

순시 속도 관측기를 사용한 사다리꼴형 브러시리스 직류 전동기의 속도 센서리스 제어

이동훈<sup>1</sup>, 이교범<sup>2</sup>, 송중호<sup>3</sup>, 최익<sup>4</sup>, 유범재<sup>5</sup>, 박진배<sup>6</sup>  
<sup>1</sup>연세대학교, <sup>2</sup>고려대학교, <sup>3</sup>서울산업대학교, <sup>4</sup>광운대학교, <sup>5</sup>KIST,

Speed Sensorless Control for the trapezoidal BLDC Motor Using an Instantaneous Speed Observer

Dong-Hoon Lee<sup>1</sup>, Kyo-Beum Lee<sup>2</sup>, Joong-Ho Song<sup>3</sup>, Ick Choy<sup>4</sup>, Bum-Jae Yoo<sup>5</sup>, Jin Bae Park<sup>6</sup>  
<sup>1</sup>Yonsei Univ., <sup>2</sup>Korea Univ., <sup>3</sup>Seoul National Univ. of Technology, <sup>4</sup>Kwangwoon Univ., <sup>5</sup>KIST

**Abstract** - 기존의 사다리꼴형 브러시리스 직류 전동기(BLDCM)의 센서리스 제어는 전류전환 시점을 알기 위하여 홀 센서 대신 단자 전압과 중성점 전압을 이용한다. 하지만, 속도 제어를 위해서는 엔코더나 레졸바와 같은 센서를 사용해야한다. 2극기 BLDC 모터의 경우 단자전압을 이용한 위치정보는 모터 한 회전 당 12번의 신호가 출력된다. 엔코더 혹은 레졸바를 제거하고, 이 신호를 이용하여 속도 정보를 만들 경우, 속도를 만들기 위한 위치 정보의 펄스 간격이 넓게 되어 순시 속도를 만들지 못하게 된다. 이로 인하여 실제 속도의 변화를 민감하게 추정하지 못하게 된다. 따라서 이렇게 만들어진 속도 정보는 실제 시스템에서 사용할 수 없게 된다. 이러한 문제를 해결하려고 본 논문에서는 순시 속도 관측기를 사용한다. 단자전압과 중성점 전압에 의한 위치 정보를 가지고 순시 속도 관측기를 속도 제어 주기보다 빠르게 갱신함으로써 순시 속도를 예측한다. 또한 이 순시 속도는 속도 제어기로 피드백 되어 속도 센서리스를 실현한다. 이에 대한 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(BLDCM)는 기계적인 브러시와 정류자 대신에 회전자 위치에 동기 하여 전동기의 전류를 전자적으로 전환해주어야 하므로 홀 센서나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이다. 그러나 위치 센서의 장착은 전동기 시스템의 가격 상승뿐만 아니라 부피의 증가, 신뢰성 저하, 사용 환경의 제약 등의 많은 문제를 유발한다. 이러한 문제를 극복하려고 근래에 위치 센서 없이 BLDCM를 구동하는 센서리스 제어에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

브러시리스 직류 전동기의 대표적인 센서리스 제어 방법으로는 제 3 고조파 전압 성분을 이용하는 방법[1], 비여자 상의 순환 전류를 이용하는 방법[2], 역기전력을 적분하는 방법[3], 단자 전압의 파형을 이용하는 방법[4] 등으로 구분할 수 있다. 이 중 제 3 고조파 전압 성분을 이용하는 방법은 단자 전압의 제 3 고조파 성분을 검출하여 이로부터 직접 전환 시점을 결정하는 방식이다. 비여자 상의 순환 전류를 이용하는 방법은 비여자 상의 환류 다이오드의 도통 구간을 이용한 순환 전류의 파형을 검출하고 이 정보를 이용하여 전환시점을 검출하는 방식이다. 역기전력을 적분하는 방법은 비여자 상의 단자 전압을 연속적으로 적분하여 정해진 threshold 전압과 비교하여 전환시점을 찾는 방식이다. 단자 전압의 파형을 이용하는 방법은 검출한 단자 전압의 정보로부터 역기전력이 영이 되는 시점(zero crossing point, ZCP)을 찾아서 지연 회로(Phase Shift Circuit)나 저역 통과 필터(Low Pass Filter) 등을 이용하여 30° 혹은 90°만큼 상 지연시켜 전환시점을 결정하는 방법이다. 이러한 방법은 제어 회로가 간단하고, 비교적 넓은 속도 영역에서 센서리스 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있어서 현재 가장 많이 선호되고 있다.

