
한계계단 응답특성을 이용한 영구자석형 동기전동기 속도제어

전인효*, 최중경**, 박승엽**

Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor using
Limited Step Response Characteristics

In-Hyo Jun*, Jung-Keyng Choi**, Seung-Yub Park**

요약

본 논문에서는 한계계단 응답특성을 이용하여 영구자석형 동기전동기의 속도 제어계에 대한 새로운 자동 조 PI(Proportional Integral) 제어기를 설계하였다. 과도응답 기간동안 소위 한계입력이라고 하는 계단입력을 인가하여 PI 제어기의 자동동조를 위한 정보를 얻기 위한 기법을 제안한다. 시스템 파라미터 추정과 동시에 속도제어가 온라인으로 이루어지는데, 이것은 시스템의 불확실성에도 불구하고 한계입력에 의해서 얻어진 시스템 파라미터 정보가 연속적으로 PI 제어기에 적용될 수 있다는 것이다. 제안된 자동동조 알고리즘은 단조증가 계단응답 특성을 갖는 영구 자석형 동기전동기의 속도제어에 대한 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 그 유효함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a new auto-tuning PI controller for the speed servo system of a PMSM is designed by using limited step response characteristics. The method is proposed that gets information about auto-tuning of PI regulator by the injection of step input, called limited input, during a transient response time of control. System parameter estimation and speed control could be continuously executed. This means that in despite of system uncertainty the system information obtained by limited input can be continuously applied to the PI regulator. We

* 마산대학 전자제어과 교수

** 창원대학교 전자공학과 교수

접수일자 : 1998년 8월 19일

demonstrate the effectiveness of the proposed auto-tuning algorithm through simulation and experiment result of the speed control for a PMSM having monotone increasing step response.

I. 서 론

전동기 제어시스템의 주요한 성능지표는 과도응답특성, 정확성, 그리고 강인성이다. PID(Proportional Integral differential) 제어는 일정한 외부 외란 혹은 파라미터 값의 영향 없이 정상상태 동안에서의 정확성 때문에 전동기 제어시스템에 널리 사용되어지고 있다. 또한 PID제어기는 구조가 간단하여 구현이 용이하고 동작 조건의 범위가 넓더라도 견실한 성능을 가지기 때문에 산업현장에서 많이 활용되고 있다. 그런데 PID 제어기의 설계에서 가장 중요한 문제는 제어기의 파라미터인 비례이득, 적분이득, 미분이득을 어떻게 적절하게 설정해야 하는지에 관한 것으로서 대부분의 경우 시스템의 불확정성 때문에 시행착오적으로 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 제어 대상의 불확정성에도 불구하고 다양한 형태의 시험 입력으로부터 계통의 특성을 분석하는 자동동조 PID 제어기법과 현대의 여러가지 제어 알고리즘과의 결합을 통한 연구가 활발히 진행되어왔다[1][2][3].

산업 현장에서 사용되는 각종 서보기기로는 구동 성능이 우수한 직류전동기가 많이 사용되어진다. 그러나 일반 직류전동기는 기계적 정류부의 존재로 브러시 마모에 의한 유지보수 문제, 스파크 및 잡음의 문제 등이 발생하므로 간단한 구동회로의 구현에 의해 사용상의 제한을 받고 있다. 반면에 영구자석형 동기전동기는 구동회로가 조금 복잡하지만 브러시가 없으므로 일반 직류전동기가 가지는 문제점을 들을 구조적으로 해결할 수 있고, 최근에는 높은 자기 밀도를 갖는 자성체의 개발로 큰 토오크 및 관성비 등을 가지고 있는 장점이 있다. 또한 회전자에 동기하여 고정자 퀸션에 전류를 흘려주면 일반 직류전동기처럼 전류에 비례하는 토크가 발생되기 때문에 유도기나 동기기에 비해 제어성이 우수하다. 그래서 영구자석형 동기전동기는 현재 산업용 로봇이나 공작기계 등과 같은 우수한 성능이 요구되는 다양한 응용분야에서 이용되고 있다. 정현파형의 영구자석형 동기전동기는 제어입력이 교류의 형태이

므로 제어회로가 복잡해지고 해상도가 높은 위치 검출이 필요하지만 거형파형에 비해서 토크리ップ의 발생이 없으므로 정밀한 속도 및 위치제어기로 적합하다[4][5].

