

# AC서보 SPMSM의 PI 및 I-P 제어기 설계에 대한 고찰

박효원, 김형준, 김경미, 최명수, 김태웅  
경상대학교

## Study on PI and I-P controller Design of AC Servo SPMSM

Hyo won Park, Hyeong jun Kim, Kyung mi Kim, Myeong soo Choi, Tae woong Kim  
Gyeongsang National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 SPMSM의 속도 및 전류제어기를 PI 혹은 I-P제어기를 조합한 네 가지 형태의 제어시스템으로 구성하여 서보시스템에 가장 적합한 형태의 제어시스템 구성과 설계기법을 도출하고, 시뮬레이션 해석을 통해 유효성을 검증한다.

### 1. 서론

서보시스템을 더 빠르고 정밀하게 제어하기 위한 기술개발 연구와 함께 응용 산업분야의 기계특성에 맞는 다양한 형태와 기능의 서보제어기술이 전 분야에 걸쳐 이루어지고 있다. 생산성을 향상시키기 위해서는 빠른 가감속 능력을 갖춘 구동장치가 필수적이며, 순간적인 부하변동에도 빠른 추종성을 갖도록 해야 한다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 서보시스템의 속응성 개선을 위해 PI 및 I-P 제어기를 비교 검토하여, SPMSM의 속도제어기와 전류제어기를 PI 및 I-P제어기를 조합한 네 가지 형태로 구성하여 안정성과 제어성능을 검증하여 서보시스템에 가장 적합한 형태의 제어시스템을 도출하고, PI 및 I-P제어기의 설계기법을 고찰한다.

### 2. 제어시스템의 구성

서보시스템은 위치제어기, 속도제어기, 전류제어기로 구성되며, 내부제어기가 외부제어기에 비해 충분히 빠르다면 각 제어기를 독립적으로 설계할 수 있어 설계가 용이하다. 각 제어기의 대역폭이 근접하게 되면 상호 간섭에 의해 특성 해석과 설계가 난해해지므로 제어기 간의 관계를 고려하여 각 요소의 게인을 설정해야 한다.<sup>[2]</sup>

본 논문에서는 속도제어기와 전류제어기의 중심으로 표 1과 같이 PI 및 I-P제어기를 조합한 4종류로 구성하여 서보시스템에 가장 적합한 제어기 구성을 도출하고자 한다. case 1의 경우가 서보제어시스템의 제어기 구성형태로 많이 사용된다.

제어시스템 구성형태에 따른 전체 시스템의 안정도와 성능을 근계적법과 단위계단응답을 이용하여 검증한 결과 case3, case4는 서보시스템제어기로 부적합하여 본 논문에서는 case1과 case2를 중심으로 검토하였다.

표 1 SPMSM제어시스템 구성 4가지

		current controller	
		PI	I-P
speed controller	PI	case 1	case 3
	I-P	case 2	case 4

### 3. 속도제어기의 PI 및 I-P제어기의 비교

전동기의 속도제어기는 일반적으로 PI제어기 형태가 사용되고 있으며, PI제어기 설계 시에는 시스템의 안정성 및 신뢰성

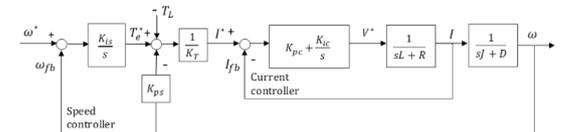
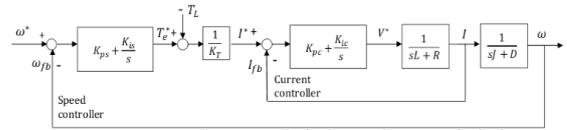