그러나 위에서 언급된 논문들은 상전류의 전환을 위한

정보만을 얻을 수 있는 위치 센서리스에 대한 것들이다. 2극기 BLDCM의 경우 전동기가 한바퀴 회전할 때 12번의 전류전환을 위한 정보를 얻는데 이 정보를 가지고 속도를 추정할 경우 정보의 양이 너무 적어 실제 속도를 빠르게 추정하는 것이 불가능하게 된다. 따라서 속도 제어를 위해서는 엔코더나 레졸바와 같은 고해상도의 위치 센서의 장착이 불가피하다.

본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 순시 속도 관측기를 사용하였다[5]. 단자전압과 중성점 전압을 이용하여 인버터의 전환 시점을 알아내고, 이 정보를 위치 정보로 변환하여 순시 속도 관측기의 입력 값으로 사용한다. 순시 속도 관측기를 속도 제어 주기 보다 더 빠르게 동작시킴으로써 관측기의 출력속도는 순시 적으로 변하는 속도를 얻게 된다.

2. 중성점 전압을 이용한 위치 센서리스

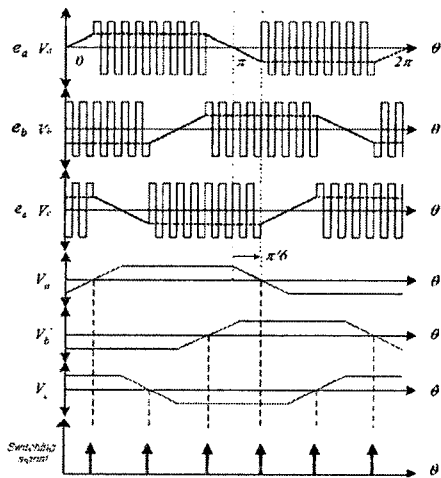


그림 1 단자 전압으로부터의 스위칭 신호의 발생

그림 1은 단자 전압으로부터 인버터의 스위칭 및 속도 관측기의 입력 값을 위한 위치를 추정하는 과정이다. V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>, V<sub>c</sub>로 측정된 단자 전압은 저역통과필터를 거쳐 V<sub>a</sub>', V<sub>b</sub>', V<sub>c</sub>'가 된다. 저역통과 필터를 거친 신호 V<sub>a</sub>', V<sub>b</sub>', V<sub>c</sub>'는 V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>, V<sub>c</sub>의 신호가 30° 지연된 신호이다. 이 신호의 zero-crossing 포인터는 역기전력의 평탄한 구간의 시작과 일치하게 된다. 토크리플이 없는 토크 제어를 위해서는 이 점이 인버터의 전환 시점이 된다. 하지만, 실제 시스템에서는 역기전력과 단자전압 사이에 본질적인 위상 오차가 존재하고, 이상적인 상지연기처럼 위상을 정확히 30°로 밀어주는 저역 통과 필터나 상지연 회로를 설계하는 것이 어렵다는 등의 이유로 위치 추정 오차가 발생하게 된다. 따라서 이러한 원인에 의한 위치

추정 오차를 줄이기 위하여 모터와 인버터 사이의 중성점 전압을 이용하게 된다. 그림2는 위치 추정 오차에 따른 중성점 전압의 파형이다.

