

Matlab Simulink를 이용한 BLDC 모터 모델링 구현에 관한 연구

김남우* · 허창우*

*목원대학교

BLDC Motor Modelling using Matlab/Simulink Implementation.

Nam-woo Kim* · Chang-Wu Hur**

*MOKWON University

E-mail : gotree94@gmail.com

요 약

본 논문에서는 BLDC 모터의 일반적인 구조와 동작에 대해서 설명하고 시뮬레이션 가능한 수학적 인 모델을 통해서 Matlab/Simulink에서 구현 하였다.

키워드

BLDC, Matlab, Model, Simulink.

I. 서론

직류전동기(DC Motor)는 기계적인 접촉 구조인 정류자(Commutator)와 브러시(Brush)를 이용하여 회전에 따라 전기자 전류의 극성을 바꾸어 주어야만(이를 기계적인 정류라고함) 일정한 방향으로 토크가 발생하게 되어 연속적인 회전이 가능하다. 이러한 정류자와 브러시를 회전시 전자 기적 잡음과 기계적 소음이 발생하며, 마찰에 따른 마모로 인해 정기적인 유지보수가 필요하다. 통산 소형 직류 전동기는 바깥지름이 $\phi 25 \sim \phi 34$ 까지는 약 1000시간, $\phi 37 \sim \phi 60$ 까지는 약 2000시간 정도 사용 가능하다. 특수한 고수명의 경우 약 3000시간까지도 가능하다.

이러한 직류 전동기와 전기적인 특성은 유사하지만 전기적인 정류(Electronic Commutation)를 사용하여 유지보수가 필요한 기계적인 접촉 구조인 정류기구를 제거하여 신뢰성을 향상시킨 전동기가 브러시리스 직류 전동기이다. 이러한 BLDC 전동기에서 전자적인 정류를 실현하기 위해서는 영구자석 회전자의 자극 위치를 검출하는 센서와 그 센서 신호를 이용해 상전류들을 전환하도록 하는 반도체 소자를 사용한 구동 회로가 필수적으로 요구된다.

BLDC 전동기의 구조는 직류 전동기와는 크게 다른데, 브러시리스화를 위해 전류가 흐르는 전기 자 권선을 고정자 측으로 배치하고, 영구자석을 회전자 측으로 하였기 때문이다. 이에 따라 전도 기 구조와 형상에 큰 자유도를 가지게 되어, 소형

화나 박형화 등의 용도에 맞추어 최적 형상의 전 동 기 개발이 가능하게 되었다.

이러한 BLDC 전동기는 고효율, 고회전률, 고폭/관성 비의 특성과 더불어 고속운전이 가능하고 구동 방식이 간단하며 가격이 저렴하여 현 재 에어컨과 냉장고용 압축기, 팬(Fan), 세탁기의 드럼, VCR, 재봉틀 등의 가전기기로부터, HDD, DVD, CD 플레이어 등의 정보통신기기와 서버 구 동 및 전기 자전거, 전기 스쿠터들에 이르기까지 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

II. 본론

2.1 BLDC의 구조

BLDC 전동기는 회전자의 위치 정보를 사용하여 직류 전동기의 정류자와 브러시 기능을 반도체 스위치로 구현함으로써 직류 전동기의 치명 적인 단점을 해결한 전동기 이다. 그러나 그 구조 는 그림 1(a)에 보이는 직류 전동기 와는 다르 며, 그림 1(b)에 보이는 바와 같이 오히려 교류 전동기인 영구자석 동기 전동기(PMSM)처럼 회 전자에 영구자석을 가지며, 고정자에 권선을 갖는 구조이다. 그러나 고정자권선에는 직류 전동기의 전기자 도체에 흐르는 전류와 같은 구형파 형태 의 전류가 흐르기 때문에 브러시리스 DC 전동기 라 부른다.

