

# 산업용 서보 구동 시스템을 위한 자동 P/PI 속도 제어기 설계

論 文

52B-12-5

## Automatic P/PI Speed Controller Design for Industry Servo Drives

裴 祥 圭\* · 石 雋 基\*\* · 金 慶 泰\*\*\* · 李 東 椿§

(Sang-Gyu Bae · Jul-Ki Seok · Kyung-Tae Kim · Dong-Choon Lee)

**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.

**Key Words** : P/PI speed controller, Servo drives, Frequency content of motor torque command, Automatic P/PI control mode switching, Windup

### 1. 서 론

산업 현장에서는 오래 전부터 임의의 시스템을 제어하는데 비교적 간단하면서도 효과적인 PI 형태의 제어 구조가 널리 사용되어 왔다. 특히, PI (Proportional-Integral) 제어기는 시스템 혹은 플랜트(Plant)의 모델링에 대한 정보가 불확실하거나 모델 상수가 가변적인 경우에도 제어기 이득(Gain)의 적절한 설정에 의해서 안정적인 성능을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이러한 PI 형태의 제어기는 적분기의 누적(Windup) 현상에 의해서 응답이 정상상태 도달 시에 오버슈트(Overshoot)/언더슈트(Undershoot)를 유발하고, 이로 인해 과도 응답 특성이 저해되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 도입된 것이 누적방지(Anti-windup) 기법이다. 기존의 연구에 의해서 이미 소개된 기법만도 종류가 매우 많은데, 그 중에서 대표적인 것으로는 제어기 출력이 포화(Saturation)될 때와 같이 어떤 특정 조건이 될 경우만 적분기 동작을 멈추는 Conditional Integration, 적분기 출력이 규정된 값 이상으로 증가할 때만 동작하는 Limited Integration, 그리고 가장 널리 사용되는 방법으로는 적분기 출력과 제한(Limit) 출력 사이의 차이를 적분기에서 빼주는 Tracking Anti-windup 등이 있다[1-3]. 그러나, 이러한 방법들 중 일부는 적분기가 포화될 때만 동작하기 때문에 포화되지 않은 경

우의 누적 현상에 대해서는 여전히 문제점을 가지고 있다. 이보다 좀 더 복잡한 구조의 누적방지 기법들은 별도의 설정 정수로 Dead Zone 범위나 누적방지 이득 등이 있어서 이 값의 설정 방법에 따라 성능이 변동하는 문제가 있고, 구체적인 설정 방법도 알려져 있지 않다.

산업용 서보 제어기와 같이 위치 제어를 수행하는 시스템에서는 오래 전부터 적분기에 의한 누적 현상을 방지하기 위하여 특정 조건이 만족될 때에 P 제어기와 PI 제어기를 절환하는 일종의 Conditional Integration 기법을 사용하여 왔다. 이러한 방법에서 가장 중요한 것은 절환 조건과 절환 시점이다. 산업용 서보 시스템에서는 절환을 위한 변수로는 흔히 토오크 지령, 속도 지령 및 위치 오차 등을 주로 사용하고, 이 변수들의 값이 규정된 값 이상이 될 경우에 P 제어기로 절환하는 방법을 사용하고 있다[4-5]. 이 방법은 비교적 구현이 간단하고, 복잡한 기계적 구조를 가지는 미지의 기계에 대한 튜닝을 사용자에게 맡기는 특징이 있다. 그러나, 일반 사용자에게 토오크 지령, 속도 지령 등에 대한 물리적 인식이 부족한 경우가 대부분이고, 절환 값을 설정하려면 기계 시스템이 설치된 산업 현장에서 전동기 과도 상태 속도나 위치 파형을 반복적으로 관찰해야 하는 문제가 발생한다. 이는 시스템 초기 설치 시간을 증가시킬 뿐만 아니라, 반복되는 실험에 의해서 현장 기계에 전기적 혹은 기계적 충격이 가해지는 사고로 연결되기도 한다. 또한, 특정 위치 지령에서 잘 동작하는 절환 값이 다른 위치 지령에서는 제어기 절환이 일어나지 않는 등의 문제를 발생하기 때문에 전 운전 영역에서 동작하는 조건을 찾는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 사용자의 수고 없이도 자동으로 P/PI 제어기가 절환될 수 있는 알고리즘을 제시하고자 한다. 이를 위하여 제어 대상 시스템을 주파

\* 準 會 員 : 嶺南大學 電氣工學科 碩士課程

\*\* 正 會 員 : 嶺南大學 電子情報 工學部 助教授 · 工博

\*\*\* 非 會 員 : 嶺南大學 電子情報 工學部 傳任講師 · 工博

§ 正 會 員 : 嶺南大學 電子情報 工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2003年 6月 23日

最終完了 : 2003年 10月 26日

수 영역에서 분석하여 P/PI 절환 원리를 파악하고, 토오크 지령의 주파수 성분에 따라 자동으로 제어기 절환이 일어나도록 하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과 제시된 알고리즘은 운전 영역에 상관없이 일관된 제어 특성을 보이고, 성능 면에서도 속도 응답의 오버슈트를 최소화 할 수 있었다. 제안된 알고리즘을 이용하면 공장 준설 초기에 대량 설치되는 서보 시스템의 설치 시간을 단축시킬 수 있으리라고 생각된다. 본 논문에서는 400W 서보 구동 시스템을 대상으로 실험을 통하여 제안된 자동 P/PI 속도 제어기의 타당성을 검증하였다.