본 논문에서는 한계계단 응답특성을 이용하여 일차의 동특성 모델로 표현되는 정현파형의 영구자석형 동기전동기의 속도 제어계에 대한 새로운 자동동조 PI제어기를 설계하였다. 자동동조의 목적은 계통의 불확실성에도 불구하고 시험입력의 인가를 통해 시스템을 제어하기 위한 제어 파라미터를 결정하는 것이므로 시험입력에 대한 응답특성의 분석이 매우 중요하다. 제안된 방법은 시간영역에서 확정적인 입력에 대한 과도상태의 응답을 관찰하여 자동으로 PI이득을 동조하는 것으로, 단조 증가하는 형태의 계단응답을 보여주는 계통에 대해 한계입력 즉 인가할 수 있는 최대의 계단입력을 인가한 후 그 응답특성을 온라인으로 분석하여 계통의 동특성을 정의하고 연속적으로 PI이득을 자동 조정한다. 이것은 기존의 방법들에 비해 계통의 동특성을 모델링함과 동시에 비례이득과 적분이득을 계산하여 PI제어를 온라인으로 수행하며, 시험입력 자체가 계통의 과도응답특성을 개선할 수 있고, 또한 제어시스템의 구현이 용이하다는 것이다. 제안된 자동동조 알고리즘은 단조증가 계단응답 특성을 갖는 영구자석형 동기전동기의 속도제어에 대한 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 속도응답이 오버슈트 없이 지령치에 잘 수렴함을 알 수 있다.

II. 한계계단 응답특성을 이용한 자동동조 알고리즘

자동동조의 목적은 계통의 불확실함을 실질적인 입력을 통해 계통의 제어 파라미터를 결정하는 것 이므로 시험입력에 대한 응답특성의 분석이 매우 중요하다. 본 논문에서는 시험 입력으로 인가되는 신호가 계단화 형태의 상수이면서 계통입력에 최대치를 갖는 한계입력으로 결정하였으므로 분석적인 편리함이 본 논문의 특성이라고 할 수 있다. 이 한

계입력을 인가하게 되면 속도응답 곡선은 초기 어느 시간까지 근사적으로 선형인 구간이 존재하며, 제안된 알고리즘은 이 구간을 이용한다.

영구자석형 동기전동기의 동태방정식은 일반적인 직류전동기의 동태방정식과 같은 형태를 갖고, 단조 증가 계단응답의 전형적인 모양을 취한다. 직류전동기의 일반적인 동태방정식의 형태는 식(1)과 같다.

$$\dot{\omega} = -\frac{B}{J}\omega + \frac{K_t}{J}i - \frac{T_L}{J} \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서 ω 는 속도, i 는 전류입력, B 는 마찰계수, J 는 관성모멘트, T_L 은 부하, K_t 는 토크상수를 나타낸다. 계통의 파라메터인 J , B , K_t , T_L 은 주어질 수도 있으나, 여러 요인에 의해 대부분의 경우 불확실하다. 본 논문에서 적용한 모터의 파라메터 값들은 $J = 0.00004498 \text{ N-m sec}^2$, $B = 0.00006239 \text{ N-m sec}$, $K_t = 0.21462 \text{ N-m/A}$ 로 주어진다. 식(1)의 양변에 적분을 취하면 식(2)와 같다.

$$\omega = -\frac{B}{J} \int \omega + \frac{K_t}{J} \int i - \int \frac{T_L}{J} \quad \dots \dots \dots (2)$$

여기서 몇가지 조건에 의해 유도되는 수식들을 분석함으로써 상황에 맞는 계통 파라메터를 구할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 시스템의 파라메터 추정 알고리즘은 다음의 4가지 경우에 대하여 그 절차와 방법을 설명한다.

1. 마찰계수와 부하가 없는 경우

속도와 입력전류와의 관계는 식(3)과 같다.

$$\omega = \frac{K_t}{J} \int i \quad \dots \dots \dots (3)$$

여기서 계통의 유일한 파라메터인 K_t/J 는 속도와 입력적분치 정보로부터 쉽게 얻을 수 있다. 특히 전류 i 가 한계 상수치로 인가된다면 시간축 상의 속도계적의 관찰에서 속도 상승 기울기가 K_t/J 파라메터 정보를 포함하게 된다. 즉 $\omega = (K_t/J)pt$ 이고, 여기서 p 는 입력전류 상수치가 된다. 그림 1에서 보면 속도를 입력의 적분치로 나눈 값이 4253의 값에 수렴함을 알 수 있다. 이 값이 바로 K_t/J 값

이 된다.

