

전류 기반 부하 추정을 이용한 BLDC 모터의 Gain Scheduling PI 속도 제어

조희상*, 정유직*, 이재빈*, 이준범**, 박현중*
국립공주대학교*, (주)현대포리텍**

Gain Scheduling PI-Based Speed Control of a BLDC Motor Using Current-Based Load Estimation

Hee-Sang Cho*, Yoo-Jik Jeong*, Jae-Been Lee*, Joon-Beom Lee**, Hyun-Jong Park*
Kongju National University*, Hyundai Polytech**

Abstract - 본 논문은 BLDC 모터의 외란 발생 시 속도 회복 성능 향상을 위한 전류 기반 Gain Scheduling PI 제어를 제안한다. 기존의 고정 Gain 기반 PI 제어기는 부하 외란 발생 시 속도 강하율 및 회복 성능 저하 문제가 발생한다. 제안한 제어기는 3상 전류 벡터 크기를 이용한 Load Indicator를 기반으로 2D Lookup Table에서 K_p 및 K_i 를 동적으로 조절한다. 시뮬레이션 결과, 기존 PI 제어기는 부하 인가 후 기준 속도로 완전히 회복되지 못하였지만, 제안한 Gain Scheduling PI 제어기는 부하 인가 후 속도 강하율이 3.51 %에서 1.66 %로 감소하였으며 약 0.387 s 내에 기준 속도의 ± 0.5 % 범위에 진입하였다.

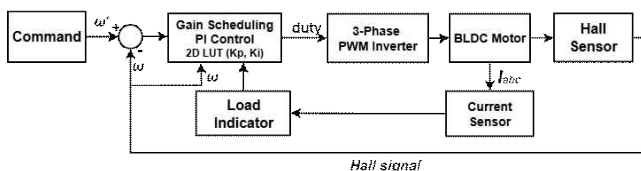
1. 서 론

BLDC 모터는 높은 효율과 토크 밀도로 산업 전반에 널리 사용되며, 다양한 운전 조건과 부하 변화에 대응하기 위한 안정적인 속도 제어를 위해 구조가 간단한 PI 제어기가 일반적으로 적용된다 [1-3]. 그러나 기존 PI 제어기는 고정된 Gain 구조를 사용하므로 과도 상태와 부하 외란에 대한 동시 대응이 어렵고, 부하 인가 후 속도 강하율 및 회복 성능 저하 문제가 발생한다 [2]. 이를 개선하기 위해 운전 조건에 따라 Gain을 동적으로 조절하는 Gain Scheduling 기반 제어 연구가 제안되고 있다 [3, 4]. 본 논문에서는 3상 전류 기반 Load Indicator를 이용한 Gain Scheduling PI 제어를 제안한다. Simulink 시뮬레이션을 통해 기존 PI 제어기 대비 부하 인가 후 속도 강하율 감소 및 속도 회복 성능이 향상됨을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 BLDC 모터 구동 시스템

그림 1은 본 논문에서 제안한 Gain Scheduling PI 기반 BLDC 모터 구동 시스템의 전체 구성도를 나타낸다. 시스템은 Inverter, BLDC motor, Hall Sensor, Current Sensor 및 Gain Scheduling PI 제어기로 구성된다.



〈그림 1〉 제안한 Gain Scheduling PI 기반 BLDC 모터 구동 시스템 전체 구성도

Hall Sensor는 Commutation Logic 기반 게이트 신호 생성, 속도 피드백 산출에 활용되며, Current Sensor로 측정된 3상 전류는 Load Indicator 산출에 사용된다. 여기서 $e(t) = \omega^* - \omega$ 는 속도 오차를 나타낸다. Gain Scheduling PI 제어기는 속도 오차를 기반으로 제어 출력을 생성하며, 속도 피드백과 Load Indicator를 이용하여 LUT 기반으로 K_p 및 K_i 를 동적으로 조정한다.

〈표 1〉 Motor Parameter

항목	기호	값	단위
DC Link 전압	V	48	V
극쌍 수	P	3	-
상저항	R_s	13	$m\Omega$
상인덕턴스	L_s	0.22	mH
영구자석 자속	λ	0.03	Wb
관성 모멘트	J	0.01	$Kg \cdot m^2$
정격 전류	I_{rated}	20	A

2.2 기존 PI 제어기 구조

기존 PI 제어기는 식 (1)과 같이 기준 속도와 피드백 속도 간의 오차 $e(k)$ 에 고정 Gain인 K_p 및 K_i 를 적용하여 제어 출력을 생성한다.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt \quad (1)$$

본 논문에서 기존 PI 제어기의 고정 Gain은 $K_p=0.5$, $K_i=1$ 로 설정하였다. K_p 와 K_i 는 각각 비례 및 적분 이득이다. 기존 PI 제어기는 고정 Gain 구조를 사용하므로 과도 상태와 부하 외란에 동시에 대응하는 데 한계가 있다.