## 2 이론적 배경

그림 1은 P/PI 속도 제어기 출력인 토오크  $T_e(s)$ 을 입력으로 받아서 속도  $\omega_m(s)$ 를 출력하는 전체 서보 시스템의 구성도이다. 산업 현장에서 사용하는 서보 시스템은 일반적으로 그림 1과 같이 마찰  $B_m$ 과 관성  $J_m$ 으로 구성되는 1차 시스템으로 간략히 모델링되기 때문에, PI 제어기만 사용하여도 효과적인 동작 특성을 얻을 수 있다[6].

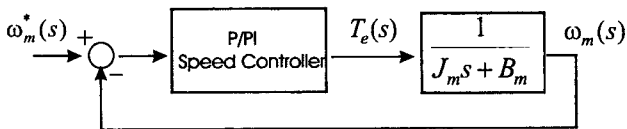


그림 1 P/PI 속도 제어기 전체 시스템 구성도  
Fig. 1 Block diagram of P/PI speed control system

마찰과 관성으로 구성되는 1차 서보 시스템에 대해서 보드 선도를 도시해 보면 그림 2와 같다. 절점 주파수  $f_T$ 를 기준으로 좌측 영역의 전달함수는  $\frac{1}{J_m s + B_m}$ 로 볼 수 있지만, 절점 주파수의 우측 영역은 마찰  $B_m$ 이 없는  $\frac{1}{J_m s}$ 로 볼 수 있다. 즉, 절점 주파수를 기준으로 해서 시스템이  $\frac{1}{J_m s + B_m}$ 에서  $\frac{1}{J_m s}$ 로 변화하였다는 것을 알 수 있다.

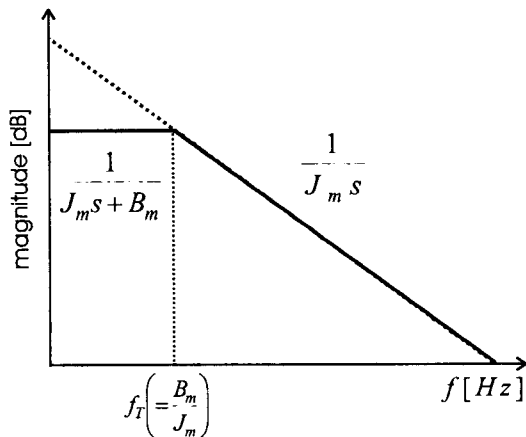


그림 2 1차 서보 시스템에 대한 보드 선도  
Fig. 2 Frequency response of first order servo system

시스템이  $\frac{1}{J_m s}$ 일 경우는 P 제어기만으로도 제어가 가능하다

므로, 좌측영역에서는 PI 제어기로 우측 영역에서는 P 제어기로 운전하는 것이 타당하다. 또, 절점 주파수를 기준으로 해서 고주파 영역과 저주파 영역으로 나눈다면 좌측 영역은 저주파 영역, 우측 영역은 고주파 영역이 된다. 과도 상태 즉, 속도 또는 토오크가 급격히 증가 또는 감소할 경우 I 제어기의 느린 동작 특성에 의해 오차가 누적 되어서 오버슈트가 발생하므로 고주파 영역에서 I 제어기는 가급적 사용하지 않는 것이 좋다. 이와 같이, 저주파 영역에서는 PI 제어기로, 고주파 영역에서는 P 제어기로 운전하는 것이 서보 시스템 속도 응답의 오버슈트를 감소시킨다. 이러한 관점에서 볼 때, P 제어기와 PI 제어기를 절환하는 Conditional Integration의 일종인 P/PI 절환 제어 기법은 오버슈트를 줄이는 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 그러나, 산업용 서보 구동 시스템에서 널리 사용되는 기존의 P/PI 속도 제어기는 특정 운전 조건에서 사용자의 정밀한 튜닝을 거치면 오버슈트가 거의 없는 응답을 얻을 수 있지만, 가속속, 속도 지령, 부하 조건 등 운전 조건이 바뀌게 되면 다시 오버슈트가 발생하는 문제점을 가지고 있다. 그림 3 과 그림 4에서 이에 대해 설명하고 있다.

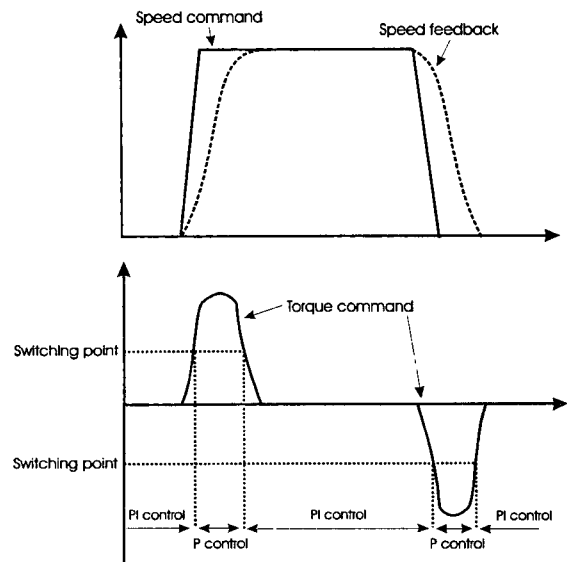


그림 3 기존 P/PI 속도 제어기의 동작 예(1)  
Fig. 3 Operating example of conventional P/PI speed control scheme (1)

그림 3은 기존의 P/PI 속도제어기에서 토오크 지령을 기준으로 한 절환점을 결정하는 방법에 대한 예이다. 그림 3에서와 같이 속도 지령이 주어진 경우, 현재 토오크 지령의 임의의 점에서 절환점을 선정하면 이 시점을 기준으로 P 제어기와 PI 제어기가 서로 절환된다. 오랜 시간 튜닝을 통해서 그림과 같이 오버슈트가 거의 발생하지 않는 절환점을 그림 3과 같이 찾을 수 있다. 이 방법은 주어진 운전 조건에 대한 최적의 응답을 제공하지만, 튜닝 시간이 매우 길고 그림 4와 같이 운전 조건이 변동하면 속도의 과도 응답 특성이 저해된다.

