

브러시리스 직류전동기 속도 제어를 위한 한계시스템응답 특성을 이용한 Auto-tuning PI 제어

전장현*, 전인호*, 최중경*, 박승엽*

* 창원대학교 공과대학 전자공학과

* 641-773: 경남 창원시 사림동 9번지

*jjh74@chollian.net * ihjun@masan-c.ac.kr

*cjk@sarim.changwon.ac.kr *psy@sarim.changwon.ac.kr

Auto-Tuning PI control using limited step response for brushless DC motor speed control

Jang-hyun Jun*, In-hyo Jun*, Jung-keyng Choi*, Seung-yub Park*

* Dept. of electronics Eng.Changwon Univ.Changwon, Korea

* 641-773: 9 Sarim-Dong, Changwon, Kyungnam, Korea

*jjh74@chollian.net ** ihjun@masan-c.ac.kr

*cjk@sarim.changwon.ac.kr *psv@sarim.changwon.ac.kr

Abstract : This paper describes the procedure of getting information about auto-tuning of PID regulator by the injection of high step input, called limited input, during a transient time of control. The key point is that system identification and control could be continuously executed. This means that the system information obtained by limited input despite of system uncertainty can be continuously applied to the PI regulator. Simulation and experiment result of brushless DC motor system having monotone increasing step response demonstrate the usefulness of proposed auto-tuning algorithm.

I. 서론 (Introduction)

PID제어기는 구조가 간단하여 구현이 용이하고 동작 조건의 범위가 넓더라도 견실한 성능을 가지기 때문에 산업현장에서 가장 많이 쓰이고 있다. 이 PID제어기의 설계에서 가장 중요한 문제는 제어기의 파라미터인 비례이득, 적분이득, 미분이득을 어떻게 적절하게 설정해야 하는지에 관한 것으로서 대부분의 경우 시스템의 불확정성(uncertainty) 때문에 시행착오적으로 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 제어 대상의 불확정성에도 불구하고 여러 형태의 시험입력 인가를 통해 PID 제어 이득을 결정하는 PID제어기 파라미터의 자동동조(auto-tuning)에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다.^{[1][2]}

본 연구에서는 시간영역에서의 확정적인 입력응답에 대한 자동조정 방법으로 단순 증가하는 형태의 스텝응답을 보여주는 계통에 대해 큰 계단입력-이것을

한계입력이라 한다-을 인가한 후 그 응답특성을 온라인으로 분석하여 계통의 동특성을 정의하고 연속적으로 PI 이득을 자동동조하는 방법을 제안한다. 이 방법이 기존의 방법들과 다른 점은 동특성의 모델링과 동시에 PI 제어가 수행되며, 시험입력 자체가 계통의 과도응답특성을 개선할 수 있다는 것, 그리고 구현이 쉽다는 것들을 기술할 수 있다.

이 연구의 검증을 위해 현재 산업체에서 다양한 분야에 그 쓰임이 늘어나고 있으며 1차의 동특성 모델로 표현되는 정현파형 브러시리스 직류전동기 속도제어계에 제안된 방법을 적용한다. 이 브러시리스 직류전동기는 현재 산업용 로봇이나 공작기계 등과 같은 우수한 성능이 요구되는 다양한 응용분야에서 이용되고 있으며, 일반 직류전동기가 가지는 문제점들을 구조적으로 해결하므로 보수성의 문제가 없다. 또한 근래에는 높은 자기 밀도를 갖는 자성체의 개발로 큰 토크, 관성비 등을 가지고 있는 장점이 있다. 그리고 정현파형 브러시리스 직류전동기는 제어 입력이 교류의 형태이므로 제어회로가 복잡해지고 해상도가 높은 위치 검출이 필요하지만 거형파형에 비해서 토크리플 발생이 없으므로 정밀한 속도 및 위치제어기로 적합하다^[3]. 이러한 브러시리스 직류전동기에 한계입력을 인가하고, 과도응답특성을 통하여 모터의 동특성을 정의하고, PI 이득을 자동동조하여 속도제어를 할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

II. Auto-tuning PI 속도제어 알고리즘

브러시리스 직류전동기의 동태방정식은 일반적인 직류전동기의 동태방정식과 같은 형태를 갖고, 단조증가

스텝응답의 전형적인 모양을 취한다.

