

BLDC 전동기용 센서리스 드라이브의 성능 향상을 위한 퍼지 역기전력 관측기

박병건, 김태성, 류지수, 현동석
한양대학교

Fuzzy back-EMF Observer for Improving Performance of Sensorless brushless DC motor drive

Byoung-Gun Park, Tae-Sung Kim, Ji-Su Ryu, Dong-Seok Hyun
Hanyang University

ABSTRACT

In this paper, a novel sensorless brushless DC (BLDC) motor drive method using the fuzzy back-EMF observer is proposed to improve the performance of conventional sensorless drive methods.

Most existing back-EMF sensing methods need additional circuit and have a low performance in transient state or low speed range. Therefore, this paper proposes the fuzzy back-EMF observer and an algorithm using this observer to estimate a speed and a position of the rotor. The robustness of the proposed algorithm is proved through the simulation compared with other sensorless drive methods.

1. 서 론

최근 산업발전에 따른 가전기기, 컴퓨터 주변기기, 사무 자동화 기기의 사용이 증가하고, 공장 자동화를 위한 자동화 기기 로봇, 자동차의 제어장치 증가에 따른 각종 전자 기기와 정밀기기의 구동원, 제어원으로 BLDC 전동기의 사용량이 증가되고 있다. BLDC 전동기는 직류 전동기의 속도제어 용이성, 고 효율성, 큰 기동토크와 소형·경량화가 가능한 장점과 계자와 전기자의 위치를 서로 뒤바꿔 놓은 구조를 가짐으로서 브러시와 정류자의 마모로 인한 단점을 보완한 전동기이다^[1]. BLDC 전동기의 구동을 위해서는 회전자 위치 정보를 요구하기 때문에 회전자 위치 센서가 반드시 필요하다. 하지만 이러한 회전자 위치 센서의 비용과 신뢰성의 문제로 현재는 위치 센서가 필요 없는 센서리스 BLDC 전동기 구동에 대한 연구가 진행되고 있다. 기존에 제안된 대부분의 역기전력 검출 방법은 추가적인 회로를 필요로 하며 과도상태 및 저속영역에서 제어성능 저하의 문제가 있었다^[2].

본 논문에서는 센서리스 BLDC 전동기 구동의 과도상태 및 저속영역에서의 성능 향상을 위한 퍼지 역기전력 관측기를 구성하고, 이를 이용한 위치 및 속도 추정 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘의 타당성과 강인성을 입증하기 위해 미분방정식 형태의 외란모델을 이용한 역기전력 관측기와 비교하여 시뮬레이션을 실행하였다.

2. BLDC 전동기 시스템 모델링

BLDC 전동기는 한 상에 대해 다음과 같은 전압 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$v_a = R_s i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

이를 이용한 BLDC 전동기의 역기전력을 추정하기 위해 선간전류의 변화에 대한 시스템 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{di_{ab}}{dt} = -\frac{2R_s}{2L_s} i_{ab} - \frac{1}{2L_s} e_{ab} + \frac{1}{2L_s} v_{ab} \quad (2)$$

3. 퍼지 역기전력 관측기를 이용한 센서리스 제어방법

BLDC 전동기에서 역기전력은 전동기의 속도 및 위치에 관한 정보를 포함하고 있다. 그러나 일반적인 BLDC 전동기 구동 시스템에서 역기전력은 직접 측정되는 변수가 아니므로, 센서리스 구동을 위하여 여러 가지 간접적인 방법에 의해서 역기전력을 검출하고 있다^[3]. 전류의 오차와 전류 오차 변화율을 입력으로 받는 퍼지 함수 추정기를 통하여 BLDC 전동기의 역기전력을 추정할 수 있다. 추정

된 역기전력으로부터 위치 및 속도 추정 알고리즘을 도출하게 된다. 그림 1은 제안한 센서리스 BLDC 전동기 구동 시스템의 전체 구조를 나타내고 있다.

