

미지입력 관측기를 이용한 BLDC 전동기 센서리스 드라이브에 대한 연구

김태성, 류지수, 현동석
한양대학교

Sensorless Drive of Brushless DC Motors Using an Unknown Input Observer

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

ABSTRACT

In this paper, a novel motor control method is proposed to improve the performance of sensorless drive of BLDC motors. The unknown input (back-EMF) is modelled as the additional state of system in this paper. Taking into account the disturbance adopted by the back-EMF, the observer can be obtained by the augmented system equation. An algorithm to detect the back-EMF of the BLDC motor using the state observer is constructed. As a result, the novel sensorless drive of BLDC motors that can strictly estimate rotor position and speed is proposed.

1. 서 론

현대사회에서 자동화설비의 확장으로 인하여 산업용 로봇 및 각종 수치제어 공작기계에서부터 가정용 기기 등 모든 분야에서 서보 전동기는 필수적인 구동원으로 자리 잡고 있다. 그중 직류 전동기의 계자와 전기자의 위치를 서로 바꿔 놓은 구조를 갖고 있는 BLDC 전동기는 전동기의 수명과 같은 브러시를 제거함으로써, 기계적 마모에 의한 유지 및 보수의 문제를 해결하여 신뢰성을 향상시켰을 뿐만 아니라, 최근 높은 에너지 집적도를 갖는 영구자석, 전력용 소자 및 고성능 마이크로 프로세서 등의 비약적인 연구 발전에 힘입어 소형, 경량, 고효율성을 갖는 최적의 전동기로 인정 되고 있다^[1].

BLDC 전동기의 구동을 위해 반드시 필요한 회전자 위치정보를 얻기 위해 사용된 홀소자, 레졸버 및 엔코더 등은 각각 외부 자계에 민감, 제작 단가의 상승, 방열의 곤란 등 여러 가지 문제점들을 안고 있어서, 최근에는 위치센서는 물론이고 속도센서까지 제거한 뒤에도 안정

적인 제어를 할 수 있는 여러 기법들이 제안 되고 있다.

기존 센서리스 제어기법은 크게 4가지로 분류할 수 있다. 먼저 개방된 상 (Phase) 의 전류를 검출하는 방식^[2]은 고속 운전 시 회전자 위치 분해능이 현저하게 저하될 뿐만 아니라, 특히 이 방법의 실현을 위해서는 환류 다이오드에 흐르는 전류 검출을 위한 비교회로에 추가적으로 절연된 전원 (Isolated Power) 이 공급되어야 한다. 그리고 역기전력의 제 3고조파를 검출하는 방식^[3]은 일반적으로 전동기 제작 당시 고려되지 않는 전동기 중성점을 이용한 상전압 측정이 불가피하며 특히 저속영역에서 제 3 고조파 검출이 쉽지 않다. 또 역기전력을 적분하는 방식^[4]은 센서리스 운전 시 상전류가 역기전력과 완전 동기 되지 못하고, 약계자 운전이 불가능하다. 마지막으로 개방된 상의 단자 전압을 측정하는 방식^[5]은 가장 일반적으로 사용하고 있는 센서리스 제어기법이지만, 특히 과도상태 응답특성이 좋지 않다.

본 논문에서는 O'Reilly가 밝힌바 있는 미지 입력 시스템의 모델과 시스템 구조와의 관계^[6]를 이용한 미지 입력 (Unknow Input) 관측기를, BLDC 전동기 센서리스 제어에 적합 하도록 새롭게 재구성하여, 사다리꼴형태의 역기전력을 갖고 있는 BLDC 전동기 구동에 필요한 역기전력을 추정하는, 새로운 센서리스 제어 기법을 제안 하고자 한다.