2. 마찰계수는 없고 부하가 존재하는 경우

부하가 존재할 경우에는 속도방정식과 속도를 입력 적분치로 나눈 값에 대한 방정식을 구하면 식(4)와 식(5)와 같다.

$$\omega = (K_t/J)pt - (T_L/J)p \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\omega / \int u = K_t/J - T_L/Jp \quad \dots \dots \dots (5)$$

따라서 이 식으로부터 1의 경우에서 얻어진 K_t/J 값을 통해 T_L/J 값을 구할 수 있다.

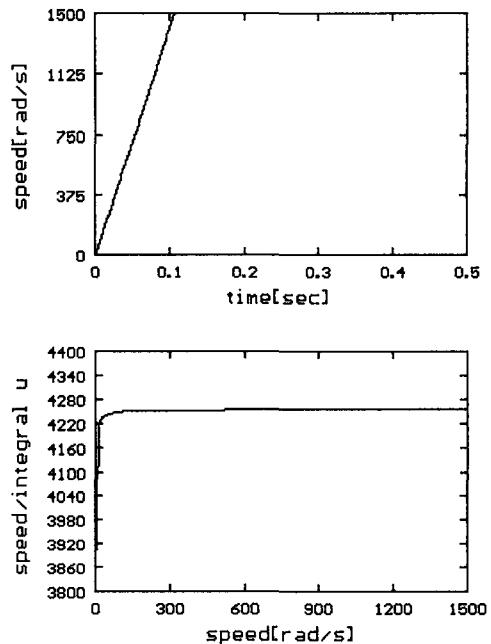


그림 1. $B=0$, $T_L \neq 0$ 일 경우 모터 속도의 계단응답

Fig. 1 Step response of motor velocity when $B=0$, $T_L \neq 0$

3. 마찰계수는 존재하고 부하가 없는 경우

속도에 대한 방정식은 식(6)과 같고, 양변에 입력의 적분치를 곱해주면 식(7)이 된다.

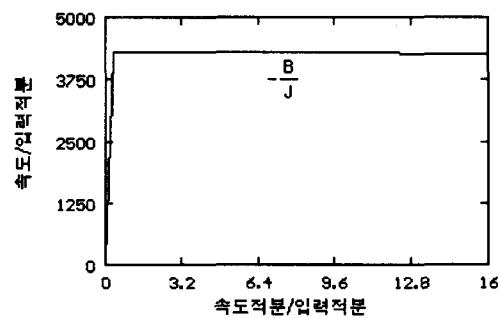
$$\omega = -\frac{B}{J} \int \omega + \frac{K_t}{J} \int i \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

$$\frac{\omega}{\int i} = - \frac{B}{J} \frac{\int \omega}{\int i} + \frac{K_t}{J} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

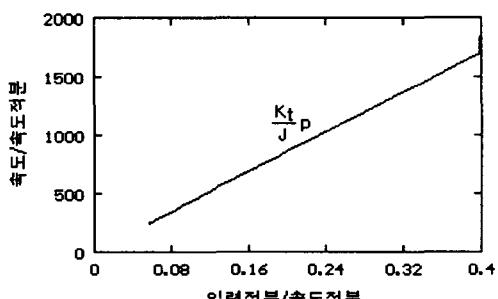
여기서 우리는 그림 2(a)와 같이 속도를 입력의 적분치로 나눈 것 값과 속도의 적분치를 입력의 적분치로 나눈 값을 양 축으로하는 그래프를 그리면, 그 기울기는 B/J 값을, 또한 그 y 절편의 값은 K/J 을 나타낸다. 또한 식(5)를 속도의 적분치로 나누면 식(8)과 같이 된다.

$$-\frac{\omega}{\int \omega} = -\frac{B}{J} + \frac{K_t}{J} \frac{\int i}{\int \omega} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

따라서 그림 2(b)에서 그 기울기를 통해 좀더 정확한 값의 K_1/J 의 값을 구할 수 있다.



