

퍼지제어기를 이용한 센서리스 직류전동기의 속도제어에 관한 연구

김 성 철¹⁾, 河 注 植²⁾

A Study on the Speed Control of a Sensorless DC Motor by Using Fuzzy Controller

Song-Chol Kim , Joo-Sik Ha

Abstract

DC Motors are still widely used in industrial fields, as driving power motors for electrical vehicles , cranes and winches due to their strong starting torques, and as servo-motors for position and speed control systems due to their easiness of speed control in wide range, and etc. Generally in the speed control systems of motors, speed sensors are required and this fact results in the increased price and operating cost and in the limited application of the motors.

This paper presents a new speed control method for sensorless DC motors. In this scheme, the rotational speed is estimated by the measurement values of the armature voltage and current. A Fuzzy controller, which is robust against environmental variations uncertainties and nonlinearities of plants, is used as the feedback controller instead of the conventional PID controller.

Through computer simulations the effectiveness and usefulness of the proposed method are illustrated.

제 1 장 서 론

직류전동기는 구조가 복잡하고 가격이 비싸며 보수관리가 어렵다는 결점이 있기는 하나 기동토크가 크고 속도 제어가 용이하다는 장점 때문에 각종의 산업분야에 많이 이용되고 있으며, 그 속도제어 분체는 매우 중요하다.¹⁾ 특히 직류전동기를 속도제어용 또는 위치제어용 서보모터로서 이용되는 경우에는, 고도로 정밀한 속도제어가 요구되며 제어기술도 종래의 아날로그제어 방식에서 최근에는 마이크로프로세서를 이용한 디지털제어 방식으로 전환되고 있다.²⁾

일반적으로 회전계통의 속도제어에 있어서는 정도높은 속도검출기가 요구되며 속도검출기로서는 타코제너레이터, 엔코더등이 이용되고 있다. 그러나 속도검출기를 전동기에 부착하는 것은 고가로 인한 경제적인면, 부피증대로 인한 공간적인면 그리고 온도, 습도, 진동 등 주위 환경의 변화로 인한 정도하락등의 문제때문에 최근에는 속도검출기를 사용하지 않고(센서리스: sensorless) 전동기의 속도제어를 행하는 방법이 많이 연구되고 있다.^{3,4,5)}

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 전기제어공학 전공

2) 한국해양대학교 기관공학부 교수

본 논문은 서보계통에 많이 이용되고 있는 직류전동기에 있어서 속도제어법으로 전압제어법을 채택하고, 속도검출기를 이용하지 않고 전동기의 전압과 전류를 측정함으로써 전동기의 회전각속도를 추정한다음, 종래의 PID제어기⁶⁾ 대신에 제어대상의 비선형성이나 불확실성에도 대해서도 매우 효과적이라는 이유로 최근 많이 발전되고 있는 퍼지제어기를 이용하여 직류전동기의 속도제어를 행하는 방법을 제안한다.⁷⁾

또한 디지털 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 제안하는 방법에 의한 결과와 LQ제어에 의한 결과를 비교 분석하고, 전동기의 계수 변화가 속도추정 및 속도제어특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

제 2 장 속도검출기없는 직류전동기의 속도제어계의 구성

2.1 전기자전압제어 직류전동기의 모델링

Fig.2.1에서 $u(t)$ 는 전기자에 인가해주는 입력전압, i_a 는 전기자전류, R_a 와 L_a 는 각각 전기자회로의 저항과 인덕턴스이다. 계자에 가해지는 전압 V_F 는 일정하며 따라서 계자전류 및 공극자속은 일정하다고 가정하고, 전기자전압제어 직류전동기의 관계식을 수립하면 식(2.1)~(2.4)와 같이 된다.