그림 4와 같이 속도의 가속시간을 느리게 바꾸면 가속 시점의 토오크 지령이 변동하게 되고, 기존의 고정된 절환점에

의해서는 오버슛이 발생하게 되는 것을 볼 수 있다. 즉, 그림 3에서 설정된 절환점을 기준으로 할 경우에는 PI 제어기로만 동작하여 적분기 누적 현상에 의한 오버슛이 발생함을 확인할 수 있다. 물론, 이 경우 기존의 여러 누적 방지 기법을 병용할 수 있지만, 이 방법들 또한 운전 조건에 따라 누적방지 이득 (Anti-windup Gain)을 바꾸지 않으면 속도 응답의 오버슛과 긴 정착 시간(Settling Time)을 제거할 수 없다.

또한, 서보 전동기의 경우 관성/토크의 비가 매우 작기 때문에 약간의 누적 현상에 의한 토크가 발생하여도 속도 응답에는 큰 오버슛을 초래한다.

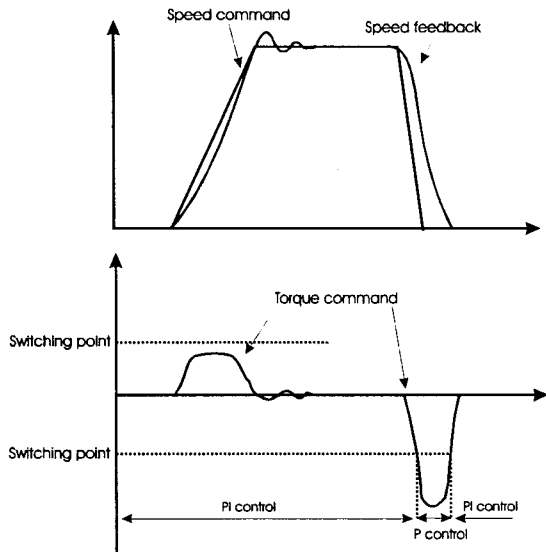


그림 4 기존 P/PI 속도 제어기의 동작 예(II)  
 Fig. 4 Operating example of conventional P/PI speed control scheme (II)

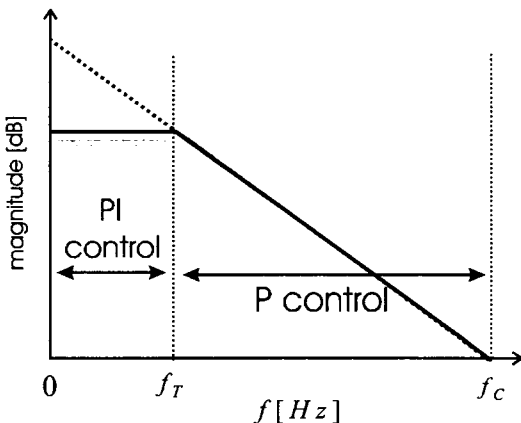


그림 5 주파수 영역에서 본 P/PI 속도 제어기 절환 기준  
 Fig. 5 Illustration of P/PI speed controller switching reference in the frequency domain

이와 같이, 기존의 P/PI 속도 제어기는 속도 지령, 부하 조건, 가감속 시간 등이 바뀌게 되면 다시 튜닝을 하든지 혹은 시스템 응답의 특성 저하 문제를 감수하고 운전해야만 하는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 기존의 P/PI 속도 제어기가 시간 영역(Time Domain)에서 속도 지령, 토크 지령, 위치 오차 등을

기준으로 절환점을 결정하기 때문에 발생하는 것이다.

제안된 P/PI 속도 제어기는 속도 제어기 출력인 토크 지령의 주파수 분석을 통하여 자동적으로 제어기 모드를 P 모드에서 PI 모드로 또는 상황에 따라서 그 역으로 바꾸어 튜닝 작업의 번거로움을 제거한다.

그렇게 하기 위해서는 지령 토크의 주파수 분석을 수행하고 지령 토크가 절점 주파수를 기준으로 그림 5와 같이 고주파 성분이면 P 제어기로, 저주파 성분이면 PI 제어기로 절환하면 된다.

### 3. 실시간 토크 지령 주파수 분석

지령 토크의 주파수를 분석하기 위해서 이산 토크 데이터(Discrete Torque Data) 입력에 대해 DFT(Discrete Fourier Transform)를 행하였다[7-8]. DFT를 수행하면 시간 영역의 각 토크 데이터에 대한 주파수 영역에서의 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  $N$ 은 샘플링 개수,  $T_n^*$ 은 이산 토크 데이터,  $X[k]$ 는 주파수 분석 결과 값이다. DFT는  $N^2$  번의 곱셈과  $N(N-1)$  번의 덧셈을 행하여야하기 때문에 계산 시간이 많이 소요 된다. 계산 시간을 줄이기 위해서 FFT(Fast Fourier Transform)로 실시간 주파수 분석을 행하였고, Zero Padding 하여 주파수 분석 값의 정밀도를 향상시켰다[7-8].