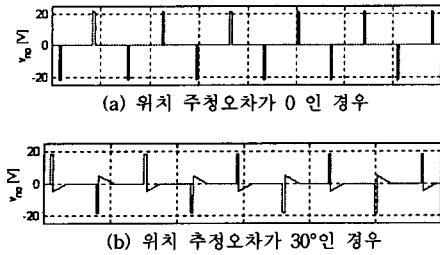


그림 2 위치 추정 오차에 따른 중성점 전압 파형

그림 2(a)로부터 인버터의 정상구간에서 위치 추정오차가 0일 때 에는 중성점 전압도 0임을 볼 수 있다. 하지만, 위치 추정 오차가 발생할 경우 정상구간에서 중성점 전압도 통전구간 후에 0이 아닌 파형을 가짐을 그림 2(b)에서 볼 수 있다. 이러한 성질에 따라서 중성점 전압을 제어함으로써 위치 추정오차를 0으로 줄일 수 있다. 그림 3에서 기준 중성점 전압을 0으로 놓고 추정된 중성점 전압과 PI 제어를 함으로써 궁극적으로 위치 추정 오차가 0이 되게 한다. 이러한 과정을 통하여 얻은 위치 정보  $\theta$ 는 더욱 정밀한 인버터의 스위칭 전환시점을 알려준다.

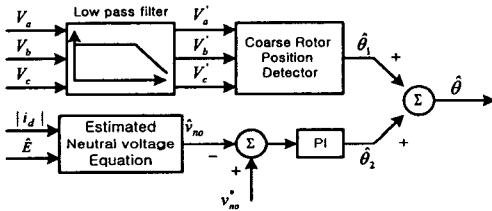


그림 3 중성점 전압을 이용한 위치 추정

### 3. 순시 속도 관측기를 이용한 속도 센서리스

#### 3.1 위치 정보의 수가 적을 때의 속도 특성

중성점 전압을 이용하여 만든 위치 정보는 2극기 BLDCM의 경우 전동기 1 회전 당 12PULSE의 위치 정보를 발생한다. 이 정보를 가지고 직접 속도를 계산할 경우 위치 정보량이 너무 적어 필연적으로 시간 지연이 생기게 된다. 또한, 저속영역으로 내려갈수록 시간 지연이 더욱 커져서 어느 일정속도 이하에서는 이 속도를 가지고 속도 제어기의 피드백 신호로 사용할 수 없게 된다. 그림 4는 중성점 전압을 이용한 위치 정보로 속도를 만들 때의 시간 지연에 대한 그림이다.

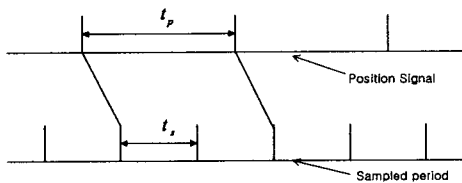


그림 4 위치 정보 주기와 샘플링 주기와와의 관계

그림 4에서  $t_p$ 는 중성점 전압을 이용한 위치 정보의 주기,  $t_s$ 는 속도를 계산하기 위한 샘플링 주기이다. 그림 4에서 속도를 계산할 때 최대 시간 지연은 대략 식(1)과 같이 표현된다.

$$t_d = \frac{3}{2} t_p \quad (1)$$

모터 1회전 당 위치 정보의 수가 적거나, 모터가 저속 영역에서 동작하게 되면  $t_p$ 가 커지므로 식(1)에서 시간 지연  $t_d$ 는 증가하게 된다. 어느 이상의 값으로 증가된 시간 지연은 결국 시스템의 불안정을 초래한다.

#### 3.2 순시 속도 관측기의 설계.

BLDCM의 기계 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_E = J_m \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m - \tau_d \quad (2)$$

여기서  $T_E$ 는 구동 토크,  $J_m$ 은 관성 모멘트,  $B_m$ 은 마찰 계수,  $w_m$ 은 회전자 속도,  $\tau_d$ 는 부하 외란이다. 또한, 회전자 속도  $w_m$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\theta_m}{dt} = w_m \quad (3)$$

제어기의 샘플링 주기에 비하여 외란  $\tau_d$ 의 변화는 매우 작으므로 다음 식처럼 표현할 수 있다.

$$\frac{d\tau_d}{dt} = 0 \quad (4)$$

일반적으로 상태 방정식을 다음과 같이 표현한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad y = Cx \quad (5)$$

