

구형파 전류여자 브러시리스 직류전동기의 시뮬레이션 모델

김종선, 오원현, 신은철, 유지윤, 이광운*
고려대학교 전기공학과, * 삼성전자

A Simulation Model of Brushless DC Motor with Rectangular Current Excitation

Jong-Sun Kim, Won-Hyun O, Eun-Chul Shin, Ji-Yoon Yoo, and Kwang-Woon Lee*
Korea University, * SamSung Electronics co.

ABSTRACT

Brushless DC motor(BLDCM) are suitable to operate in a wide speed range, easy to control and since there are no mechanical brushes and commutators, require low maintenance costs and are free from restrictions of application environment. And since the ratio of instantaneous torque and rated torque is high, BLDCM are appropriate for variable speed operation. This paper proposes the optimal model by using Matlab/Simulink based on modelling and characteristic analysis of trapezoidal back EMF type BLDCM and verifies the validity of the proposed model by applying control systems.

1. 서론

브러시리스 직류전동기는 영구자석 동기전동기와 유사한 구조이면서 직류 전동기와 같이 선형적인 토크 대 전류, 또는 속도 대 전압 특성을 지닌 전동기이다. 따라서 가변속 운전과 제어가 용이하며 동시에 구조적으로 기계적인 정류자와 브러시가 없기 때문에 소음과 분진, 스파크 등이 없어서 사용 환경에 제약이 없고, 토크 대 관성의 비가 매우 좋아 소형으로 높은 출력을 낼 수 있다. 또한, 넓은 운전 영역에 걸쳐 높은 효율을 유지하기 때문에 가변속 운전이 요구되는 응용 개소에 최적의 전동기이다. 또한, 전력용 스위칭 소자의 특성개선과 마이크로 프로세서와 디지털 기술의 발달로 산업계에서 다양한 분야로 확대되고 있다.^[1]

브러시리스 직류전동기는 역기전력 파형의 형태가 토크 출력 특성을 크게 좌우하며, 또한 3상 전

동기에서는 시스템 해석시 브러시리스 직류전동기 모델을 120°도통구간을 갖는 사다리꼴로 선형화하는 방법을 주로 사용하고 있다. 그러나 실제 역기전력 파형은 이상적인 사다리꼴 형태로 나타나지 않으며 기존의 브러시리스 직류전동기 모델을 사용할 경우 실제 시스템과 다른 특성이 나타나고 이는 토크리플과 속도리플이 실제값과 오차가 생기게 하는 원인으로 해석할 수 있다.

BLDCM 제어시스템을 설계 및 개발하기 위해서는 적절한 모델링 및 시뮬레이션을 수행해야 하는데, 기존에는 SPICE, SIMNON, SABER 같은 전용 소프트웨어를 이용하거나, 전동기의 수학적 모델링 해석, 단자전압 분석 및 결과예측분석을 C/C++언어로 구현하여 시뮬레이션을 행하는 것이 일반적이다.^[2-4] 본 논문에서는 위와 같은 연구개발과정의 효율성을 제고하기 위해 새로운 하나의 방법을 연구하고 그 유효성을 검토하였다. 즉, 브러시리스 직류전동기 제어시스템을 설계하는데 있어서 전압원 인버터에 의해 구형파 형태의 전류로 여자되는 브러시리스 직류전동기의 기계적 모델링 및 특성해석을 대상으로 하여 Matlab/Simulink^[5]를 이용한 최적모델을 제시하고, 이를 제어시스템에 적용하여 최적모델의 타당성을 입증한다.

2. 구형파 브러시리스 직류전동기의 동적 해석

구형파 전류 여자 브러시리스 직류전동기는 영구자석 회전자와 그림 1과 같은 3상 전기자 권선을 갖는다. 영구자석과 스테인리스강으로 된 영구자석 고정 슬리브는 높은 저항성을 갖기 때문에 회전자에 유도되는 전류는 무시될 수 있으며 제동 권선은 없는 것으로 가정한다.

