

# 가변이득 PI 제어를 이용한 BLDC 모터의 속도제어

## Speed Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor using Variable Gain PI Controller

윤시영\* · 이주†  
(Si-Young Yun · Ju Lee)

**Abstract** - This paper provides a technical review of speed control using variable gain PI algorithm for BLDC(Brushless DC) motor. Usually the PI control is used in many motor applications, but a general PI control has problems of overshooting and disturbance for response. By the change of PI gain in motor control operation, these problems can be solved. To find the optimized PI gains for BLDC motor control, many control methods have been proposed. In this paper, the control algorithm with a variable PI gain is applied to improve overshooting response in transient region and rapid load disturbance rejection. Fixed gain and variable gain PI controls are compared. The validity of the propose method is verified by experiment.

**Key Words** : Electric BLDC motor, Variable PI gain, Speed control, Overshooting, Disturbance rejection

### 1. 서론

오랫동안 산업계에서 사용해 온 DC 모터는 효율 및 동작 성능 면에서 우수성을 가지고 있지만 브러시와 정류자의 존재로 인해 한계수명이 발생하여 그 수요가 점차 영구자석형 모터로 대체되고 있다. 영구자석형 동기모터 중 하나인 BLDC(Brushless DC) 모터는 고효율, 고토크 및 작은 체적을 가지고 있어 산업분야에서 동력용과 서보제어용으로 많이 사용되고 있다. 제어에 대한 넓은 속도범위와 작은 관성으로 인하여 짧은 동작구간에서의 급가속이 가능한 점 그리고 제어구조가 간단하다는 점은 BLDC 모터가 서보모터로서의 최적의 조건을 가지고 있음을 보여주고 있다[1].

BLDC 모터의 제어성을 개선시키기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있으며 특히 서보모터로의 활용을 위해 다양한 속도제어, 위치제어 기법 등이 개발되고 있다. 이러한 BLDC 모터의 속도제어나 위치제어를 위해 간단한 알고리즘부터 진보적 기법을 가진 이론들 까지 많은 종류의 제어기법이 사용되고 있다. 선형제어기로는 PI 제어기, PD 제어기, PID 제어기, 선형 최적제어기, 선형모델 추종제어기 등이 있으며 여러 제어 방식 중 간단한 구조와 쉬운 적용 때문에 현재까지도 모터제어에 PI(Proportional Integral) 제어가 가장 보편화되어 있다. 그러나 일반적인 PI 제어는 비선형적인 제어가 필요한 부분에서 오차가 발생한다는 점과 오버슈팅(overshooting), 느린 정착시간(settling time) 등의 적용상에 있어서 여러 문제점을 가지고 있다[2].

이러한 선형제어의 문제점을 보완하기 위하여 변수들의

변화에도 불구하고 높은 성능을 유지할 수 있는 비선형 제어기법이 도입되었다. 비선형제어기로는 제어기의 구조나 제어 파라미터를 적절하게 변경하도록 하여 주어진 요구 성능을 만족하도록 하는 적응제어(adaptive control)와 스위칭 평면에 도달할 때까지 구조를 변화시키는 가변구조제어(variable structure control), 불확실한 상태를 표현할 수 있는 이론으로부터 도입된 퍼지제어(fuzzy control) 등이 있다. 현재에는 여러 가지 제어이론을 적절하게 혼합하여 사용하는 기법들이 많이 발표되고 있다. 예로 들면 가변이득 PID 제어기, 적응 PID 제어기, 적응 가변 구조 제어기, 적응 퍼지 제어기, 퍼지 적응 가변 구조 제어기 및 지능제어 등이 있다.

컨트롤러의 발전으로 고전적인 고정이득 제어기에서 현재는 제어상황에 맞게 적절한 입력을 발생시키는 능동형 비선형제어가 가능하게 되었으며 좀 더 발전된 제어기법을 위해 이러한 연구들이 진행되고 있다[2-5]. 그러나 이러한 적응제어 기법들은 상당히 복잡하거나 많은 연산을 필요로 하고 있다. 반면 PID 제어는 문제를 해결하는데 있어서 아직까지 매우 간단하고 효과적인 방법으로 알려져 있다. 대부분의 현장에서 사용되는 실제적인 제어기법으로 PID 제어를 사용하는 것이 바로 이러한 이유 때문이다[6]. 물론 PID 제어기가 간단한 구조를 가지고 있지만 최적화된 이득을 구하는 데는 많은 노력과 경험이 요구된다. 이것은 실제 모터 적용에 있어 제어 모델링과 제어 이득, 제어방법 선정 등의 내부적 요소를 가지고 있어 값을 설정하는데 어려움이 있기 때문이다. 따라서 PID 제어기의 최적의 동작을 위한 제어이득 값을 얻기 위해서는 경험적인 요소를 포함한 전문가적인 노하우가 필요하다.