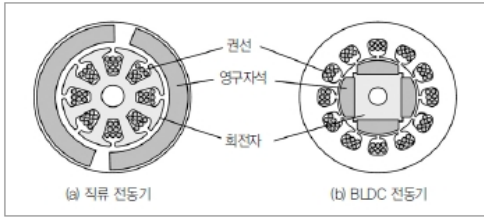


그림 1. DC/BLDC 전동기의 구조

이와 같은 BLDC 전동기의 구조는 직류 전동기에 비해 다음과 같은 장점을 가진다. 영구자석이 회전하는 구조인 BLDC 전동기는 많은 도체로 이루어진 무거운 전기자가 회전하는 구조인 직류 전동기보다 관성이 작아져 빠른 가·감속에 유리하다. 또한 권선이 고정 자 축에 있어 방열이 유리하므로 온도에 따른 영구자석의 감자(Demagnetization)를 피하기 위해 최대 전기자 전류에 제약이 있는 직류 전동기보다 최대 출력 토크 발생 측면에서 유리하다. 게다가 BLDC 전동기는 직류 전동기의 기계적인 접촉 문제와 정류 기능의 문제가 없으므로 고속 운전이 가능하다.

2.2 BLDC의 동작

3상 2극 Y 결선 BLDC 전동기의 구동 시스템이 그림 4에 보인다. BLDC 전동기에서 정류자와 브러시의 기능을 반도체 스위치로 구현하기 위해서는 필수적으로 회전자의 위치를 알아야 한다. 회전자는 영구자석이므로 통상 홀 소자(Hall Element)와 같은 자속 검출센서를 사용하여 그 위치를 알아낸다. 이러한 홀 소자는 120°(전기각) 간격으로 배치되어 있어서 이들 신호로부터 회전자의 위치를 6개 구간으로 구별하여 검출할 수 있다. 이렇게 검출된 회전자의 위치 정보를 사용하여 연속적인 회전을 위해 필요한 두 상(Phase)의 전류를 인버터를 통해 출력한다.

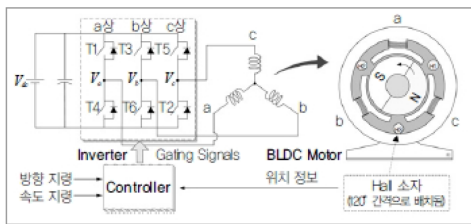


그림 2. BLDC 전동기 구동시스템

BLDC 전동기를 위한 인버터는 통상 어느 시점에 두 개의 스위칭 소자만이 동작하는 2상 여자 방식으로 구동된다. 각 스위칭 소자는 120°씩 통전하며, 암(Arm) 단락 방지를 위한 데드 타임(Dead Time)이 필요 없다. BLDC 전동기의 구동 과정이 그림3에 보인다. 한 주기의 스위칭 시퀀스(Sequence)는 120°(전기각) 간격으로 6개 구간으로 구성된다.

로 구성된다.

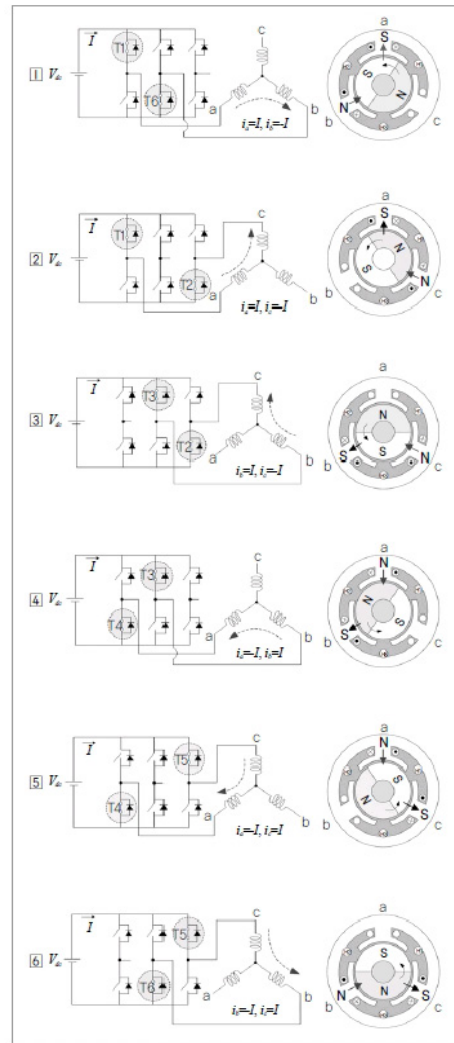


그림 3. 3상 2극 BLDC 전동기의 구동 과정

그림 4에 6개의 모드에서의 역기전력과 홀 소자의 검출 신호(H1, H2, H3) 및 이 신호에 따른 각 상 전류와 토크가 보인다. 여기서 홀 소자는 N극을 검출 시에는 1을, S극을 검출 시에는 0을 출력한다고 가정한다. 역방향으로 회전시키기 위해서는 스위치가 온/오프(On/Off) 하는 시퀀스를 바꾸어 주어야 한다.