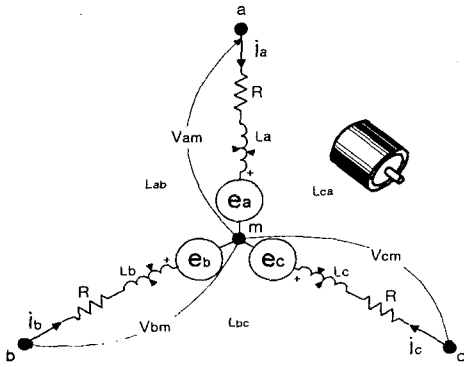


그림 1 고정자 권선 등가 회로

그러므로 고정자 3상 권선의 상변수 회로 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{am} \\ v_{bm} \\ v_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 v_{am}, v_{bm}, v_{cm} 는 상전압, i_a, i_b, i_c 는 상전류, e_a, e_b, e_c 는 상역기전력, R 은 상저항, L_a, L_b, L_c 는 각 상의 자기 인덕턴스, L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} 는 각 상의 상호 인덕턴스이다. 여기서 3상 고정자 권선은 동일하다고 가정한다.

유기된 역기전력은 사다리꼴 형태를 가지며 크기는 회전자의 속도에 비례한다. 전동기의 전기적 위치를 θ_e 라고 하면 θ_e 의 함수인 역기전력 함수 $k_e(\theta_e)$ 를 도입하여 역기전력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_a = k_e(\theta_e) \frac{2\omega_e}{p} \quad (2)$$

위 식에서 p 는 전동기의 극 수이고, ω_e 는 전기적 각속도이다. 역기전력 함수 $k_e(\theta_e)$ 의 크기를 K_e 로 가정하면

$$k_e(\theta_e) = \begin{cases} K_e \frac{6}{\pi} \theta_e & (0 \leq \theta_e \leq \frac{\pi}{6}) \\ K_e & (\frac{\pi}{6} \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{6}) \\ K_e \frac{6}{\pi} (\pi - \theta_e) & (\frac{5\pi}{6} \leq \theta_e \leq \pi) \end{cases} \quad (3)$$

로 표현되며 반파 대칭이므로

$$k_e(\theta_e + \pi) = -k_e(\theta_e), \quad (\pi \leq \theta_e \leq 2\pi) \quad (4)$$

가 된다. b상과 c상의 역기전력은 a상 역기전력과 크기가 같으며 전기각으로 각각 $120^\circ, 240^\circ$ 위상차를 가진다. 또한, 회전자 위치에 따른 3상 고정자 권선 인덕턴스의 변화가 없는 표면부착형 영구자석 전동기로 가정하면 각 상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 동일하므로 이를 다음 식과 같이 각각 L_s, M 으로 나타낼 수 있다.

$$L_a = L_b = L_c = L_s \quad (5)$$

$$L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = M$$

식 (5)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{am} \\ v_{bm} \\ v_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

3상 Y결선 전동기에서

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (7)$$

이므로,

$$Mi_a + Mi_b = -Mi_c \quad (8)$$

이다. 식 (8)을 이용하여 식 (6)을 간략화하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{am} \\ v_{bm} \\ v_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

위 식에서

$$L = L_s - M \quad (10)$$

로 표현하면 전압 방정식은 아래와 같이 정리된다. 이에 대한 등가 회로는 다음에 보인 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{am} \\ v_{bm} \\ v_{cm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

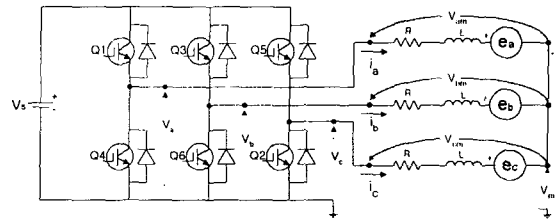


그림 2 브러시리스 직류 전동기와 인버터 등가 회로

이때 전동기의 출력은

$$P_{out} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (12)$$

이며, 이 출력을 기계적 출력으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{out} = T\omega_m \quad (13)$$

식 (12), (13)으로부터 출력 토크는 T 는

$$T = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (14)$$

와 같이 유도될 수 있고, 이때의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \omega_m = -\frac{B}{J} \omega_m - \frac{T_L}{J} + \frac{T}{J} \quad (15)$$

3. 제안된 구형파 브러시리스 직류전동기의 최적 모델

상변수 모델링을 이용한 구형파 브러시리스 직류전동기의 해석을 바탕으로 모델링을 위한 동작 특성을 살펴보고, 각 부분을 Matlab/Simulink를 이용하여 설계하였다.