직류전동기의 일반적인 동태방정식의 형태는 식(1)과 같다.

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

여기서 ω 는 속도, i 는 전류입력, B 는 마찰계수, J 는 관성모멘트, T_L 은 부하, K_t 는 토크상수를 나타낸다. 프로세스의 파라미터인 J, B, K_t, T_L 은 주어질 수도 있으나, 대부분의 경우 불확실하다.

자동동조의 목적은 프로세스의 불확실성에도 불구하고 시험 입력의 인가를 통해 프로세스를 제어하기 위한 제어 파라미터를 결정하는 것이므로 시험입력에 대한 응답특성의 분석이 매우 중요하다. 본 논문에서는 시험 입력으로 상수이면서 스텝입력신호로 프로세스에 인가할 수 있는 최대값을 인가하도록 하였다. 이 한계 입력을 인가하게 되면 속도응답 곡선은 초기 어느 시간까지 근사적으로 선형인 구간이 존재하며, 제안된 알고리즘은 이 구간을 이용한다.

식(1)의 양변에 적분을 취하면 식(2)와 같다.

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

본 연구에서 제안하는 시스템의 파라미터 추정 알고리즘은 다음의 4가지 경우에 따라 절차와 방법을 설명한다.

1. $B=0, T_L=0$ 인 경우

속도와 입력전류와의 관계는 식(3)과 같다.

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

여기서 우리는 계통의 유일한 파라미터인 K_t/J 를 속도와 입력적분치 정보에서 쉽게 얻을 수 있다. 특히 전류 i 가 한계 상수치로 인가된다면 시간축 상의 속도계적의 관찰에서 속도 상승 기울기가 K_t/J 파라미터 정보를 포함하게 된다. 즉 $\omega = (K_t/J)pt$ 이고, 여기서 p 는 입력전류 상수치가 된다.

그림(1)에서 보면 속도를 입력의 적분치로 나눈 값이 4294의 값에 수렴함을 알 수 있다. 이 값이 바로 K_t/J 값이 이 된다.

2. $B=0, T_L \neq 0$ 인 경우

부하가 존재할 경우에서 속도방정식과 속도를 입력적분치로 나눈 값에 대한 방정식을 구하면 식(4)와 식(5)와 같다.

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

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

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

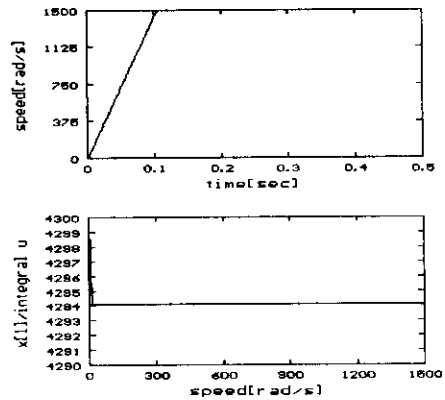


그림 1. $B=0, T_L \neq 0$ 일 경우 모터 속도의 스텝응답 ($J = 0.00004498 \text{ N-m-sec}^2, K_t = 0.21462 \text{ N-m/A}$)
 Fig. 1. Step response of motor velocity when $B=0, T_L \neq 0$ ($J = 0.00004498 \text{ N-m-sec}^2, K_t = 0.21462 \text{ N-m/A}$)

3. $B \neq 0, T_L = 0$ 인 경우

속도에 대한 방정식은 $\omega = -\frac{B}{J}\int\omega + \frac{K_t}{J}\int i$ 가 되고, 양변에 입력의 적분치를 곱해주면, 식(6)과 같게 된다.

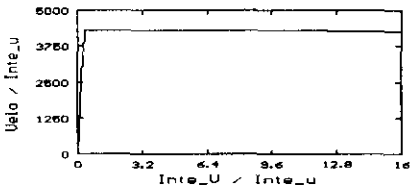
$$\frac{\omega}{\int i} = -\frac{B}{J}\frac{\int\omega}{\int i} + \frac{K_t}{J} \quad (6)$$

여기서 우리는 그림 2의 (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 y절편의 값은 K_t/J 을 나타낸다.

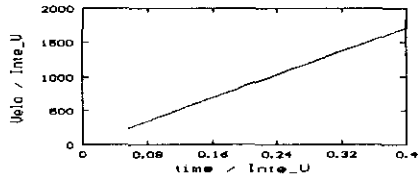
또한 식(5)를 속도의 적분치로 나누면 식(7)과 같이 된다.

