의 부하토크에 대한 H_{∞} 제어기와 견실 PID 제어기의 응답성능을 정리하여 나타내면, Table 3과 같다. 단 Table 3에서 외란억제시점은 외란발생으로 인하여 모터 속도응답이 기준속도로부터 벗어나 다시 정상상태오차 이내로 도달하는 시간을 의미하며, 여기서 정상상태오차는 BLDC 모터의 응답속도와 기준속도와의 오차가 0.1%일 때를 의미한다.

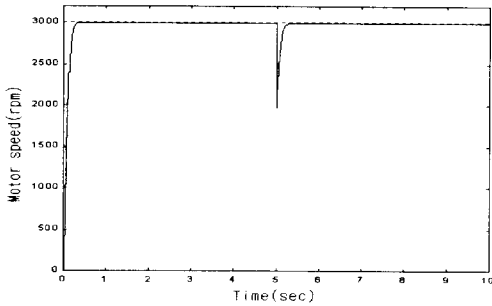
H_{∞} 제어기의 모터 속도응답에 있어서, 정상상태오차 이내로 도달하는 시점은 부하토크의 크기에 관계없이 0.34초로 주어졌으며, 부하토크 발생으로 인해 생기는 기준속도와의 최대오차는 부하토크가 커질수록 증가함을 알 수 있다. 이에 반하여, 견실 PID 제어기에서는 부하토크의 크기가 증가함에 따라 정착시간 역시 증가하였으며, 기준속도와의 최대오차는 부하토크가 4kgf·cm 이상인 경우, H_{∞} 제어기보다 크게 나타났다. H_{∞} 제어기의 속도응답은 전반적으로 다양한 크기의 부하토크가 발생하여도 견실한 외란억제 성능을 나타내었으며, 이와는 달리 모델매칭법으로 선정된 견실 PID 제어기의 속도응답은 외란이 억제되는 시점이나 기준속도와의 최대오차면에 있어서 다소 차이가 있었으나, 전반적으로 외란에 대한 억제성능이 우수함을 알 수 있다.

Table 3 Simulation results of the H_{∞} and robust PID speed controller under load torque

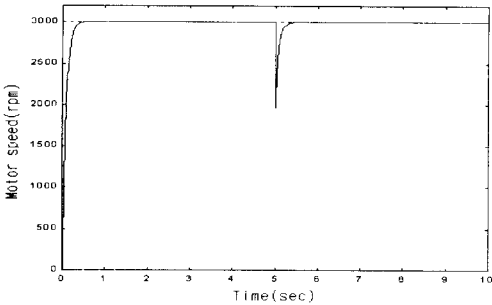
부하토크 (kgf·cm)	H_{∞} 속도제어기		견실 PID 속도제어기	
	외란억제시점 (sec)	기준속도와의 최대오차(rpm)	외란억제시점 (sec)	기준속도와의 최대오차(rpm)
1	0.34	80	0.21	79
2	0.34	159	0.25	158
3	0.34	237	0.26	237
4	0.34	315	0.29	316
5	0.34	393	0.31	396
6	0.34	470	0.31	476
7	0.34	550	0.32	555
8	0.34	626	0.34	634
9	0.34	704	0.35	713
10	0.34	782	0.36	792
11	0.34	860	0.36	870
12	0.34	938	0.37	950
13	0.34	1015	0.37	1030



(a) 13kgf · cm load torque



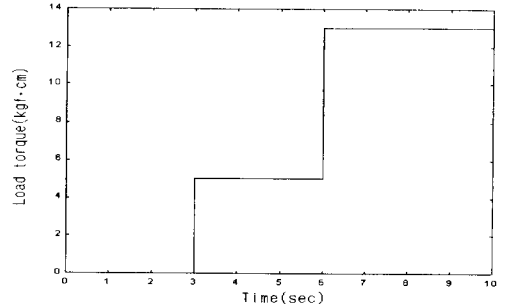
(b) Motor speed(H_{∞} controller)



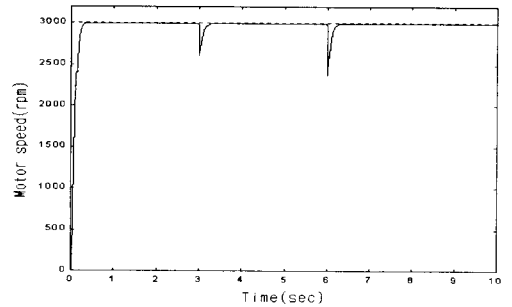
(c) Motor speed(robust PID controller)