그림 3은 전동기의 전기적 위치 함수인 역기전력 함수의 크기(K_e)를 모델링 하였다. a상과 b상, c상의 역기전력은 크기가 모두 같으며 전기각으로 120°, 240°위상차를 가진다.

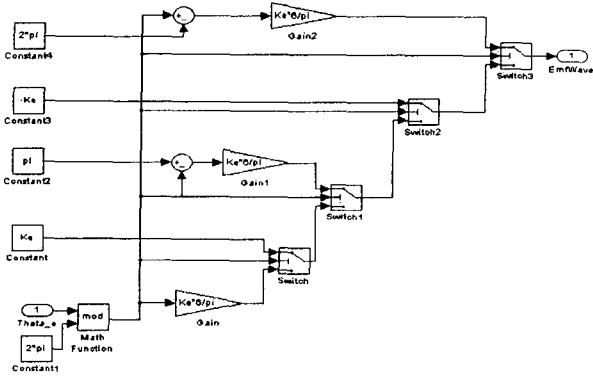


그림 3 K_e 상수 모델링

그림 4는 그림 3의 역기전력 함수의 크기(K_e)를 도입하여 역기전력을 모델링 하였다.

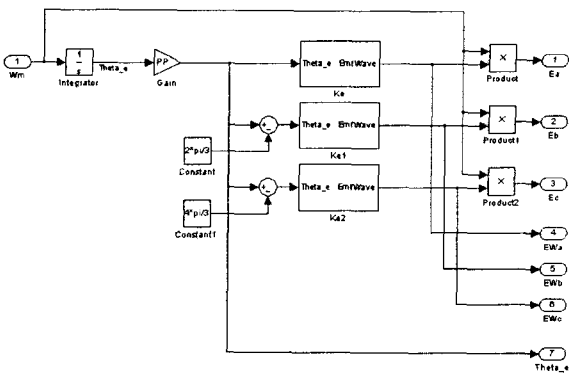


그림 4 역기전력 세부 모델

그림 5는 BLDCM 모델을 실제 전동기와 동일한 특성 및 성능을 구현하기 위해 실제 전동기의 홀센서 신호 검출부 모델이다.

그림 6은 구형파 브러시리스 직류전동기의 최적 모델의 세부 구성도이다. 역기전력부와 홀센서 신호부 그리고 전기적, 기계적 표현을 모두 표현하였으며, 세부 모델에서는 모든 함수 표현을 시뮬링크와 C코드로 작성된 S-function으로 구현하였다.

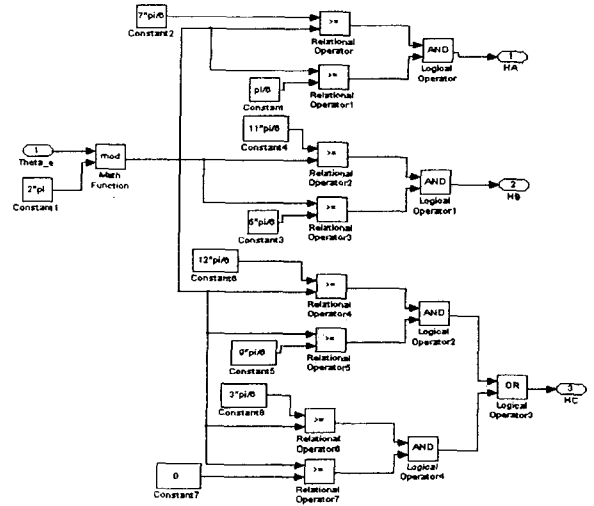


그림 5 홀센서 신호 세부 모델

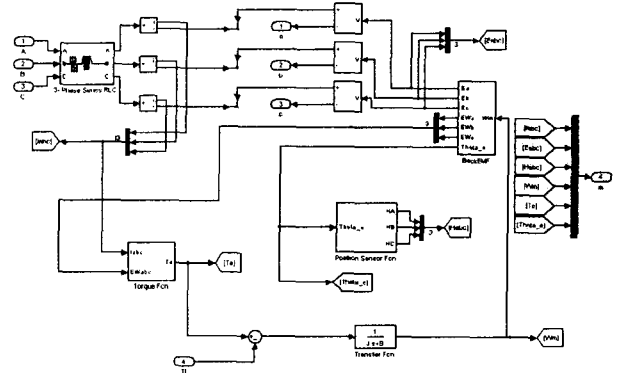


그림 6 BLDCM 최적 모델

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 제어시스템 구성

본 논문에서 제안된 전동기의 최적모델의 타당성을 고찰하기 위해 제어시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