그림 1 속도 및 전류제어기의 형태에 따른 제어시스템 구성

을 확보하기 위해서 과도상태에서 오버슈트를 작게 설계하여야 한다.<sup>[3]</sup> 식(4)의 분자항에 존재하는 영점의 영향에 의해 계단적인 속도지령이 인가될 경우 오버댐핑으로 설계되어 있더라도 진동적인 응답이 나타나게 되는데, 이와 같은 현상은 속도제어 성능저하의 원인이 된다. 속도 PI제어기의 페루프전달함수는 식(4), 속도 I-P제어기의 페루프전달함수는 식(5)에 각각 보여 주며, I-P제어기는 전달함수에 영점이 제거되기 때문에 감쇠비에 의해서 오버슈트 및 정착시간 등과 같은 응답특성을 향상시킬 수 있도록 제어게인설정이 용이하다.<sup>[4]</sup>

$$\frac{\omega_{fb}}{\omega^*} = (s \frac{K_{ps}}{JK_T} + \frac{K_{is}}{JK_T}) / (s^2 + s \frac{D}{J}) \quad (4)$$

$$\frac{\omega_{fb}}{\omega^*} = (\frac{K_{is}}{JK_T}) / (s^2 + \frac{(DK_T + K_{ps})}{JK_T} s + \frac{K_{is}}{JK_T}) \quad (5)$$

I-P제어기의 블록선도를 등가변환하면 기준속도입력이 1차 LPF를 거쳐 PI제어기를 통과하는 것과 같다. 이로 인해 최소의 오버슈트로 원하는 응답특성을 얻을 수 있지만 상승시간의 지연이 발생하게 된다.

그림 6은 관성부하에 대해 감쇠비 ζ가 1로 설계된 경우에 2가지 형태에 대한 제어기 출력을 비교한 것이며, PI제어기는 I-P제어기보다 오버슈트가 5.44배로 나타난다. 즉, I-P제어기는 PI제어기보다 대역폭을 크게 하여 외란토크에 대해 더 좋은 응답특성을 가지도록 설계할 수 있음을 보여준다.

대역폭은 근사적으로 시간역에서 과도응답 특성을 나타내는 시정수 τ의 역수와 같으며 적분게인 K<sub>i</sub>은 비례게인 K<sub>p</sub>에 시정수의 역수를 곱하여 계산하므로 동일한 오버슈트를 기준으로 I-P제어기는 적분게인을 약 5배정도 크게 설정할 수 있다. 적분기가 사용되는 제어기는 정격에 의해 값의 범위를 물리적으로 제한하면 이에 발생하는 오차의 누적에 의해서 적분기 포화현상이 발생하는 데, 이 현상은 적분시간과 비례하여 발생한다. 대역폭을 증가시키는 것은 곧 적분시간을 늘리는 것과 같으므로 대역폭을 늘려서 설계할 경우 안티와인드업 제어기의 게인 또

한 조정이 필요하다. 안티와인드업 제어기의 계인은 요구되는 제어특성에 따라  $1/K_p$ 을 기준으로  $1/3K_p < K_a < 3/K_p$ 의 범위에서 가변 가능하므로 대역폭이 증가된 I P 제어기의 안티와인드업 제어기의 계인( $K_a'$ )은  $K_a' = 2/K_p$ 로 설정한다.[4]

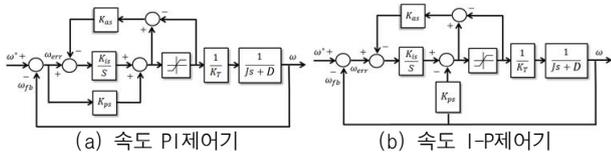


그림 2 속도 PI 및 I-P 제어기의 블록선도

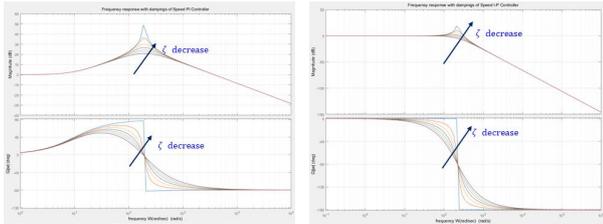


그림 3 감쇠비에 따른 각 제어기의 주파수응답특성 (Matlab)

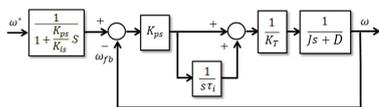


그림 4 I-P 속도 제어기 블록도의 증가 변환

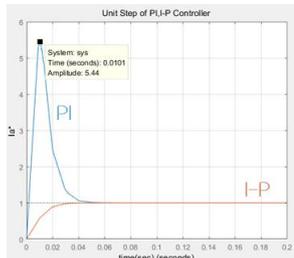


그림 5 같은 조건에서 설계된 PI/I-P 제어기의 단위계단응답 비교 (Matlab)

## 5. 시뮬레이션

속도 및 전류제어기를 PI 및 I P 제어기로 조합하여 구성한 4가지 제어시스템에 대하여 안정도와 성능을 검증하고 제안하고자 하는 제어기 구성 및 설계기법의 타당성을 검증하기 위해 300W급 SPMSM구동시스템을 구성하여 스위칭주파수 20kHz, 전류제어기 주파수는 4kHz, 속도제어기의 주파수를 800Hz로 각각 설정하여 시뮬레이션해석을 Matlab 및 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 수행하였다.