2.3 제안한 Gain Scheduling PI 제어기

고정 Gain 기반 PI 제어기는 부하 증가 시 충분한 회복 토크를 생성하지 못한다. 이를 개선하기 위해 제안한 Gain Scheduling PI 제어기는 전류 기반 부하 지표를 이용하여 운전 상태에 따라 K_p 및 K_i 를 동적으로 조절한다.

2.3.1 전류 기반 Load Indicator

BLDC 모터의 부하 토크는 직접 측정이 어려우므로, 본 논문에서는 전류 기반 간접 추정 방식을 적용하였다. BLDC 모터의 전자기 토크는 식 (2)와 같이 전류에 비례하므로, 부하 증가 시 상전류가 증가하는 특성을 이용하여 추가적인 Torque Sensor 없이 부하 상태를 실시간으로 추정할 수 있다 [2, 4].

$$T_e = K_t \cdot i \quad (2)$$

3상 전류는 Current Sensor를 통해 측정되며, PS Vector Norm 블록을 이용하여 3상 전류의 벡터 크기 $|I_{abc}|$ 를 계산한다.

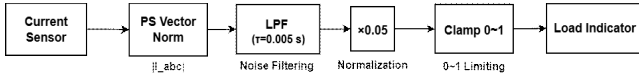
$$|I_{abc}| = \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2} \quad (3)$$

계산된 전류 벡터 크기는 저역통과필터(LPF, $\tau = 0.005$ s)를 통해 고주파 노이즈를 제거하였다. 이 값은 부하 응답 지연과 노이즈 제거 성능 간 절충 관계(trade-off)를 고려하여 선정하였다.

이후 정격 전류 20A 기준의 Normalization Gain($\times 0.05$)을 적용하여 정규화한다. 이후 식 (4)와 같이 값을 0~1 범위로 제한(clamp)하여 최종 Load Indicator를 생성한다.

$$T_L = \text{clamp}(|I_{abc}| \times 0.05, 0, 1) \quad (4)$$

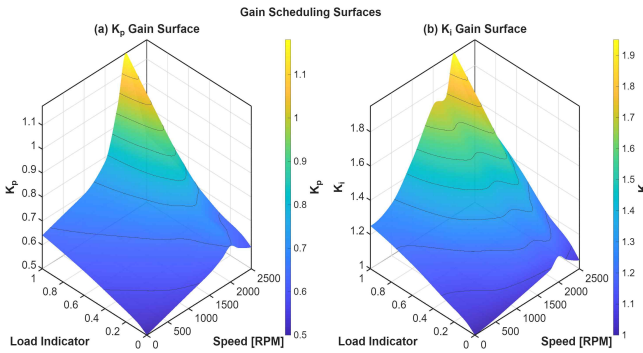
여기서 $L=0$ 은 무부하 상태, $L=1$ 은 정격 부하 상태를 나타낸다. 생성된 Load Indicator는 속도 피드백과 함께 2D Lookup Table의 입력으로 사용된다.



〈그림 2〉 전류 기반 Load Indicator 생성 블록도

2.3.2 2D LUT 기반 Gain Scheduling

제안한 Gain Scheduling PI 제어기는 속도 피드백과 Load Indicator를 입력으로 사용하는 2D Lookup Table 기반 Gain Scheduling 구조를 적용하여 K_p 및 K_i 를 동적으로 결정한다. K_p 및 K_i 는 Srinivas et al. [3]의 설계 원칙을 참고하여 부하 및 속도 조건에 따라 차등적으로 조정되도록 설계하였다. 그림 3은 제안한 Gain Scheduling LUT의 gain 분포를 나타낸다.



〈그림 3〉 Gain Scheduling LUT K_p 및 K_i 분포

그림 3에서 고부하 조건으로 갈수록 K_p 및 K_i 가 증가하며, 2000 RPM 부근에서 최댓값을 갖도록 설계하였다. 이후 초고속 영역에서는 과도한 Gain 증가에 따른 오버슈트 및 제어 입력 포화를 방지하기 위해 Gain 값을 일부 감소하도록 설계하였다.

2.3.3 Gain 설정 방법

K_p 및 K_i 이득 값은 고부하 구간(Load Indicator ≥ 0.6)에서 빠른 속도 회복을 위해 K_p 를 상대적으로 크게 설정하였다. Inverter Saturation($\pm 48V$) 범위 내에서 제어 입력이 제한되도록 조정하였으며, K_i 는 과도한 오버슈트 방지와 안정적인 속도 응답을 고려하여 설정하였다.

