

브러시리스 전동기의 센서리스 구동을 위한 퍼지 역기전력 관측기

朴炳建^{*}, 金泰成^{**}, 柳志帥^{***}, 玄東石[†]

A Fuzzy Back-EMF Observer for Sensorless Drive of BLDC Motor

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

요 약

본 논문에서는 일반적인 브러시리스 전동기의 센서리스 구동 성능을 개선하기 위한 퍼지 역기전력 관측기를 이용한 새로운 센서리스 구동 방법이 제안되었다. 기존의 브러시리스 전동기의 센서리스 구동 방법은 저속영역과 과도 상태에서의 성능저하와 추가적인 회로를 필요로 한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 사다리꼴 형태의 역기전력을 추정하기 위해 적합한 퍼지 논리에 의해 브러시리스 전동기의 역기전력을 정확하게 추정하였다. 퍼지 역기전력 관측기를 이용한 제안된 알고리즘은 정상 상태 뿐만 아니라 과도 상태에서도 연속적인 회전자 위치를 추정하고 외부 환경 변화에 강인한 제어를 얻을 수 있다. 제안된 알고리즘의 우수성은 다른 센서리스 구동방법과 비교한 시뮬레이션 결과를 통하여 입증되었다.

ABSTRACT

In this paper, a novel sensorless drive for brushless DC (BLDC) motor using the fuzzy back-EMF observer is proposed to improve the performance of conventional sensorless drive methods. Existing sensorless drive methods of the BLDC motor have low performance at transients or low speed range and occasionally require additional circuits. To cope with these problems, the back-EMF of the BLDC motor must be precisely estimated by a fuzzy logic, which is suitable to estimate the back-EMF which has a trapezoidal shape. The proposed algorithm using fuzzy back-EMF observer can achieve robust control for the change of an external condition and continuously estimate position of the rotor at transients as well as at steady state. The superiority of the proposed algorithm is proved through the simulation compared with other sensorless drive methods.

Key Words : BLDC Motor, Sensorless Drive, Fuzzy Control

1. 서 론

[†]교신저자 : 정회원, 한양대 전기제어생체공학부 교수
E-mail : dshyun@hanyang.ac.kr

^{*}학생회원, 한양대 대학원 전기공학과 박사과정

^{**}정회원, 한양대 대학원 전기공학과 박사과정

^{***}정회원, 한영전기공업(주) 기술연구소 책임연구원

접수일자 : 2006. 9. 21 1차 심사 : 2006. 11. 15

2차 심사 : 2007. 2. 21 심사완료 : 2007. 2. 26

최근 산업발전에 따른 가전기기, 컴퓨터 주변기기, 사무 자동화 기기, 공장 자동화를 위한 로봇, 자동차의 제어장치 증가에 따른 각종 전자기기와 정밀기기의 구동원, 제어원으로 브러시리스 전동기의 사용량이 증가되고 있다. 브러시리스 전동기는 직류 전동기의 속

도제어 용이성, 고 효율성, 큰 기동토크와 소형·경량화가 가능한 장점과 계자와 전기자의 위치를 서로 뒤바꿔 놓은 구조를 가짐으로서 브러시와 정류자의 존재에 따른 단점을 보완한 전동기이다^[1]. 브러시리스 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 브러시리스 전동기 구동에 대한 연구가 진행되고 있다.