2. BLDC 전동기의 모델링

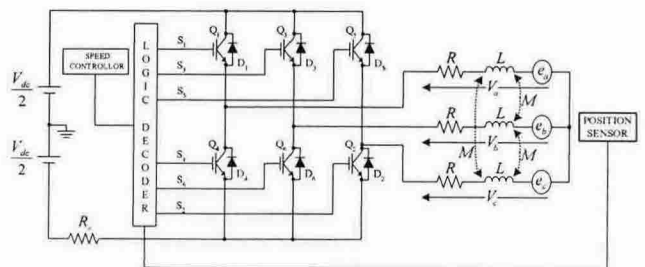


그림 1 BLDC 전동기 드라이브의 블록 다이어그램
Fig. 1 Block diagram of BLDC motor drive

그림 1은 일반적인 BLDC 전동기 드라이브의 블록도를 보여주고 있다.

BLDC 전동기의 상전압 방정식은 식 (1)과 같으며, 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 모터 상전압, R_s 는 상당 전기저항, 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 각속도 이다.

BLDC 전동기는 역기전력의 형태가 사다리꼴 모양을 갖기 때문에 역기전력의 값이 일정한 부분에 구형과 형태의 상전류가 입력될 때 토크리플이 가장 작은, 안정된 제어가 이루어짐을 식 (2)를 통해 알 수 있다.

3. 제안하는 센서리스 제어 방법

BLDC 전동기 구동 시스템에 존재하는 센서는 크게 3 가지로서, 회전자 자극 검출로 회전자 위치를 파악하여 스위칭 전환시점 결정에 사용되는 자기센서와 상전류의 측정을 위한 전류센서, 그리고 직류 링크 전압센서가 있다. 일반적인 센서리스 구동이라 함은 이중 자기센서의 제거를 일컫는다. 따라서 BLDC 전동기 센서리스 구동 시스템에서 역기전력은 직접 측정되지 않으므로 이를 미지 입력으로 간주 하여 추가적인 시스템의 상태로 모델링하고, 전체 시스템은 역기전력에 대한 미분방정식 형태 외란 모델을 도입한 확장 상태방정식으로 표현된다. 이 때 얻어지는 확장 상태방정식은 항상 가관측하게 되며, 역기전력 추정을 위한 상태관측기의 설계가 가능하다. 또한 추정된 역기전력으로부터 속도 및 위치 추정 알고리즘을 도출하게 된다.

3.1 미지 입력 관측기를 사용한 역기전력 추정

선간전류의 변화에 대한 시스템 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 i_{ab} 와 v_{ab} 는 측정할 수 있으므로 기지 (Known)이며, e_{ab} 는 미지 (Unknown) 이다.

식 (3)을 상태방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

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

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

여기서

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

$$C = [1], \quad x = [i_{ab}], \quad y = [i_{ab}], \quad u = [v_{ab}], \quad w = [e_{ab}]$$

이다. 식 (4)에서 역기전력을 미지의 외란으로 간주하고 있다. 외란은 미리 예측하기 어렵지만 실제 계통에서 발생할 수 있는 외란은 계단, 램프, 삼각함수 형태가 대부분이므로 아래와 같이 미분방정식에 의해서 모델링 할 수 있다.

$$\dot{z} = Dz \quad (6)$$

$$w = Hz \quad (7)$$

여기서

$$D = \begin{bmatrix} 0 & I_{(\delta-1) \times 1} \\ 0 & 1 \times (\delta-1) \end{bmatrix}, \quad H = [I_1 \ 0 \ 1 \times (\delta-1)]$$

이고, I 는 단위행렬 (Identity Matrix)이며, δ 는 아래 다항식의 차수이다.

$$w = \sum_{i=0}^{\delta} a_i t^i, \quad \delta \geq 1 \quad (8)$$

외란에 대한 실험적 정보가 없는 경우는 식 (8)에서 $a_i = 0$ 으로 설정한다. 이와 같은 모델링은 느리게 변화하는 미지 외란 뿐 아니라 다항식의 차수를 증가시킴으로써 대부분의 외란에 대한 효과적인 모델을 제공한다.

