

산업용 서보 구동 시스템을 위한 자동 P/PI 속도 제어기 설계

배 상규, 석 줄기, 김 경태, 이 등춘
영남대학교 전자정보공학부

Automatic P/PI speed controller design for industry servo drives

Sang-Gyu Bae, Jul-Ki Seok, Kyung-Tae Kim and Dong-Choon Lee
Yeungnam University

Abstract – Conventional P/PI speed controller of today's servo drives should be manually tuned the controller switching set-point by trial-and-errors, which may translate the drive system down-time and loss of productivity. The adjustable drive performance is heavily dependent on the quality of the expert knowledge and becomes inadequate in applications where the operating conditions change in a wide range, i.e., tracking command, acceleration/deceleration time, and load disturbances. In this paper, the demands on simple controls/setup are discussed for industry servo drives. Analyzing the frequency content of motor torque command, P/PI control mode switching is automatically performed with some prior knowledge of the mechanical dynamics. The dynamic performance of the proposed scheme assures a desired tracking response curve with minimal oscillation and settling time over the whole operating conditions. For comprehensive comparison of traditional P/PI control scheme, extensive test is carried out on actual servo system.

1. 서 론

산업 현장에서 많이 사용되고 있는 산업용 서보 모터의 가장 큰 문제점 중의 하나는 서보 모터의 오버슈트 발생에 의한 속도 특성 악화, 그리고 점착 시간(settling time)의 지연등이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔고, 그 중 일반적인 방법으로 알려진 것이 P/PI 절환 기법이다[1-2]. 그러나, 기존의 P/PI 절환 기법은 이론적인 근거가 부족할 뿐만 아니라 최적의 절환점을 찾기 위해서는 사용자의 경험이나, 전문가의 도움을 필요로 한다. 더욱이 초기의 동작 조건에서 여러 번의 튜닝을 거쳐 설정한 절환점에서만 최적화된 동작을 하기 때문에, 속도 지령의 변화, 가감속 시간의 변화, 그리고 부하 변동 등이 발생하였을 때에는 최적의 동작 특성을 얻을 수 없게 된다. 즉, 기존 P/PI 절환 기법은 초기에 사용자의 경험 또는 전문가의 도움에 의해 결정된 절환점에서는 우수한 동작 특성을 얻을 수 있지만, 운전 조건의 변화가 있을 때에는 속도 응답의 오버슈트 또는 오실레이션의 발생을 초래하게 된다. 그러므로, 운전 조건의 변동이 있을 때마다 사용자는 여러 번의 튜닝작업을 거쳐 최적의 절환점을 설정해 주어야 하는 번거로운 작업을 반복하여야 한다. 이는 사용자에게 상당한 불편함을 주고 생산성 향상에도 좋지 않다. 본 논문에서는 토크 지령을 주파수 분석하여 자동적으로 절환점을 찾는 자동 P/PI 속도 제어기를 제안한다.

제안된 자동 P/PI 속도 제어기는 주파수 분석을 이용하여 모드를 절환 시키기 때문에, 동작 조건의 변동에 따른 사용자의 튜닝이 필요 없다.

본 논문에서는 실험을 통하여 제안된 자동 P/PI 속도 제어기의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

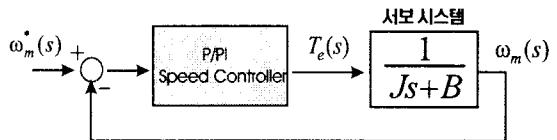


그림 1. 전체 시스템 구성도

전체 시스템 구성은 그림 1에 나타내었다. 기존의 P/PI 속도 제어기는 현재의 동작 조건에서 시스템의 동작 특성을 관찰한 다음, 최적의 절환점을 판단한다. 제안된 자동 P/PI 속도 제어기에서 주목할 만한 것은 시간 영역에서 다루는 것이 아니라 주파수 영역에서 다루었다는 점이다. 그림 2는 서보 시스템의 보드 선도를 나타낸다.

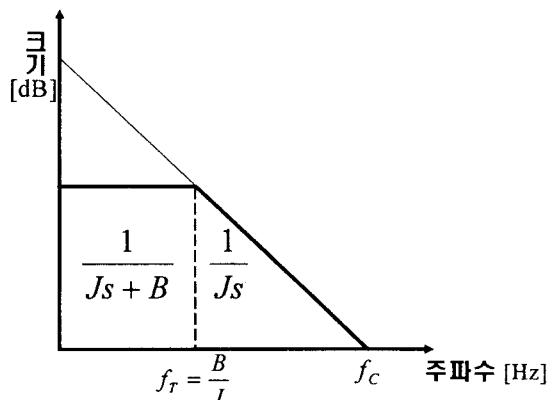


그림 2. 서보 시스템의 보드 선도

표 1. f_T 를 기준으로 한 전달 함수

$$\text{저주파 영역에서의 전달함수} = \frac{1}{Js + B}$$

$$\text{고주파 영역에서의 전달함수} = \frac{1}{Js}$$

그림 2에서 $f_T = \frac{B}{J}$: 절점 주파수, f_C : 교차각 주파수(crossover frequency)이다. 그림 2에서 절점 주파