기존 센서리스 제어기법을 살펴보면, 먼저 개방된 상의 전류를 검출하는 방식^[2]은 동기 절차가 간단하고, 저속영역에서 제어특성이 비교적 우수하다는 장점이 있지만, 고속 운전 시 회전자 위치 분해능이 현저하게 저하될 뿐만 아니라, 특히 이 방법의 실현을 위해서는 환류 다이오드에 흐르는 전류 검출을 위한 추가적인 회로가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 그리고 역기전력의 제 3고조파를 검출하는 방식^[3]은 역기전력을 이용하여 자속을 검출하는 방법에 비해 현저히 작은 용량의 필터를 사용하여, 필터링에 의한 신호 지연에 둔감하고, 광범위 속도에서 원만한 제어가 가능하다고 하지만, 일반적으로 전동기 제작 당시 고려되지 않는 전동기 중성점을 이용한 상전압 측정이 불가피하며 특히 저속영역에서 제 3 고조파 검출이 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다. 또 역기전력을 적분하는 방식^[4]은 역기전력이 영이 되는 지점 ZCP(Zero Crossing Point)로부터 30° 되는 지점까지의 적분값이 일정하다는 원리를 이용하는 방식으로서, 모드 전환시점을 추가로 계산할 필요가 없어 주 프로세서의 부담이 작다는 장점에 반해 센서리스 운전 시 상전류가 역기전력과 완전 동기 되지 못하고, 약계자 운전이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 그리고 개방된 상의 단자 전압을 측정하는 방식^[5]은 개방된 상의 단자전압으로부터 ZCP를 검출하여 회전자의 위치를 간접 검출하는 방식으로서 가장 일반적으로 사용하고 있는 센서리스 제어 기법이지만, 특히 과도상태 응답특성이 좋지 못하다는 단점을 가지고 있다. 마지막으로 역기전력을 외란으로 간주하여 미분방정식 형태로 표현하여 미지 입력관측기를 구성한 센서리스 구동 방식^[6]은 저속부터 고속영역까지 센서리스 구동이 잘 이루어지지만 사다리꼴 형태의 역기전력을 미분방정식 형태로 표현하는데 있어서 한계를 가지고 있기 때문에 역기전력이 변화하는 구간과 일정한 구간을 추정하는데 오차가 발생하여 과도상태와 정상상태의 특성을 제한적으로 이용하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 브러시리스 전동기의 센서리스 구동 방법의 과도상태 및 저속영역에서의 성능 향상을 위한 퍼지 역기전력 관측기를 구성하고, 이를 이용한 위치 및 속도 추정 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘의 타당성과 우수성을 입증하기 위해 미분방정식 형태로 역기전력을 표현한 미지 입력관측기와 비교하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 브러시리스 전동기 시스템 모델링

BLDC 전동기는 일반적으로 120도 간격으로 발생하는 사다리꼴 형태의 역기전력이 평탄한 구간에 구형파의 전류를 흘려줌으로서 토크 맥동이 없는 원활한 구동을 할 수 있다. 그림 1은 3상 2여자 방식의 BLDC 전동기에 대한 정상적인 구동에 대한 시스템 등가회로와 특성을 보여준다.

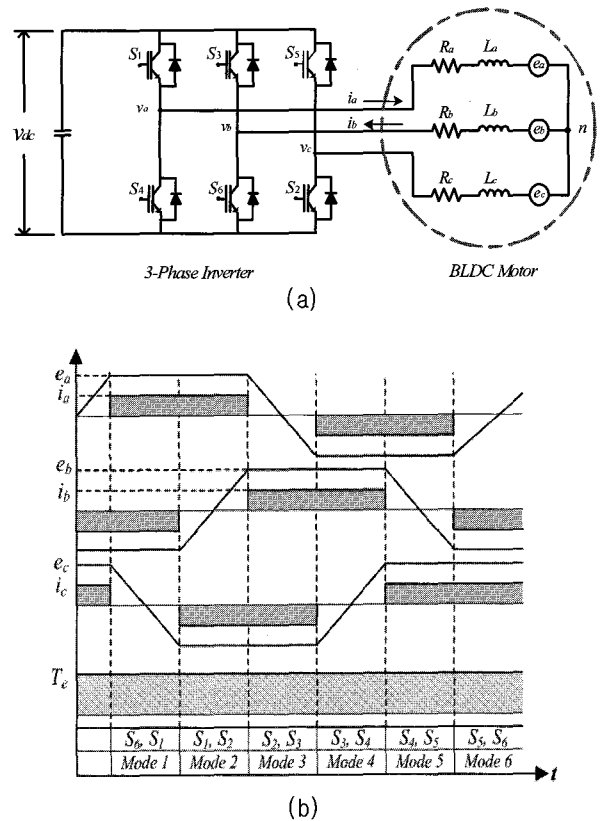


그림 1 일반적인 BLDC 전동기 구동 시스템 (a) 등가회로 (b) 역기전력, 상전류, 발생토크 파형
 Fig. 1 General performance of BLDC motor drive system (a) Electrical equivalent circuit (b) Waveforms of back EMF, phase current, developing torque

BLDC 전동기는 식 (1)과 같은 전압 방정식으로 나타낼 수 있으며, 발생 토크는 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{(e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c)}{\omega_m} \quad (2)$$

여기서, V_a, V_b 와 V_c 는 상전압, R_s 는 상당 전기자 저항, i_a, i_b 와 i_c 는 상전류, L_s 는 상당 전기자 인덕턴스, e_a, e_b 와 e_c 는 상당 역기전력, ω_m 은 각속도이다.