따라서, 이상의 모델링 방법을 역기전력의 모델링에 적용하여 미지 입력항을 제거한, 다음의 확장모델 (Augmented Model)을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx_a}{dt} = A_a x_a + B_a u \quad (9)$$

$$y = C_a x_a \quad (10)$$

여기서

$$A_a = \begin{bmatrix} A & FH \\ 0 & E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2R_s}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{-2L_s} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_a = [C \ 0] = [1 \ 0],$$

$$x_a = \begin{bmatrix} i_{ab} \\ e_{ab} \end{bmatrix}, \quad y = [i_{ab}], \quad u = [v_{ab}]$$

이며, 외란 다항식의 차수 $\delta=1$ 로 설정하였다.

식 (9)와 (10)의 시스템은 가관측하므로 다음과 같은 관측기를 구성하는 것이 가능하다.

$$\frac{d\hat{x}_a}{dt} = A_a \hat{x}_a + B_a u + K(y - \hat{y}) \quad (11)$$

여기서 K 는 관측기 이득행렬로서 관측기가 안정되도록 적절히 선정한다. 관측기의 이득이 적절히 선택된다면 이 관측기는 전류 및 역기전력을 정확하게 추정할 수 있다. 관측기의 구조는 그림 2와 같다.

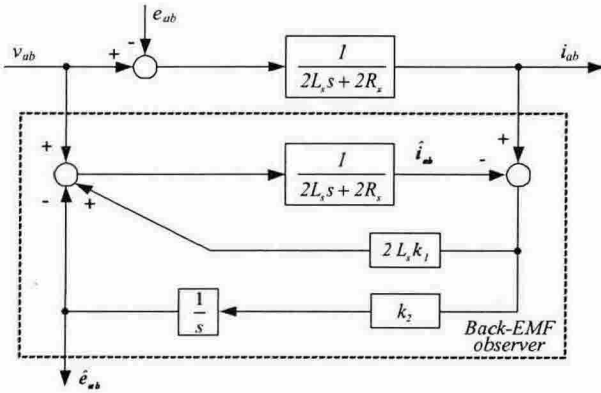


그림 2 제안하는 역기전력 관측기의 블록 다이어그램
Fig. 2 Block diagram of the proposed back-EMF observer

따라서, 3상 모두를 포함한 전체 관측기 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ab} \\ \hat{e}_{ab} \\ \hat{i}_{bc} \\ \hat{e}_{bc} \\ \hat{i}_{ca} \\ \hat{e}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2R_s}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2R_s}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2R_s}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ab} \\ \hat{e}_{ab} \\ \hat{i}_{bc} \\ \hat{e}_{bc} \\ \hat{i}_{ca} \\ \hat{e}_{ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2L_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2L_s} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ k_2 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 \\ 0 & 0 & k_2 \\ 0 & 0 & k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} - \hat{i}_{ab} \\ i_{bc} - \hat{i}_{bc} \\ i_{ca} - \hat{i}_{ca} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2 전환 함수

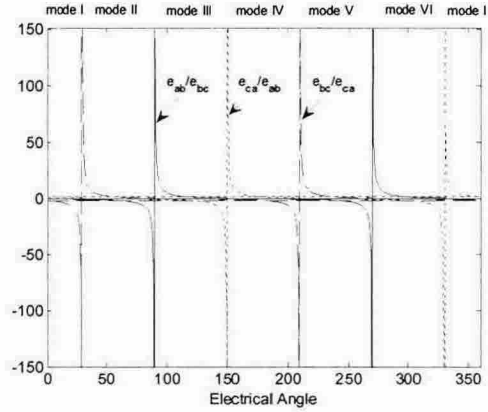


그림 3 제안하는 전환 함수
Fig. 3 The proposed commutation function

그림 3은 제안하는 전환 함수를 나타내고 있다. 이와 유사한 전환 함수가 제안된 바 있으나^[7], 본 논문에서 제안하는 전환 함수는 전환 시점 이전에 음의 값을 갖기 때문에 문턱값 결정이 용이하다. 또한 페루프 관측기가 제공하는 역기전력의 추정치를 이용하기 때문에 노이즈에 둔감하다는 장점을 갖고 있다.