(a) 속도를 입력의 적분치로 나눈 특성곡선



(b) 솔도를 솔도의 적분치로 나눈 틀셨율선

Fig. 2 Step response of motor velocity when $B \neq 0$, $T_L = 0$

4. 마찰계수와 부하가 존재하는 경우

식(7)과 (8)에서 부하 T_L 을 고려하면 속도를 입력의 적분치로 나눈 방정식과 속도의 적분치로 나눈 방정식은 식(9)와 (10)이 된다.

$$-\frac{\omega}{i} = -\frac{B}{J} \frac{\int \omega}{\int i} + \left(\frac{K_t}{J} - \frac{T_L}{J} \right) \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$-\frac{\omega}{\int \omega} = -\frac{B}{J} + \left(\frac{K_t}{J} + \frac{T_L}{J} \right) \frac{\int i}{\int \omega} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

따라서 3의 경우에 구해진 값들과 식(9)로부터 B/J 의 값을, 식(10)으로부터 $\left(\frac{K_t}{J} - \frac{T_L}{J}\right)$ 의 값을 얻을 수 있다.

III. PI 속도제어기 설계

본 논문에서는 속도제어를 위해 일반적인 극점배치방법을 이용하여 비레이득과 적분이득을 계산하고 제어입력 u 를 구한다. 전류를 입력으로 인가하는 경우 영구자석형 동기전동기의 속도상태방정식은 식(11)과 같이 표현된다.

이 식을 속도오차 상태방정식으로 표현하면 식 (12)와 같다.

$$\dot{e} = a_{22}(e + \omega_{ref}) + bu + fV \quad \dots \dots \dots (12)$$

여기서,

$$x_2 = \omega, \quad u = i, \quad e = \omega - \omega_{ref}, \quad a_{22} = -\frac{B}{J},$$

$$b = \frac{K_T}{J}, \quad f = -\frac{1}{J},$$

속도오차 상태방정식 (12)에 대한 PI제어기의 제어
입력 u 는 식(13)과 같다.

이 식에서 입력을 비례입력만으로 구성하는 경우 속도응답에서 오버슈트는 일어나지 않으나 정상상태오차가 존재하게 된다. 그러므로 입력에 적분항을 포함시켜서 정상상태오차를 제거해 주어야 한다. 그

러나 전체 시스템의 차수가 적분항의 추가로 원래의 차수보다 1차수 증가되어 속응성의 저하와 오버슈트의 가능성성이 보인다. 따라서 비례이득(K_p)과 적분이득(K_i)의 적절한 선택을 통해 빠른 속도 응답을 얻으면서 불필요한 오버슈트 발생을 억제시켜야 한다. 다음은 PI 제어입력을 인가할 때 속도오차 e 에 관한 라플라스 변환식을 얻는 과정이다. 우선 식(12)와 (13)을 라플라스 변환하고, 식(13)을 식(12)에 대입하여 속도오차인 $E(s)$ 에 관한 식으로 정리하면 식(14)와 같다.

$$E(s) = \frac{a_{23} K_i e(0) + a_{22} \omega_{ref} + fV_L}{s^2 - (a_{22} + a_{23} K_p)s - a_{23} K_i} \quad \dots \dots \dots (14)$$

이 식의 분모 다항식의 관찰을 통해 적분기를 도입함으로 시스템의 차수가 1차수 증가되어 성능저하의 가능성이 있음을 알 수 있다. 속도오차 $E(s)$ 를 다음 식(15)와 같이 극점배치방법을 이용하여 설정한다. 여기서 각 극점은 모두 s 평면상의 좌반면에 위치하도록 설정하여 특성방정식의 안정성을 보장한다.

$$E(s) = \frac{Q(s)}{(s + \lambda_1)(s + \lambda_2)} \quad \dots \dots \dots (15)$$

여기서 λ_1 과 λ_2 적절하게 설정된 극점인데, 극배치 설계 방법에서 극점의 설정은 s 평면 좌반면에 위치하도록 선정되어야 하므로 둘 다 양의 값을 가져야 한다.

식(14)와 (15)를 서로 비교하면 다음과 같은 조건식 (16)과 (17)이 성립한다.

$$\lambda_1 + \lambda_2 = -(a_{22} + a_{23} K_p) \quad \dots \dots \dots (16)$$

$$\lambda_1 \lambda_2 = -a_{23} K_i \quad \dots \dots \dots (17)$$

식(16)과 (17)에서 입력 u 를 구성하는 K_p 와 K_i 를 구하면 다음 식(18)과 (19)가 된다.

$$K_p = -\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + a_{22}}{a_{23}} \quad \dots \dots \dots (18)$$

$$K_i = -\frac{\lambda_1 \lambda_2}{a_{23}} \quad \dots \dots \dots (19)$$

따라서 제어입력 u 와 PI의 이득 K_p 와 K_i 의 결과

식은 다음 식(20), (21), (22)와 같다.

