

# 전차원 관측기를 적용한 BLDC 제어의 성능 분석

이승훈<sup>1</sup>, 이종희<sup>1</sup>, 정찬영<sup>1</sup>, 조영훈<sup>+</sup>  
 건국대학교 전기공학과<sup>1</sup>

## Performance Analysis of BLDC Control Using Full-Order Observer

Seunghoon Lee<sup>1</sup>, Jonghee Lee<sup>1</sup>, Chanyeong Jung<sup>1</sup>, Younghoon Cho<sup>+</sup>  
 Konkuk University Electrical Engineering<sup>1</sup>

### ABSTRACT

본 논문에서는 BLDC와 PI 제어기를 사용하여 전동기의 속도를 제어할 때 전차원 관측기를 적용하여 부하 토크를 추정 및 보상함으로써 속도 리플을 줄일 수 있는지를 검증하고자 하였다. 모터 구동 시에는 필연적으로 부하 토크가 외란으로 포함되며 그로 인해 제어대상인 속도에 리플을 야기하게 된다. 따라서 보다 안정적인 제어를 위해서는 이 외란을 보상해주는 것이 필요한데, 관측기를 이용하면 별도의 장비나 센서 없이 이 부하 토크를 효과적으로 보상해 줄 수 있다.

### 1. 서론

BLDC는 직류 전동기의 기계적 정류 장치를 전자적인 정류 장치로 대체하여 유지 보수적 면에서 개선시킨 전동기이다. 물리적 접촉부가 없으므로 고속으로 사용이 가능하며 제어가 간단하다는 장점이 있어 널리 쓰이고 있다.

그러나 전자적으로 구성한 정류 장치에 의해 전류가 흐르는 권선이 바뀔 때마다 필연적으로 리플이 생기는 단점이 있다. 또한 전동기는 부하와 연결되어 구동할 시 부하 토크가 외란으로 입력되는데 이러한 점들이 전동기의 제어 안정성을 떨어뜨리고 속도 리플을 발생시키게 된다.

본 논문에서는 기본적인 PI 제어기를 통해 BLDC의 회전 속도를 제어하며, 두 개의 관측기를 적용시켜 부하 토크를 추정한 후 보상하여 최종적으로 속도 리플을 줄여 제어의 안정성을 높이고자 하였다.<sup>[1]</sup>

### 2. 본론

#### 2.1 시스템 구조

실험에 사용되는 시스템 구조는 그림 1에 나타나 있다. BLDC 전동기와 구동용 3상 인버터가 있고 전류 제어기와 속도 제어기를 통해 속도 제어를 수행하는데 이 때 PWM 동작 모드는 Bipolar PWM이다. 이에 더해 관측기 두 개를 사용하는데 첫 번째 관측기는 시스템을 추종하는 속도 관측기이고 두 번째 관측기는 좀 더 정확하게 부하 토크를 추정하는데 사용되는 외란 관측기이다.

속도 관측기로부터 얻어진 속도의 추정값을 속도 제어기의 오차 계산에 사용하고, 외란 관측기로부터 얻어진 외란 토크를 보상에 사용한다. 이 때 전동기의 사양은 표 1과 같다.

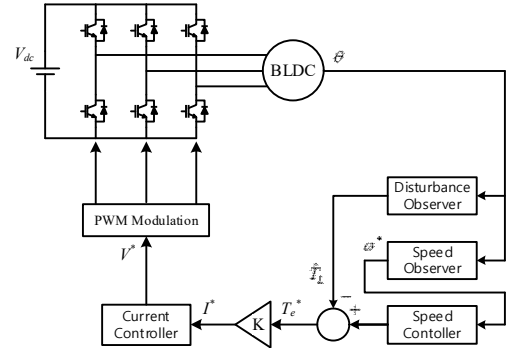


그림 1 BLDC 모터를 구동하기 위한 시스템.  
 Fig. 1 System for driving BLDC motor.

표 1 전동기 제정수

Table 1 Motor Parameters

$R[\Omega]$	0.11	$J[\text{kg}\cdot\text{m}^3]$	0.0016
$L[\text{mH}]$	7.2	$B$	0.0002025
$K_r$	1.98	Pole	8

#### 2.2 전차원 관측기

전동기 구동 시스템의 제어기를 구성할 때 필요한 상태 변수를 귀환하게 되는 경우가 있다. 그러나 많은 경우에 모든 상태 변수를 전부 측정할 수 있는 것은 아니다. 특히 본 논문에서 보상하고자 하는 부하 토크는 직접적으로 측정하기 어렵기 때문에 보상을 위해 관측기를 이용하게 되는데, 관측기는 측정된 상태 변수로부터 시스템에서 필요로 하는 다른 상태 변수를 추정하는 방법이다.

$$x = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx$$

시스템 방정식이 수식 (1)과 같다면 관측기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (2)$$

여기서  $\hat{x}$  은 추정된 상태 변수이며 오차의 수렴 특성은 행렬 A의 고유 값에 의해 결정되고 시스템 상태와의 오차를 귀환하여 모델이 연속적으로 수정되도록 하면 좀 더 정밀하고 빠른 추정 시스템을 얻을 수 있게 된다.