일반적으로 속도 제어기 출력인 토크 지령은 넓은 범위의 스펙트럼을 가진다. 즉, 매 순간 토크 지령에는 고주파 성분과 저주파 성분이 동시에 포함되어 있다. 따라서, 주어진 시점에서의 토크 성분의 지배적인 주파수 성분을 판단하기 위하여 식 (2)와 같은 Spectral Energy Ratio R을 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,  $f_s$ 는 샘플링 주파수(Sampling Frequency),  $f_c$ 는 교차각 주파수(Crossover Frequency),  $N_T$ 는 절점 주파수일 때의 데이터 색인(index),  $N_C$ 는 교차각 주파수일 때의 데이터 색인이다. 교차각 주파수  $f_c$ 는 식 (4)에 의해서 쉽게 얻을 수 있다. 식 (2)에 정의된 Spectral Energy Ratio R은 절점 주파수  $f_T$  이상의 주파수가 전체 주파수 영역에서 어느 정도 비율인지를 나타내는 것이다.

#### 4. 실제 구현시 고려 사항

##### 4.1 포화 영역에서의 동작

일반적으로 제어기 출력단에는 정격 출력 범위를 넘어서지 않게 하기 위한 제한기(Limiter)를 실장한다. 그림 6과 같이 서보 시스템 운전 초기에는 속도 오차 값이 크므로 제어기 출력인 토크 지령은 순간적으로 증가하여 제한기에 의해서 포화된다. 이렇게 되면 포화 영역에서 토크 곡선은 실제로는 아직 고주파 영역에 있음에도 불구하고 마치 저주파 영역에 있는 것으로 판단하게 되어 PI 제어기 모드로 동작하게 된다. 이를 방지하기 위해서 포화 되었을 경우에는 P 제어기 모드를 유지하도록 내부 알고리즘을 구현 하였다.

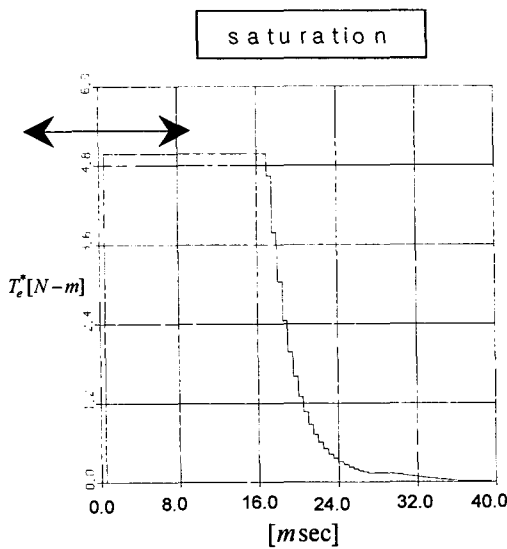


그림 6 토크 지령이 포화 되었을 경우의 예  
Fig. 6 Example of torque command trajectory with saturation region

##### 4.2 절점 주파수 선정

현재 상용으로 시판되고 있는 모든 산업용 서보 구동 장치는 모터의 관성을 초기에 온라인 또는 오프라인 방식으로 추정을 하여 알아내지만, 마찰 계수의 값을 추정하지 않는다. 따라서, 식 (5)에서 주어지는 절점 주파수의 값을 알 수 없다.

$$f_T = \frac{B_m}{J_m} \quad (5)$$

대부분 서보 구동 시스템 설계에 있어서 정격 속도에서 마찰에 의한 부하 토크는 경험적으로 정격 토크의 30%를 넘지 않도록 설계 한다. 본 논문에서는 가능한 절점 주파수의 최대 값을 구하기 위해서 최대 마찰  $B_{max}$ 을 정격 토크의 50%로 설정하고, 최소 모터 관성은 모터 자체 관성으로 설정 하였다.

이상의 조건에서 상용 30W~15kW 서보 모터들의 절점 주파수를 알아본 결과 최대 값은 55[Hz]를 넘지 않았다. 이 값과 본 논문에서 주어진 스위칭 주파수 10kHz, 데이터 개수 128을 대입하면 식 (3)에 의해서  $N_T$ 는 1이 되므로 R의 분해능이 매우 낮게 된다. 그러므로, 본 논문에서는 최대 절점 주파수와 가까우면서도 R의 분해능을 높이기 위해 절점 주파수를 120 [Hz]로 설정하였다. 절점 주파수를 120 [Hz]로 설정한 경우, 그림 7과 같이 주파수 영역에서는 실제 절점 주파수와 비교해서 차이가 크게 나타나 보이지만, 시간 영역에서 보면 약간의 오차가 있을 뿐 그 차이는 극히 작다. 이상의 설정이 현실적으로 큰 문제가 없음을 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