PI 제어기는 이득의 변화 여부에 따라 고정이득(fixed gain)을 가지는 것과 가변이득(variable gain)을 가지는 두 가지로 나눌 수 있다. 고정이득 PI 제어기는 이득을 일정하게 유지하는 것으로 속도제어기의 대역폭을 충분히 크게 할

† Corresponding Author: Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Received : June 16, 2013; Accepted : August 14, 2013

수 없어 속도제어 특성이 저하되게 된다. 이로 인해 오버슈팅과 외란에 대한 응답성 두 가지 전부에 대해 동시에 만족할 만한 성능을 나타내지는 못한다. 이는 과도현상과 외란에서도 정상상태와 마찬가지로 같은 PI 제어이득을 가지고 있어 두 가지 전부를 만족시키지 못해 나타나는 현상이다. 이에 반해 가변 이득 PI 제어기는 구간에 따른 이득의 변경으로 특성에 맞는 동작을 수행하여 제어 성능의 향상을 가져올 수 있게 한다. 이러한 가변이득 제어기의 구현은 간단하여 대상으로 하는 모터의 제어에 쉽게 적용할 수 있다. 이러한 점은 가변이득 PI 제어기가 시변과라미터(time varying parameter)가 있는 시스템의 제어 시에 다른 적응 제어 기법에 비해 설계 및 적용이 간단하다는 장점으로 나타나고 있다.

모터제어 시 이득에 따라 발생하는 토크와 속도, 위치의 동적 응답특성은 매우 중요하다. 불안정한 응답특성은 속도제어 시에는 일정하지 않은 속도와 외란에 민감하게 반응하고 위치제어 시에는 회전방향이 빈번하게 바뀌는 현상으로 나타나 정지 시에 진동을 발생하게 할 수도 있다. 이것은 안정화까지의 시간지연과 불안정한 정상상태 도달 등으로 나타나게 된다. 이로 인해 제어오차를 발생시키며 제어성능에 중요한 포인트가 된다. 보통 제어기의 성능은 목표 값에 얼마나 빨리 추종해 가느냐 하는 트래킹(tracking) 특성과 외란(disturbance)이 발생하였을 시 얼마나 빨리 오차를 최소화 하느냐 하는 외란제거(disturbance rejection) 특성 두 가지를 가지고 판단한다.

본 논문에서는 적용이 비교적 쉬운 가변이득 PI 제어기를 사용하여 BLDC 모터의 속도제어를 수행한다. 기동 시의 오버슈팅과 외란에 대한 현상을 파악하고 제어이득의 변화에 따른 출력 응답 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 BLDC 모터에 대한 가변이득 PI 제어기의 적용 가능성을 확인하도록 한다.

## 2. 제어시스템

### 2.1 BLDC 모터의 제어시스템

BLDC 모터를 포함한 일반적인 모터의 속도제어기는 그림 1과 같다. BLDC 모터는 인가된 DC전압에 비례하여 전류가 변하기 때문에 인가전압을 가지고 토크와 속도를 제어할 수가 있다.

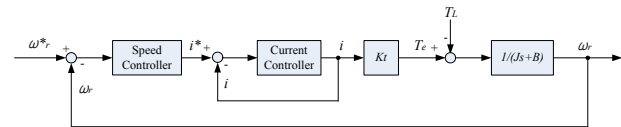


그림 1 모터시스템의 속도제어기  
Fig. 1 Speed controller of motor system

그림 1에서 보듯이 지령속도와 현재속도의 차이를 입력으로 하는 속도제어기를 구성하고 그 내부에 전류제어기가 포함하도록 되어 있다. BLDC 모터는 토크를 통해 속도를 변화시킬 수 있기 때문에 전류의 크기만 제어하면 쉽게 속도 제어를 구현할 수 있게 된다. 제어변수인 상전류  $I_{ph}$ 의 크기

는 인버터의 입력전류  $I_{dc}$ 에 비례하므로 이를 이용하여 속도 제어기를 구성하게 된다.