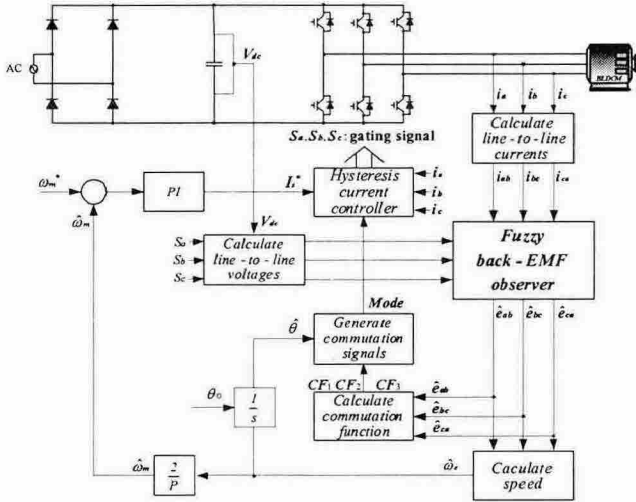


그림 1 제안한 센서리스 구동 시스템의 전체 구조
Fig. 1 The overall structure of the proposed sensorless drive system

3.1 퍼지 역기전력 관측기

퍼지 논리는 언어적인 규칙에 의하여 논리 알고리즘이 구성되며, 임의의 비선형 함수를 추정할 수 있는 범용 함수 추정기 (Universal Function Approximator)로 알려져 있다^[4]. 그림 2는 제안한 퍼지 역기전력 관측기의 구조를 나타낸다.

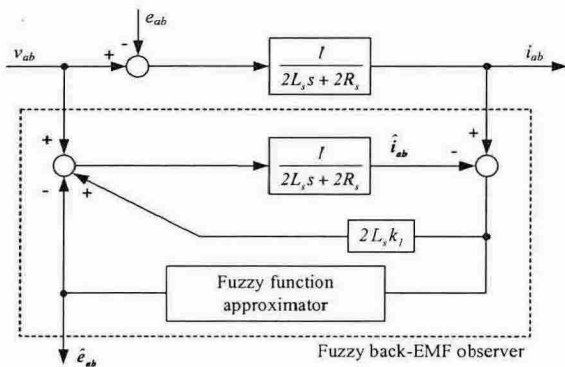


그림 2 제안한 퍼지 역기전력 관측기의 블록 다이어그램
Fig. 2 Block diagram of the Fuzzy back-EMF observer

퍼지 함수 추정기의 입력인 BLDC 전동기 시스템의 순간 전류오차 $err(i_{ab})$ 와 순간 전류오차의 변화분 $cerr(i_{ab})$ 는 다음 식으로 정의한다.

$$err(i_{ab}) = i_{ab} - \hat{i}_{ab} \quad (3)$$

$$cerr(i_{ab}) = err(i_{ab})_{(n-1)} - err(i_{ab})_n \quad (4)$$

퍼지 역기전력 관측기의 출력은 역기전력 추정값인 \hat{e}_{ab} 이다. 각 룰 베이스는 Negative Large (NL), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Zero (ZE), Positive Small (PS), Positive Medium (PM), Positive Large (PL)로 이루어진 7개의 퍼지 언어치로 나눈다.

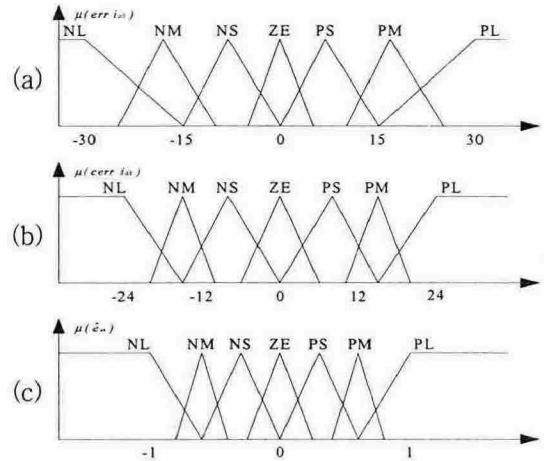


그림 3 퍼지 변수의 소속 함수 (a) 전류 오차 (b) 전류 오차 변화분 (c) 역기전력 추정값

Fig. 3 Membership function of the fuzzy variables (a) Current error (b) Difference of current error (c) Estimated back-EMF

그림 3은 전류 오차, 전류 오차의 변화분 그리고 역기전력 추정값에 대한 각각의 소속 함수를 나타낸다. 표 1은 퍼지 함수 추론을 위해 생성되는 퍼지 룰 베이스를 나타낸다. 이를 통해서 비 퍼지화 알고리즘을 이용하여 추정된 순간 역기전력 \hat{e}_{ab} 를 얻게 된다.