$$u - e_f = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$e_f = k_v \omega \quad (2.2)$$

$$\tau = k_t i_a = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4)$$

단, e_f : 역기전력, k_v : 역기전력 계수, τ : Motor의 회전 Torque

ω : 회전자의 각속도, J : Motor의 회전자 및 부하의 관성능률, θ : 회전각

f : 회전부분의 점성마찰계수

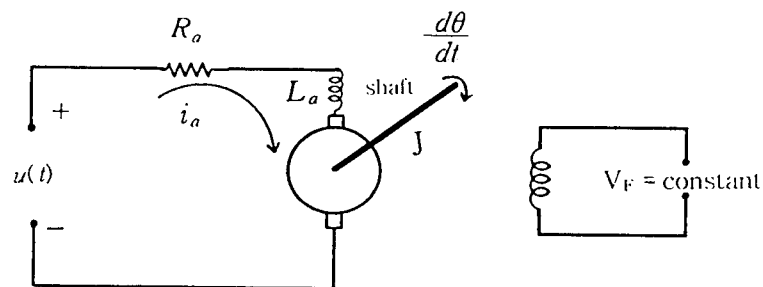


Fig. 2.1 Schematic Diagram of a Armature Voltage Controlled DC Motor

식(2.1),(2.2)에서 전동기의 회전속도 ω 는 전기자전압 u , 전기자저항 R_a , 역기전력계수

k_r 의 값에 따라 달라진다. 본 연구에서는 전기자전압제어법을 대상으로 하고 있으므로, R_a 와 k_r 는 일정하다고 가정하고 위 식들을 라플라스 변환하여 u 를 입력, ω 를 출력으로 하는 블록선도를 작성하면 Fig. 2.2와 같이 된다.

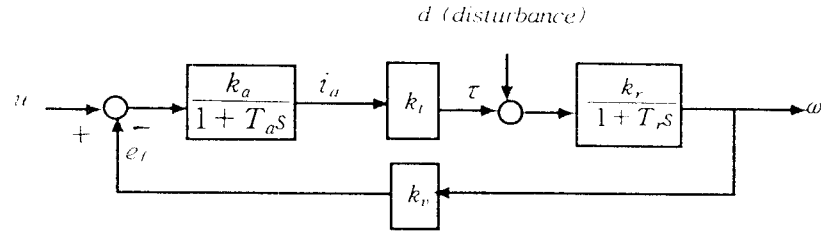


Fig. 2.2 Block Diagram of a Armature Voltage Controlled DC Motor

Fig. 2.2에서 시정수 T_a , T_r 와 이득 k_a , k_r 는 각각 다음과 같다.

$$\text{단, } T_a = \frac{L_a}{R_a}, \quad k_a = \frac{1}{R_a}, \quad T_r = \frac{J}{f}, \quad k_r = \frac{1}{f} \quad (2.5)$$

2.2 속도감출기를 이용하지않는 속도제어계의 구성

Fig. 2.1 직류전동기의 등가회로에서 일반적으로 L_a 의 값은 매우 작으므로 이를 무시할 수 있다. 즉, $T_a = \frac{L_a}{R_a} \rightarrow 0$ 가 된다. 전동기 각속도 ω 의 목표치를 ω_r 이라 하면 식(2.1), (2.2)로부터 식(2.6), (2.7)을 얻는다.

$$i_a = k_a(u - k_r \omega) \quad (2.5), \quad i_r = k_a(u - k_r \omega_r) \quad (2.6)$$

단, i_r ; ω 가 ω_r 일 때의 i_a 를 말한다. 식(2.6), (2.7)으로 부터 다음 식을 얻는다.

$$i_a - i_r = k_a k_r (\omega_r - \omega) \quad (2.8)$$

Motor 정수 k_a , k_r 의 값을 정확하게 파악하기는 일반적으로 용이하지 않으므로 k_a , k_r 의 측정치를 각각 \hat{k}_a , \hat{k}_r 라 하고, 직류전동기의 센서리스 속도제어계를 구성해보면 Fig. 2.3과 같이 된다.

i_a 와 u 의 측정치로부터 추정된 ω 의 추정치를 $\hat{\omega}$ 라고 하면, $\hat{\omega}$ 는 식(2.6)로부터 식(2.9)과 같이 되고 이때 식(2.8)은 식(2.10)와 같이 된다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k_r} \left(u - \frac{i_a}{k_a} \right) \quad (2.9)$$

$$i_a - i_r = \hat{k}_a \hat{k}_r (\omega_r - \hat{\omega}) \quad (2.10)$$

따라서 $i_a \rightarrow i_r$ 가 되도록 제어하는 것은, $\hat{\omega} \rightarrow \omega_r$ 이 되도록 제어하는 것과 같이 된다. 이상과 같이 위의 식을 이용하여 Fig. 2.3 블록선도를 등가변환하면 Fig. 2.4와 같이 된다.