각 모드에서 전환 함수는 다음과 같다.

$$\text{Mode 1 and 4 : } CF(\theta)_1 = \frac{e_{ab}}{e_{bc}} \quad (13)$$

$$\text{Mode 2 and 5 : } CF(\theta)_2 = \frac{e_{bc}}{e_{ca}} \quad (14)$$

$$\text{Mode 3 and 6 : } CF(\theta)_3 = \frac{e_{ca}}{e_{ab}} \quad (15)$$

3.3 속도 및 위치의 추정

영구자석형 동기전동기에서는, 역기전력 위상이 바로 위치 정보이기 때문에 역기전력의 추정값이 얻어지면 간단한 역 삼각함수 연산에 의해 위치를 계산할 수 있다. 그러나 BLDC 전동기의 경우 사다리꼴 역기전력을 갖기 때문에 120° 도통의 구형과 전류가 인가되므로 d-q 변환을 통한 삼각함수 연산을 할 수 없다. BLDC 전동기에서 역기전력 크기와 속도사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$E = K_e \omega_e \quad (16)$$

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

또한, 어떤 구간에서든지 a, b, c상 각각의 역기전력의 크기를 서로 비교해서 최대치를 찾으면 역기전력의 크기를 구할 수 있다. 따라서 속도 추정은 관측기가 제공하는 역기전력 추정치로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{\omega}_e = \frac{\hat{E}}{K_e} \quad (17)$$

$$\hat{\omega}_m = \frac{2}{P} \hat{\omega}_e \quad (18)$$

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

$$\vartheta = \int \hat{\omega}_e dt + \theta_0 \quad (19)$$

여기서 θ_0 는 회전자 초기 위치값이다.

3.4 제안하는 센서리스 방법의 전체 구조

제안하는 센서리스 방법의 전체 구조 블록 다이어그램은 그림 4와 같다. 각상의 전류제어를 위해 히스테리시스 전류 제어기가 사용되었다. 선간전압은 직류링크전압과 인버터 스위칭 상태를 기반으로 계산하였다. 또한 일반적인 BLDC 전동기의 센서리스 방법에서 회전자의 초기 기동을 위해 사용되는 강제정렬방법을 사용하였다.

앞서 언급했던 바와 같이, 역기전력 관측기는 역기전력 추정치를 제공하고 이 값을 다시 전동기의 속도, 회전자의 위치 그리고 전환 함수를 연산 할 수 있게 해준다. 이렇게 만들어진 전환 함수와 회전자의 위치값은 전환 신호 발생 블록에서 전환 신호를 발생시킨다. 이는 히스테리시스 전류 제어기를 통하여 최종적으로 각각의 전력용 반도체 소자에 인가됨으로서 제어를 달성하게 된다. 즉 전환 순간을 정확하게 설정하기 위해 필요했던 회전자의 위치정보는 역기전력 관측기에 의해 추정된 역기전력 값을 사용한 전환 함수에 의해 얻어지게 된다.

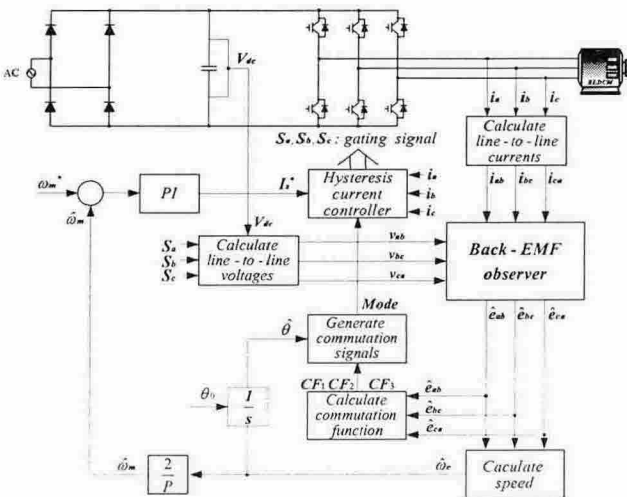


그림 4 제안하는 센서리스 구동 시스템의 전체 구조
Fig. 4 The overall structure of the proposed sensorless drive system

4. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 사용된 BLDC 전동기의 정격과 파라미터들은 표 1과 같다.