그림 1의  $\omega_r, \omega_r^*$ 는 회전자의 회전각속도와 지령속도를 나타내며  $i, i^*$ 는 전기자 전류와 지령 전류값,  $K_t$ 는 토크 상수를 나타낸다. 모터를 대상으로 하는 부하시스템의 토크방정식은 식(1)과 같고 라플라스변환을 사용하여 방정식을 다시 표현하면 식(2)와 같이 된다.

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (1)$$

$$T_e(s) = (Js + B)\omega_r(s) + T_L \quad (2)$$

여기서,  $B$ 는 마찰계수이며 본 논문에서는  $T_L$ 에 포함된 것으로 하며  $T_e, T_L, J$ 는 각각 전자기적 토크, 부하토크, 부하의 관성모멘트를 나타낸다.

PI 속도제어기 시스템의 개루프 전달함수와 폐루프 전달함수는 식(3), (4)와 같이 표현된다.

$$G_s^o(s) = (K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}) \cdot \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \cdot \frac{K_t}{Js} \quad (3)$$

$$G_s^c(s) = \frac{G_s^o(s)}{1 + G_s^o(s)} = \frac{\frac{K_t K_{ps}}{J} s + \frac{K_t K_{is}}{J}}{s^2 + \frac{K_t K_{ps}}{J} s + \frac{K_t K_{is}}{J}} \quad (4)$$

$\omega_{cc}$ 는 전류제어기의 대역폭(차단주파수),  $K_{ps}, K_{is}$ 는 속도 제어기의 비례이득과 적분이득을 나타낸다. 전류제어기의 대역폭  $\omega_{cc}$ 를 속도제어기의 대역폭  $\omega_{cs}$  보다 크게 선정하면  $\frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \approx 1$ 이 되고 PI 절점 주파수를  $\omega_{cs}$  보다 충분히 작게

선정하면 속도제어기의 전달함수는  $K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} \approx K_{ps}$ 가 된다.

따라서 개루프 전달함수는  $G_s^o(s) \approx \frac{K_{ps} K_t}{Js}$ 로 표현된다. 비례

이득은 시스템의 응답 상승, 지연시간을 결정하고 적분이득은 정상상태 오차 감소시간을 결정한다. 응답특성과 안정성을 위해 전류제어기는 속도제어기의 대역폭보다 보통 5배에서 10배 정도로 크게 설정한다. 비례이득과 적분이득이 크면 시스템의 응답은 진동하게 되어 불안정해진다. 시스템 안정성을 위해 과도응답과 정상상태 응답 두 가지를 해석하게 되는데 이는 제어기 이득과 관계되어 있다. 이러한 제어기 이득은 모터의 저항과 인덕턴스 등에 따라 다를 수가 있으므로 동일한 대역폭의 응답특성을 얻기 위해서는 정확한 모터의 파라미터 정보를 알 필요가 있다.

### 2.2 고정이득 PI 제어

PI 제어기는 제어가 간단하고 구조에 비해 효과적인 성능을 가지고 있어 모터의 속도와 위치를 제어하기 위한 방법으로 많이 사용한다. 고정이득 PI 제어(fixed gain PI control)는 시스템의 제어기 이득이 항상 상수로 고정되어 있다는 것을 의미한다. 실제로 PI 제어기를 사용하여 제어하

는 경우 이득값은 대체로 trial and error method를 사용하여 구해낸다. 이러한 제이이득 tuning 방법에는  $K_i = 0$ 으로 두고  $K_p$ 를 oscillation이 발생할 때 까지 가변시킨 후  $K_i$ 를 설정하는 manual tuning method와 Ziegler - Nichols method 등이 있다. PI 제어기의 전달함수는 식(5)와 같다. 여기서  $T = K_p/K_i$  이며 적분시간상수(integral time constant)이다.