2.4 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 48V BLDC 모터를 대상으로 목표 속도 2000 RPM, 부하 외란 5 Nm을 3초 시점에 인가하는 조건으로 Simulink 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 PI 제어기와 제안한 Gain Scheduling PI 제어기의 속도 응답을 비교하였으며, 평가 지표로 오버슈트, 부하 인가 후 속도 강하율 및 속도 회복 시간을 사용하였다. 본 논문에서 속도 회복 시간은 부하 인가 후 속도가 최저점에 도달한 시점부터 기준 속도의 $\pm 0.5\%$ 범위에 최초로 진입할 때까지의 시간으로 정의한다.

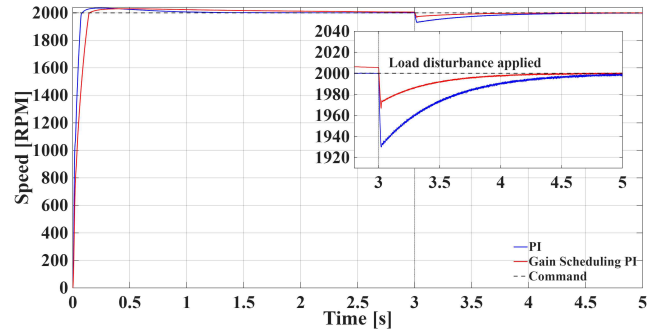
2.4.1 성능 비교 분석

표 2는 기존 PI 제어기와 제안한 Gain Scheduling PI 제어기의 성능 비교 결과를 나타낸다.

〈표 2〉 PI 및 Gain Scheduling PI 제어기 성능 비교

	PI	Gain Scheduling PI
오버슈트 [%]	1.74	1.49
부하 인가 후 속도 강하율 [%]	3.51	1.66
속도 회복 시간 [s]	0.924	0.387

제안한 Gain Scheduling PI 제어기는 기존 PI 제어기 대비, 속도 회복 시간이 0.924 s에서 0.387 s로 단축되었다. 두 제어기의 속도 응답 비교는 그림 4에 나타낸다.



〈그림 4〉 PI 및 Gain Scheduling PI 제어기 속도 응답 비교

3. 결 론

본 논문에서는 3상 전류 기반 부하 지표를 이용하여 K_p 및 K_i 를 동적으로 조절하는 Gain Scheduling PI 제어기를 제안했다. Simulink 시뮬레이션 결과, 기존 PI 제어기 대비 부하 인가 후 속도 강하율이 3.51 %에서 1.66 %로 약 1.85 %p 감소하였다. 제안한 Gain Scheduling PI 제어기에서는 기존 PI 제어기 대비 부하 인가 후 약 0.387 s 내에 기준 속도의 $\pm 0.5\%$ 범위에 진입하였으며, 속도 회복 시간이 0.924 s에서 0.387 s로 단축되었음을 확인하였다. 이는 부하 증가 시 전류 기반 Load Indicator에 의해 제어 Gain이 동적으로 증가하면서 과도 토크 응답이 향상되었기 때문이다. 향후 연구에서는 외란 관측기(DOB)를 Gain Scheduling PI 제어기와 결합하여 미지 부하 조건에서도 강인한 속도 제어 성능을 확보하는 방향으로 연구를 확장할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2026년도 정부(교육부)의 재원으로 한국산업기술진흥원-조기취업형 계약학과 선도대학(원) 육성사업의 지원을 받아 수행된 연구임

[참 고 문 헌]

- [1] J. S. Wen, C. H. Wang, Y. D. Chang, C. C. Teng, "Intelligent Control of High-Speed Sensorless Brushless DC Motor for Intelligent Automobiles", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 3394-3398, 2008.
- [2] 윤시영, 이주, "가변이득 PI 제어기를 이용한 BLDC 모터의 속도 제어", 전기학회논문지, Vol. 62, No. 9, pp. 1234-1239, 2013.
- [3] M. S. S. Srinivas, K. R. Rajagopal, "Fuzzy Logic Based Gain Scheduled PI Speed Controller for PMBLDC Motor", IEEE International Conference on Power Electronics, pp. 1-4, 2009.
- [4] C. W. Hung, J. H. Chen, H. T. Chang, "A Minimal Fuzzy Gain Scheduling Speed Controller and Torque Compensation for the Variable Sampling System of BLDC Motors", IEEE Fifth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, pp. 434-437, 2011.