표 1 BLDC 전동기의 정격과 파라미터
Table 1 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

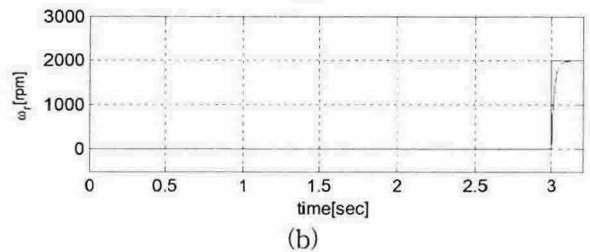
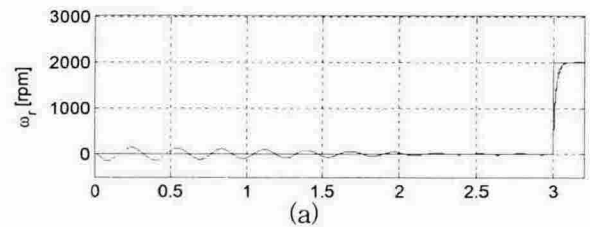


그림 5 과도상태 속도 응답 특성 (a) 제안된 센서리스 방법 (b) 일반적인 센서를 사용한 방법

Fig. 5 Speed response at transient state (a) In the proposed sensorless scheme (b) In the conventional scheme use sensor

그림 5는 제안된 센서리스 제어 방법과 센서를 사용한 일반적인 제어 기법을 사용하였을 경우 각각에 대한 초기 기동과 과도상태 시 속도 응답 특성을 보여주고 있다. 제안된 센서리스 제어 방법을 사용하였을 때, 특히 강제 정렬 이후 과도상태의 동작 특성에 있어서, 센서를 사용한 방법과 비교하여도 손색이 없을 만큼의 매우 양호한 응답 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 6(a)~(c)는 2000 [rpm]에서 제안된 센서리스 드라이브의 응답특성을 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 0.05 초에 1/2 정격부하를 인가하였다. 그림 6(a)에서 무부하시 속도는 거의 정확하게 추정하고 있으며, 부하 인가 후에 약간의 편차를 관측할 수 있으나 전체적으로 양호한 성능을 보여준다. 그림 6(b)는 관측기에 의해 추정된 순간 역기전력을 보여주고 있다. 그림 6(c)는 전환 함수를 보여주고 있다. 여기서 전환 신호는 전환 함수에 문턱값을 50으로 설정하여 얻어진 것이다.

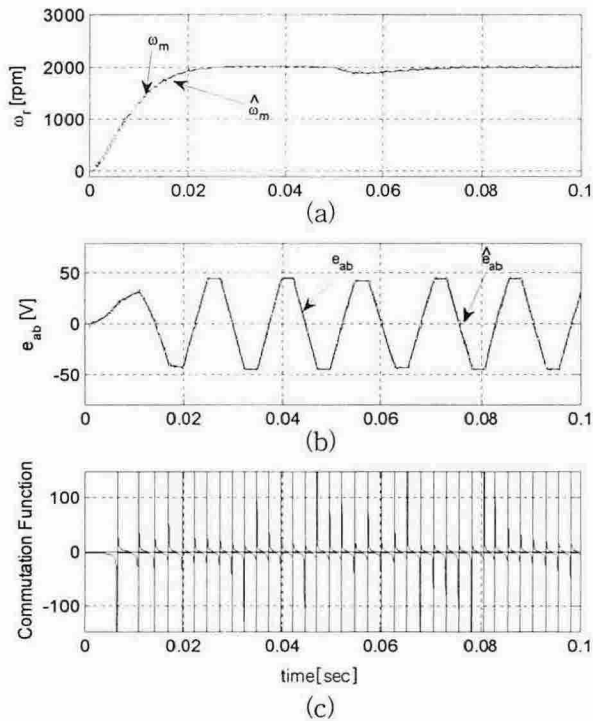


그림 6 2000 [rpm]에서 제안된 센서리스 방법을 사용한 시뮬레이션 결과 (a) 회전자 속도 (b) 선간 역기전력 (c) 전환 함수
 Fig. 6 Simulation results of the proposed sensorless scheme at 2000 [rpm] (a) Rotor speed (b) Line-to-line back-EMF (c) Commutation function