3. 제안하는 센서리스 구동 방법

3.1 제안하는 센서리스 구동 알고리즘

그림 2는 제안한 센서리스 브러시리스 전동기 구동 시스템의 전체 구조를 나타내고 있다. 히스테리시스 전류 제어기에 의해 전류를 제어하고 선간전압은 인버터의 스위칭 상태와 직류링크 전압에 의해 계산되어진다. 회전자 위치는 브러시리스 전동기의 일반적인 센서리스 구동 시스템에서 사용되는 회전자 강제정렬 방법을 이용하였다. 퍼지 역기전력 관측기에 의해 추정된 역기전력 값은 회전자의 위치와 전환 함수를 계산한다. 이러한 전환 함수를 이용하여 회전자의 전환 신호를 생성하여 센서리스 구동이 이루어진다.

3.2 퍼지 역기전력 관측기

퍼지 역기전력 관측기는 브러시리스 전동기의 시스템 상태 방정식과 퍼지 함수 추정기로 구성된다. 퍼지 함수 추정기는 임의의 비선형 함수를 추정할 수 있는 범용 함수 추정기 (Universal Function Approximator)로 알려져 있다^[7]. 비록 퍼지 논리가 이러한 알고리즘을 처리하기 위해 많은 시간을 필요로 하지만, 이러한 시간은 마이크로프로세서 처리 속도의 향상으로 문제가 되지 않는다. 그림 3은 제안한 퍼지 역기전력 관측기의 구조를 나타낸다.

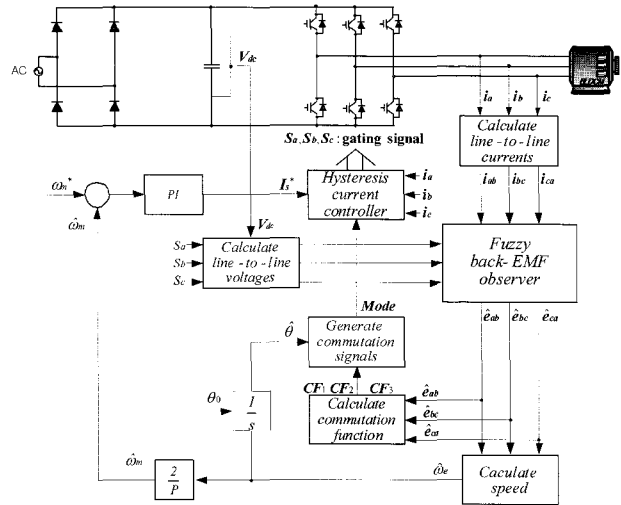


그림 2 제안한 센서리스 구동 시스템의 전체 구조
Fig. 2 The overall structure of the proposed sensorless drive system

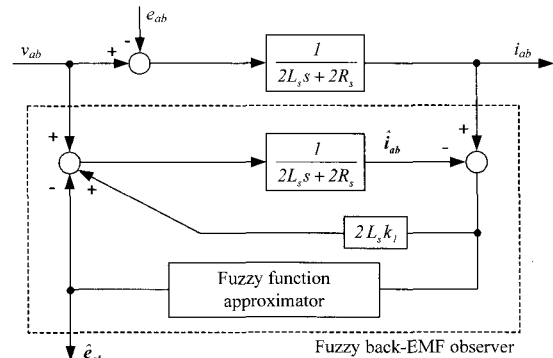


그림 3 제안한 퍼지 역기전력 관측기의 블록 다이어그램
Fig. 3 Block diagram of the Fuzzy back-EMF observer

퍼지 역기전력 관측기는 브러시리스 전동기의 중성점에 관한 접근을 피하기 위해 식 (3)과 같이 선간 방정식으로 구성된다.

$$\frac{di_{ab}}{dt} = -\frac{2R_s}{2L_s} i_{ab} - \frac{1}{2L_s} e_{ab} + \frac{1}{2L_s} v_{ab} \quad (3)$$