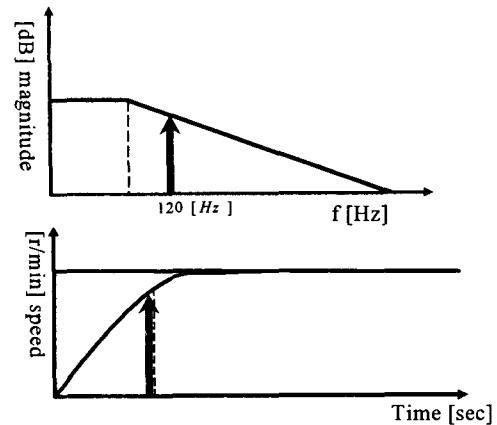


그림 7 시간 영역에서  $f_T$ 와 주파수 영역에서  $f_T$  선택의 차이 비교

Fig. 7 Influence for selection of break frequency in frequency and time domain

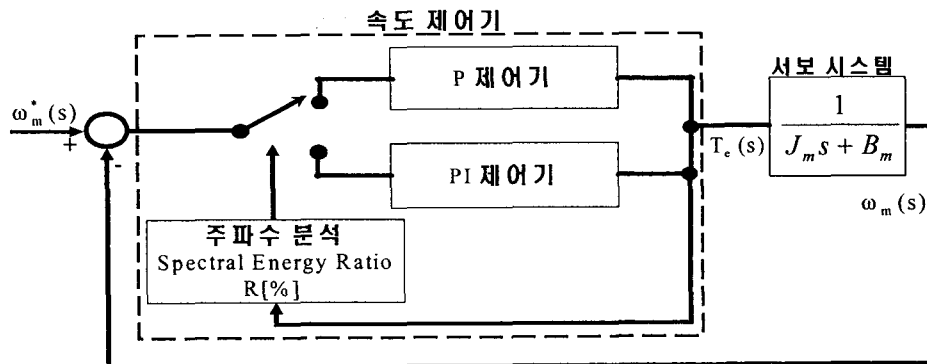


그림 8 제안된 서보 시스템 블록도  
Fig. 8 block diagram of proposed P/PI speed

따라서, 주어진 절점 주파수 120Hz에 대해서 식 (6)과 같이 R의 값이 50% 이상이 되면 고주파 영역에 현재 토오크 지령 주파수가 존재한다고 판단하여 PI 모드에서 P 모드로 전환 하도록 하였다. 다시 말해서  $0 < f < f_T$  인 구간은 PI 모드,  $f_T < f < f_C$  인 구간은 P 모드로 동작하게 하였다.  $f_C$ 의 값은 식 (4)에서 간단히 얻을 수 있다.

$$R \geq 50[\%] \tag{6}$$

### 4.3 실제 시스템 구성

그림 8은 제안된 자동 P/PI 속도 제어기의 블록도이다. 제어기의 출력인 토크 지령  $T_e(s)$ 를 주파수 분석하여 앞에서 설명한 Spectral Energy Ratio R [%]을 기준으로 해서 P 제어기 모드로 운전할 것인지 PI 제어기 모드로 운전할 것인지를 결정하게 된다.

## 5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 MATLAB/Simulink를 이용하였고, 사용된 서보 모터의 정격 및 상수는 표 1과 같다. 그리고 전류 제어기 샘플링 타임은 50 $\mu$ s, 속도 제어기 샘플링 타임은 200 $\mu$ s이며, 부하의 관성은 모터 자체 관성의 5배로 가정하였다. 토오크 데이터의 수 N은 128개, 설정 절점 주파수는 120Hz이다. 물론 이는 실제 모터의 절점 주파수와는 많은 차이가 있다. 기존의 P/PI 속도 제어기와 제안된 자동 P/PI 속도 제어기에 대해서 서로 다른 가속 시간을 가진 속도 지령 500 [r/min]에 대해서 비교하였다. 그림 9는 기존의 P/PI 속도 제어기에 대한 결과이다. 위에서부터 속도 지령, 실제 속도, 토오크 지령 그리고 FlagKi를 나타낸다. FlagKi는 현재 제어기 모드가 PI 모드이면 1이 되고 P 모드이면 0이 되어 현재 제어기 모드 상태를 알려주는 역할을 한다.

그림 9는 절환 변수로는 토오크 지령을 선택하였고, 속도를 계속 관찰한 후 여러 번 튜닝을 거친 결과로 주어진 운전 조건에 대해서 우수한 속도 응답을 갖는다. 그러나, 그림 10과 같이 가속 시간을 길게 하면 오버슈트가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이, 속도 지령이 변화됨에 따라 토오크 지령의 모양이 바뀌었는데도 불구하고 기존의 절환 기준점을 기준으로 절환 하였기 때문에 오버슈트가 발생한 것이다. 그림 10과 같은 경우는 사용자에게 의해서 다시 번거로운 튜닝 작업을 거쳐 아지만 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 1 서보 모터의 정격 및 상수

Table 1 Ratings and known parameters of servo motor under test

3상, 220[V], 400 [W], 8극	
정격 속도	3000 [r/min]
토오크 상수	0.332 [Nt-m/A]
관성	$3.6 \times 10^{-5}$ [Kg-m <sup>2</sup> ]
마찰계수	$1.8 \times 10^{-4}$ [Nt-m/rad/s]

그림 11은 제안한 자동 P/PI 속도 제어기의 결과이다. 위에서부터 속도 지령, 실제 속도, 토오크 지령, FlagKi 그리고 Spectral Energy Ratio R을 나타낸다. R은 식 (6)과 같이 50%로 설정하여 50%가 넘으면 PI 모드에서 P 모드로 전환하도록 하였다. 사용자의 튜닝 없이 속도 지령을 500 [r/min]로 인가하고 운전하였지만, 오버슈트가 거의 발생하지 않는 우수한 속도 응답 특성을 갖는다. 그리고 그림 12는 역시 자동 P/PI 속도제어기로서 속도 지령은 500 [r/min]을 유지하고 가속 시간을 길게 바꾼 경우이다. 기존의 P/PI 제어기와는 달리 운전 조건을 바꾸어도 오버슈트가 거의 없는 동일한 속도 응답 특성을 갖는 것을 볼 수 있다.