표 1 퍼지 룰 표

Table 1 Fuzzy rule table

$\frac{err(i_{ab})}{cerr(i_{ab})}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	ZE	NS	NM	NL	NL	NL	NL
NM	PS	ZE	NS	NM	NL	NL	NL
NS	PM	PS	ZE	NS	NM	NL	NL
ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PS	PL	PL	PM	PS	ZE	NS	NM
PM	PL	PL	PL	PM	PS	ZE	NS
PL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	ZE

3.2 전환 함수

전환 함수^[5]는 전환 시점 이전에 음의 값을 갖기 때문에 문턱값 결정이 용이하다. 또한 퍼지 관측기가 제공하는 역기전력의 추정치를 이용하기 때문에 노이즈에 둔감하다는 장점을 갖고 있다.

각 모드에서 전환 함수는 다음과 같다.

$$\text{Mode 1 and 4 : } CF(\theta)_1 = \frac{e_{ab}}{e_{bc}} \quad (5)$$

$$\text{Mode 2 and 5 : } CF(\theta)_2 = \frac{e_{bc}}{e_{ca}} \quad (6)$$

$$\text{Mode 3 and 6 : } CF(\theta)_3 = \frac{e_{ca}}{e_{ab}} \quad (7)$$

3.3 속도 및 위치의 추정

역기전력이 사다리꼴 형태인 BLDC 전동기는 120° 도통의 구형파 전류가 인가되므로 역기전력의 크기와 속도 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$E = K_e \omega_e \quad (8)$$

여기서 E 는 역기전력의 크기, K_e 는 역기전력 상수, 그리고 ω_e 는 전동기의 전기적 각속도이다.

또한, 어떤 구간에서든지 a, b, c상의 선간 역기전력의 크기를 서로 비교해 최대치를 찾으면 역기전력의 크기를 구할 수 있다. 따라서 속도의 추정은 역기전력의 추정치로부터 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\hat{\omega}_e = \frac{\hat{E}}{K_e} \quad (9)$$

$$\hat{\omega}_m = \frac{2}{P} \hat{\omega}_e \quad (10)$$

$\hat{\omega}_m$ 은 기계적 각속도 추정치이고, P 는 극수이다. 위치는 속도를 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$\hat{\theta} = \int \hat{\omega}_e dt + \theta_0 \quad (11)$$

여기서 θ_0 는 회전자의 초기 위치값이다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 사용된 BLDC 전동기의 정격과 파라미터들은 표 2와 같다.

표 2 BLDC 전동기의 정격과 파라미터
Table 2 Ratings and Parameters of BLDC Motor

정격 전압	V	160 [V]
정격 토크	Te	0.662 [Nm]
정격 속도	Nr	3500 [rpm]
저항	Rs	0.75 [Ω]
인덕턴스	Ls	0.0031 [H]
역기전력 상수	Ke	0.1074 [V/(rad/sec)]
극 수	P	4