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT}\right) \quad (5)$$

$$u(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)e(s) \quad (6)$$

여기서  $u(s)$ 는 속도제어기의 출력으로서 인버터의 DC전류를 나타내고 전류제어기의 입력으로 작용한다. 또한 에러값  $e(s)$ 는 속도에 대한 목표치와 실측치와의 차이를 나타낸다. 즉,  $e(s) = \omega_r^*(s) - \omega_r(s)$ 이다. 연속시간시스템(continuous time system)에서 이산시간시스템(discrete time system)으로 변환하기 위해 식(6)에 대해 Backward Transform  $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ 을 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$su(s) = sK_p e(s) + K_i e(s) \quad (7)$$

$$\left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)u(z) = \left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)K_p e(z) + K_i e(z) \quad (8)$$

이산시간 형태를 가지기 위해 식(8)을 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{u(k) - u(k-1)}{T} = K_p \left[\frac{e(k) - e(k-1)}{T}\right] + K_i e(k) \quad (9)$$

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) T \quad (10)$$

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{n=0}^k e(n) \quad (11)$$

식(10)에서의 현재 출력값은 이전 출력값과 에러값 및 에러차이값에 대해 이득을 곱한 형태로 표현된다. 식(10)에  $u(k-1) = u(k-2) + K_p [e(k-1) - e(k-2)] + K_i e(k-1) T$ 의 이전 상태 출력식을 대입하여 정리하면 식(11)의 형태가 된다.  $K_p, K_i$ 와 sampling time T를 고정하여 제어기를 구성한 것이 고정이득 PI제어기이다.

### 2.3 가변이득 PI 제어

가변이득 PI 제어(variable gain PI control)의 기본 개념은 파라미터가 변화함에 따라 PI 제어기의 이득을 그 변화에 맞추어 계속하여 변화시키는 것이다.

BLDC 모터의 비선형 속도, 위치제어를 하기 위해서는 고정이득제어 보다는 좀 더 향상된 알고리즘이 필요하다. 속도제어기의 특성을 나타내는 것은 기동 시의 오버슈트와 외란에 대한 강인함으로 표현될 수 있다. 큰 PI 이득은 정상상태에서 외란에 강하나 기동 시에 큰 오버슈트를 발생하게 한다. 또한 작은 PI 이득은 반대로 기동 시에 오버슈트를 발

생시키지는 않으나 외란에 좋지 않은 특성을 나타내게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 가변이득 속도제어기를 사용하면 각각의 구간에서 다른 이득을 사용하여 향상된 기능을 가지도록 할 수 있다. 초기의 이득 값은 오버슈트를 제거할 수 있는 범위에서 설정하고 마지막 이득 값은 정상상태에서 외란에 강하도록 설정한다.

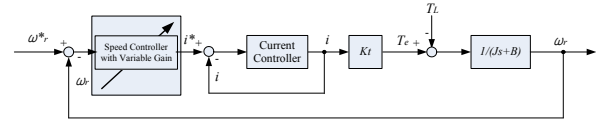


그림 2 가변이득 PI 속도제어기  
Fig. 2 Speed controller with variable PI gain

가변이득 제어는 속도제어에서와 마찬가지로 위치제어의 제어대상이 정확한 위치를 가지도록 하는 데에 상당한 효과를 나타낸다. 목표점에서의 진동을 감소시킬 수 있으며 빠른 정착시간을 갖도록 할 수 있다. 이러한 위치제어에서는 응답특성과 진동에 대한 강인함이 중요 결정사항이 된다.

- 가변이득 값은 다음과 같은 규칙을 가지고 이루어진다.
- 이득의 초기값은 초기 기동시의 오버슈트를 제거하기 위해 사용한다.
- 이득의 최종값은 정상상태에서의 빠른 외란제거 응답성을 가지기 위해 사용한다.
- 기동 시의 과도영역에서는 이득의 초기값과 최종값을 가지고 구간 내에서는 여러 형태의 곡선 중 최적의 응답특성을 가지는 값으로 표현한다.

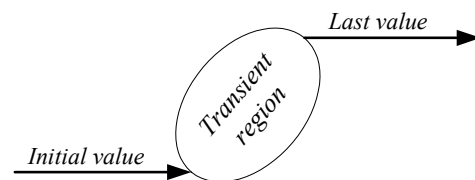


그림 3 PI 제어기의 가변이득 값 변화  
Fig. 3 Variable gain change of PI controller

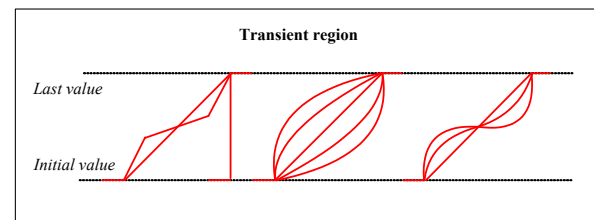


그림 4 과도영역에서의 가변이득 패턴  
Fig. 4 Patterns of variable gain in transient region

그림 3은 PI 속도제어기에 사용되는 이득 값을 변화를 보여준다. 최종 기동 시에는 이득의 초기값을 가지고 정상상태에서는 최종값을 사용하게 된다. 그림 4는 시뮬레이션과 실험에 적용한 과도영역에서의 다양한 형태의 곡선을 나타낸다. 과도 영역에서의 제어이득 형태에 따른 응답특성은 다음 절에서 설명하도록 한다.

