

미지입력 관측기를 이용한 BLDC 전동기 센서리스 드라이브에 대한 연구

金泰成[†], 柳志帥^{*}, 玄東石^{**}

Sensorless Drive of Brushless DC Motors Using an Unknown Input Observer

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

요 약

본 논문에서는 BLDC 전동기 센서리스 드라이브의 성능 향상을 위한 새로운 전동기 제어 기법을 제안한다. 최근 센서리스 제어방법의 주류를 이루고 있는 단자전압을 이용하는 방식들은 전동기를 동기 모드로 운전할 때 과도한 전압이 인가되면, 회전자 위치를 정확하게 검출할 수 없다. 특히 과도상태영역에서의 응답특성이 좋지 않다. 따라서 본 논문에서는 미지 입력인 역기전력을 추가적인 시스템의 상태로 모델링하고, 전체 시스템을 역기전력에 대한 미분방정식 형태 외란 모델을 도입한 확장 상태방정식으로 표현함으로써 얻어지는 상태관측기를 통하여 전동기의 속도 및 회전자 위치를 추정하는 새로운 알고리즘을 제안한다.

ABSTRACT

In this paper, a novel motor control method is proposed to improve the performance of sensorless drive of BLDC motors. In the terminal voltage sensing method, which is a great portion of sensorless control, a precise rotor position cannot be obtained when excessive input is applied to the drive during synchronous operation mode. Especially in the transient state, the response characteristic decreases. To cope with this problem, 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.

Key Words : BLDC Motor, Sensorless, Unknown Input Observer

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, 마찰에 의하여 전동기의 수명에 영향을 주는 브러시를 제거함으로써, 기계적 마모에 의한 유지 및 보수 문제를 해결하여 신뢰성을 향상시켰을 뿐만 아니라, 최근 높은 에너지 집적도를 갖는 영구자석, 전력용 소자 및 고성능 마이크로 프로세서 등의 비약적인 연

[†]교신저자 : 정회원, 한양대 대학원 전기공학과 박사과정

E-mail : redtea@ihanyang.ac.kr

^{*}정회원, 한양대 대학원 전기공학과 연구교수

^{**}정회원, 한양대 전기제어생체공학부 교수

접수일자 : 2005. 9. 9 1차 심사 : 2005. 10. 24

심사완료 : 2006. 1. 2

구 발전에 힘입어 소형, 경량, 고 효율성을 갖는 최적의 전동기로 인정 되고 있다^[1].

BLDC 전동기의 구동을 위해 반드시 필요한 회전자의 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 안정적인 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 전력용 반도체 소자에 역병렬로 연결되어있는 환류 다이오드의 도통 간격을 검출하는 방식으로, 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 비교회로에 추가적으로 절연된 전원(Isolated Power)이 공급되어야 한다는 단점을 갖고 있다. 그리고 역기전력의 제 3고조파를 검출하는 방식^[3]은 고정자측 3상 전압의 간단한 합을 통해 기본파와 다른 고조파를 모두 제거시키고 오직 3고조파만을 검출하는 방식으로, 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 운전시 상전류가 역기전력과 완전 동기 되지 못하고, 약계자 운전이 불가능하다는 단점을 갖고 있다. 마지막으로 개방된 상의 단자전압을 측정하는 방식^[5]은 개방된 상의 단자전압으로부터 ZCP를 검출하여 회전자의 위치를 간접 검출하는 방식으로서 가장 일반적으로 사용하고 있는 센서리스 제어기법이지만, 특히 과도상태 응답특성이 좋지 못하다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 O'Reilly가 밝힌바 있는 미지 입력 시스템의 모델과 시스템 구조와의 관계^[6]를 이용한 미지 입력(Unknown Input) 관측기를, BLDC 전동기 센서리스 제어에 적합 하도록 새롭게 재구성하여, 사다

리꼴형태의 역기전력을 갖고 있는 BLDC 전동기 구동에 필요한 역기전력을 추정하는, 새로운 센서리스 제어 기법을 제안하고자 한다.