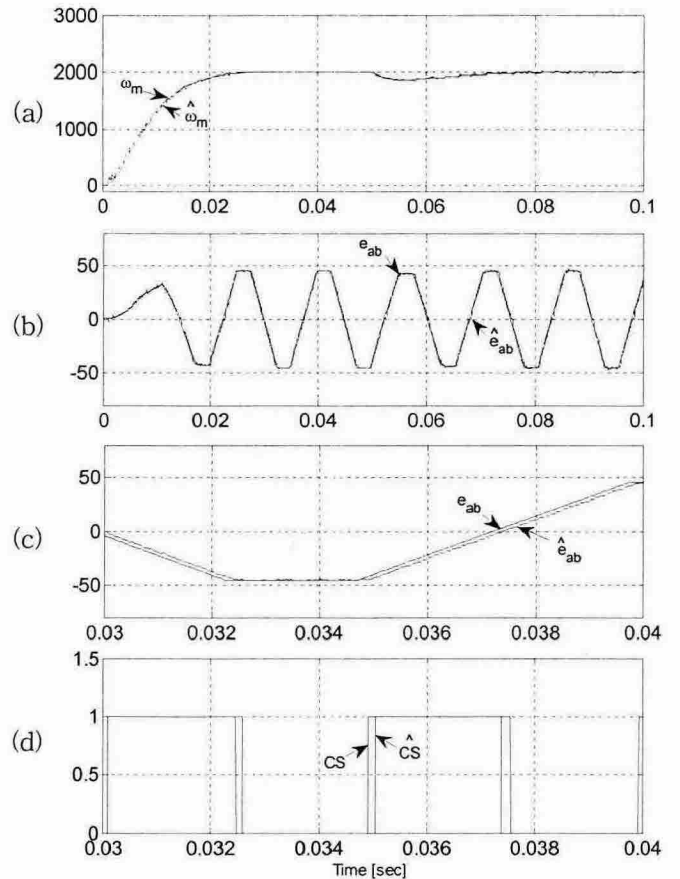


그림 4 관측기에 1차 외란 모델을 사용한 시뮬레이션 결과 (a) 회전자 속도 (b) 선간 역기전력 (c) 확대한 선간 역기전력 (d) 전환 신호

Fig. 4 Simulation results of the observer using first order disturbance model (a) Rotor speed (b) Line-to-line back-EMF (c) Extended line-to-line back-EMF (d) Commutation signal

그림 4(a)~(d)는 관측기에 1차 외란 모델^[6]을 사용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 1차 외란 모델은 역기전력이 일정한 영역에서 실제 값을 잘 추정하지만 역기전력이 변화하는 영역에서는 추정값과 실제 역기전력 사이에 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 오차는 회전자 속도의 경우에는 추정이 양호하지만, 인버터의 동작을 명령하는 전환 신호에는 추정된 역기전력이 실제 값에 뒤지기 때문에 나쁜 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그림 5(a)~(d)는 관측기에 2차 외란 모델^[6]을 사용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 2차 외란 모델은 역기전력이 변화하는 영역에서 실제 역기전력을 잘 추정하지만, 역기전력이 일정한 영역에서는 실제 값을 추정하는 데 있어서 불안정하게 추정을 하여 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이런 오차에 의한 전환 신호는 비교적 양호하지만, 회전자 속도에 영향을 미쳐 지속적으로 속도에 맥동이 발생하는 것이 관측된다.

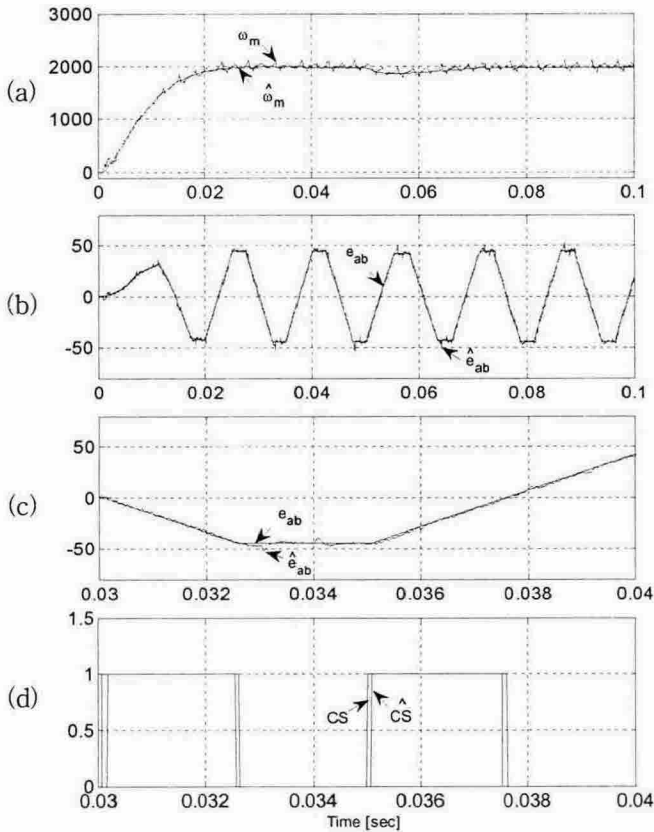


그림 5 관측기에 1차 외란 모델을 사용한 시뮬레이션 결과 (a) 회전자 속도 (b) 선간 역기전력 (c) 확대한 선간 역기전력 (d) 전환 신호

