

# 위치 및 속도 검출기 없는 BLDC 전동기의 벡터 제어

이 홍락°, 권 영안, 김 철우  
부산 대학교

Vector Control of Sensorless BLDC Motor

H L Lee, Y A Kwon and C U Kim  
Pusan National University

Abstract - BLDC motor is widely used in industrial drive applications due to high efficiency, high power and easy maintenance. However position and speed sensors generally used in BLDC motor increase drive cost, and reduce application range. This study describes sensorless speed control using instantaneous voltage - current equation, and presents the results of computer simulation.

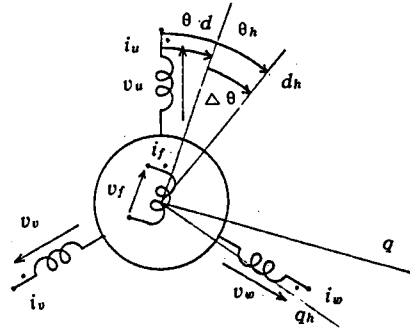


그림 1. 브러시리스 전동기의 모델

## 1. 서론

영구자석 브러시리스 전동기는 그 구조와 제어방법에 따라 구형파형 브러시리스 전동기와 정현파형 브러시리스 전동기로 나누어지며, 효율 및 출력이 높아 서보용에서 수 백kw에 이르는 동력용으로까지 사용범위가 매우 넓어지고 있다. 그러나 브러시리스 전동기의 속도제어를 위해서는 일반적으로 사용되는 속도 및 위치 검출기는 가격상승뿐만 아니라 사용범위를 상대적으로 축소시키고 있다. 본 연구에서는 위치 및 속도 검출기 없는 정현파형 브러시리스 전동기에서 순시전압-전류 관계식을 이용한 속도제어에 관하여 기술한다.<sup>(1)-(4)</sup>

전류와 전압을 검출하여 순시전압방정식에서 속도를 추정할 수 있고 속도추정에 대한 오차는 위치에 대한 오차로 나타난다. 순시전압방정식에서 검출전류와 추정속도로 계산하면 실제전압과 오차가 생기며 이 오차는 위치와 비례관계가 있으므로, 실 전압과 계산된 전압과의 오차에 의해 위치를 보상하게 된다.

## 전동기 모델

그림 1과 같은 정현파형 브러시리스 전동기의 실속 순시 전압 방정식은 전동기의 영구자석을 일정전류가 흐르는 권선으로 대체하는 경우에 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f + PL_f & PM \cos \theta \\ PM \cos \theta & R_a + PL_a \\ PM \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & PL_a \cos \frac{4\pi}{3} \\ PM \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & PL_a \cos \frac{2\pi}{3} \\ PM \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & PM \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ PL_a \cos \frac{4\pi}{3} & PL_a \cos \frac{2\pi}{3} \\ R_a + PL_a & PL_a \cos \frac{2\pi}{3} \\ PL_a \cos \frac{4\pi}{3} & R_a + PL_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad \text{---(1)}$$

전동기의 상전류는 식(1)에서 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_u &= \frac{2}{3L_a} (v_u - R_a i_u + M I_f \omega \sin \theta) \\ \frac{d}{dt} i_v &= \frac{2}{3L_a} \left( (v_v - R_a i_v + M I_f \omega \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi)) \right) \end{aligned} \quad \text{---(2)}$$

전동기의 운동방정식과 발생토크는 다음과 같다.

$$T = P M I_f \left( i_u \sin \theta + i_v \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) - (i_u + i_v) \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \right) \quad \text{---(3)}$$

$$\frac{d}{dt} w = \frac{P}{J} (T - T_L - Dw_m) \quad \text{---(4)}$$

$$w_m = \frac{w}{P}$$

P: 쌍극수, T: 발생 토크, T<sub>L</sub>: 부하토크,

D: 마찰계수, w<sub>m</sub>: 회전자 속도

### 3. 제어 알고리즘

그림 1에서 실제 회전자 자속 방향을 기준으로 하는 d-q 회전좌표계와 제이기가 가상하는 회전자 자속 방향을 기준으로 하는 d<sub>h</sub>-q<sub>h</sub> 회전좌표계를 고려하고, 실제의 회전자의 위치를 θ, 회전자의 가상 위치를 θ<sub>h</sub>라 하면 실제와 가상 축과의 상차 Δθ는 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \theta_h - \theta \quad \text{---(5)}$$