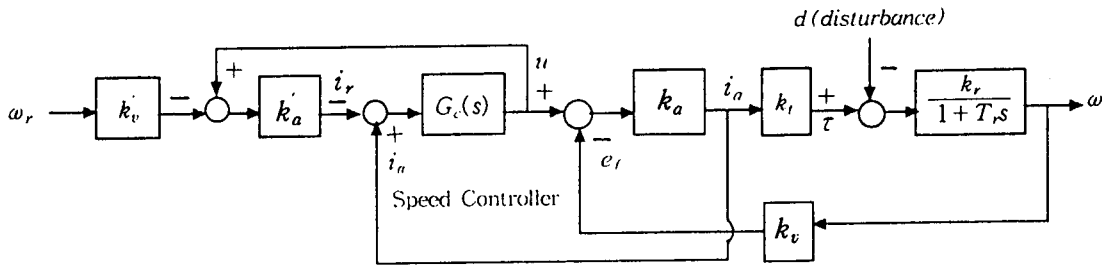


Fig 2.3 Speed Control System of the Sensorless Armature Controlled DC Motor

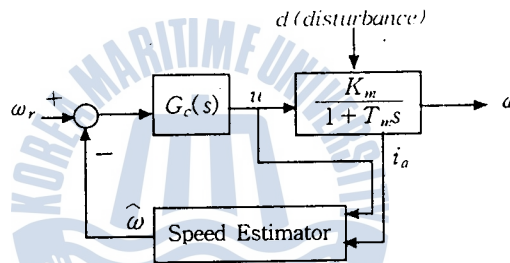


Fig 2.4 The Block Diagram of Sensorless Speed Control for Armature Controlled DC Motor

Fig 2.4에서 K_m 과 T_m 은 아래와 같이 된다.

$$K_m = \frac{k_a k_t k_r}{1 + k_a k_v k_r k_t} \quad (2.10)$$

$$T_m = \frac{T}{1 + k_a k_v k_r k_t} \quad (2.11)$$

제 3 장 속도제어기의 설계

3.1 속도제어의 기준

u 와 i_a 가 정확하게 측정되었다고 가정하였을 때 직류전동기의 회전속도 ω 와 이에 대한 추정치 $\hat{\omega}$ 와의 관계는 식(2.6), (2.9)로부터 식(3.1) 및 (3.2)과 같이 된다.

$$\hat{\omega} = \omega + n \quad (3.1)$$

$$\text{단, } n = c_1 u - c_2 i_a, \quad c_1 = \frac{k_v - k'_v}{k_v k'_v}, \quad c_2 = \frac{k_v k_a - k'_v k'_a}{k_a k_a k_v k'_v} \quad (3.2)$$

식(3.2)에서 k_v 와 k_a 는 각각 직류전동기에 있어서 역기전력 계수의 진치와 그 측정치이며, k_b 와 k_r 는 전기자 저항 R_a 와 R_a 의 측정치 R_a 의 역수이다. $k_v = k'_v$, $k_a = k'_a$ 일 때 n 은 영이 되고 $\hat{\omega}$ 와 ω 는 일치하게 된다. 여기서 k'_v , k'_a 의 값만 높을 정도로 측정한다면 일반적으로 n 의 값은 무시할 수 있을 정도로 작다.(5.2 참조)

따라서 본 연구에서는 $\hat{\omega}$ 가 ω 에 일치한다는 가정하에 속도제어기 $G_c(s)$ 를 설계한다.