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

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



(a) 속도를 입력의 적분치로 나눈 특성곡선



(b) 속도를 속도의 적분치로 나눈 특성곡선

그림 2. $B \neq 0, T_L = 0$ 인 경우 모터 속도의 스텝 응답 ($B = 0.00006239$ N-m-sec, $J = 0.00004498$ N-m-sec², $K_t = 0.21462$ N-m/A)

Fig. 2. Step response of motor velocity when $B \neq 0, T_L = 0$ ($B = 0.00006239$ N-m-sec, $J = 0.00004498$ N-m-sec², $K_t = 0.21462$ N-m/A)

4. $B \neq 0, T_L \neq 0$ 인 경우

식(6)과 식(7)에서 부하 T_L 을 고려하면 속도를 입력의 적분치로 나눈 방정식과 속도의 적분치로 나눈 방정식은 식(8)과 식(9)와 같다.

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

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

따라서 3의 경우에 구해진 값들과 식(8)로부터 B/J 의 값을, 식(9)로부터 $\left(\frac{K_t}{J} - \frac{T_L}{J} \right)$ 의 값을 얻을 수 있다.

III. PI 속도제어 및 전류 제어 서보 시스템의 구성

본 연구에서는 속도제어를 위해 극점배치방법을 이용하여 PI 이득을 계산하고 제어입력 u 를 구한다. 제어입력 u 와 PI 이득 K_p, K_i 의 결과식은 다음 식(10), (11), (12)와 같다.

$$u = K_p \cdot e + K_i \int e dt \quad (10)$$

$$K_p = -\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + (-B/J))}{(K_t/J)} \quad (11)$$

$$K_i = -\frac{\lambda_1 \lambda_2}{(K_t/J)} \quad (12)$$

여기서 e 는 속도 오차이고, λ_1 과 λ_2 는 적절하게 선정된 극점이다.

본 논문에서 제어대상으로 설정한 전동기는 일본 Yaskawa사 제품으로서 slotless 3상 8극형 고정자와 8극 영구자석형 회전자를 갖는 정격전압 200V, 정격전류 2A, 200W급형평과형 브러시리스 직류전동기이다. 제어대상의 서보시스템의 구성은 그림 3과 같다^[4]. 브러시리스 직류전동기의 속도제어를 위해 DSP (TMS 320c31)를 사용하였고, DSP에서 출력되는 전류지령 명령을 정확히 추종하기 위해 아날로그 소자를 이용하여 PWM 전류제어기를 구성하였다^[5]. 그리고 구동 드라이버로 Mitsubishi사의 IPM을 사용하였다.

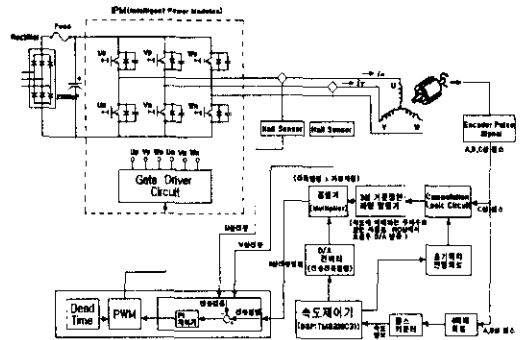
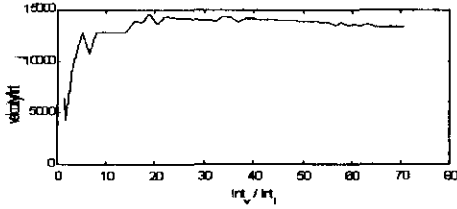


그림 3. 전체 서보 시스템의 구성
Fig. 3. Configuration of the whole servo system

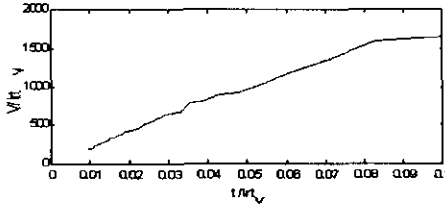
IV. 시뮬레이션 결과 및 실험결과

본 연구에서 적용되어진 PI속도제어 서보시스템에 대하여 한계스텝입력 2A를 인가해서 무부하시의 응답 곡선을 구하면 그림 4과 같다. 그림 4의 (a)에서 기울기로부터 B/J 를 알 수 있고, (b)로부터 K_t/J 의 값을 구할 수 있다. 따라서, 추정된 파라미터의 값은 $B/J = 0.053, K_t/J = 15171.89$ 가 된다.