2. BLDC 전동기의 모델링

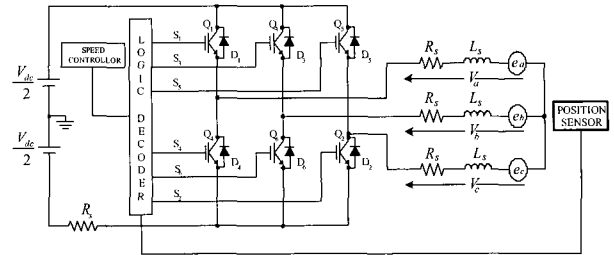


그림 1 BLDC 전동기 드라이브의 블록 다이어그램
Fig. 1 Block diagram of BLDC motor drive

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 전동기 상전압, R_s 는 해당 전기자 저항, i_a, i_b 와 i_c 는 상전류, L_s 는 해당 전기자

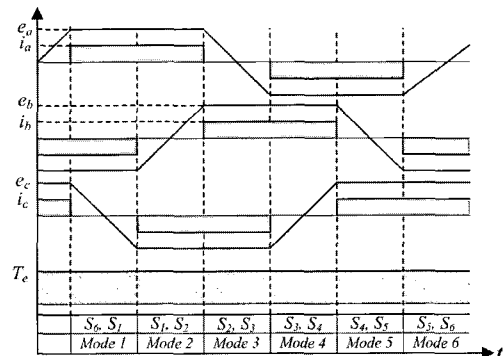


그림 2 BLDC 전동기의 역기전력, 상전류와 토크 파형
Fig. 2 Waveforms of back EMF and phase current of BLDCM

인덕턴스, e_a , e_b 와 e_c 는 상당 역기전력, ω_m 은 각속도 이다.

그림 2와 같이 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 3가지로서, 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 미지입력으로 간주하여 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 미지입력 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 $A = \left[-\frac{2R_s}{2L_s} \right]$, $B = \left[\frac{1}{2L_s} \right]$, $F = \left[-\frac{1}{2L_s} \right]$, $C = [1]$, $x = y = [i_{ab}]$, $u = [v_{ab}]$, $w = [e_{ab}]$ 이다.

식 (4)에서 역기전력을 미지의 외란으로 간주하고

있다. 외란은 미리 예측하기 어렵지만 실제 계통에서 발생할 수 있는 외란은 계단, 램프, 삼각함수 형태가 대부분이므로 식 (6), (7)과 같이 미분 방정식에 의해서 다음과 같이 모델링 할 수 있다^[6].

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

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

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

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^[6].

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

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

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

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

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

$x_a = \begin{bmatrix} i_{ab} \\ e_{ab} \end{bmatrix}$, $y = [i_{ab}]$, $u = [v_{ab}]$ 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. 제안하는 역기전력 관측기의 블록 다이어그램은 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

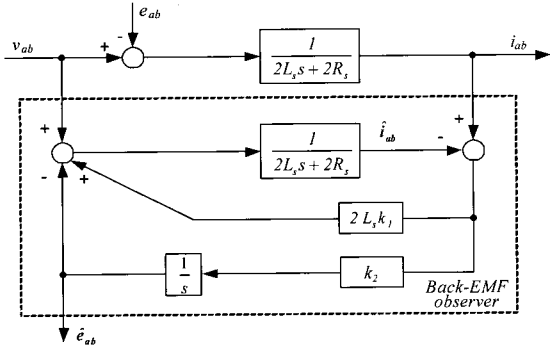


그림 3 제안하는 역기전력 관측기의 블록 다이어그램
Fig. 3 Block diagram of the proposed back-EMF observer

따라서 3상 모두를 포함한 전체 관측기 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ab} \\ \hat{e}_{ab} \\ \hat{i}_{bc} \\ \hat{e}_{bc} \\ \hat{i}_{ca} \\ \hat{e}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2R_s}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2R_s}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2R_s}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ab} \\ \hat{e}_{ab} \\ \hat{i}_{bc} \\ \hat{e}_{bc} \\ \hat{i}_{ca} \\ \hat{e}_{ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2L_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2L_s} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & k_3 & 0 \\ 0 & k_4 & 0 \\ 0 & k_5 & 0 \\ 0 & k_6 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} - \hat{i}_{ab} \\ i_{bc} - \hat{i}_{bc} \\ i_{ca} - \hat{i}_{ca} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2 전환 함수

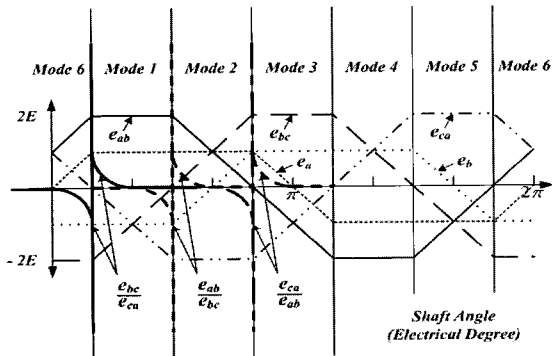


그림 4 제안하는 전환 함수
Fig. 4 The proposed commutation function

그림 4는 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.