3.2 퍼지 속도제어기의 설계

송전에 직류전동기의 속도제어 계통에 있어서는 일반적으로 P 또는 PI등 PID제어기가 많이 이용되어 왔으나,⁶⁾ 본 연구에서는 제어대상에 비선형성이 있거나, 동특성이 정확하게 파악되지 않는 경우에도 용이하게 적용될 수 있어서 최근 그 응용이 활발해지고 있는 Fuzzy제어 알고리즘^{8,9)}을 이용하여 직류전동기의 속도제어기를 Fig. 3.1과 같이 구성한다. 퍼지제어기의 입력 변수 E_i 와 ΔE_i 는 플랜트에서 얻는 e_i 와 Δe_i 를 각각 기준화하여 식(3.3)과 같이 계산한다.

$$\begin{cases} E_i = \frac{e_i}{e_{\max}} \\ \Delta E_i = \frac{\Delta e_i}{\Delta e_{\max}} \end{cases} \quad (3.3)$$

단, $e(t) = \omega_r(t) - \hat{\omega}(t)$, $e_i = e(iH)$, H : 샘플링 시간, $\Delta e_i = e_i - e_{i-1}$
 또한 퍼지제어기의 출력 즉, 플랜트에의 조작 입력은 식(3.4)와 같이 계산된다.

$$\begin{cases} \Delta U_i = \frac{\Delta u_i}{\Delta u_{\max}} \\ u_i = u_{i-1} + \Delta u_i \end{cases} \quad (3.4)$$

식(3.3), (3.4)에서 e_{\max} , Δe_{\max} 및 Δu_{\max} 로는 e_i , Δe_i 및 Δu_i 의 예상되는 최대치를 취하며 E_i , ΔE_i 및 ΔU_i 는 각각 절대치가 1이하의 값으로 기준화 된다.

다음에 퍼지제어기에 있어서 제어규칙은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 퍼지 입력공간을 각각 2개로 분할하고, 식(3.5), (3.6)와 같이 단순한 제어 규칙을 사용하기로 한다.¹⁰⁾

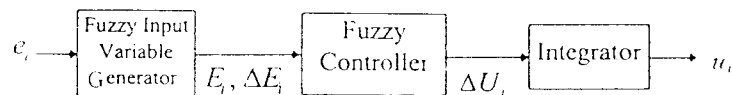


Fig. 3.1 The Block Diagram of the Fuzzy Speed Controller

$$\begin{aligned} \text{제어규칙1 } R^1; & \quad \text{if } E_i \text{ is } P \text{ and } \Delta E_i \text{ is } P \\ & \quad \text{then } \Delta U_i \text{ is } P \end{aligned} \quad (3.5)$$

2) 피지변수로서, 제어규칙을 행하여야 할 제어동작을

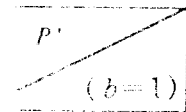
min)로는 식(3.7) 및 (3.8) 3.3과 같다.

3) 광화하여 이용 한다.¹¹⁾ 식(3.9), (3.10)에 의해서

는 연산 기호이다.



ω_2 가 되는 x_2



actions used

9) 연구에서 Table 1.1과 같은 특성을 갖는 타이저 방식의 직류전동기를 사용하였다.

Table 1 Characteristics of the DC Motor used in the Simulation

Rated Voltage	215 volt
Rated Current	2 Amp
Rated Speed	3600 rpm
Rated Output	1/3 HP

시뮬레이션에 사용된 전동기의 전기자저항 R_a , 역기전력 계수 K_e , 직류이동 K_m 은 식 (4.1)로부터 계산할 수 있다.

$$k_e = \frac{P}{I \cdot \omega_n}, \quad R_a = \frac{U - k_e \omega_n}{I}, \quad K_m = \frac{\omega_n}{U} \quad (4.1)$$

단, P : 상각출력(Watt) U : 정격전압(V)
 I : 정격전류(A) ω_n : 정격각속도(rad/sec)

식(4.1)에 Table 4.1의 자료를 대입하여 정격상태에서의 k_e , R_a , K_m 의 값을 구체적으로 계산해보면 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} k_e = 0.3252 \text{ volt} \cdot \text{sec} / \text{rad}, & R_a = 46.2 \ \Omega \\ K_m = 1.75 \text{ rad} / \text{sec} \cdot \text{volt}, & T_m = 0.65 \text{ sec} \end{cases} \quad (4.2)$$