수 f_T 를 기준으로 보면 왼쪽 영역은 저주파 영역, 오른쪽은 고주파 영역이라 할 수 있다. 각 영역의 전달함수는 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 만약 고주파 영역에서 PI 제어기로 운전하게 되면, I 제어기는 P 제어기에 비해 동작이 느리기 때문에, I 제어기에 의한 오차가 쌓이게 되어 오버슈트가 발생하게 된다[3-4]. 고주파 영역은 시간 영역에서 보면 속도 또는 토크가 증가하거나 감소하고 있는 구간이고, 저주파 영역은 정상상태에 이르거나 혹은 속도나 토크의 가감이 적은 구간이라고 볼 수 있다.

그러므로 저주파 영역에서는 PI 제어기, 고주파 영역에서는 P 제어기로 제어 가능하다는 것을 알 수 있다.

그리고, 토크 지령의 주파수 성분을 분석하여 절환점을 찾을 수만 있다면 자동으로 P/PI 절환을 할 수 있게 된다. 본 논문에서는 주파수 스펙트럼 분석을 이용한 절환점을 찾는 방법을 제안한다.

2.2 실시간 토크 주파수 분석

지령 토크의 주파수를 분석하기 위해서 이산 토크 데이터 입력에 대해 DFT(Discrete Fourier Transform)를 행하였다[5-6]. DFT를 수행하면 각 토크 데이터에 대한 주파수 값을 얻을 수 있다. DFT의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} T_n^*[n] e^{-j(2\pi/N)kn} \quad (1)$$

단, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

여기서 N : 샘플링 개수, T_n^* : 이산 토크 데이터, $X[k]$: 주파수 분석 결과 값이다. DFT는 계산 시간이 오래 걸리므로 계산 시간을 줄이기 위해서 FFT(Fast Fourier Transform)로 실시간 주파수 분석을 행하였고, zero padding하여 주파수 분석 값의 정밀도를 향상시켰다.

지령 토크의 주파수 분석을 수행한 다음, 현재 토크 지령 주파수가 얼마만큼 절환점에 가까워 졌는지를 판단하기 위해서 식 (2)와 같이 절점 주파수 f_T 이상의 주파수가 전체 주파수의 어느 정도 비율인지를 나타내는 Spectral Energy Ratio R 을 정의한다.

$$R = \frac{\sum_{k=N_T}^{N_c} |X[k]|^2}{\sum_{k=0}^{N_c} |X[k]|^2} \times 100 [\%] \quad (2)$$

$$N_C = \text{int}\left(\frac{f_c}{f_s} N\right) \quad N_T = \text{int}\left(\frac{f_T}{f_s} N\right) \quad (3)$$

$$\left| \frac{1}{J_S} \right|_{s=2\pi f_c} = 1 \quad (4)$$

여기서 f_s : 샘플링 주파수, N_T : 절점 주파수 일 때의 데이터 색인, N_C : 교차각 주파수 일 때의 데이터 색인이다.

2.3 절점 주파수 설정

산업용 서보 모터에서 관성 J 는 초기에 추정을 하여 알아 내는 반면, 마찰 B 의 값은 추정을 하지 않는다.[1-2]. 그러므로 본 논문에서는 절점 주파수 f_T 의 최

대 값과 최소 값을 찾기 위해서 표 2와 같은 조건에서 절점 주파수의 최대·최소 값을 구하였다.

표 2. 최소 마찰 B_{min} 과 최대 마찰 B_{max} 의 기준

$B_{min} = 0$
$B_{max} = \text{정격 토크의 } 50[\%]$

서보 모터에서 마찰을 정격 토크의 50[%]이상이 되게 설계하는 경우는 없다. 왜냐하면 마찰이 전체 토크의 절반을 차지하기 때문에 서보 모터가 제대로 된 동작을 할 수 없다. 그러므로 최대 마찰 B_{max} 값을 표 2와 같이 결정한 것은 현실적인 측면에서 적절하다. 표 2의 조건에서 여러 서보 모터들의 절점 주파수를 알아본 결과 약 55[Hz]를 넘지 않았다. 그러나 식 (3)에 의해서 N_T 를 구하면 N_T 는 1이 되어, 식 (2)의 분자와 분모의 값이 거의 같게 된다. 즉, 절점 주파수 f_T 를 55[Hz]로 해서 R을 구하면, 분해능이 너무 낮아, 적절한 절환점을 찾을 수 없다. 그러므로 실제 실험에서는 절점 주파수 f_T 를 N_T 가 적어도 3이 되는 값인 120[Hz]로 설정하였다.