이러한 홀 소자는 120°(전기각) 간격으로 배치되어 있어서 이들 신호로부터 회전자의 위치를 6개 구간으로 구별하여 검출할 수 있다. 이렇게 검출된 회전자의 위치 정보를 사용하여 연속적인 회전을 위해 필요한 두 상(Phase)의 전류를 인버터를 통해 출력한다.

BLDC 전동기를 위한 인버터는 통상 어느 시점에 두 개의 스위칭 소자만이 동작하는 2상 여자 방식으로 구동된다. 각 스위칭 소자는 120°씩 통전하며, 암(Arm) 단락 방지를 위한 데드 타임

(Dead Time)이 필요 없다. BLDC 전동기의 구동 과정이 그림 5에 보인다. 한 주기의 스위칭 시퀀스(Sequence)는 120°(전기각) 간격으로 6개 구간으로 구성된다.

그림 6에 6개의 모드에서의 역기전력과 홀 소자의 검출 신호(H1, H2, H3) 및 이 신호에 따른 각 상 전류와 토크가 보인다. 여기서 홀 소자는 N극을 검출 시에는 1을, S극을 검출 시에는 0을 출력한다고 가정한다. 역방향으로 회전시키기 위해서는 스위치가 온/오프(On/Off) 하는 시퀀스를 바꾸어 주어야 한다.

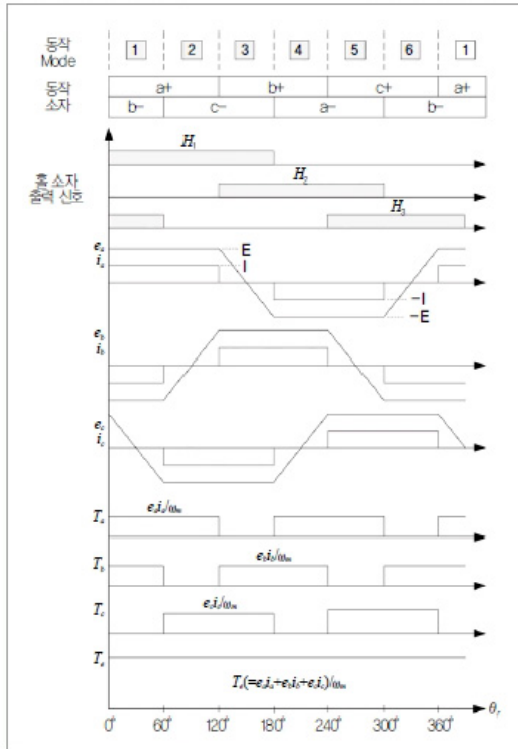


그림 4. BLDC 전동기의 구동 파형

2.3 BLDC의 수학적 모델

3상 2극 BLDC 전동기에서 고정자의 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다. 유도 전동기나 동기 전동기와는 다르게 BLDC 전동기에서는 제어를 위해 d-q축 좌표 변환을 적용하지 않고 abc 상변수 식들을 직접 사용한다.

$$v_a = R_s i_a + (L_s - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

$$v_b = R_s i_b + (L_s - M) \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (2)$$

$$v_c = R_s i_c + (L_s - M) \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (3)$$

여기서, v_{abc} , i_{abc} , e_{abc} 는 각각 고정자 전압,

전류, 역기전력이며, R_s 는 고정자 저항, L_s 는 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스이다. BLDC 전동기의 토크는 출력 전력 P_e 와 회전자의 각 속도 ω_m 으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (4)$$

여기서, ω_m 은 기계 각속도이다. 그림 6에 보이는 동작에 따른 식(4)의 토크는 다음과 같이 단순히 역기전력 크기 E 와 전류 크기 I 의 산술적인 곱으로 표현된다.

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} = 2 \frac{EI}{\omega_m} \quad (5)$$

따라서 E 와 I 가 일정하면 그림 4에서 보이듯 일정한 토크를 얻을 수 있지만, 역기전력이 이상적인 사다리꼴이 아니라면 구형파의 일정한 전류를 흘리더라도 토크에는 리플(Ripple)이 발생하게 된다. 또한 역기전력이 이상적이라도 상전류 전환 시에 전류에 리플이 존재하여 토크 리플이 발생할 수 있다. 이러한 토크 리플로 인해 BLDC 전동기를 고성능 정밀 제어에 적용하기 어렵다.