##### 2.2.1 전차원 관측기 설계

전동기의 회전각과 회전속도, 부하 토크를 상태 변수로 지정하여 식 (2)에 따라 표현하면 관측기의 수식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} (\theta_m - \hat{\theta}_m) \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 비례이득 행렬  $L$  을 적절히 설정함으로써 구동 토크  $T_e$  와 측정된 위치정보  $\theta_m$  으로부터 외란 토크  $T_L$  과 속도  $\omega_m$  을 안정적으로 검출할 수 있다. 비례이득 행렬  $L$  의 설정을 위해 특성방정식을 계산하여 근을 삼중근  $\beta$  로 설정하면 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} l_1 &= -3\beta \\ l_2 &= 3\beta^2 \\ l_3 &= \beta^3 J \end{aligned} \quad (4)$$

이 때  $\beta$  는 사용자가 설정하고자 하는 대역폭에 의해 결정되며 일반적으로 속도 제어기의 3~5배로 설정하게 된다.

### 2.2.2 외란 관측기

관측기의 동특성이 충분히 빠를 경우 관측기의 추정치들은 본래의 시스템을 잘 추종하지만, 부하 토크의 경우 적분항에서 얻어지는 특성상 그 추정 특성이 떨어진다. 이러한 점을 보완하기 위해 일반 속도관측기와 별도로 외란 관측기를 적용하여 외란 토크  $T_L$  에 대한 추정 특성을 개선할 수 있다.

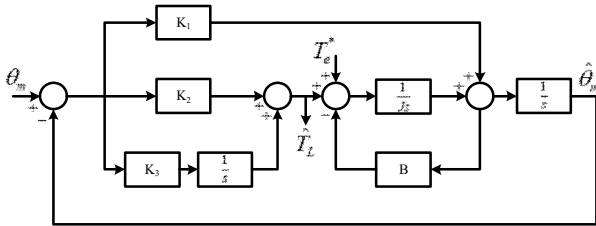


그림 2 외란 관측기 블록도.  
Fig. 2 Block diagram of disturbance observer.

$$\begin{aligned} K_1 &= l_1 \\ K_2 &= J l_2 \\ K_3 &= -l_3 \end{aligned} \quad (5)$$

외란 관측기의 블록도는 그림 2와 같다. 블록도에서의 이득  $K_{1,2,3}$  는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.<sup>[1]</sup>

### 2.3 시뮬레이션 결과

속도 지령으로 1000rpm을 주었고, 평균 10N·m에 정현파 형태로 유동하는 부하를 달았다. 시뮬레이션 시간은

0.6s 동안 관측하였으며 0.3s에 외란 보상을 시작하였다. 그림 3은 시뮬레이션 결과이다. 첫 번째 그래프는 제어 대상인 속도이며, 두 번째 그래프는 부하 토크와 전동기의 출력 토크를 나타내고, 세 번째는 외란 관측기에서 추정된 부하 토크의 추정 그래프이다. 그림에 나타난 것처럼 관측기에서 추정한 토크가 시스템의 부하를 잘 추종하고 있으며, 이를 보상해 줄 경우 속도 리플이 현저하게 줄어들음을 확인할 수 있다. 이는 그림 4에서 더 잘 확인할 수 있다.

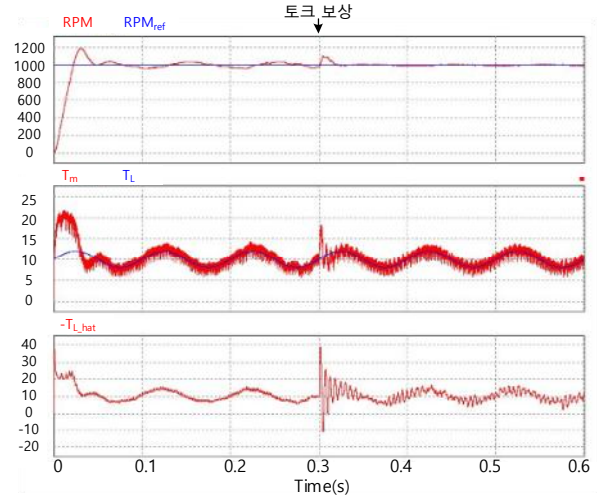


그림 3 BLDC 모터의 속도, 토크 출력 파형.  
Fig. 3 BLDC motor speed, torque output waveform.

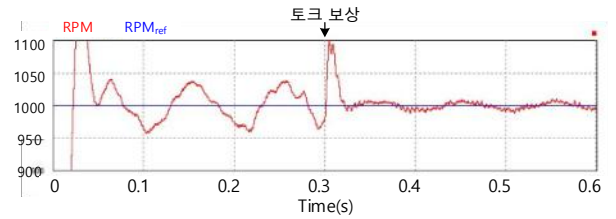


그림 4 관측기 적용시 전동기 속도 파형.  
Fig. 4 Motor speed waveform using observer.

## 3. 결론

본 논문에서는 시뮬레이션 결과로부터 관측기의 적용이 BLDC의 속도 리플을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 별도의 장비 없이 이용할 수 있으며 복잡하지 않은 이론으로 적용할 수 있는 관측기는 큰 효용성이 있음을 알 수 있다.

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 산업연계 교육활성화 선도대학(PRIME) 사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

### 참고 문헌

- [1] Y. D. Yoon, E. Jung, A. Yoo and S. K. Sul, "Dual Observers for the Disturbance Rejection of a Motion Control System," *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, New Orleans, LA, 2007, pp. 256-261.