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

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

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

3.3 속도 및 위치의 추정

영구자석형 동기전동기에서는, 역기전력 위상이 바로 위치 정보이기 때문에 역기전력의 추정값이 얻어진다면 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 E는 역기전력의 크기, K_e는 역기전력 상수, 그리고 ω_e는 전동기의 전기적 각속도이다.

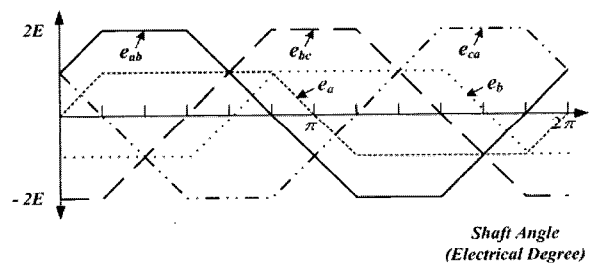


그림 5 선간 역기전력
Fig. 5 Line-to-line back-EMF

그림 5는 어떤 구간에서든지 a, b, c상 각각의 역기전력의 크기를 서로 비교해서 최대치를 찾으면 역기전력의 크기를 구할 수 있음을 보여준다. 따라서 속도 추정은 관측기가 제공하는 역기전력 추정치로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

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

여기서 $\hat{\omega}_m$ 은 기계적 각속도 추정치이고, P 는 극수이다.

위치는 속도를 적분함으로써 얻을 수 있다.

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

여기서 θ_0 는 회전자의 초기 위치 값이다.

이렇게 구해진 추정 위치는 전환 신호와 비교되어, 회전자 위치 추정이 잘 이루어 지지 않는 경우 인버터 스위칭 신호를 차단시키는 시스템 보호용으로 사용 된다.

3.4 제안하는 센서리스 방법의 전체 구조

제안하는 센서리스 방법의 전체 구조 블록다이어그램은 그림 6과 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.

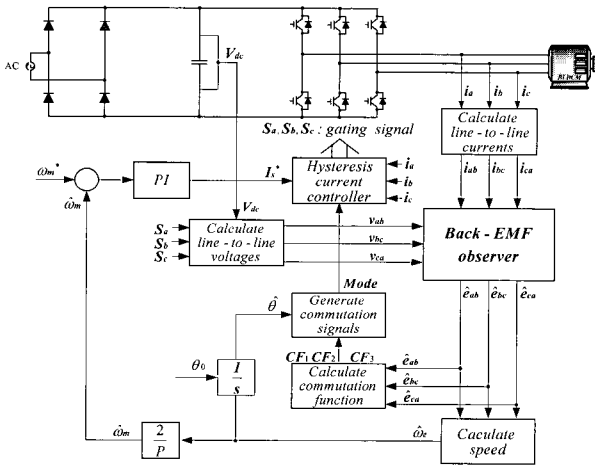


그림 6 제안하는 센서리스 구동 시스템의 전체 구조
Fig. 6 The overall structure of the proposed sensorless drive system

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 위치 값은 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.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB을 통해 실행되었으며, 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	T_e	0.662 [Nm]
정격 속도	N_r	3500 [rpm]
저항	R_s	0.75 [Ω]
인덕턴스	L_s	0.0031 [H]
역기전력 상수	K_e	0.1074 [V/(rad/sec)]
극 수	P	4

그림 7(a)~(f)는 2000 [rpm]에서 제안된 센서리스 드라이브의 응답특성을 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 0.05 초에 1/2 정격부하를 인가하였다. 그림 7(a)와(b)에서 무부하시 속도는 거의 정확하게 추정하고 있으며, 부하 인가 후에 약간의 편차를 관측할 수 있으나 전체적으로 양호한 성능을 보여준다. 그림 7(c)와(d)는 전류와 관측기에 의해 추정된 선간 역기전력을 보여주고 있다. 그림 7(e)와(f)는 전환 함수와 전환 신호를 보여주고 있다. 여기서 전환 신호는 전환 함수에 문턱값을 50으로 설정하여 얻어진 것이다.