### 3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 가변이득 제어기의 동적특성을 고정이득 제어기와 비교하여 수행하였으며 각각에 대해 시뮬레이션과 실험으로 두 제어기의 응답 특성의 차이점을 분석한다. 식 (5)에 있는 비례이득 값( $K_p$ )과 적분시간상수( $T$ )를 변경하여 각각의 경우에 대해 시뮬레이션을 수행한다.

시뮬레이션에서는 초기의 부하토크를 0.3[Nm]로 하고 정상상태에서의 외란을 시험하기 위하여 0.5[Nm]를 인가하도록 한다. 지령속도는 3,000[rpm], 적분시간 상수는 100us이며 속도제어기의 scale 상수는 0.00001로 한다.

그림 5는 비례이득 값  $K_p$ 가 20, 50, 80, 150을 가질 때의 속도응답 특성을 나타낸 것이다. 안정화 상태로 되기까지의 settling time은 약 1초가 걸리며 외란을 모의하기 위해 4~6 초 사이 2초간에 추가로 0.2[Nm]의 부하토크를 인가한다. 가변이득 제어기에 대한 향상된 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션과 실험을 통해 결과를 확인한다.

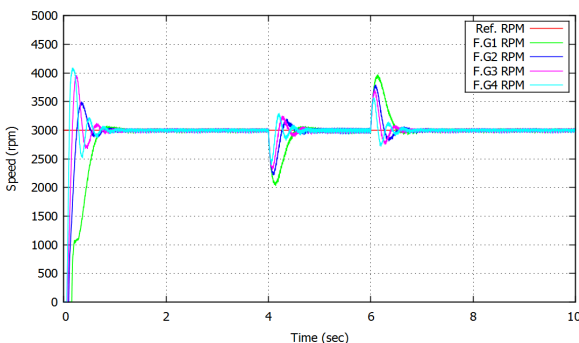


그림 5 고정이득 값에 대한 PI 제어기의 속도응답특성 - 시뮬레이션 (F.G1-F.G4: 20, 50, 80, 150)

Fig. 5 Speed response characteristics of PI controller with fixed gains - simulation (F.G1-F.G4: 20, 50, 80, 150)

각각에 비례이득 값에 대한 속도응답의 PO(percent overshoot)는 식(12)와 같다.

$$PO = \frac{peak\ v_{out} - v_{out}(\infty)}{v_{out}(\infty)} \times 100\% \quad (12)$$

표 1은 고정이득 값 20, 50, 80, 150에 대한 초기 기동 시와 외란 시의 PO 값을 시뮬레이션을 통해 계산하여 나타낸 것이다. 초기 기동 시에는 PO 값이 이득값에 따라 비례적으로 증가하는 것을 보여주며 외란 시에는 이득값이 작을수록 오버슈트가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 과도현상과 외란의 조건하에서 최적의 응답특성을 가질 수 있도록 이득값을 선정하는데 PO값을 이용할 수 있다. 즉, 초기 기동 시에는 오버슈트가 발생하지 않는 이득값을 취하고 외란 시에는 빠른 응답특성을 가지도록 하는 이득값을 선정하도록 한다.

본 논문에서는 초기 기동 시 오버슈트가 발생하지 않고 외란에 빠르게 반응할 수 있도록 하기 위해서 비례이득 값 ( $K_p$ )의 초기치를 20로 하고 최종값을 50으로 선정하여 가변이득 제어기를 모의 구현한다.

