

싱글전류센서를 적용한 BLDC 전동기 속도제어시스템 시뮬레이션

손영대, **한경석**
동서대학교

Simulation of Speed Control System for Brushless DC Motor Drives Using a Single DC Current Sensor

Young-Dae Son, Gyung-Seok Han
Dongseo University

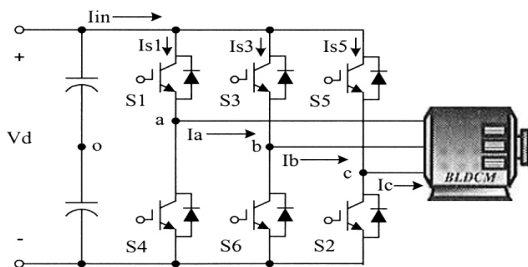
Abstract - 본 논문에서는 싱글전류센서를 이용하여 브러시리스 직류 전동기의 속도제어시스템 시뮬레이션 방법 및 그 결과를 제시한다. BLDC 전동기 제어에 매우 중요한 역할을 가지고 있는 피드백 센서 방식으로 싱글 전류검출센서를 이용한 속도제어 방법은 모터 설계의 비용을 낮추고, 심플한 제어기 설계를 가능하게 한다. 또한, 전동기에 손상을 줄 수 있는 오류조건을 감지함으로써 신뢰성을 향상시켜 줄 수 있다. 시뮬레이션에 사용하는 BLDC 전동기는 3상 Y결선 전동기를 모델로 하며 MATLAB/SIMULINK를 사용한 시뮬레이션을 수행하여 그 성능을 분석하였다.

1. 서 론

최근, 환경문제와 유가 상승 등으로 인해 영구자석으로 구성된 브러시리스 직류 전동기(Brushless DC Motor : BLDC)의 사용이 급증하고 있다. 영구자석형 전동기는 일반 DC 전동기에 비해 정류자가 없으므로 브러시에 의한 마찰 부분이 없어 마모가 없고 수명이 길며 소음과 유지비가 적다는 장점을 가진다. 구조상으로는 회전자와 영구자석으로 된 동기 전동기와 같으나, 전력용 반도체 스위칭 소자와 회전자의 위치 센서를 통하여 정류자와 브러시를 대신하도록 하여, 직류 전동기의 운전 특성을 얻는 전동기이다. 이는 전력용 반도체 스위칭 소자의 개발과 회로류 자석의 개발에 힘입어 고속화 및 소형화가 가능하게 되어 서보 시스템의 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 이러한 BLDC 전동기는 회전자의 위치에 따라 전동기의 상전류를 전환(Commutation)해 주어야 하므로 홀센서나 엔코더와 같은 회전자 위치검출 센서가 필수적이다. BLDC 전동기 제어를 위해 개발자는 전류, 위치, 속도 및 회전방향을 감지해야 한다. 최근 다양한 피드백 센서가 개발되고 있는데 전류 검출을 위해 사용되는 피드백 센서는 션트저항(Shunt Resistor)을 이용한 전류센서, IC 패키지에 마그네틱 센서와 보정회로를 결합시킨 홀-효과(Hall-Effect) 전류센서, 전류의 비율이 코일 권선비의 함수가 되는 트랜스포머 원리를 이용하는 전류검출 트랜스포머(Current-Sensing Transformer) 등과 같은 3가지의 주요 전류 피드백 센서로 나눌 수 있다. 적용센서의 단가를 줄이기 위하여 전동기 권선의 전압을 직접 이용하여 전동기의 속도와 위치를 측정하는 역기전력 제어방식(Back EMF Control Method)이나 센서리스 전동기 제어방식이 개발되어 적용되고 있지만 낮은 회전속도에서는 정확성을 확보할 수 없고 제어시스템의 설계가 까다롭다. 또한, 센서를 이용한 제어방법보다 정밀도가 현저히 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 다양한 피드백 센서 방식 중에서 저가의 IC칩을 이용하고 3상전류의 전부를 검출하지 않고 하나의 직류전류만 검출하는 싱글전류센싱 방법을 채택한 BLDC 전동기 속도제어시스템 시뮬레이션 방법과 그 결과를 제시하여 본 시스템의 타당성을 입증한다.

2. 본 론

2.1 BLDC 전동기 구동시스템 분석



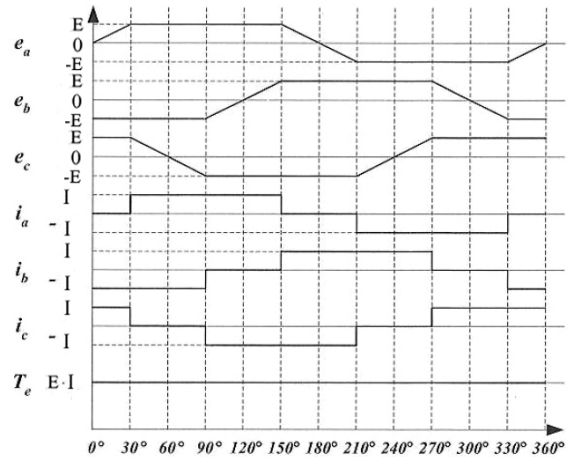
〈그림 1〉 BLDC 전동기 구동시스템 구성도

그림 1은 6스위치로 구동되는 3상 BLDC 전동기의 전체 구성도를 나타낸다. 전동기는 포화되지 않고, 스위칭 반도체 소자는 이상적이라고 가정하여 상전압 방정식과 발생토크 식은 다음과 같다.