그림 12에서 점원 내부의 FlagKi가 PI 모드와 P 모드를 반복하는 이유는 토오크 지령이 이 구간에서 저주파 성분에서 고주파 성분으로 변동하기 때문이다.

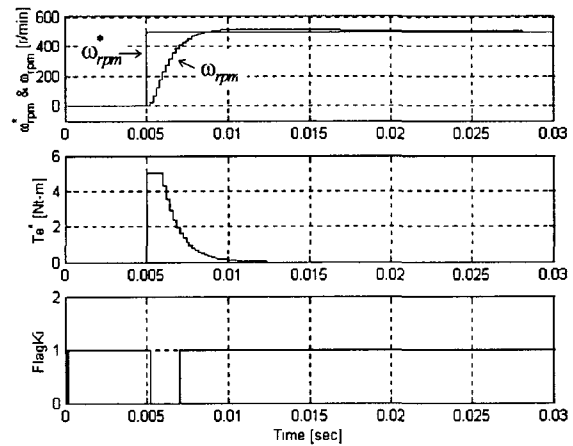


그림 9 기존 P/PI 속도 제어기 ; 500 [r/min] 스텝 속도 지령  
Fig. 9 Conventional P/PI switching scheme for 500 [r/min] step speed command

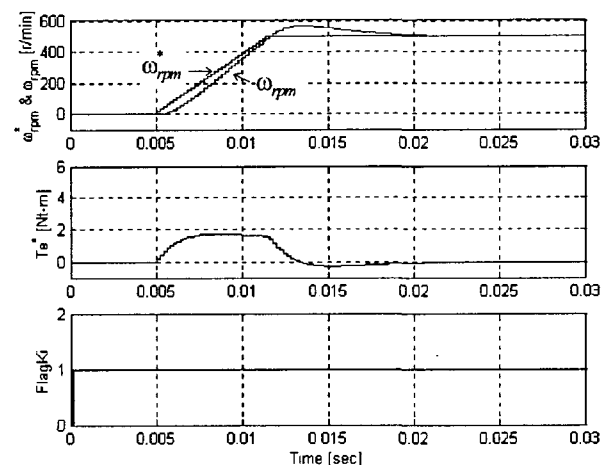


그림 10 기존 P/PI 속도 제어기 : 500 [r/min] 램프 속도 지령  
Fig. 10 Conventional P/PI switching scheme for 500 [r/min] ramp speed command

이는 기존의 P/PI 속도 제어기에서는 볼 수 없는 특성으로 자동 P/PI 속도 제어가 잘 동작하고 있음을 보여주고 있다. 또한, 절점 주파수를 실제와 다르게 120Hz 정도로 선정하여도 실제로 응답에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

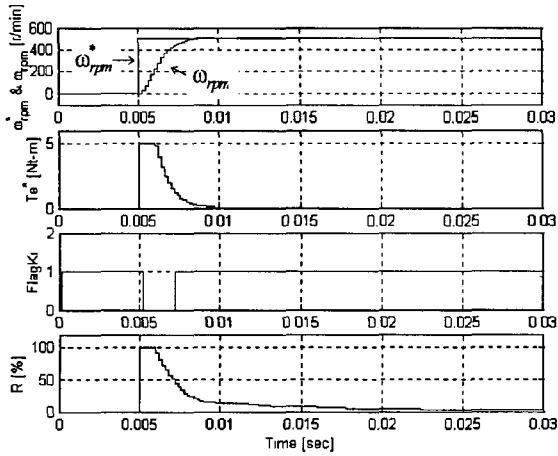


그림 11 자동 P/PI 속도 제어기 ; 500 [r/min] 스텝 속도 지령  
Fig. 11 Automatic P/PI switching scheme for 500 [r/min] step speed command

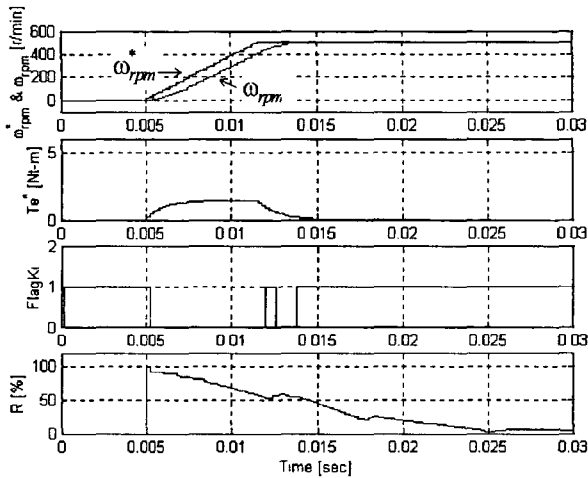


그림 12 자동 P/PI 속도 제어기 ; 500 [r/min] 램프 속도 지령  
Fig. 12 Automatic P/PI switching scheme for 500 [r/min] ramp speed command

6. 실험 결과

본 연구의 타당성을 검증하기 위해 표 1의 400 [W] 서보모터를 대상으로 실험을 수행하였다. 스위칭 주파수는 10kHz, 프로세서는 TMS320VC33, 120MHz를 사용하였고, 다른 모든 조건은 시뮬레이션과 동일하게 설정되었다.

그림 13은 실제 속도와 속도 지령, 토크 그리고 FlagKi를 나타내고 있다. 이 경우 오랜 시간을 소요하여 서보 시스템의 속도 동작 특성을 관찰, 여러 차례의 튜닝을 거쳐 최적의 절환점을 찾아 운전하였다.