$$u = K_p \cdot e + K_i \int e dt \quad \dots \dots \dots (20)$$

$$K_p = -\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + (-B/J))}{(K_i/J)} \quad \dots \dots \dots (21)$$

$$K_i = -\frac{\lambda_1 \lambda_2}{(K_i/J)} \quad \dots \dots \dots (22)$$

IV. 전류제어 서보시스템의 구현

서보시스템의 전체 구성도는 그림 3과 같다. 제어 대상으로 적용한 전동기는 slotless 3상 8극형 고정자와 8극 영구자석형 회전자를 갖는 정현파형의 영구자석형 동기전동기이다. 영구자석형 동기전동기의 속도제어를 위해 주 프로세서는 DSP(TMS 320c31) 칩을 사용하였다[6]. DSP에서 출력되는 전류지령 명령을 정확히 추종하기 위해 아날로그 소자를 이용하여 PWM 전류제어기를 구성하였다[7]. 3상 기준파형을 만들기 위해서는 U상과 W상 2상분의 데이터를 ROM의 영역에 기억시키고 $V=-(U+W)$ 는 아날로그 연산을 통하여 구한다. 전동기에 전원 공급시 회전자의 초기위치를 판별하여 최대의 토크를 유지할 수 있는 자계를 형성시킬 수 있도록 ROM의 데이터 시작 부분을 바꾸어 주는 회로를 구성하였다. 전동기의 속도는 전류의 입력량과 비례하며, 전류의 입력량은 3상의 기준 정현파의 진폭의 크기에 따라 결정되므로 속도 가변을 위해서 3상 기준 정현파의 진폭을 가변시키는 곱셈기를 구성하였다.

전류 검출을 위해서는 홀 센서(Hall Sensor)를 채택하였다. 실제로 홀 센서로부터의 출력은 잡음이 상당히 많이 포함되어 있으므로 저역통과필터를 통해 여과되고 여기에 비례이득을 곱해서 연산이 편리하도록 한다. 이렇게 출력된 전압은 곱셈기로부터 출력된 3상의 기준파형과 비교되어 전류오차 신호를 만든다. 이 오차 신호는 하드웨어 PI 제어기를 통과한 다음 삼각파와 비교되어 실제 인버터에 입력될 PWM신호를 형성한다. 전동기구동 드라이브로는 IGBT를 6개 내장하여 3상 인버터로써 많이 사용되고 있는 IPM(Intelligent Power Modules)을

사용하였다. IGBT의 단락 파괴를 막기 위해 테드 타임(Dead Time) 회로를 설계하였다. 실제 큰 파워를 스위칭할 때 발생되는 잡음과 회로 파괴를 방지하기 위해 포토커플러로 구성된 게이트 드라이버를 사용한다. 회전자의 속도 정보는 회전자 축과 직결된 엔코더에서 발생되는 펄스로부터 얻는다. 속도에 대한 정밀 정보와 특히 저속에서의 펄스의 손실을 막기 위해 A상과 B상을 입력으로 하여 4 채배회로를 구성하여 펄스의 수를 4배로 늘려주었다. 또한 이 회로는 전동기가 회전할 때 생기는 전동에 의한 속도 오차를 고려하여 자체적으로 하드웨어에 의한 연산이 가능하도록 설계하였다.

V. 시뮬레이션 및 실험결과

본 논문에서 적용되어진 PI속도제어 서보시스템에 대하여 한계계단입력 2A를 인가해서 무부하시의 응답곡선을 구하면 그림 4와 같다. 그림 4(a)에서 기울

기로부터 B/J 를 알 수 있고, 그림 4(b)로부터 K/J 의 값을 구할 수 있다. 따라서, 추정된 파라메터의 값은 $B/J = 0.053$, $K/J = 15171.89$ 가 된다.

추정된 파라메터를 이용하여 극점배치 방법에 의해 PI속도제어기를 시뮬레이션한 결과는 그림 5와 같다. 여기서 속도지령치는 314 rad/sec로 하고, 극점배치를 위한 두 극점은 pole1=1, pole2=1000 으로 설계함에 따라 $K_p=-0.0727$, $K_i=-0.0726$ 으로 설정된다.