표 1 시뮬레이션에 따른 고정이득에 대한 PO 값

Table 1 Percent Overshoot for fixed gains in simulation

항 목	고정이득 값			
	20	50	80	150
초기 기동 시 PO (%)	2.25	16.29	32.10	36.29
외란 시 PO (%)	32.12	26.13	23.14	18.96

그러나 가변이득을 가지고 있는 제어기의 경우 시뮬레이션에 대한 그림 6와 7에서 보듯이 정상상태가 되기 전의 과도구간에서 심하게 속도가 변동되는 현상이 발생된다. 이것은 과도구간에서 이득 값이 어떻게 형성되는가에 따라 다른 속도 변동성을 가지는 것을 나타내는 것으로 모터의 운전 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 예측할 수 있다. 따라서 여러 형태를 가진 구간이득 값에 대해 과도구간에서의 시뮬레이션을 통해 각각의 응답특성을 파악한다.

그림 6은 가변이득 값이 단위계단과 직선의 방정식, 3구간 선형화 형태를 가진다. 그러나 시뮬레이션에 따르면 이러한 이득값을 가지고 있을 경우 과도응답 구간에서의 속도 응답 특성은 매우 좋지 않게 나타난다. 이것은 이득값이 급변하는 형태를 지니고 있어 구간을 나누어 선형화적인 요소를 가지게 하더라도 경계선 지점에서 특히 오버슈트가 크게 발생하는 것을 보여 준다.

그림 7은 n=0.3, 0.5, 1, 2, 5의 값을 가지는 경우에 polynomial curve의 응답특성을 보여주고 있다. 식(13)은 그

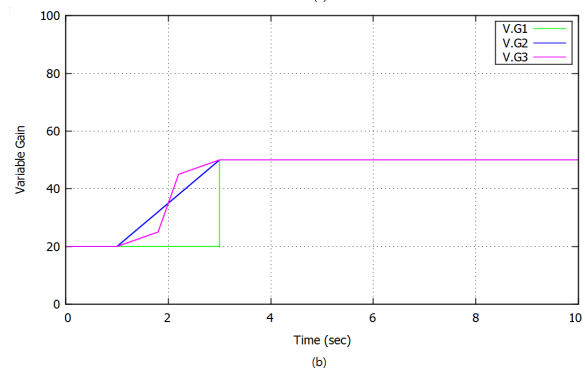
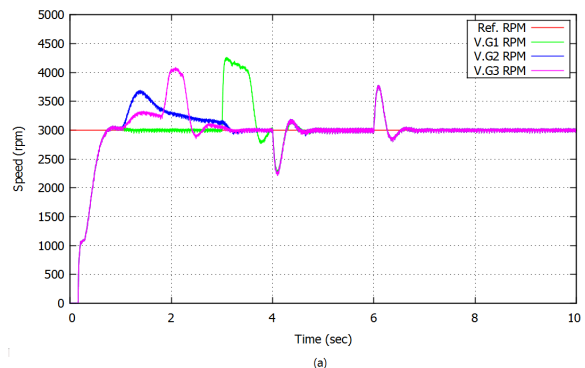


그림 6 가변이득 값에 대한 PI 제어기의 속도응답특성 - 시뮬레이션 #1 (a) 속도응답 (b) 가변이득 값

Fig. 6 Speed response characteristics of PI controller with variable gains - simulation #1 (a) speed response (b) variable gains

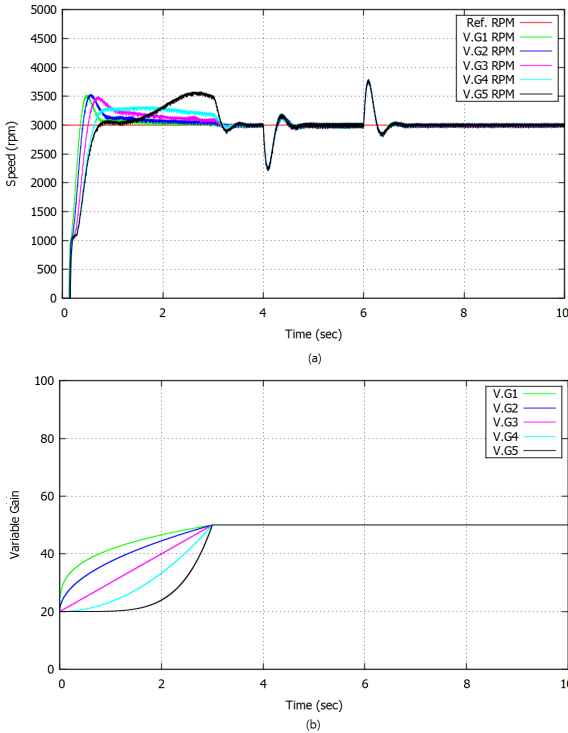


그림 7 가변이득 값에 대한 PI 제어기의 속도응답특성 - 시뮬레이션 #2 (a) 속도응답 (b) 가변이득 값  
 Fig. 7 Speed response characteristics of PI controller with variable gains - simulation #2 (a) speed response (b) variable gains