추정된 파라미터를 이용하여 극점배치 방법에 의해 PI속도제어기를 시뮬레이션한 결과는 그림 5와 같다. 여기서 극점배치를 위한 두 극점은 $pole1 = 1000, pole2 = 1$ 로 설정하였고, 속도지령치는 314 rad/sec로 한다.



(a) 속도를 입력의 적분치로 나눈 특성곡선



(b) 속도를 속도의 적분치로 나눈 특성곡선

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

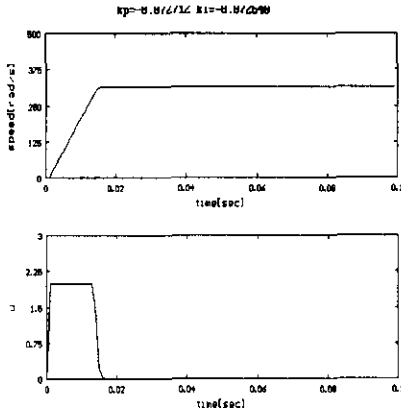


그림 5. 시뮬레이션 결과 ($B/J=15.22, K_i/J=15228.75, pole1=1000, pole2=1$, 속도 지령치 = 314 rad/sec)

Fig 5. Simulation result ($B/J=15.22, K_i/J=15228.75, pole1=1000, pole2=1$, velocity reference = 314 rad/sec)

또한 시뮬레이션의 경우와 동일한 파라미터, 극점 및 속도의 지령치를 적용하여 얻어진 실험결과와 그림 8과 같다. 시뮬레이션과 실험결과로부터 얻어진 속도 응답이 오버슈트 없이 지령치에 잘 수렴함을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 시간영역에서의 확정적인 입력응답에 대한 자동동조 방법으로, 계통에 최대의 한계입력을

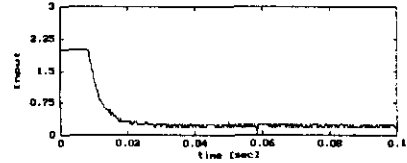
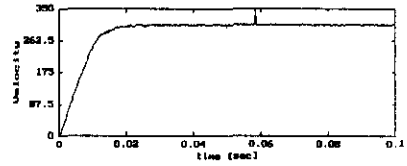


그림 6. 실험 결과 ($B/J = 15.22, K_i/J = 15228.75, pole1=1000, pole2=1$, 속도지령치 314 rad/sec)

Fig. 6 experiment result ($B/J=15.22, K_i/J=15228.75, pole1=1000, pole2=1$, velocity reference = 314 rad/sec)

인가하여 응답특성을 온라인으로 분석해서 계통의 동특성을 정의하고 연속적으로 PI 이득을 자동 동조하는 방법을 제안한다. 기존의 방법들과 다른 점은 계통의 동특성을 모델링함과 동시에 PI제어를 수행함으로써, 시험입력자체가 계통의 과도응답특성을 개선할 수 있고 구현이 쉽다는 것이다. 본 연구의 검증은 제어대상을 단조증가의 계단응답을 갖는 정현파형 BLDC 모터의 속도제어 시스템으로 하여 제안된 알고리즘의 유용성을 시뮬레이션과 실험의 결과를 통해서 입증하였다.

참고 문헌

- [1] A.A.Voda and I.D.Landau. "A method for the auto-calibration of PID controllers", Automatica, Vol.31, pp 41-53, 1995
- [2] Yoshikazu Nishikawa, Nobuo Sannonmiya, Tokuji Ohta, and Haruki Tanaka, "A Method for Auto-tuning of PID Control Parameters", Automatica, Vol.20, pp321-332, 1984
- [3] Yasuhico Dote, Sakan Kinoshita "Brushless Servomotors", Clarendon Press Oxford, 1990.
- [4] "DC Motors, Speed Controls, Servo Systems", Electro-craft Corp. 1977.
- [5] Ned Mohan, Tore M, Undeland, Willamp P.Robbins, "Power Electronics : Converters, Applications, and Design", John Wiley & Sons, 1989.