식 (3)을 시스템 상태방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu + Fw \quad (4)$$

$$y = Cx \quad (5)$$

여기서,

$$A = \left[-\frac{2R_s}{2L_s} \right], B = \left[\frac{1}{2L_s} \right], F = \left[-\frac{1}{2L_s} \right], C = [1],$$

$$x = [i_{ab}], y = [i_{ab}], u = [v_{ab}], w = [e_{ab}]$$

식 (4)에서 전동기의 역기전력은 외란으로 간주되어 진다. 일반적으로 다항식의 미분방정식으로 구성된 외란 모델은 미분 방정식의 차수를 증가시켜 다양한 형태의 외란을 나타낼 수 있다. 하지만 이러한 외란 모델은 사다리꼴 형태의 역기전력을 정확하게 나타낼 수 없다. 그러므로 임의의 비선형 함수를 추정할 수 있는 퍼지 함수 추정기는 본 논문에서 역기전력 외란 모델로서 적용되었다. 퍼지 함수 추정기의 입력은 브러시리스 전동기 시스템의 전류오차 $err(i_{ab})$ 와 전류오차의 변화분 $cerr(i_{ab})$ 으로 이루어진다. 입력은 다음 식으로 정의한다.

$$err(i_{ab}) = i_{ab} - \hat{i}_{ab} \tag{6}$$

$$cerr(i_{ab}) = err(i_{ab})_{(n-1)} - err(i_{ab})_n \tag{7}$$

퍼지 함수 추정기의 출력은 역기전력 추정값인 \hat{e}_{ab} 이다. 전류 오차, 전류 오차의 변화분 그리고 역기전력 추정값에 대해 그림 4와 같이 각각의 소속 함수를 나타낸다.

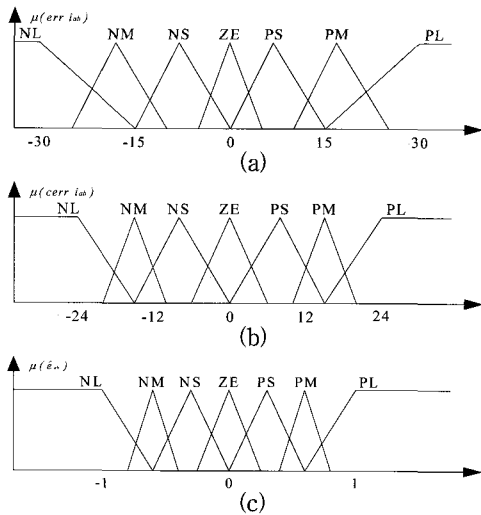


그림 4 퍼지 변수의 소속 함수 (a) 전류 오차 (b) 전류 오차 변화분 (c) 역기전력 추정값

Fig. 4 Membership function of the fuzzy variables (a) Current error (b) Difference of current error (c) Estimated back-EMF

소속 함수를 이용하여 퍼지 변수를 구성하고 각 입력과 출력 값은 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.

이러한 퍼지 변수들은 실험적인 결과 혹은 전문가의 경험을 통해 다른 범위의 값을 갖게 표현이 되며 이러한 값의 변화는 알고리즘을 간단하게 구현하며 신뢰성을 높인다. 퍼지 함수의 추론을 위해서는 아래와 같은 조건에 의해 퍼지함수 결과를 얻을 수 있다.

IF (condition 1) AND (condition 2) THEN (conclusion)

퍼지 함수의 추론은 Mamdani에 의해 제안되어진 식 (8)과 같은 Max-Min 방법으로 이루어진다.

$$DOF_1 = \mu_{NL}(err) \wedge \mu_{NL}(cerr) = \mu_{NL}(\hat{e}_{ab})$$

$$DOF_2 = \mu_{NL}(err) \wedge \mu_{NM}(cerr) = \mu_{NL}(\hat{e}_{ab})$$

$$\vdots$$

$$DOF_{49} = \mu_{PL}(err) \wedge \mu_{PL}(cerr) = \mu_{PL}(\hat{e}_{ab})$$

표 1은 퍼지 함수 추론을 위해 생성되는 퍼지 룰 표를 나타낸다.