식(2),(3),(4)로부터 상태방정식을 구하면 시스템 상수  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , 상태  $x$ , 출력  $y$ 는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [1 \ 0 \ 0]$$

$$x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ w_m \\ \tau_m \end{bmatrix} \quad y = \theta_m \quad u = T_E \quad (6)$$

순시 속도 관측기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (7)$$

여기서  $\hat{x}$ 는 순시 속도 관측기에 의한 추정 상태,  $L$ 은 관측기 상수 값이다. 플랜트의 상태  $x$ 와 추정 상태  $\hat{x}$  사이의 오차  $e$ 가 0으로 수렴하도록  $L$ 의 값이 선정되어야 한다.

$$e = x - \hat{x} \quad (8)$$

식(5), (7), (8)로부터

$$\dot{e} = (A - LC)e \quad (9)$$

식(9)에서  $A - LC$ 의 고유값(eigenvalue)이 음의 실수를 가지고 또한 적당한  $L$ 값을 선정하면 오차  $e$ 는 0으로 수렴한다. 이는 곧  $\hat{x}$ 가  $x$ 에 수렴함을 의미한다.

식(6)과 식(7)로부터 순시 속도 관측기의 상태 방정식을 구하면 식(10)과 같다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{obs} \\ \hat{\omega}_{obs} \\ \hat{\tau}_{obs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_E$$

$$+ \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} [\hat{\theta} - [1 \ 0 \ 0]] \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{obs} \\ \hat{\omega}_{obs} \\ \hat{\tau}_{obs} \end{bmatrix} \quad (10)$$

그림 5는 순시 속도 관측기의 구조도이다.

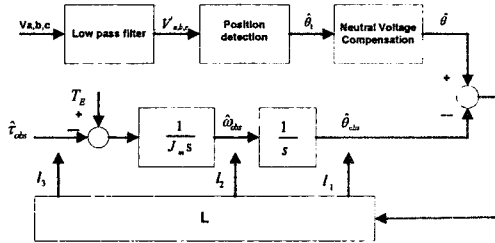


그림 5 순시속도 관측기의 구조

순시 속도 관측기는 단자전압과 중성점전압을 이용하여 추정된 위치 정보와 관측기에 의하여 추정된 위치정보의 오차를 각각의 상태 값에 피드백 하여 상태 추정 오차가 영으로 빠르게 수렴하게 한다. 또한, 순시 속도 관측기를 속도 제어기의 주기보다 빠르게 갱신함으로써, 위치 정보의 펄스 수가 적더라도 순시 적으로 변화하는 속도를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 순시속도는 실제 속도의 변화가 있을 때 이를 빠르게 추정한다. 반면에 위치 정보로부터 직접 계산된 속도는 위치 정보의 펄스 수가 적을 때는 시간지연 때문에 속도의 변화를 빠르게 추정할 수 없다. 다음 절에서 이에 대한 시뮬레이션 파형을 보인다.

#### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 토크상수 0.487[Nm/A], 관성모멘트  $8.26 \times 10^{-5}$ [Kg $m^2$ ], 저항 3.4[Ω], 인덕턴스 8.2[mH], 정격출력 45[W]의 모터에서 시뮬레이션을 수행하였다.

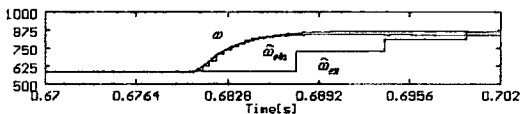
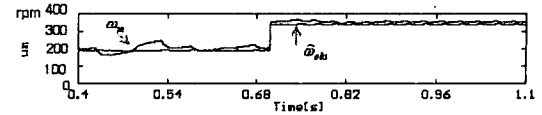