림 7에서 나타낸 polynomial curve를 식으로 나타낸 것이며 이때의 p와 n의 값에 따라 여러 형태의 이득궤적을 가지게 된다. 적용된 변수 값을 표 2에 나타내었다.

$$K_p = \begin{cases} 20 + p \times t^n & \text{If } t < 3 \text{ (sec)} \\ 50 & \text{If } t \geq 3 \text{ (sec)} \end{cases} \quad (13)$$

표 2 Polynomial curve에 적용된 변수 값  
 Table 2 Variables of polynomial curves

변수	적용 값				
p	24.082	17.321	10.000	3.333	0.123
n	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0

그림 7에서 나타나 있듯이 본 시뮬레이션에서는 식(13)에서 n=2 근처의 값을 가질 때 속도응답 특성이 가장 좋은 결과를 나타내고 있다. 이는 초기 기동 시에 PI 제어 이득 값에 따른 전류의 변화량이 전체적으로 작게 되는 것을 나타내는 것이다.

#### 4. 실험 결과

그림 8과 9는 실제 BLDC 모터를 대상으로 고정 이득값과 가변 이득값에 대한 속도응답 특성을 나타낸 그림이다. 그림 8에 나타난 고정이득 값은 각각 10, 20, 50, 55 이다.

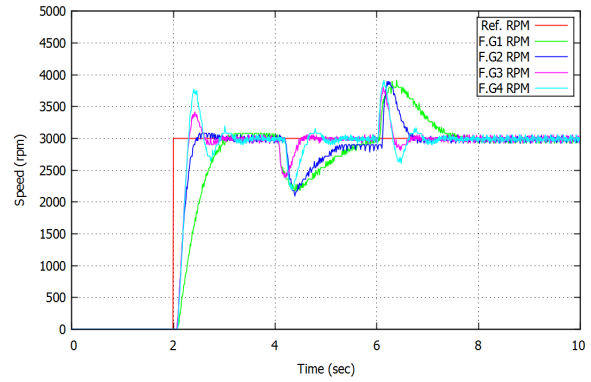


그림 8 고정이득 값에 대한 PI 제어기의 속도응답특성 - 실험  
 Fig. 8 Speed response characteristics of PI controller with fixed gains - experiment

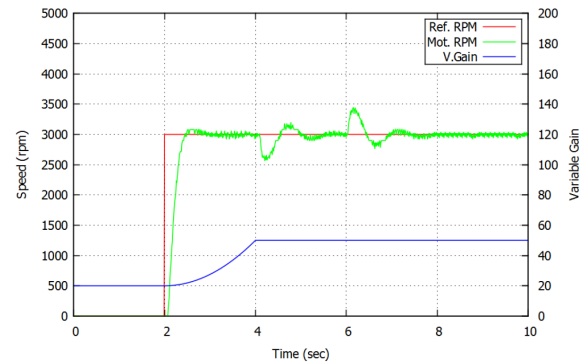


그림 9 가변이득 값에 대한 PI 제어기의 속도응답특성 - 실험  
 Fig. 9 Speed response characteristics of PI controller with variable gains - experiment

가변이득을 나타내는 그림 9에서는 이득 값의 변경 범위를 20에서 50으로 하고 과도구간에서는 n=2인 polynomial curve를 이용하여 속도응답 특성을 구하였다. 실험에서는 지령속도를 3,000[rpm]으로 하고 4초에서 6초 사이에 부하토크를 1.5[Nm]를 인가하여 외란에 대한 속도응답 특성을 구하였다.