표 1 퍼지 룰 표
Table 1 Fuzzy rule table

$\begin{matrix} err(i_{ab}) \\ cerr(i_{ab}) \end{matrix}$	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

이를 통해서 추론된 퍼지 함수의 출력은 퍼지 변수이기 때문에 실제적인 시스템에 적용하기 위한 값으로 바꾸어 주기 위한 비 퍼지화 알고리즘을 수행한다. 비 퍼지화 알고리즘 단계에서 퍼지 변수는 소속함수의 값에 따라서 여러 값이 나타날 수 있으므로 이러한 결과

들을 단일 출력으로 만들기 위해 식 (9)와 같은 비 퍼지화 방법인 무게 중심법(COA)을 이용하여 일반적인 단일 출력을 얻게 된다.

$$\Delta \hat{e}_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^N e_{abi} \mu_{out}(e_{abi})}{\sum_{i=1}^N \mu_{out}(e_{abi})} \quad (9)$$

여기서 e_{abi} 는 퍼지변수 값을 나타내며, $\mu_{out}(e_{abi})$ 는 퍼지변수의 소속 함수를 나타낸다.

퍼지 역기전력 관측기의 전체적인 명확한 출력은 식 (9)에 의하여 추정된 선간 역기전력의 변화분과 이전 값을 이용하여 식 (10)과 같이 \hat{e}_{ab} 를 얻게 된다.

$$\hat{e}_{ab}(k) = \hat{e}_{ab}(k-1) + \Delta \hat{e}_{ab}(k) \quad (10)$$

3.3 전환함수

그림 5는 회전자 위치의 전환 신호를 결정하기 위해 선간 역기전력에 의해 얻어지는 전환 함수를 나타내고 있다. 전환 함수^[8]는 전환 시점 이전에 음의 값을 갖기 때문에 문턱값 결정이 용이하다. 또한 퍼지 관측기가 제공하는 역기전력의 추정치를 이용하기 때문에 노이즈에 둔감하다는 장점을 갖고 있다.

$$\text{Mode 1 and 4 : } CF(\theta)_1 = \frac{e_{ca}}{e_{ab}} \quad (11)$$

$$\text{Mode 2 and 5 : } CF(\theta)_2 = \frac{e_{bc}}{e_{ca}} \quad (12)$$

$$\text{Mode 3 and 6 : } CF(\theta)_3 = \frac{e_{ab}}{e_{bc}} \quad (13)$$

3.4 속도 및 위치의 추정

역기전력이 사다리꼴 형태인 브러시리스 전동기는 120° 도통의 구형과 전류가 인가되므로 역기전력의 크기와 속도사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$E = K_e \omega_e \quad (14)$$

여기서 E는 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.

$$\hat{\omega}_e = \frac{\hat{E}}{K_e} \quad (15)$$

$$\hat{\omega}_m = \frac{2}{P} \hat{\omega}_e \quad (16)$$

$\hat{\omega}_m$ 은 기계적 각속도 추정치이고, P는 극수이다.

회전자의 위치는 식 (17)과 같이 속도를 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$\hat{\theta} = \int \hat{\omega}_e dt + \theta_0 \quad (17)$$

여기서 θ_0 는 회전자의 초기 위치값이다.

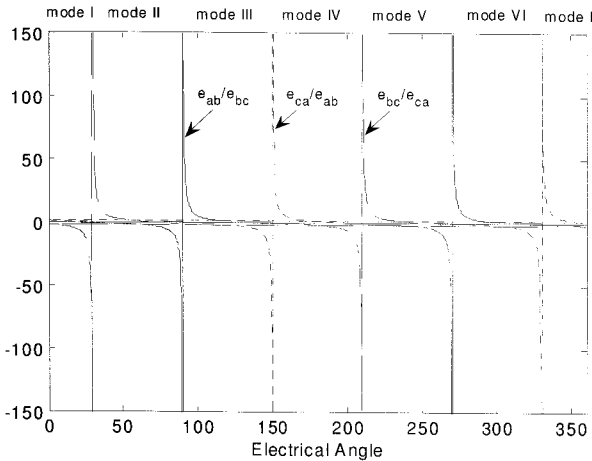


그림 5 전환 함수

Fig. 5 The proposed commutation function

각 모드에서 전환 함수는 다음과 같다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB을 이용하여 구현하였으며 시뮬레이션에 사용된 전동기의 정격과 파라미터들은 표 2와 같다. 제안한 퍼지 역기전력 관측기의 우수성

을 검증하기 위해 최근에 제안되어진 일반적인 외란은 미분방정식 형태로 표현될 수 있다는 이론에 근거하여 브러시리스 직류전동기의 역기전력을 외란으로 간주하여 관측기를 구성한 미지 입력관측기를 이용한 센서리스 구동방법과 비교 하였다. 또한, 외부환경의 변화에 대한 응답특성을 고려하기 위해 부하 토크를 가변시켜 시스템의 속도응답 특성을 살펴보았다.