그림 8(a)~(f)는 100 [rpm]에서 제안된 센서리스 드라이브의 응답특성을 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 0.3 초에 1/4 정격부하를 인가하였다. 센서리스 제어 기법을 이용한 BLDC 전동기 구동에 있어서 저속 영역이라 할 수 있는 정격의 5%를 감안했을 경우에도 우수한 제어 특성을 갖게 됨을 알 수 있다.

그림 9는 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 사용 하였을 때, 특히 강제 정렬 이후 과도상태의 동작 특성에 있

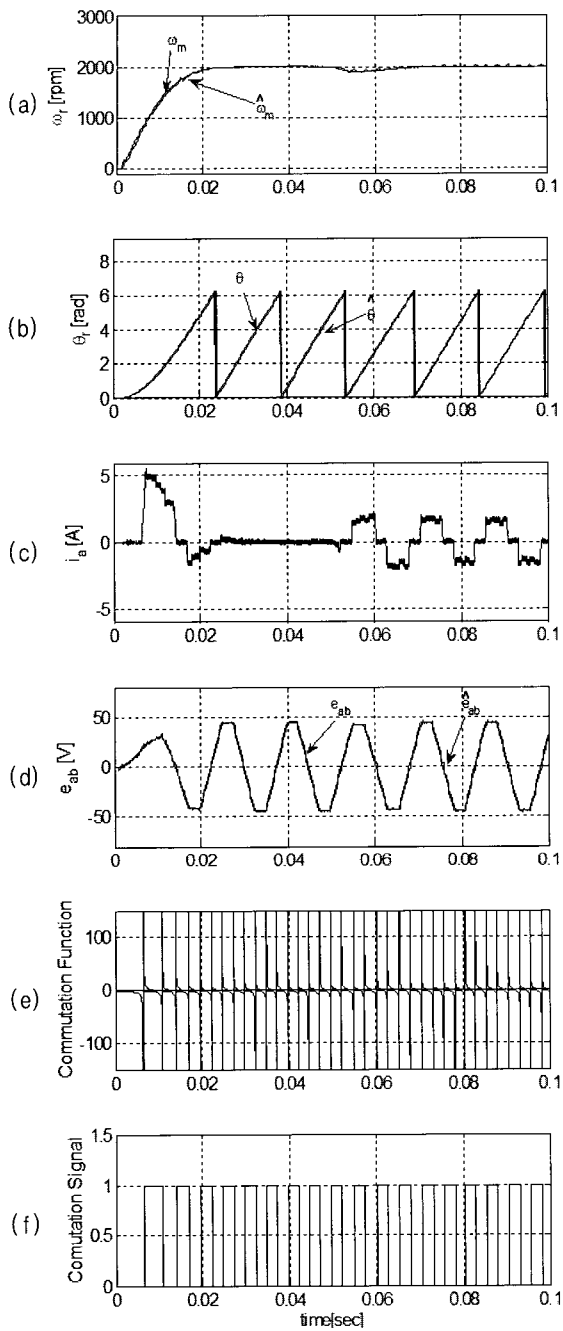


그림 7 2000 [rpm]에서 제안된 센서리스 방법을 사용한 시뮬레이션 결과
 (a) 회전자 속도 (b) 회전자 위치 (c) 상 전류
 (d) 선간 역기전력 (e) 전환 함수 (f) 전환 신호
 Fig. 7 Simulation results of the proposed sensorless scheme at 2000 [rpm]
 (a) Rotor speed (b) Rotor position
 (c) Phase current (d) Line-to-line back-EMF
 (e) Commutation function (f) Commutation signal