그리고, R의 값이 50[%] 이상이 되면 PI 모드에서 P 모드로 절환하도록 하였다. 다시 말해서 $0 < f < f_T$ 인 구간은 PI 모드, $0 < f < f_C$ 인 구간은 P 모드로 동작하게 하였다. f_C 의 값은 식 (4)에서 간단히 얻을 수 있다.

3. 실험 결과

본 논문의 타당성을 검증하기 위해 400[W] 서보모터로 실험을 수행하였다. 스위칭 주파수는 10[kHz], 프로세서는 TMS320VC33, 120[MHz]를 사용하였고, 전류 제어기와 속도 제어기의 샘플링 타임은 각각 50[us]와 200[us]로 설정 하였다. 그리고 토크 데이터의 수 $N=128$ 개, 부하관성은 모터 자체관성의 5배를 연결하였다.

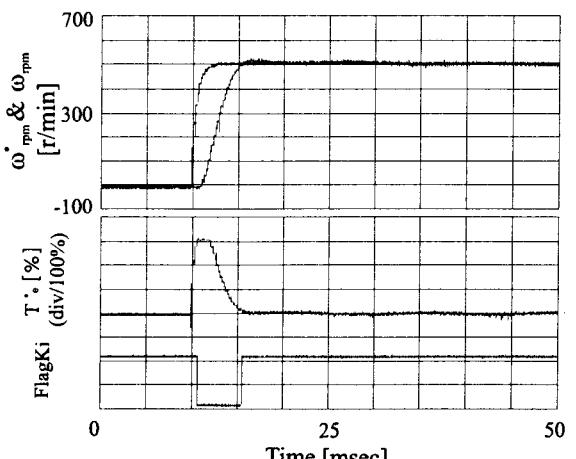


그림 3. 기준 P/PI 속도 제어기: 500(r/min) 스텝 속도지령

그림 3은 실제 속도와 속도 지령, 토크 그리고 FlagKi를 나타내고 있다. FlagKi는 현재 속도 제어기가 P 모드인지 PI 모드 인지를 표시한다. 즉, P 모드이면 FlagKi는 0이 되고 PI 모드이면 FlagKi는 1이 된다. 그림 3은 오

랜 시간을 소요하여 서보 시스템의 속도 동작 특성을 관찰, 여러 차례의 튜닝을 거쳐 최적의 절환점을 찾아서 실험하였다.

그림 4는 그림 3과 동일한 속도 조건에서 가속시간만 그림 3보다 더 느리게 조정하여 실험한 경우이다. 그림 3에서 여러 번의 튜닝 작업을 거쳐 사용자에 의해 결정된 절환점에서는 그림 4와 같이 운전 조건이 바뀌게 되면 오버슈트가 발생한다. 그러므로 기존 P/PI 속도 제어기는 그림 3에서 그림 4에서와 같이 운전 조건이 바뀌게 되면, 사용자가 다시 속도 특성을 관찰하여 절환점을 설정해 주어야 한다. 이는 사용자에게는 상당히 번거로운 작업이다.