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

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

그림 6(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 정상상태의 성능을 저하시킨다.

그림 7(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 8(a)~(d)는 제안된 퍼지 관측기를 사용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 역기전력의 파형에 추정된 파형이 미분방정식 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.

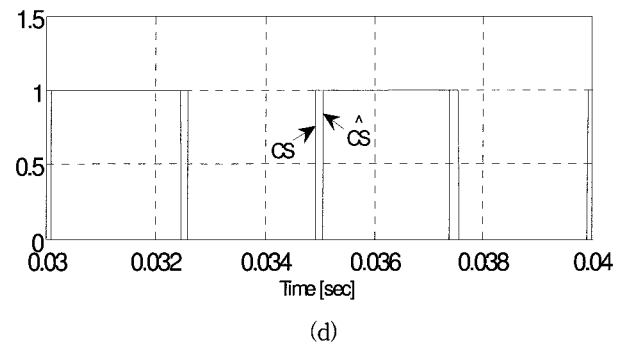
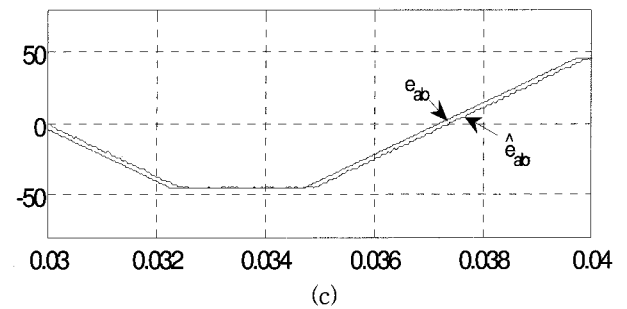
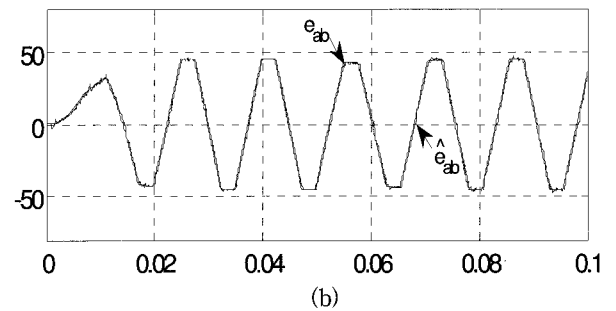
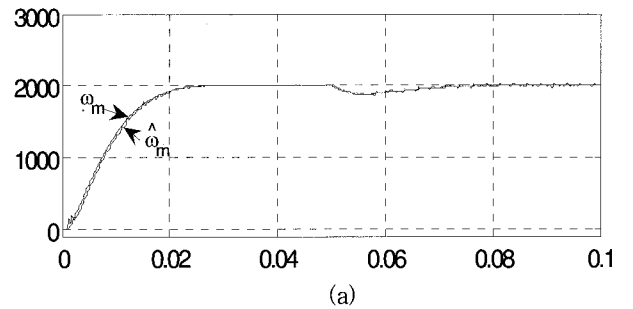
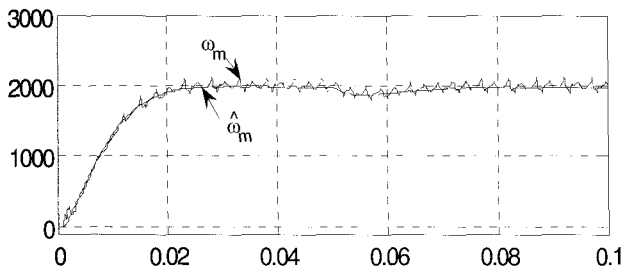
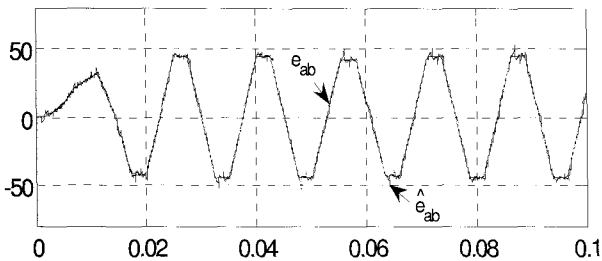