Fig. 8 Step response under load torque

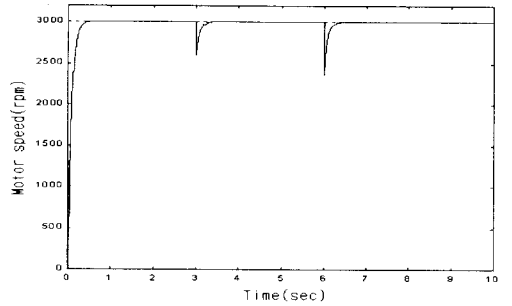
다음으로 Fig. 9(a)와 같이 3초에서 크기가 5kgf · cm인 부하토크가 발생하여 6초에서 크기가 다시 13kgf · cm로 증가하였을 때의 H_{∞} 제어기와 견실 PID 제어기의 속도응답을 Fig. 9(b)와 Fig. 9(c)에서 나타내었다. Fig. 9(b)에서 부하토크가 발생한 시점인 3초에서 2607rpm으로 감소하였으나, 기준속도와의 오차가 0.1% 이내로 줄어드는 시점은 0.34초 이후였으며, 6초에서 모터속도는 다시 2373rpm으로



(a) Step change load torque



(b) Motor speed(H_{∞} controller)



(c) Motor speed(robust PID controller)

Fig. 9 Step response under step change load torque

감소하였으나, 역시 0.34초 이후에서 기준속도와의 오차가 0.1% 이내로 줄어들었다. Fig. 9(c)에서는 부하토크 발생 시점인 3초에서 모터속도는 2603rpm으로 감소하였으나, 기준속도와의 오차가 0.1% 이내로 감소하는 시점은 0.34초 이후였으며, 6초에서 모터속도가 2366rpm으로 감소하였으나, 0.37초 이후에서 기준속도와의 오차가 역시 0.1% 이내로 줄어들어 매우 우수한 외란억제 성능을 나타내었다.

5. 결론

본 논문에서는 모델매칭법을 이용하여 설계된 H_∞ 제어기로부터 외란억제 성능 및 명령추종 성능을 만족하는 견실 PID 제어기 조정기법에 관하여 연구하였다. H_∞ 제어기와 동일한 성능의 견실 PID 제어기를 설계하기 위하여, 주어진 사양을 만족하는 H_∞ 제어기를 설계한 후, 주파수영역에서 루프 전달함수의 주파수 응답 비교를 통하여, 설계된 H_∞ 제어기와 동일한 성능을 가지는 PID 제어기를 구성하였다. 이러한 견실 PID 제어기 조정기법은 BLDC 모터의 속도제어기 설계에 적용하여, 설계된 견실 PID 속도제어기가 부하토크에 대한 억제성능 및 기준속도에 대한 견실 명령추종 성능을 만족함을 시뮬레이션 결과로부터 나타내었다. 결론적으로 본 논문에서 제안된 H_∞ 제어기에 기초한 견실 PID 제어기 조정기법은 BLDC 모터의 속도제어기 설계에 있어서 그 유용성과 응용가능성이 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 山本重彦, *PID制御の基礎と應用*, 朝倉書店, 1997.
2. Tan, W., Liu, J., and Tam, P. K. S., "PID Tuning Based on Loop-Shaping H_∞ Control," IEE Proceedings - Control Theory and Applications, Vol. 145, No. 6, pp. 485-490, 1998.
3. Matsuo, T., and Nakano, K., "Robust Stabilization of Closed-Loop Systems by PID+Q Controller," International Journal of Control, Vol. 70, No. 4, pp. 631-650, 1998.
4. Ho, W. K., Hang, C. C., and Cao, L. S., "Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specifications," Automatica, Vol. 31, No. 3, pp. 497-502, 1995.
5. 多美 勉, *H_∞ 制御*, 昭晃堂, 1994.
6. Gahinet, P., "Explicit Controller Formulas for LMI Based H_∞ Synthesis," Automatica, Vol. 32, No. 7, pp. 1007-1014, 1996.

7. Yukitomo, M., Iino, Y., Hino, S., Takahashi, K., and Nagata, K., "A New PID Controller Tuning System and its Application to a Flue Gas Temperature Control in a Gas Turbine Power Plant," Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications, Trieste, Italy, 1998.