3상 성분을 d<sub>h</sub>-q<sub>h</sub>회전 좌표계로 변환하는 변환행렬은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} q_h \\ d_h \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_h & \cos(\theta_h - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_h + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta_h & -\sin(\theta_h - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_h + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad \text{---(6)}$$

식(1), (5), (6)으로부터 d<sub>h</sub>-q<sub>h</sub>회전좌표계에서 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{d_h} \\ v_{q_h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+LP & -Lw_h \\ Lw_h & R+LP \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d_h} \\ i_{q_h} \end{bmatrix} + K_E w \begin{bmatrix} \sin \Delta\theta \\ \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad \text{---(7)}$$

$$\text{단, } R=R_a, L=\frac{3}{2}L_a, K_E = \sqrt{\frac{3}{2}}Ml,$$

$$w_h = \frac{d\theta_h}{dt}, w = \frac{d\theta}{dt}$$

만약 이상적인 상태에서 속도 및 위치를 추정하여 동작 한다면 θ<sub>h</sub> = θ가 된다. 이 경우에 전압방정식은 다음과 같다. 여기에서 v<sub>d<sub>h</sub>'</sub>와 v<sub>q<sub>h</sub>'</sub>는 가상의 전압이며, 이 값은 실제의 전류로부터 계산된다.

$$\begin{bmatrix} v_{d_h}' \\ v_{q_h}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+LP & -Lw_h \\ Lw_h & R+LP \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d_h} \\ i_{q_h} \end{bmatrix} + K_E w_h \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{---(8)}$$

실제 전압 v<sub>d<sub>h</sub></sub>와 가상 전압 v<sub>d<sub>h</sub>'</sub>와의 차이를 Δv<sub>d<sub>h</sub></sub>라 하면 (7)과 (8)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\Delta v_{d_h} = v_{d_h} - v_{d_h}' = K_E w \sin \Delta\theta \quad \text{---(9)}$$

여기에서 Δθ ≈ 0라 하면 Δv<sub>d<sub>h</sub></sub>는 Δθ에 비례관계를 가지게 된다. 따라서 가상축과 실제축과의 위치오차는 가상전압과 실제 전압과의 차에 비례함을 알 수 있으며, 이 가상전압과 실제 전압과의 차를 보상함으로써 추정위치의 오차를 보상할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 추정속도 및 위치에 대한 보상은 가상전압과 실제전압의 차에 대하여 PI제어기를 통한 속도차를 추정속도에 더함으로써 속도 보상을 한다.

식(7)에서 추정속도는 Δθ ≈ 0, w<sub>h</sub> ≈ w인 경우에 다음과 같다.

$$\hat{w} = \frac{v_{d_h} - (R+LP)i_{d_h}}{K_E + Li_{d_h}} \quad \text{---(10)}$$

그리고, 그림 1과 같은 회전방향에서 Δθ > 0이면 가상 축이 실제축에 대하여 앞서게 되므로 이에 비례하는 보상 속도에 의해 보상을 하게 된다. 따라서, 보상속도w<sub>c</sub>는 다음과 같다.

$$w_c = w_h - \hat{w} \quad \text{---(11)}$$

시계방향으로 회전할 때 Δθ = 0가 되기 위해서는 식(12)를 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \Delta\theta > 0 (\Delta v_{d_h} > 0) \text{ 이면, } w_c > 0 \\ \Delta\theta < 0 (\Delta v_{d_h} < 0) \text{ 이면, } w_c < 0 \end{aligned} \quad \text{---(12)}$$

이상에서 위치오차를 줄이기 위한 보상속도는 PI알고리즘을 사용하면 다음과 같다.

$$w_c = (K_w \Delta v_{d_h} + K_d \int \Delta v_{d_h} dt) \text{sgn}(w_h) \quad \text{---(13)}$$

이상에서 기술된 제어방식에 의한 블록선도는 그림 2와 같으며 인버터 구동회로의 제어방식은 전류제어형 히스테리시스 PWM방식이 이용된다.