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

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_m = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (2)$$

여기서, v_a, v_b, v_c : 상전압 R_s : 상당 저항
 i_a, i_b, i_c : 상전류 L_s : 상당 인덕턴스
 e_a, e_b, e_c : 상당 역기전력 ω_r, ω_m : 전기, 기계 각속도
 T_e : 전동기 발생토크 T_L : 부하토크
 J : 관성계수 B : 마찰계수



〈그림 2〉 BLDC 전동기의 이상적인 전류파형과 역기전력 파형

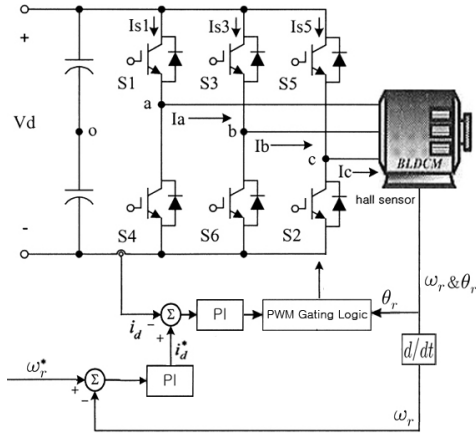
그림 2는 BLDC 전동기의 이상적인 전류파형과 역기전력 파형을 나타낸다. BLDC 전동기에서 토크 리플을 최소화하기 위해 요구되는 파형은 120°의 준구형파이다. 이러한 파형이 입력되었을 때 사다리꼴 모양의 이상적인 역기전력 파형이 나타난다. 회전자의 위치에 따라 이상적인 역기전력의 파형을 생성하는 a상의 역기전력 식은 다음과 같으며, 나머지 b, c상의 역기전력은 120° 위상차를 가진다.

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{6}{\pi} k_e \cdot \omega_r \cdot \theta_r, \quad 0 < \theta_r \leq \frac{\pi}{6} \\ e_a &= k_e \cdot \omega_r, \quad \frac{\pi}{6} < \theta_r \leq \frac{5\pi}{6} \\ e_a &= -\frac{6}{\pi} k_e \cdot \omega_r \cdot \theta_r, \quad \frac{5\pi}{6} < \theta_r \leq \pi \end{aligned} \quad (3)$$

이 때, 각 상의 역기전력 진폭은 각속도와 역기전력 상수의 곱으로 구할 수 있다.

$$E = k_e \cdot \omega_r \quad (4)$$

2.2 BLDC 전동기 속도제어 시스템 모델링



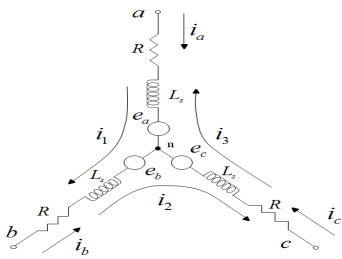
〈그림 3〉 싱글전류센서를 적용한 PI 속도제어 시스템

그림 3은 전동기의 PI 속도제어를 위한 시스템 구성도이며, 기존의 3상 전류를 검출하여 각 상전류를 독립적으로 제어하는 방식과는 달리, 직류측 전류만을 검출하는 싱글전류센서를 적용한 BLDC 전동기의 PI 속도제어 시스템을 나타낸다. 식 (3)과 그림 2에 기초하여 회전자 위치에 따른 각 상의 역기전력 모델링 식을 유도하면 다음과 같다[1].

$$e_a = \begin{cases} (6E/\pi)\theta_r & (0 < \theta_r < \pi/6) \\ E & (\pi/6 < \theta_r < 5\pi/6) \\ -(6E/\pi)\theta_r + 6E & (5\pi/6 < \theta_r < 7\pi/6) \\ -E & (7\pi/6 < \theta_r < 11\pi/6) \\ (6E/\pi)\theta_r - 12E & (11\pi/6 < \theta_r < 2\pi) \end{cases} \quad (5)$$

$$e_b = \begin{cases} -E & (0 < \theta_r < \pi/2) \\ (6E/\pi)\theta_r - 4E & (\pi/2 < \theta_r < 5\pi/6) \\ E & (5\pi/6 < \theta_r < 9\pi/6) \\ -(6E/\pi)\theta_r + 10E & (9\pi/6 < \theta_r < 11\pi/6) \\ -E & (11\pi/6 < \theta_r < 2\pi) \end{cases} \quad (6)$$

$$e_c = \begin{cases} E & (0 < \theta_r < \pi/6) \\ -(6E/\pi)\theta_r + 2E & (\pi/6 < \theta_r < \pi/2) \\ -E & (\pi/2 < \theta_r < 7\pi/6) \\ (6E/\pi)\theta_r - 8E & (7\pi/6 < \theta_r < 9\pi/6) \\ E & (9\pi/6 < \theta_r < 2\pi) \end{cases} \quad (7)$$