전동기의 토오크계수 k_t 는 역기전력계수 k_e 와 같으며 회전계동의 시정수 T_m 의 값은 운전 실험 결과에서 얻은 수치이다.¹²⁾

4.2 제어특성 시뮬레이션

Fig. 4.2는 $R_a = 46.2[\Omega]$, $k_e = 0.3252[\text{volt} \cdot \text{sec} / \text{rad}]$ 이고 $R_s = R_a$ ($k_p = k_n$), $k_v = k_i$ 일 때 즉 식(2.3)에서 $n = 0$, $\hat{\omega} = \omega$ 인 경우에 대하여 시뮬레이션을 행하고 Fig. 2.1 전동기 속도제어 계통에 대한 인디셜응답과 위와 동일한 조건하에 위치제어가 대신 IQ제어를 사용하였을 때의 인디셜응답을 도시한 것이다.

여기서 IQ제어기는 식(2.1)~(2.4)를 상태방정식으로 표시하고 식(4.3)의 평가함수를 최소화하는 최적제어이론에 의하여 설계된 것으로 한다.¹³⁾

$$J(\Delta u) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\Delta x^T W \Delta x + \Delta u^T V \Delta u) dt \quad (4.3)$$

$$\text{단, } W = \begin{pmatrix} W & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad V = 1$$

$\Delta x, \Delta u$: 각각 상태벡터 x , 입력(전기자 전압) u 의 정상상태로부터의 변동분
 다음에 Fig. 4.3은 R_a 와 k_e 에 오차가 있을 때 즉, $\hat{\omega} \neq \omega$ 일때의 인디셜응답이다.

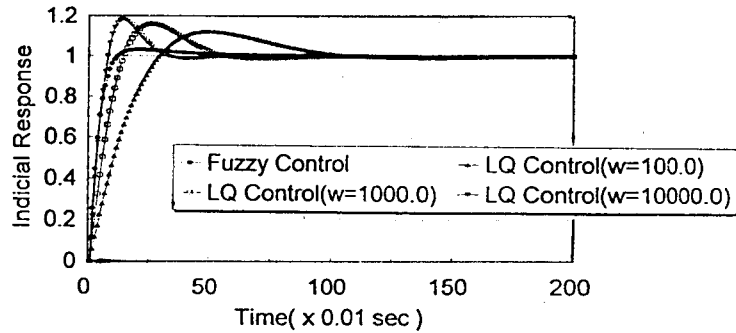


Fig. 4.2 Indicial Responses of the Speed Control Systems ($\hat{\omega} = \omega$) and of the LQ Control Systems

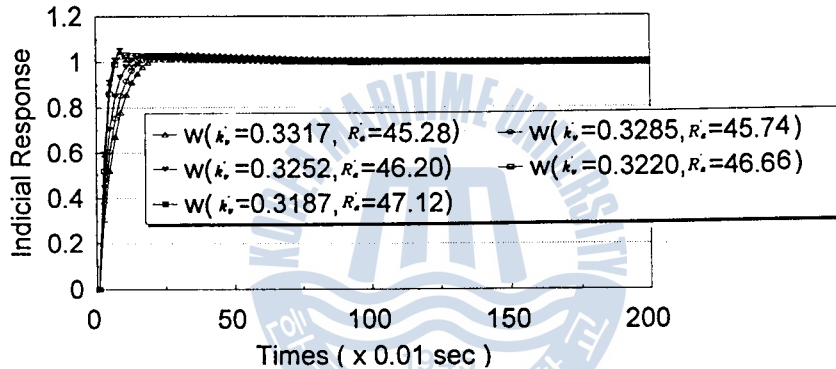


Fig. 4.3 Indicial Responses of the Proposed Speed Control Systems ($\hat{\omega} \neq \omega$)