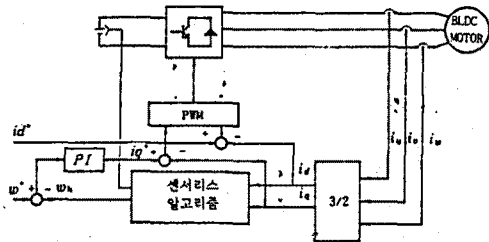


그림 2. 시스템 제어 블록선도

### 4. 시뮬레이션 결과

전동기 사양 및 시스템 정수는 표1 및 표2와 같다.

표 1. 전동기 사양

극	4
정격전류	7.5A
정격전압	154V
회전자 관성계수	0.048kg m <sup>2</sup>
마찰계수	0.0042kg m <sup>2</sup> /s
고정자 저항	0.95Ω
고정자 인덕턴스	5.11mH
토크상수	0.28Nm/A

표 2. 시스템 정수

전류 제어 시간	200 μs
속도 제어 시간	1.6ms
Ksp/Ksi	0.6/0.01
Kcp/Kci	1.02/0.004

그림 3은 상기한 제어방식에 의한 시뮬레이션 결과이다.

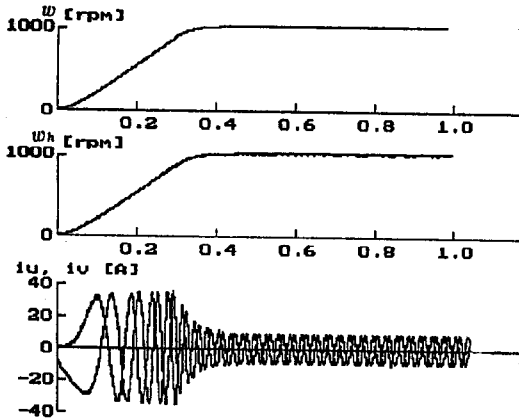


그림 3. 정방향 1000rpm 운전

여기서 부하는 8[Nm]이고 속도지령을 증가비가 3333.3 [rpm/sec]인 경사입력으로 가했을 때이며, 지령속도에 잘 추적하고 있음을 보여준다.

그림 4는 역방향 1000[rpm]에서 정방향 1000[rpm]으로 회전방향을 바꾸는 경우에 속도 추적을 나타낸다.

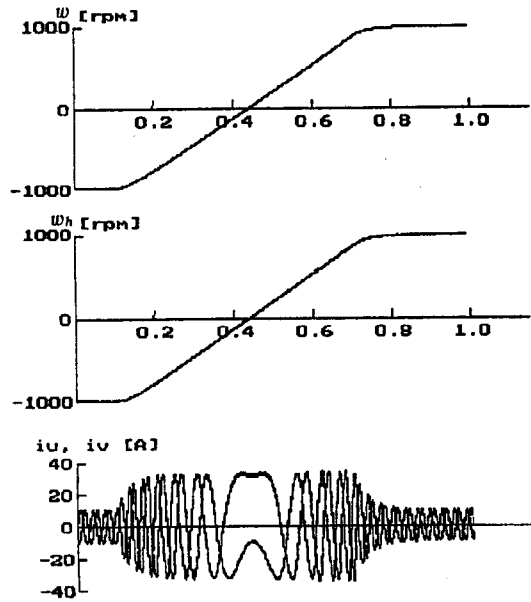


그림 4. 역방향 - 정방향 1000rpm 운전

## 5. 결론

영구자석 브러시리스 전동기는 효율, 출력및 출력대 관성계수비가 높고 보수유지가 용이하여 서보용에서 동력용으로까지 사용범위가 넓어지고 있다. 그러나 일반적으로 사용되는 위치및 속도 검출기는 가격상승및 사용범위를 상대적으로 축소시키고 있다. 본 연구에서는 순시전압-전류 관계식을 이용한 위치및 속도 검출기 없는 속도제어방식에 관하여 기술하고 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

## 참고문헌

- 1)Rusong Wu, "A Permanent Magnet Motor Drive without a Shaft Sensor", Conference Record: IEEE, 1990, pp 553-558.
- 2)Sefosh and Ogasawara, "A Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motor", Conference Record: IEEE, 1990 pp.443-447.
- 3)Paul Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill 1986.
- 4)Nobuyki Matsui, "Brushless dc Motor Control without Position and Speed Sensors", IEEE Trans. industry Applications, Vol. 28, No.1, January/February 1990