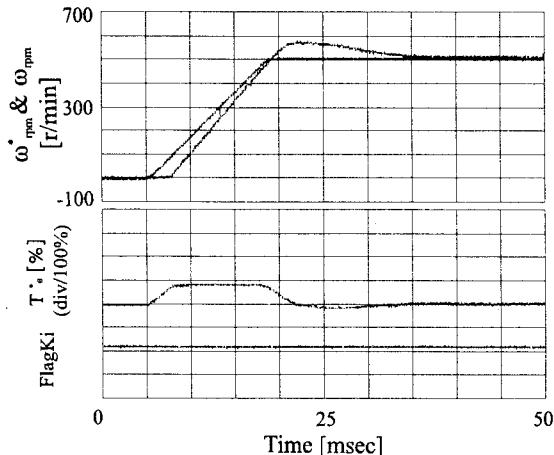


그림 4. 기존 P/PI 속도 제어기: 500(r/min) 램프 속도 지령

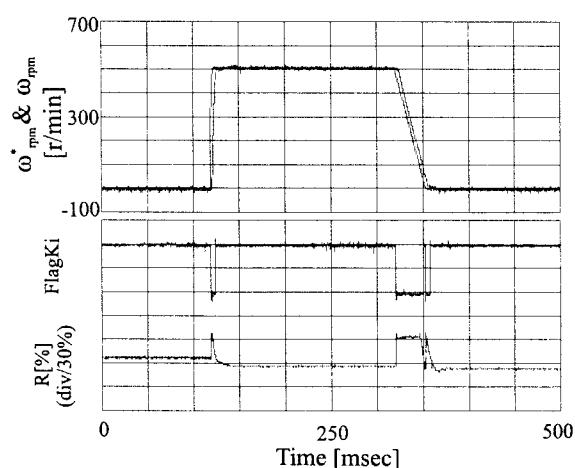


그림 5. 제안된 자동 P/PI 속도 제어기: 500(r/min) 가속 시간과 감속 시간을 다르게 설정한 경우

그림 5는 속도 지령과 실제 속도, FlagKi 그리고 Spectral Energy Ratio R을 나타내고 있다. 그림 5는 제안된 자동 P/PI 속도 제어기로써 아무런 튜닝 작업을 하지 않았고, 기존 P/PI 속도 제어기와 비교하기 위해서 가속시간과 감속시간을 달리하여 500[r/min]으로 운전한 경우이다. 가속 시간과 감속 시간을 다르게 하여 변화를 주었지만 기존 P/PI 속도 제어기와 비교하여 볼 때 오버슈트가 거의 발생하지 않는다. 그림 3과 그림 4에서 보면 가속 시간을 증가시켜 설정하였을 때는 오버슈트가 발생하는 반면, 제안된 P/PI 속도 제어기에서는 아무런

튜닝 작업을 하지 않고, 가감속 시간에 변화를 주어도 오버슈트가 거의 발생하지 않는다.

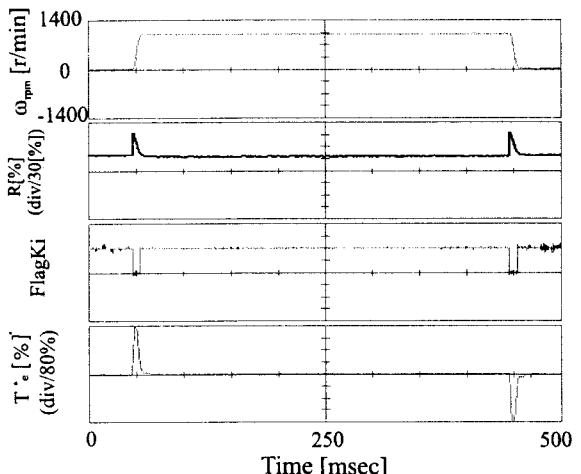


그림 6. 제안된 자동 P/PI 속도 제어기: 1000(rpm) 스텝 속도 지령

그림 6은 실제 속도, Spectral Energy Ratio R, FlagKi 그리고 토크를 나타내고 있다. 속도 변화에 대해 적절한 동작을 하는 것을 검증하기 위해 그림 5의 경우보다 속도를 2배 더 증가시킨 1000[rpm]의 조건에서 실험한 것이다. 속도 지령에 변화를 주었지만 속도 응답에서 오버슈트가 거의 발생하지 않는다. 이는 주파수 분석을 통하여 변화된 운전 조건에 대한 적절한 절환점을 제안된 자동 P/PI 속도 제어기가 자동적으로 찾아 내어 모드를 절환하였기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 P/PI 절환 기법의 문제점을 보완하여 속도 지령의 변화, 가감속 시간의 변화, 부하 변동 등에 강인한 자동 P/PI 속도 제어기를 제안하였다.

기존 P/PI 속도 제어기가 시간 영역에서 문제점을 해결하려면 반면, 제안된 자동 P/PI 속도 제어기는 주파수의 관점에서 접근하여 기존 P/PI 속도 제어기 보다 효율적일 뿐만 아니라 사용자로 하여금 번거로운 튜닝 작업으로부터 벗어나게 해 주었다. 제안된 자동 P/PI 속도 제어기는 토크 지령의 주파수를 분석하여 Spectral Energy Ratio의 값을 기준으로 하여 자동적으로 절환하게 된다. 서보 모터 400(W)에 적용, 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Sigma II Series Servo System User's Manual. Yaskawa Electric America, Inc., 2000.
- [2] MELSERVO J2-Super Series Instruction Manual. Mitsubishi Electric, 2001.
- [3] George Ellis, *Control System Design Guide*. Academic Press, 2001.
- [4] K. J. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America, pp.120-200, 1995.
- [5] James H. McClellan, Ronald W. Schafer, and Mark A. Yoder, *DSP First: A Multimedia Approach*. Prentice Hall, pp.320-377, 1999.
- [6] Dimitris G. Manolakis, Vinay K. Ingle, and Stephan M. Kogon, *Statistical and Adaptive Signal Processing*. McGraw Hill, pp.195-225, 2000.