또한 시뮬레이션의 경우와 동일한 파라메터, 극점 및 속도의 지령치를 적용하여 얻어진 실험결과는 그림6과 같다. 시뮬레이션과 실험결과로부터 얻어진 속도응답이 오버슈트 없이 지령치에 잘 수렴한다. 이것은 기존의 오프라인 방법에 비해 본 논문에서는 파라메터 추정과 제어를 온라인으로 동시에 수행함으로써 시험입력 자체가 계통의 과도응답 특성을 개선할 수 있고, 제어 절차를 간소화함에 따라 제어기 구현이 용이하다는 것을 알 수 있다.

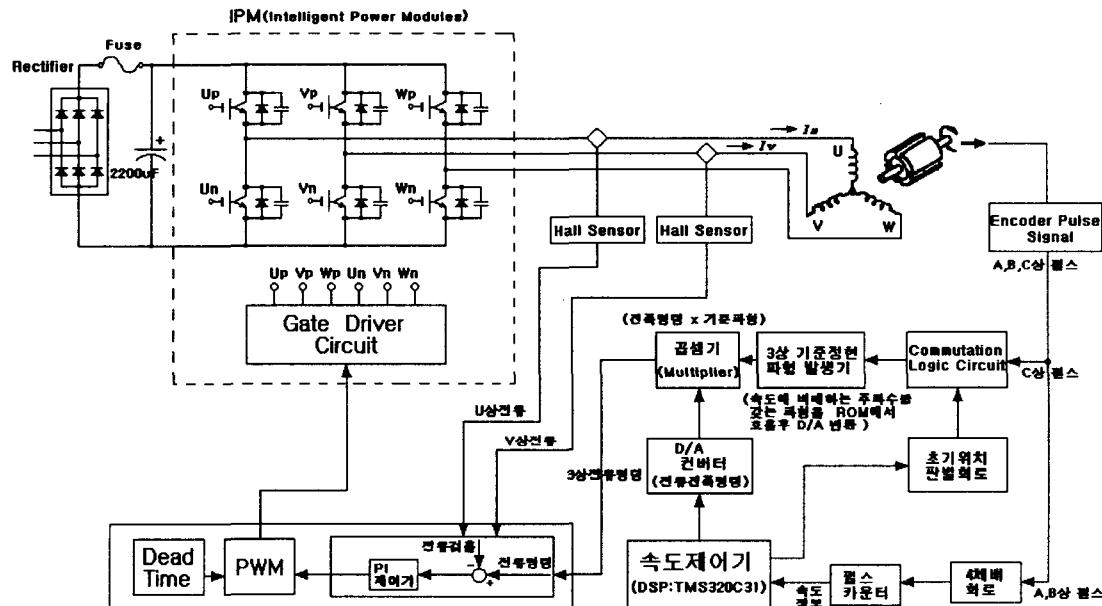
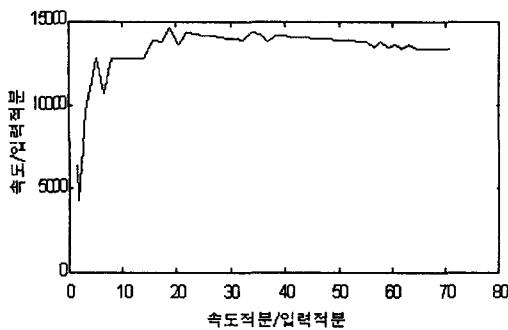
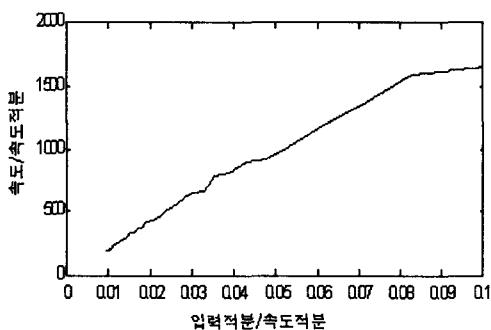


그림 3. 전체 서보 시스템의 구성

Fig. 3 Servo system configuration



(a) 속도를 입력의 적분치로 나눈 특성곡선



(b) 속도를 속도의 적분치로 나눈 특성곡선

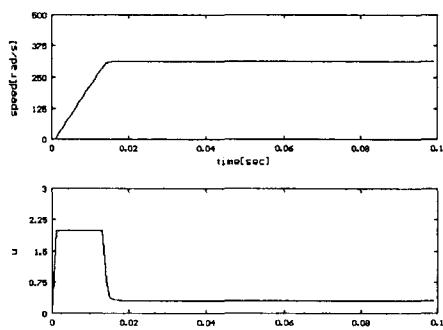
그림 4. 한계계단입력(2A)에 의한 응답곡선
Fig. 4 Response curve by limited step input(2A)