그림 14는 그림 13과 동일한 속도와 조건에서 가속 시간만 그림 13보다 더 느리게 조정하여 실험한 경우이다. 그림 13에서 사용자에게 의해 여러 번의 튜닝 작업을 거쳐 결정된 절환점에서는 그림 14와 같이 운전 조건이 바뀌게 되면 오버슈트가 발생한다.

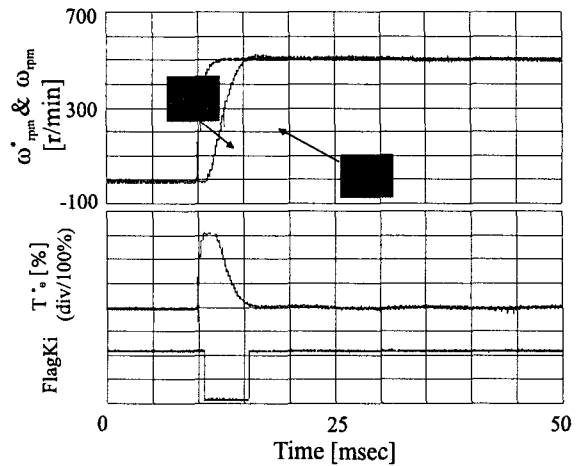


그림 13 기존 P/PI 속도 제어기; 500 [r/min] 스텝 속도 지령  
Fig. 13 Conventional P/PI switching scheme for 500 [r/min] ramp speed command

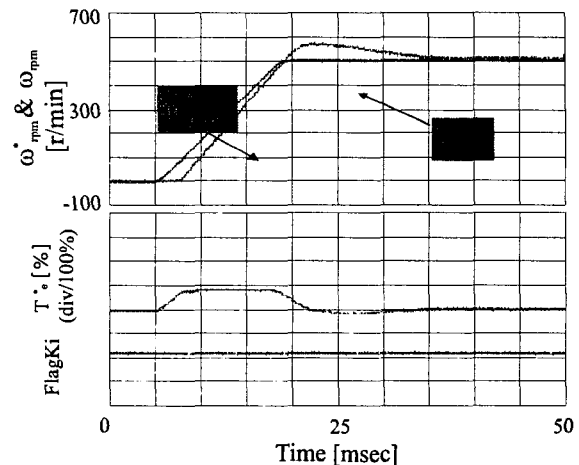


그림 14 기존 P/PI 속도 제어기; 500 [r/min] 램프 속도 지령  
Fig. 14 Conventional P/PI switching scheme for 500 [r/min] ramp speed command

그림 15는 그림 13과 동등한 조건에서 속도 지령을 1000 [r/min]으로 상승시킨 경우에 대한 파형이다. 절환 시점이 500 [r/min]에 대해서만 튜닝되었기 때문에 이 경우 가속시의 속도 응답에는 오버슈트, 감속시의 응답에는 언더슈트가 발생함을 확인할 수 있다. 따라서, 기존 P/PI 절환 방식에서는 운전 조건 변동에 따른 속도 응답 특성의 성능 저하가 발생함을 알 수 있다. 다음은 제안된 자동 P/PI 속도 제어기에 대한 실험 결과이다.

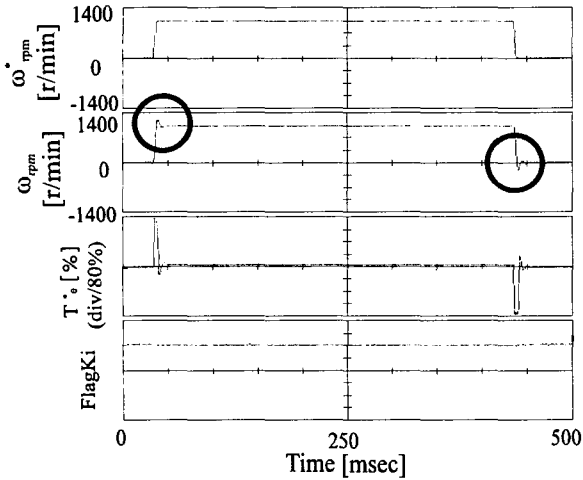


그림 15 기존 자동 P/PI 속도 제어기; 1000 [r/min] 스텝 속도 지령

Fig. 15 Conventional P/PI switching scheme for 1000 [r/min] speed command

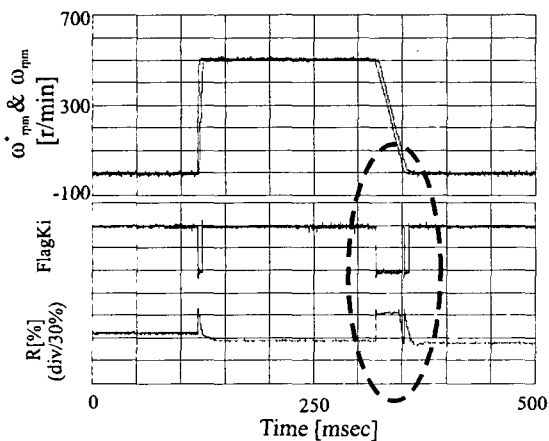


그림 16 제안된 자동 P/PI 속도 제어기; 500 [r/min] 가속 시간과 감속 시간이 다른 경우

Fig. 16 Proposed automatic P/PI switching scheme for 500 [r/min] different acceleration and deceleration time speed command