제 5 장 검토 및 고찰

5.1 제어편차 및 제어입력에 대한 검토

앞절의 응답시뮬레이션 결과 즉 Fig. 4.2와 Fig. 4.3으로부터 본 연구에서 제안하는 방법에 의하면, 오버슈트가 거의 없이 속응성이 매우 양호한 제어특성을 얻을수 있으며, 전동기 정수 R_a 와 k_v 의 측정치에 다소 오차가 있다 하더라도 속도검출기를 이용하지 않고도 실용성이 있는 제어를 행할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 5.1과 5.2는 각각 $\omega = \hat{\omega}$ 일때 본 연구에서 제안하는 방법과 LQ제어에 대하여 각각 제어편차의 2승 평균과 제어입력의 2승 평균을 각각 도시한 것이다. 이 도표로부터 LQ제어에 있어서는 평가함수의 제어편차에 대한 하중계수 w 값에 따라 그 결과가 많이 달라지며, 일반적으로 제어편차를 기준으로 할 때 본 방법이 우수함을 알 수 있다. 또한 LQ제어에 있어서 제어편차를 Fuzzy제어의 결과 정도로 작게 할려면, w 의 값을 10000이상으로 크게 취하여야하며 이 경우 제어에너지는 월등히 크지게 됨을 알 수 있다.

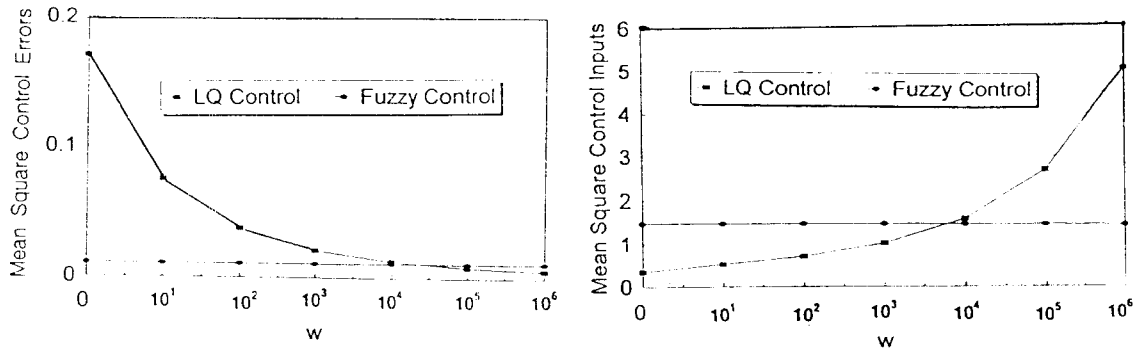


Fig.5.2 Mean Square of Control Errors in Indicial Responses Fig.5.1 Mean Square of Control Inputs in Indicial Responses

5.2 속도추정치와 제어특성

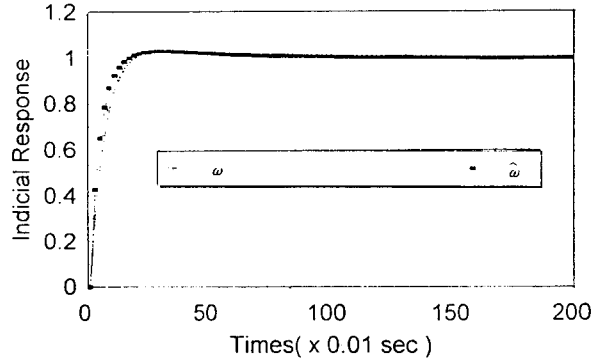
전기자 저항 R_a 와 역기전력 계수 k_v 의 측정치 R_a' 와 k_v' 가 각각 R_a 와 k_v 의 $\pm 2\%$ 까지의 오차가 있는 경우 회전속도 ω 를 rpm으로 표시하며 정격상태, 즉 3600rpm일때의 ω 의 추정치 $\hat{\omega}$ 를 계산해보면 Table 5.1와 같이 된다.

Table 5.1 Variations of $\hat{\omega}$ (rpm)

R_a	k_v	c				
		0.98	0.99	1.00	1.01	1.02
45.28	0.98	3728.84 (3.58%)	3691.17 (2.53%)	3654.26 (1.51%)	3618.08 (0.50%)	3582.61 (-0.48%)
45.74	0.99	3701.15 (2.81%)	3663.77 (1.77%)	3627.13 (0.75%)	3591.22 (-0.24%)	3556.01 (-1.22%)
46.20	1.00	3673.47 (2.04%)	3636.36 (1.01%)	3600.0 (0.00%)	3564.35 (-0.99%)	3529.41 (-1.96%)
46.66	1.01	3645.78 (1.27%)	3608.95 (0.25%)	3572.86 (-0.75%)	3537.49 (-1.74%)	3502.81 (-2.70%)
47.12	1.02	3618.09 (0.50%)	3581.55 (-0.51%)	3545.73 (-1.51%)	3510.63 (-2.48%)	3476.21 (-3.44%)