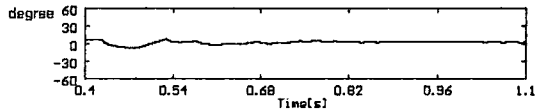
그림 6 실제속도, 관측기 속도, 추정속도의 비교

그림6은 실제 속도  $w_m$ 을 속도제어를 위한 피드백 신호로 사용하면서 속도 지령을 0.67초에서 600(rpm)에서 800(rpm)으로 변화시켰을 때, 실제속도  $w_m$ , 순시 속도 관측기로 추정된 속도  $\hat{w}_{obs}$ , 그리고 관측기를 사용하지 않고 12펄스의 위치정보를 가지고 만든 추정속도  $\hat{w}_{est}$ 를 시뮬레이션 한 그림이다. 순시 속도 관측기에 의한 추정 속도  $\hat{w}_{obs}$ 는 실제속도  $w_m$ 을 잘 추종하는 모습을 볼 수 있다. 이는 관측기의 입, 출력이 속도 제어 주기보다 빠르게 갱신됨으로써 속도성분에 시간 지연이 없기 때문이다. 반면에  $\hat{w}_{est}$ 의 경우 현재 속도는 다음의 위치 정보가 갱신될 때 까지 계속 같은 값을 유지한다. 실제 속도는 600(rpm)에서 800(rpm)으로 변하지만  $\hat{w}_{est}$ 는 다음 위치 정보가 변할 때까지 같은 속도를 유지함으로써 속도 변

화에 둔감하게 된다. 이는 속도 제어기에서  $\hat{w}_{est}$ 을 피드백으로 사용할 경우 시스템의 불안정을 가져오게 된다.



(a)



(b)

그림 7 기준속도를 230(rpm)에서 330(rpm)으로 증가시켰을 때의 위치에러, 실제속도 및 관측기 속도

BLDCM의 센서리스 드라이브를 실현하기 위하여 순시 속도 관측기로 추정된 속도  $\hat{w}_{obs}$ 을 속도제어기의 피드백 신호로 사용하였다. 이 결과 속도센서 없이 230(rpm)까지 속도 제어가 가능하였다. 그림7(a)은 230(rpm)에서 330(rpm)으로 속도 지령을 증가 시켰을 때의 속도 센서리스 드라이브에서의 관측기에 의한 추정 속도와 실제 속도를 나타낸다. 230(rpm)에서 보다 330(rpm)에서 실제속도를 더 잘 쫓아간다. 그림7(b)은 단자전압과 중성점 전압을 이용하여 만든 위치정보와 관측기에서 추정된 위치정보의 오차를 나타낸다. 위치추정 오차는 약간의 리플이 발생하지만 0에 수렴한다 특히 속도 지령이 330(rpm)일 때 거의 0에 수렴하게 된다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 단자전압과 중성점 전압을 이용하여 위치 정보를 얻는 위치 센서리스를 구현하였다. 또한, 순시 속도 관측기를 사용하여 낮은 해상도의 위치 정보를 속도 정보로 만들 때 생기는 필연적인 시간지연 효과의 영향을 피하였다. 이렇게 얻은 순시 속도 정보는 속도 제어기의 피드백 값으로 이용됨으로써 속도센서리스를 구현할 수 있었다. 속도센서리스 모드에서는 최저 230(rpm)까지 속도 제어가 가능하였다.

#### [참고 문헌]

- [1] J. C. Moreira, "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating in a Wide Speed Range", Conf. Rec. of IAS'1994, pp. 401-407, 1994
- [2] S. Ogasawara, and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motor", Conf. Rec. of IAS'1990, pp. 443-447, 1990
- [3] R. C. Beceera, et. al., "Four-Quadrant Sensorless Brushless ECM Drive", Conf. Rec. of APEC'1991, pp. 202-209, 1991.
- [4] K. Izaka, et. al., "Microcomputer Control for Sensorless Brushless DC Motor", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA 21, no. 4, pp. 595-601, May/June, 1985.
- [5] Kyo-Beum Lee, Joong-Ho Song, Ick Choy, and Ji-Yoon Yoo, "An Inertia Identification Using ROELO for Low Speed Control of Electric Machine", Conf. Rec. of APEC'2003, pp. 1052-1055, 2003.
- [6] Heui-Wook Kim, Seung-Ki Sul, "A New Motor Speed Estimator Using Kalman Filter in Low-Speed Range", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.43, no. 4, pp. 498-504 August 1996.