그림 16은 속도 지령의 변화에 따른 속도 응답 특성의 변화를 관찰하기 위해서 그림 13과 동일한 가속 시간과 그림 14와 동일한 감속 시간을 설정하여 속도 응답을 관찰하였다. 기존의 방법과 달리 가감속 시간이 변동하여도 아무런 튜닝 작업없이 오버슈트/언더슈트나 정착 시간의 지연이 없는 우수한 속도 응답 특성을 갖는다. 그리고, 그림 12에서와 같이 FlagKi가 PI 모드와 P 모드를 반복하는 현상을 실제 실험에서도 역시 볼 수 있다. 그림 17은 속도 지령을 500 [r/min]에서 1000 [r/min]으로 변경한 경우의 실험 결과이다. 그림 15의 기존 방식과 비교하여 가감속시에 우수한 속도 응답 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

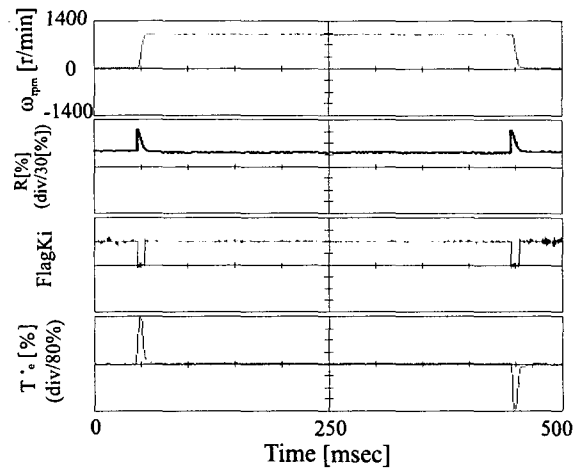


그림 17 제안된 자동 P/PI 속도 제어기; 1000 [r/min] 스텝 속도 지령

Fig. 17 Proposed automatic P/PI switching scheme for 1000 [r/min] speed command

### 7. 결 론

본 논문에서는 기존의 P/PI 속도 제어기의 문제점을 보완하여 속도 지령의 변화, 가감속 시간의 변화, 등에 강인한 자동 P/PI 속도 제어기를 제안한다. 기존의 P/PI 속도 제어기는 시간 영역의 관점에서 서보 시스템의 속도 응답 특성 문제를 해결하려 하였기 때문에, 시스템의 속도 지령, 가감속 시간 등의 변화에 따라 속도 응답의 성능 저하를 초래하는 문제점이 있다.

제안된 자동 P/PI 속도 제어기는 시간 영역의 관점이 아닌 주파수 영역의 관점에서 문제를 접근하여, 속도 제어기 출력인 토크 지령의 주파수 분석을 수행하였다. 또한, 절환 시점을 결정하기 위하여 Spectral Energy Ratio를 정의하였고, 주어진 기준 값에 이르렀을 시에는 제어기 모드를 절환하도록 하였기 때문에 시스템의 운전 조건에 상관없이 우수한 성능을 보인다. 제안된 방법은 사용자의 튜닝이 없이도 자동적으로

기준 토오크의 주파수 분석을 통해 제어기 모드를 절환하게 되므로 사용자의 편의를 증대시키고, 안정된 성능의 서보 구동 시스템 구축을 가능하게 한다.

본 논문에서는 제안된 자동 P/PI 속도 제어를 400W 서보 구동 시스템에 적용하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

**참 고 문 헌**

- [1] C. Bohn and D. P. Atherton, "An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies", *IEEE Control Systems Magazine*, April, 1995, pp. 34-40.
- [2] Y. Peng, D. Vrancic, and R. Hanus, "Anti-Windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers", *IEEE Control Systems Magazine*, Aug., 1996, pp. 48-57.
- [3] George Ellis, *Control System Design Guide*. Academic Press, 2001.
- [4] *Sigma II Series Servo System User's Manual*. Yaskawa Electric America, Inc., 2000.
- [5] *MELSERVO J2-Super Series Instruction Manual*. Mitsubishi Electric, 2001.
- [6] R. H. Bishop, *The Mechatronics Handbook*. CRC Press, 2002.
- [7] James H. McClellan, Ronald W. Schafer, and Mark A. Yoder, *DSP First: A Multimedia Approach*. Prentice Hall, pp.320-377, 1999.
- [8] Dimitris G. Manolakis, Vinary K. Ingle, and Stephan M. Kogon, *Statistical and Adaptive Signal Processing*. McGraw Hill, pp.195-225, 2000.

**저 자 소 개**



**배 상 규(裴祥圭)**

1975년 5월 27일생. 2002년 영남대학교 전자정보공학부 졸업(학사). 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.  
Tel : 053-810-3997  
E-mail : bikebae@hanmail.net



**석 줄 기(石 雋 基)**

1969년 3월 29일생. 1992년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1998년~2001년 삼성전자 생산 기술센터 자동화연구소 책임연구원. 현재 영남대학교 전자정보공학부 조교수.  
Tel : 053-810-2484, E-mail : doljk@yu.ac.kr



**김 경 태(金慶泰)**

1970년 4월 15일생. 1994년 포항공대 전자전기공학과 졸업 1996년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(공학박). 1999년~2000년 포항공대 전자전기공학과 연구원. 2001년 포항공대 전자전기 공학과 연구교수. 현재 영남대학교 전자정보 공학부 전임강사. Tel : 053-810-2492  
E-mail : junorf@yumail.ac.kr



**이 동 춘(李東椿)**

1963년 2월 20일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1988년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1998년 미국 Texas A&M Univ. 방문연구교수. 현재 영남대 전자정보공학부 부교수. 전력 전자 학회 편집 위원. Tel : 053-810-2582  
E-mail : dclee@yu.ac.kr