그림 6 관측기에 1차 외란 모델을 사용한 시뮬레이션 결과 (a) 회전자 속도 (b) 선간 역기전력 (c) 확대한 선간 역기전력 (d) 전환 신호

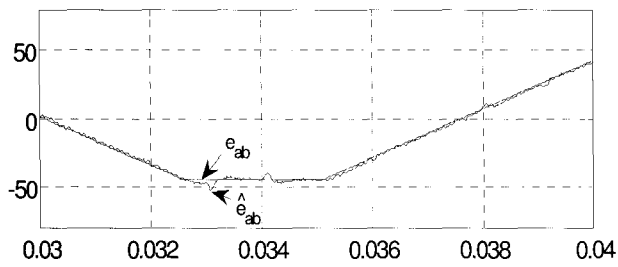
Fig. 6 Simulation results of the observer using first order disturbance model (a) Rotor speed (b) Line-to-line back-EMF (c) Extended line-to-line back-EMF (d) Commutation signal



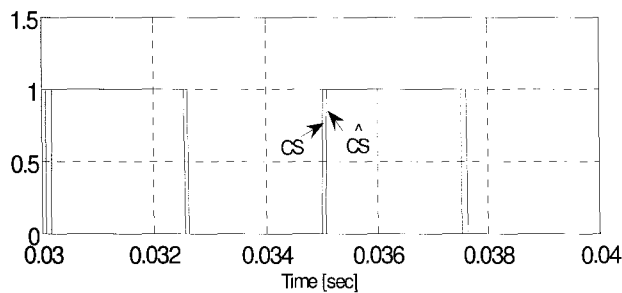
(a)



(b)



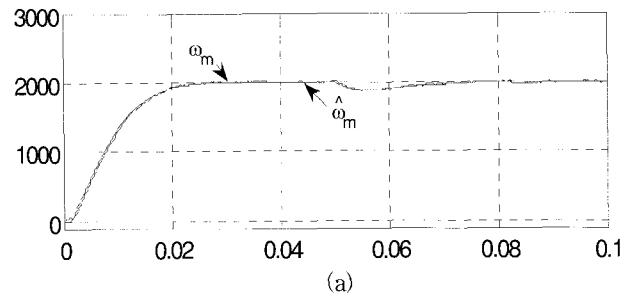
(c)



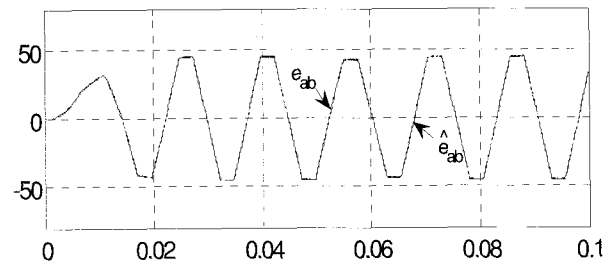
(d)

그림 7 관측기에 2차 외란 모델을 사용한 시뮬레이션 결과 (a) 회전자 속도 (b) 선간 역기전력 (c) 확대한 선간 역기전력 (d) 전환 신호

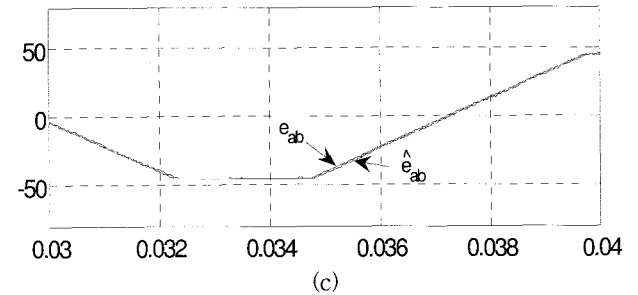
Fig. 7 Simulation results of the observer using second order disturbance model (a) Rotor speed (b) Line-to-line back-EMF (c) Extended line-to-line back-EMF (d) Commutation signal