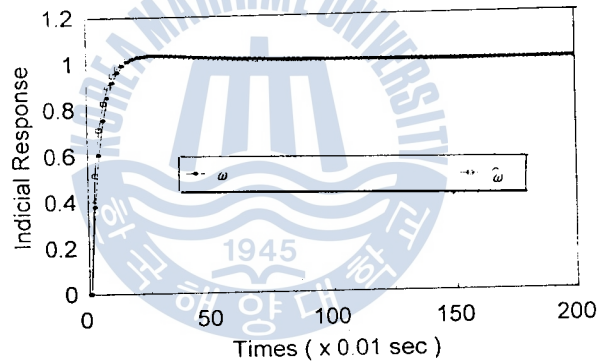
Table 4.2에서 c 는 $\frac{R_a'}{R_a} = \frac{k_v'}{k_v}$ 를 나타내며 각 회전수 밑의 숫자는 $\hat{\omega}$ 의 ω 에 대한 변동율(%)를 나타낸다. Table 5.1의 한가운데 즉, $\hat{\omega}$ 가 3600 rpm일때는 R_a 및 k_v 가 정확히 측정되었을 경우이며 $\hat{\omega}$ 의 변동율은 최고 3.58%에까지 이르고 있다. 그러나 일반적으로 온도에 의한 전기자 및 계자의 저항치의 변동을 생각해보면 R_a 가 증가할 때 k_v 는 감소하게 된다. 따라서 실제로는 Table 5.1의 음영으로 표시된 대각선의 경우가 일어날 가능성이 많으며, 이때 ω 의

변동율은 거의 0.5% 이내로 된다. 이 경우에 대한 인디셜응답 ω 을 디지털 시뮬레이션으로 계산하고 이의 추정치 $\hat{\omega}$ 와 각각 비교하여 도시한 것이 Fig. 5.3이다.



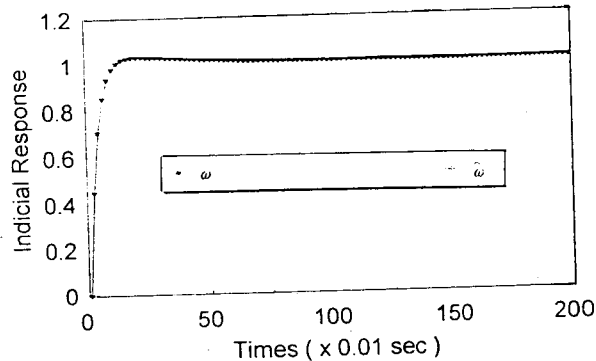
(a) $R_a' = 0.98 R_a, k_v' = 1.02 k_v$

Fig. 5.3 Indicial Responses (ω) and their Estimates ($\hat{\omega}$) of the Proposed Control Systems



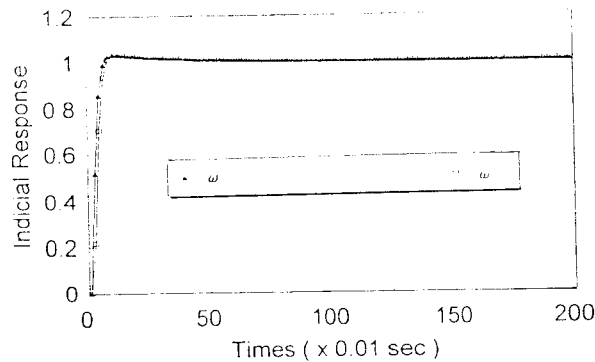
(b) $R_a' = 0.99 R_a, k_v' = 1.01 k_v$

Fig. 5.3 Indicial Responses (ω) and their Estimates ($\hat{\omega}$) of the Proposed Control Systems