상전류 전환 시 토크 리플이 발생하게 되는 원인은 그림 4에 보이는 모드2에서 모드3으로 전환 시의 특성을 살펴보자. 모드가 바뀔 때 따라 전류가 흐르는 권선은 a 상에서 b 상으로 전환되는데(이를 'Commutation'이라함), a 상 전류 i_a 는 영으로 감소하고 b 상 전류 i_b 는 1로 증가한다. 이 때 만일 두 전류의 감소율과 증가율이 같다면 $i_a + i_b = I$ 가 되고 비전환 전류(Non-commutation)인 c 상 전류 i_c 는 -1로 일정하게 되어 출력 토크는 리플이 없이 일정하게 된다.

그러나 실제의 경우 대부분 그림 5에 보이듯이 전환 전류의 증가율과 감소율은 권선의 시정수, 직류 링크(Link) 전압과 역기전력과의 전위차 등에 의해 다르게 된다. 이로 인해 비전환 모드 전류의 크기에 변동이 발생하게 되고 그 결과 출력 토크에 리플이 발생한다. 상 전환 때마다 이러한 현상은 반복되므로 그림 6에 보이듯이 운전 주파수 한 주기에 6번 토크 리플이 발생한다.

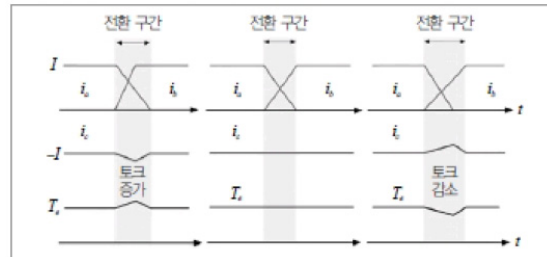


그림 5. 상전환시 전류 변동

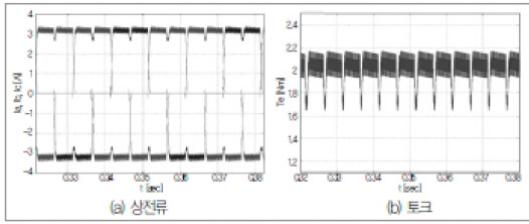


그림 6. BLDC의 3상 고정자 전류와 토크 파형

이러한 토크 리플은 소음을 발생시키거나 속도 제어 특성을 저하시킨다. 이를 제거하기 위한 많은 방법이 연구됐는데, 일례로 증가 전류와 감소 전류의 변화율이 같도록 인가 전압을 적절하게 보상하면 토크 리플을 제거할 수 있는데, 이러한 보상 전후의 실제 전류 파형이 그림 5에 보인다.

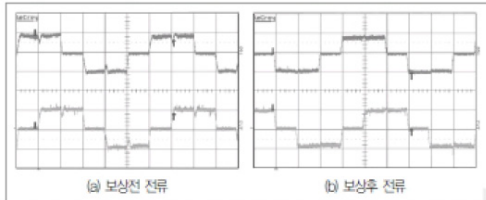


그림 7. 토크 리플 보상전후의 실제 상전류 파형

2.4 Matlab / Simulink 모델

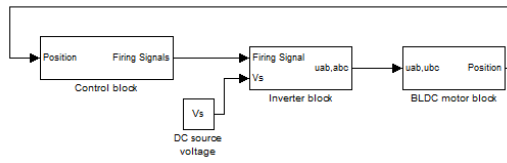


그림 8. BLDC drive model

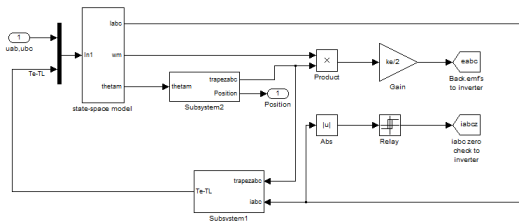


그림 9. bldc motor block

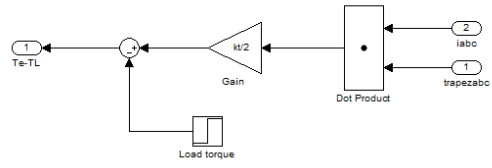


그림 10. 토크 계산

III. 결론

본 논문에서는 BLDC 모터의 일반적인 구조와 동작에 대해서 설명하고 Matlab/Simulink에서 시뮬레이션 가능한 수학적 모델을 유도하였다.