Fig. 5 Simulation results of the observer using second order disturbance model (a) Rotor speed (b) Line-to-line back-EMF (c) Extended line-to-line back-EMF (d) Commutation signal

그림 6(a)~(d)는 제안된 퍼지 관측기를 사용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 역기전력의 파형에 추정된 파형이 1차 외란 모델과 2차 외란 모델의 시뮬레이션 결과에 비해 전체적으로 오차가 작은 범위에서 잘 추정되는 결과를 볼 수 있다. 이에 따른 속도와 위치의 추정결과 또한 매우 우수한 특성을 갖게 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

퍼지 역기전력 관측기는 미분 방정식 형태의 외란 모델을 이용한 관측기보다 시스템의 역기전력을 잘 추정하는 우수한 특성을 가진다.

본 논문에서는 퍼지 논리에 의한 역기전력 추정 방법 및 이를 이용한 새로운 센서리스 제어 기법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 퍼지 논리에 의한 역기전력 추정 방법과 제안된 센서리스 제어 기법의 타당성을 검증하였다.

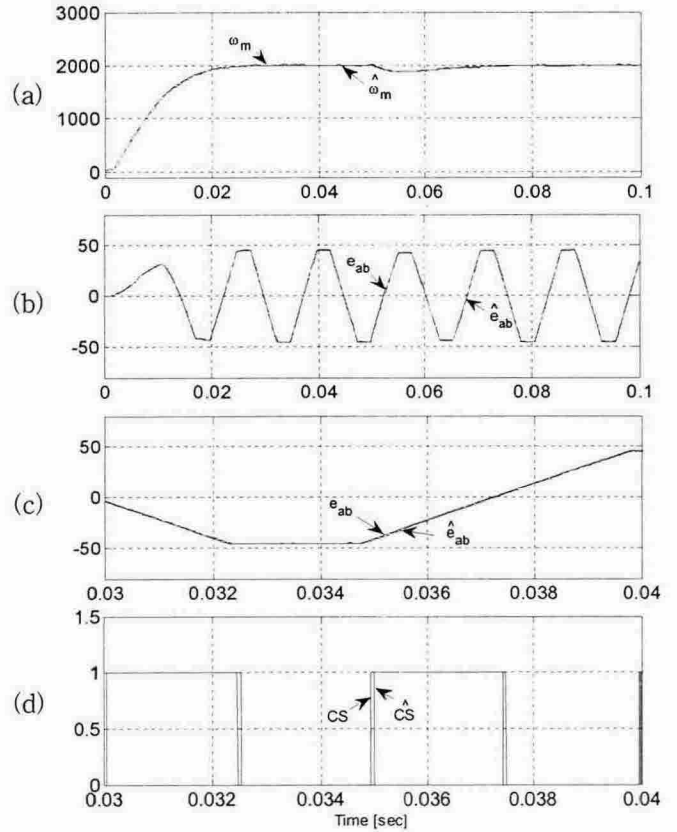


그림 6 관측기에 퍼지 함수 추론기를 사용한 시뮬레이션 결과 (a) 회전자 속도 (b) 선간 역기전력 (c) 확대한 선간 역기전력 (d) 전환 신호

Fig. 6 Simulation results of the observer using fuzzy function approximator (a) Rotor speed (b) Line-to-line back-EMF (c) Extended line-to-line back-EMF (d) Commutation signal

참 고 문 헌

- [1] T. J. E Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives," Clarendon Press, Oxford 1989.
- [2] S. Ogasawara and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 27, No. 5, pp. 928~933, Sep/Oct. 1991.
- [3] R. C. Becerra, M. Ehsani and Y. Guzelgunler, "Review of Sensorless Methods for Brushless DC," in *Proc. IEEE IAS'99 Conf.*, Vol. 1, pp. 143-150, 1999.
- [4] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I & Part II," *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, Vol. 20, No. 2, pp. 404-435, March/April 1990.
- [5] Tae-Hyung Kim and M. Ehasani, "Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1635~1645, Nov. 2004.
- [6] 김태성, 류지수, 현동석, "미지입력 관측기를 이용한 BLDC 전동기 센서리스 드라이브에 대한 연구," *전력 전자학술대회 논문집* pp. 215~219, July 2005.