〈그림 4〉 3상 BLDC 전동기의 전압 및 전류

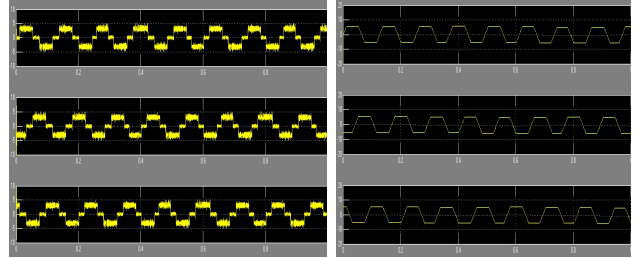
그림 2에서 60° 도통구간마다 2개상만 여자되므로 그림 4에 보인 두 상으로 이루어진 각 브랜치로 흐르는 전류는 선간전압과 관련하여 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} v_{ab} &= 2Ri_1 + 2L_s \frac{di_1}{dt} + e_{ab} \\ v_{bc} &= 2Ri_2 + 2L_s \frac{di_2}{dt} + e_{bc} \\ v_{ca} &= 2Ri_3 + 2L_s \frac{di_3}{dt} + e_{ca} \end{aligned} \quad (8)$$

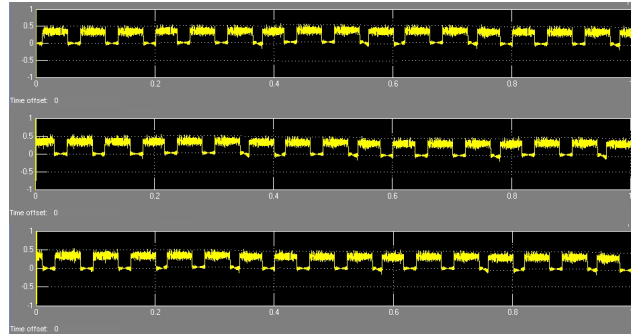
여기서, e_{ab} , e_{bc} , e_{ca} 는 선간 역기전력 성분을 나타내며, 각 상전류는 $i_a = i_1 - i_3$, $i_b = i_2 - i_1$, $i_c = i_3 - i_2$ 를 의미한다.

2.3 시뮬레이션 결과

안정적인 BLDC 전동기의 속도제어를 위해 준구형파의 전류가 인가되어야하고 이 전류가 인가되어 전동기가 회전하면 사다리꼴 모양의 이상적인 역기전력이 발생한다. 본 논문에서 제시한 싱글전류센서를 이용한 BLDC 전동기의 PI 속도제어 시스템 시뮬레이션 모델을 이용하여 MATLAB/SIMULINK 시뮬레이션을 수행한 후 그 파형을 확인하고 타당성을 검증하였다. 그림 5는 정상상태에서 준구형파 형태의 각 상전류 파형과 역기전력 파형을 나타내며, 그림 6은 각 상의 토크 파형을 나타낸다.



〈그림 5〉 각 상의 전류 파형과 역기전력 파형



〈그림 6〉 각 상의 토크 파형

3. 결 론

영구자석을 이용하는 BLDC 전동기의 정밀한 제어를 위해서는 전류, 위치, 속도, 회전방향 등 관련 정보를 검출하기 위해 다양한 피드백 정보가 요구된다. 회전자의 위치를 검출하기 위해서는 위치검출용 홀센서가 필요하며, 속도와 토크의 정밀제어를 위해서는 일반적으로 3상전류 검출 시스템을 요구한다. 이러한 전류센서의 장착은 정밀한 제어를 가능하게 하지만 사용환경에서 발생하는 오차의 범위를 증가시키고 제작 단가의 상승을 초래한다. 따라서 본 논문에서는 싱글전류센서를 이용한 직류전류 검출 및 PI 속도제어시스템 설계를 통해 제작단가 저감 및 신뢰성 확보를 구현할 수 있는 PI 속도제어시스템을 설계하여 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 입증하였다. 본 논문에서 제시한 방법은 전동기 속도제어시스템 설계시 H/W 및 S/W가 간단하고 우수한 동작 특성을 가지므로 다양한 전동력 응용분야에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Byoung-Kuk Lee, Mehrdad Ehsani, "Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives," *Journal of Power Electronics*, Vol 3, No. 2, pp.124-138, April 2003.
- [2] Joong-Ho Song, Ick Choy, "Commutation Torque Ripple Reduction in Brushless DC Motor Drives Using a Single DC Current Sensor," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.19, No.2, pp.312-319, March 2004.
- [3] Changliang Xia, Zhiqiang Li, Tingna Shi, "A Control Strategy for Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motor Using Single Current Sensor," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.56, No.6, pp.2058-2066, June 2009.
- [4] 이국선, 최익, "역기전력 관측기를 이용한 BLDC 모터의 토크 리플 저감 제어," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.952-953, 2010.