표 3 이득 값 변화에 대한 PO와 Settling time (실험)  
 Table 3 PO and Settling time for gains (experiment)

항 목	고정이득				가변이득	
	10	20	50	55	20~50	
PO (%)	기동시	2.43	2.67	13.97	26.02	2.48
	외란시	30.67	30.05	26.67	30.60	26.55
Settling time (sec)	기동시	0.93	0.42	0.56	1.03	0.45
	외란시	1.65	1.33	0.44	0.56	0.48

표 3은 실험을 통해 측정된 초기 기동 시와 외란 시의 PO 값과 정착시간을 나타낸 것이다. 그림 5의 시뮬레이션과 그림 8의 실제 실험에서의 오버슈트와 정착시간 특성은 다

소간의 차이를 보인다. 시뮬레이션과 실험결과에 나타난 정착시간의 차이는 모터 파라미터의 부정확성과 기계적 손실, 관성의 영향 등의 오차에 기인한 것으로 판단된다. 표 3에서 보면 시뮬레이션에서처럼 실험에서도 초기 기동 시에 제어이득 값에 따라 속도응답의 오버슈트가 크게 변동되어 나타나고 있으며 외란에 대한 특성 또한 제어이득 값에 따라 확연한 차이를 보이고 있다. 이러한 특성을 이용하여 가변이득에서 사용할 제어이득 값을 선정하도록 한다. 가변제어이득 값은 각각의 고정이득으로 부터 구한 PO 값과 정착시간을 기준으로 최적의 값을 선택한다.

**표 4** BLDC 모터 사양

**Table 4** Parameters of BLDCM

Items	Value
Rated Power	1[kW]
Rated Voltage	310[V]
Rated Current	3.5[A]
Rated Speed	3000[rpm]
Rated Torque	4.1[Nm]
Resistance of phase	0.11[Ω]
Inductance of Phase	1.35[mH]
Poles	6

본 논문의 실험에서는 가변제어이득 값을 오버슈트와 정착시간을 고려하여 시뮬레이션과 같은 초기값 20과 최종값 50으로 하여 부하운전 시의 속도응답을 측정하였다. 가변제어이득을 적용한 실험에서 기동 시 PO 값은 2.48% 이며 1.5[Nm]의 외란토크에 대해서는 26.55%를 나타내고 있다. 그림 9는 polynomial curve 형태의 가변이득 값을 적용하여 실험한 결과이며 기존의 고정이득제어보다 훨씬 좋은 속도응답 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

**5. 결 론**

본 논문에서는 BLDC 모터의 향상된 속도제어를 위해 가변이득 PI 제어기의 적용을 제안하고 이득에 따른 응답특성을 비교 분석하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 가변이득 제어기가 고정이득 제어기 보다 모터의 동작 시에 발생하는 오버슈팅과 외란에 강한 특성과 안정된 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 과도상태에서의 제어이득 궤적 파형에 따라 속도응답 특성이 매우 크게 차이가 나는 것을 파악할 수 있었다. 가변이득 제어를 통해 고정이득 제어에서는 가질 수 없는 강인한 제어효과를 간단한 방법을 통해 얻을 수 있었으며 이러한 가변이득 제어기는 정지 시 진동의 최소화를 필요로 하는 위치제어 분야에서 그리고 최적화된 이득을 얻기 위한 방법적인 부분에서도 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

**References**

[1] N. Ravi, S. Ekram, and D. Mahajan, "Design and Development of a In-Wheel Brushless D.C. Motor

Drive for an Electric Scooter", Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES '06. International Conference on, 2006

[2] Cheng-Tsung Lin, Chung-Wen Hung and Chih-Wen Liu, "Fuzzy PI controller for BLDC motors considering Variable Sampling Effect", IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Nov. 5-8, Taipei, Taiwan. 2007.

[3] N. Hemati, J. S. Thorp, and M. C. Leu, "Robust nonlinear control of Brushless dc motors for direct-drive robotic applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 37, pp. 460 - 468, Dec 1990.

[4] P. M. Pelczewski and U. H. Kunz, "The optimal control of a constrained drive system with brushless dc motor", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 37, pp. 342 - 348, Oct. 1990.

[5] LU. Y. S. and CHEN. J. S., "A self-organizing fuzzy sliding-mode controller design for a class of nonlinear servo system", IEEE Trans.,IE-41, pp492-502, 1994.

[6] K. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology", IEEE Trans. Control System Technology, vol. 13, pp. 559-576, July 2005.

**저 자 소 개**



**윤시영 (尹始永)**

1993년 한양대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업, 현재 동 대학원 박사과정, 1995~2000년 ㈜삼성중공업 중앙연구소, 현재 ㈜아이파워컨 부장



**이주 (李柱)**

1986년 한양대 전기공학과 졸업, 1988년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업, 1998~1993년 국방과학연구소 연구원, 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 박사졸업, 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원, 1997년~현재 한양대 전기공학부 교수