그림 5. 시뮬레이션 결과

Fig. 5 Simulation results

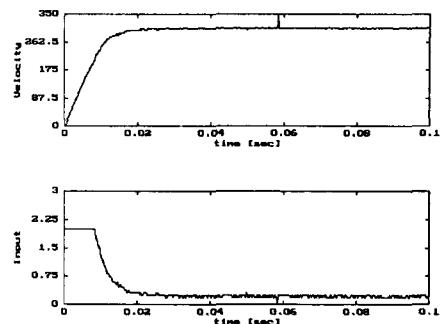


그림 6. 실험 결과

Fig. 6 experiment results

VI. 결 론

본 논문에서는 한계계단 응답특성을 이용한 자동 동조 PI 제어기법을 적용하여 영구자석형 동기전동기의 속도제어기를 설계하였다. 이 제어기법은 시간 영역에서의 확정적인 입력응답에 대한 자동동조 방법으로, 계통에 최대의 한계입력을 인가하여 응답특성을 온라인으로 분석해서 계통의 동특성을 확정하고 연속적으로 비레이드과 적분이득을 자동으로 동조하는 방법과 절차를 제안한다. 제안된 기법은 기존의 기법들에 비해 계통의 동특성 분석과 동시에 PI제어를 연속적으로 온라인화하여 수행함으로써, 시험입력 자체가 계통의 과도응답특성을 개선할 수 있고 구현이 쉽다는 것이다. 본 논문에서는 단조증가의 계단응답 특성을 갖고 1차의 동특성 모델로 표현되는 정현파형 PMSM의 속도제어 서보시스템을 제어대상으로 하여 시뮬레이션과 실험결과를 통해서 제안된 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] K.J.Astrom and Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators With Specification on Phase

- and Amplitude Margins", Automatica, Vol.20, No.5, pp. 646-651, 1984.
- [2] A.A.Voda and I.D.Landau, "A method for the auto-calibration of PID controllers", Automatica, Vol.31, pp 41-53, 1995.
- [3] 전인효 외4, "브러시리스 직류전동기 속도 제어를 위한 한계스텝응답 특성을 이용한 Auto-tuning PI제어", Proceedings of IEEK Summer Conference, 제21 권, 제1호, pp.203-206, June 1998.
- [4] Takashi Kenjo, "Permanent Magnet And Brushless DC Motors", Sogo Electronics Publishing Company, 1984.
- [5] Y.Dote and S.Kinoshita, "Brushless Servo motors", Clarendon Press Oxford, 1990.
- [6] "TMS320C3X User's Guide", Texas Instruments, 1994.
- [7] Ned Mohan et al., "Power Electronics : Converters, Applications, and Design", John Wiley & Sons, 1989.



전 인 효(全寅孝, In-Hyo Jun)
1979년 2월 경북대학교 전자공
학과 졸업 (학사)
1994년 2월 창원대학교 대학원
전자계산학과 졸업 (석사)
1996년 3월 ~ 현재 창원대학교
대학원 전기전자제어공학과 박사과정
1981년 ~ 1986년 LG전자(주) 근무
1989년 ~ 1992년 (주)동서제어 근무
1996년 ~ 현재 마산대학 전자제어과 교수
*관심연구분야 : 적응제어, 퍼지신경회로망, 컴퓨터
통신



최 중 경(崔重暉, Jung-Keyng Choi)
1986년 2월 고려대학교 전기
공학과 졸업 (공학사)
1988년 2월 고려대학교 대학원
전기공학과 졸업 (공학
석사)

1992년 2월 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업
(공학박사)
1992년 3월 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 교수
*관심연구분야 : 서보기제어, 가변구조제어, 자동
동조제어



박 승 열(朴勝燁, Seung-Yub Park)
1981년 2월 고려대학교 전기공
학과 졸업 (공학사)
1984년 2월 고려대학교 대학원
전기공학과 졸업 (공학
석사)

1988년 2월 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업
(공학박사)
1988년 3월 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 교수
*관심연구분야 : 적응제어, 고장검출진단, 인공지능
응용