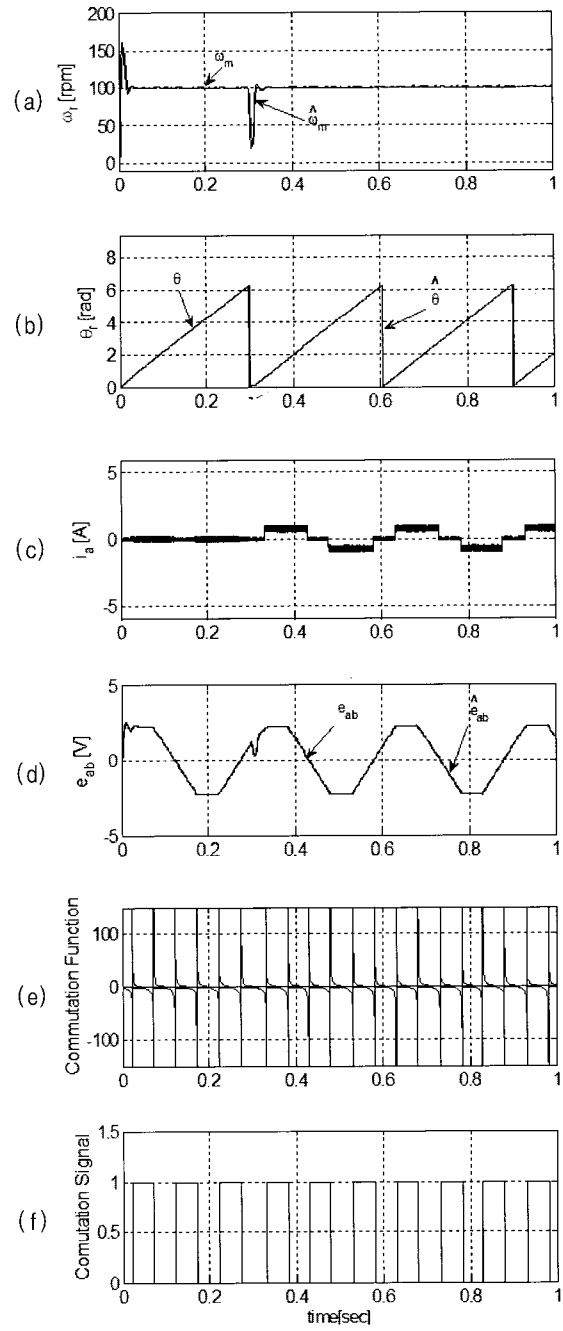


그림 8 100 [rpm]에서 제안된 센서리스 방법을 사용한 시뮬레이션 결과
 (a) 회전자 속도 (b) 회전자 위치 (c) 상 전류
 (d) 선간 역기전력 (e) 전환 함수 (f) 전환 신호
 Fig. 8 Simulation results of the proposed sensorless scheme at 100 [rpm]
 (a) Rotor speed (b) Rotor position
 (c) Phase current (d) Line-to-line back-EMF
 (e) Commutation function (f) Commutation signal

어서, 센서를 사용한 방법과 비교하여도 손색이 없을 만큼의 매우 양호한 응답 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

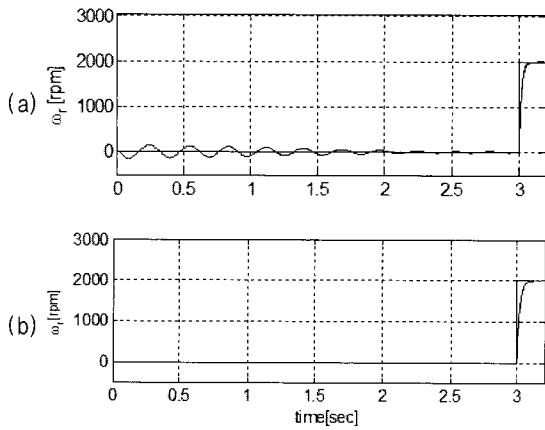


그림 9 과도상태 속도 응답 특성
(a) 제안된 센서리스 방법 (b) 일반적인 센서를 사용한 방법

Fig. 9 Speed response at transient state
(a) In the proposed sensorless scheme (b) In the conventional scheme use sensor

5. 결 론

본 논문에서는 미지 입력인 역기전력을 추가적인 시스템 상태로 모델링하고, 전체 시스템을 역기전력에 대한 미분방정식 형태 외란 모델을 도입한 확장 상태 방정식으로 표현함으로써 얻어지는 상태관측기를 통하여 역기전력을 추정할 수 있었고 이를 통해 회전자 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 저속 영역에서 매우 뛰어난 동작 특성을 갖는다. 게다가 이는 실제 구현이 간단하여, 저가형 구동장치가 필요한 산업응용분야에서 쉽게 적용할 수 있으리라 판단된다.

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] 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.

저 자 소 개



김태성(金泰成)

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



류지수(柳志帥)

1968년 7월 28일생. 1990년 단국대 전기공학 학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년~현재 한양대 전기공학과 전력전자연구실 BK 연구교수.



현동석(玄東石)

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