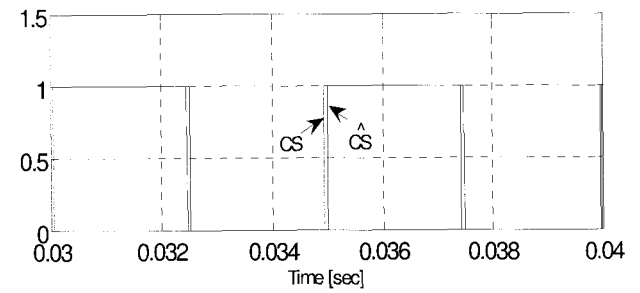
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 8 관측기에 제안한 퍼지 함수 추론기를 사용한 시뮬레이션 결과 (a) 회전자 속도 (b) 선간 역기전력 (c) 확대한 선간 역기전력 (d) 전환 신호

Fig. 8 Simulation results of the observer using the proposed fuzzy function approximator (a) Rotor speed (b) Line-to-line back-EMF (c) Extended line-to-line back-EMF (d) Commutation signal

5. 결 론

브러시리스 전동기의 일반적인 센서리스 구동 방법은 과도상태와 저속영역에서의 성능 저하와 추가적인 회로가 반드시 필요로 한다. 퍼지 역기전력 관측기는 사다리꼴 형태의 역기전력을 우수하게 모델링 함으로써 추가적인 회로 없이 시스템의 정상상태와 과도상태에 대한 실제 전동기의 회전자 위치를 잘 추정하였다.

또한, 저속 영역에서의 우수한 특성을 나타낸 미분방정식 형태의 외란 모델을 이용한 관측기보다 시스템의 역기전력을 보다 정밀하게 추정하여 센서리스 구동 방법의 성능을 개선시키기에 충분히 우수한 특성을 가진다.

본 논문에서는 퍼지 논리에 의한 역기전력 추정 방법 및 이를 이용한 새로운 센서리스 구동 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 퍼지 논리에 의한 역기전력 추정 방법과 제안된 센서리스 제어기법의 타당성을 검증하였다. 제안된 센서리스 구동 방법은 브러시리스 전동기 시스템의 저가와 신뢰성을 요구하는 산업 응용분야에 쉽게 적용될 수 있을 것이다.

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. on Ind. Appl.*, Vol. 27, No. 5, pp. 928~933, Sep./Oct. 1991.

[3] 윤영호, 김연충, 원충연, "3고조파를 이용한 PM BLDC 전동기 구동을 위한 센서리스 제어," *전력전자학회 논문지*, 제10권, 제4호, pp. 323~330, Aug. 2005.

[4] H. R. Andersen and J. K. Pedersen, "Sensorless ELBERFELD Control of Brushless DC Motors for Energy-Optimized Variable-Speed Household Refrigerators," *EPE Conf. Rec.*, Vol. 1, pp. 314~318, Sep. 1997.

[5] 장항제, 이룡순, 김종선, 유지윤, 이광운, 여형기, 박정배, "브러시리스 직류전동기용 새로운 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구," *전력전자학회 논문지*, 제6권, 제3호, pp. 223~230, June 2001.

[6] 김태성, 류지수, 현동석, "미지입력 관측기를 이용한 BLDC 전동기 센서리스 드라이브에 대한 연구," *전력전자학회 논문지*, 제11권, 제1호, pp. 2~17, Feb. 2006.

[7] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I & Part II," *IEEE Trans. on Syst. Man Cybern.*, Vol. 20, No. 2, pp. 404-435, March/April 1990.

[8] Tae-Hyung Kim and M. Ehasani, "Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1635~1645, Nov. 2004.

저 자 소 개



박병건(朴炳健)

1979년 4월 16일생. 2005년 명지대 전기정보제어공학부 졸업. 2007년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김태성(金泰成)

1973년 7월 4일생. 1996년 광주대 전자공학과 졸업. 2002년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



류지수(柳志帥)

1968년 7월 28일생. 1990년 단국대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2004년~2005년 한양대 전기공학과 BK 연구교수. 2006년~현재 한영전기공업(주) 기술연구소 책임연구원.



현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원혜공과대학 교환교수. 2003년 IEEE, Fellow Member. 1979년~현재 한양대 전자전기공학과 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.