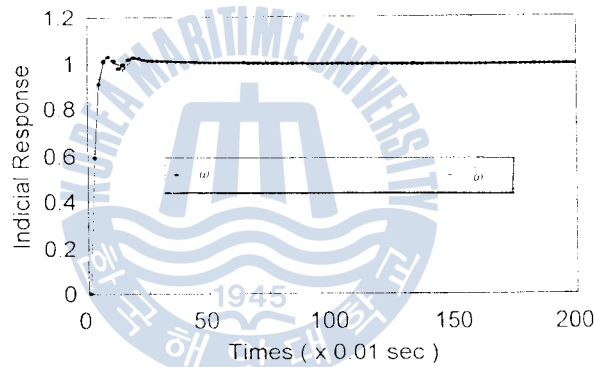
(c) $R_a' = 1.00 R_a, k_v' = 1.00 k_v$

Fig. 5.3 Indicial Responses (ω) and their Estimates ($\hat{\omega}$) of the Proposed Control Systems



(d) $R_a' = 1.01 R_a, k_v' = 0.99 k_v$

Fig. 5.3 Indicial Responses (ω) and their Estimates($\hat{\omega}$) of the Proposed Control Systems



(e) $R_a' = 1.02 R_a, k_v' = 0.98 k_v$

Fig. 5.3 Indicial Responses (ω) and their Estimates($\hat{\omega}$) of the Proposed Control Systems

제 6 장 결 론

이상으로 본 연구에서는 서보모터로 많이 이용되고 있는 타여자 직류전동기에 있어서 검출기를 사용하는 대신, 전기자 전압과 전류를 측정하여 전동기의 회전속도를 추정한다음 퍼지제어기를 이용하여 속도제어를 행하는 방법에 대하여 고찰하고, 시뮬레이션을 통하여 다음 사항을 확인하였다.

- (1) 전동기정수 R_a, k_r 의 값이 2% 정도까지 변화하더라도 이의 회전속도의 추정치에 미치는 영향은 0.5% 이내로 되며 속도검출기 없이도 속도제어가 가능하다.
- (2) 퍼지제어기를 이용함으로써 오버슈트가 작으면서 속응성이 양호한 제어가 가능하다.
- (3) 정밀제어의 경우 제어편차와 제어에너지면에 있어서 LQ제어보다 퍼지제어가 우수하다.

참 고 문 헌

- 1) 野中作太郎 : 電氣機器 , 第3章, 森北出版株式會社(1994)
- 2) 成田誠之助 : デジタル・システム制御, 昭晃堂(1984)
- 3) Benjamin C.Kuo : Digital Control System, Holt, Rinehart and Winsion Inc p.54~58, 101~108 (1988)
- 4) 中野 道雄 : 非線形コントローラを用いた速度センサレス 誘導モータの速度制御方式, SICE '95 學術講演集 214 A-6 , 日本計測自動制御 學會
- 5) 최재영, 김성환, 권영안 : 마이크로프로세서를 이용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어, 韓國船舶機關學會誌, 第20卷, 第3號(1996)
- 6) 기술조사보고 제4호 소형모터의 기술현황(직류서보 모터의 기술동향과 전망), p.114, 대한전기학회(1995)
- 7) 崔洪圭, 全光鎬, 李相昊, 姜泰垠 : 퍼지제어기를 이용한 고성능 유도전동기 전류 제어에 대한 연구, p.1762~1768 대한전기학회지 제45권, 제12호(1996)
- 8) 하주식, 송문현 : 규범모델 추종방식에 의한 회전계통의 적응속도 제어에 관한 연구, 韓國船舶機關學會誌, 第19卷, 第3號(1995)
- 9) 菅野道夫 : ファジィ制御, p.84, 日刊工業新聞社(1988)
- 10) 守田榮之 外 1人 : ファジィ デイゼル ガバナとその設計, 內燃機關, 第31卷, 第3號, p.53~62 (1992)
- 11) Y.Tsukamoto : An Approach to Fuzzy Reasoning Method, in Advances in Fuzzy Set and App., North-Holland, Amsterdam(1979)
- 12) 盧永梧 : 마이크로프로세서를 이용한 直流電動機의 速度制御에 관한 研究, 韓國海洋大學 碩士學位論文(1986.2)
- 13) 廣田實 : 船舶制御システム工學, p.233~235, 成山堂書店(1982)