근계적법을 이용하여 시스템 안정도를 확인하고, 단위계단응답을 확인하여 시간역성능을 검증한 결과를 바탕으로 서보시스템에 가장 적합한 제어시스템을 도출하였으며 이에 대한 조건 및 결과는 표 2 및 표 3에 각각 보여준다. 그리고 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 제안하고자하는 설계기법에 대한 유효성을 검증하였으며 이에 대한 결과파형은 그림 6에 보여준다.

## 6. 결론

본 논문에서는 SPMSM의 속응성과 정밀도를 개선하기 위해 서보시스템에 가장 적합한 제어시스템 구성과 PI 및 I P 제어기의 설계기법을 제안하였다. 각 제어기에 대한 전달함수를 도출한 후 Matlab 시뮬레이터에 의하여 시스템의 안정성과 시간역성능을 확인하였고, PSIM시뮬레이터에 의하여 시스템의 성능

을 확인하여 제안된 설계기법의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 중소기업청의 창업성장기술개발사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

- [1] 김민희, 정장식. (2006). 서보전동기 제어시스템의 기술동향과 발전 전망. 조명·전기설비, 20(5), 51-65.
- [2] 김태웅. (2008). 서보전동기의 제어시스템 설계고찰. 전력전자학회지, 13(6), 33-38.
- [3] 신희근, 김학원, 조관열, 지준근. (2011). IP 제어기를 이용한 통신 전원용 3상 PWM 컨버터의 전압 제어. 한국산학기술학회 논문지, 12(6), 2722-2728.
- [4] 설승기. 전기기기 제어론, 홍릉과학출판사, 2012

표 2 각 제어기의 관계에 따른 계인 설정

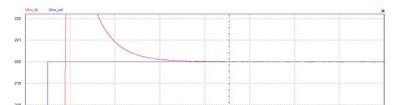
		PI controller	I P controller
current controller	$f_c$	4kHz	4kHz
	$\tau_{ic}$	$1/\tau_e$	$5 \cdot 1/\tau_e$
	$K_{uc}$	$1/K_{pc}$	$2/K_{pc}$
speed controller	$f_s$	800Hz	800Hz
	$\tau_{is}$	$1/\tau_m$	$5 \cdot 1/\tau_m$
	$K_{as}$	$1/K_{ps}$	$2/K_{ps}$

표 3 각 제어기 구성에 따른 Matlab시뮬레이션 결과

	속도제어	전류제어	시스템안정도	단위계단응답
case 1	PI	PI	안정	수렴
case 2	I P	PI	안정	수렴
case 3	PI	I P	비교적안정	발산
case 4	I P	I P	불안정	발산

표 4 각 제어기 구성과 조건에 따른 PSIM시뮬레이션 결과

	$\tau_{is}$	$K_{as}$	$\omega_{fb}$ max	$t_s$
case 1	$1/\tau_m$	$1/K_{ps}$	228.7 (rps)	0.131 (sec)
case 2	$1/\tau_m$	$1/K_{ps}$	220.0 (rps)	0.165 (sec)
case 2 1	$5 \cdot 1/\tau_m$	$2/K_{ps}$	228.4 (rps)	0.086 (sec)
case 2 2	$5 \cdot 1/\tau_m$	$2/K_{ps}$	220.6 (rps)	0.083 (sec)



(a) case 1 : 속도 PI제어기 +전류 PI제어기



(b) case 2 : 속도 I P제어기 +전류 PI제어기



(c) case 2 1 : 속도 I P제어기 +전류 PI제어기



(d) case 2 2 : 속도 I P제어기 +전류 PI제어기

그림 6 제어기 구성에 따른 리얼속도의 단위계단응답파형 (PSIM)