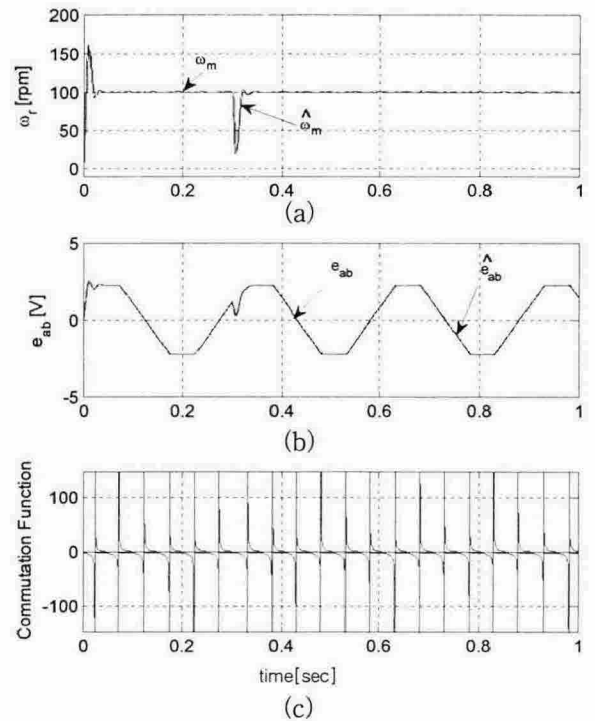


그림 7 100 [rpm]에서 제안된 센서리스 방법을 사용한 시뮬레이션 결과 (a) 회전자 속도 (b) 선간 역기전력 (c) 전환 함수
 Fig. 7 Simulation results of the proposed sensorless scheme at 100 [rpm] (a) Rotor speed (b) Line-to-line back-EMF (c) Commutation function

그림 7(a)~(c)는 100 [rpm]에서 제안된 센서리스 드라이브의 응답특성을 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 0.3 초에 1/4 정격부하를 인가하였다. 저속영역에서도 비교적 우수한 추정과 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 미지 입력인 역기전력을 추가적인 시스템 상태로 모델링하고, 전체 시스템을 역기전력에 대한 미분방정식 형태 외란 모델을 도입한 확장 상태방정식으로 표현함으로써 얻어지는 상태관측기를 통하여 역기전력을 추정할 수 있었고 이를 통해 회전자의 위치 및 속도를 정밀하게 추정하는 새로운 알고리즘이 제안되었다.

제안된 방법을 사용함으로써 위치 및 속도를 검출하기 위한 회로에서 발생하는 제작상의 문제점을 제거할 수 있으며, 엔코더와 같은 부수 회로가 필요 없게 되어 전동기 제어장치의 저가화가 가능 할 것이다. 또한 근래에 제안된 각종 센서리스 제어기법과는 달리 강제 정렬 직후 과도 상태에서의 동작 특성이 개선됨으로서 매우 안정적인 전동기 제어를 할 수 있으며 특히 저속영역에서 매우 뛰어난 동작 특성을 갖는다. 게다가 이는 실제 구현이 간단하여, 저가형 구동장치가 필요로 하는 산업용 분야에서 쉽게 적용할 수 있으리라 판단된다.

참고 문헌

- [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] J. C. Moreira, "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating Over a Wide Speed Range," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, No. 6, pp. 1392~1401, Nov./Dec. 1996.
- [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] 여형기, "브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구," 고려대학교 박사학위 논문, 1998.
- [6] M. Gopal, J. G. Ghodekar "An Application of Decentralized Observer Theory to Interconnected Power Systems," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 15, No. 2, pp. 303~308, Mar./Apr. 1985.
- [7] 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.