제안한 구형파 브러시리스 직류전동기의 최적 모델의 타당성을 보이기 위해 시뮬레이션에 사용한 전동기 정격과 파라미터 값들은 표1과 같다.

그림 7은 시뮬레이션을 위한 브러시리스 직류전동기의 전체 제어시스템 구성도이다.

전체 제어시스템 모델은 홀센서 검출부와 지령치를 처리하는 서브시스템, 전압원 인버터부, 브러시리스 전동기 모델부로 구성되어있으며, 기본 제공되는 라이브러리 블록과 S-function을 사용하여 직접 코딩하였다.

표 1 브러시리스 직류전동기 사양

상수/극수	3상/4극
입력 전압	DC 100[V]
정격 전류	4.0[A]
정격 속도	3,000[rpm]
정격 출력	250[W]
선간 역기전력 상수	0.214859[V/(rad/sec)]
토크 상수	0.2147656[Nm/A]
저항	0.75[Ω]
인덕턴스	3.05[mH]
전동기 관성 +부하 관성	2.8518e-5[kgm ²]
부하 토크	0.662[Nm]

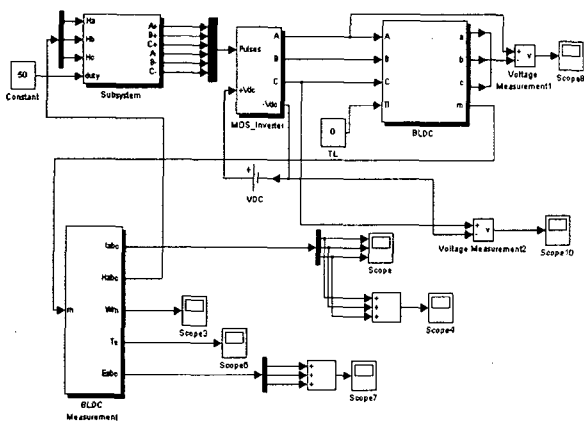


그림 7 제어시스템 구성도

4.2 실험 결과

구형과 전류 여자 브러시리스 직류전동기의 최적 모델의 타당성을 검증하기 위한 실험 결과이다.

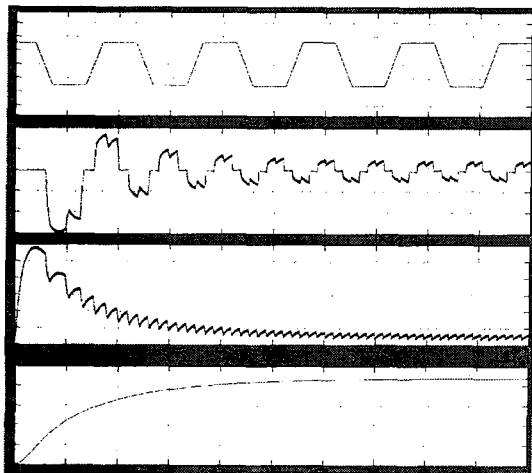


그림 8 시뮬레이션 결과 파형
(a) 역기전력 파형 (b)상전류 파형
(c)토크 파형 (d)응답속도 파형

그림 8은 전동기 최적모델을 제어시스템에 적용하여 얻은 시뮬레이션 파형이다.

역기전력 파형과 상전류 파형은 a상에 대해서 얻은 결과이며, b상과 c상은 전기각으로 120°, 240° 위상차를 가질뿐 파형은 동일하다.

그림 9는 그림 8과 동일한 조건에서 실험을 통하여 얻은 역기전력 파형으로, 시뮬레이션 파형과 실험 파형이 서로 유사함을 알 수 있다.

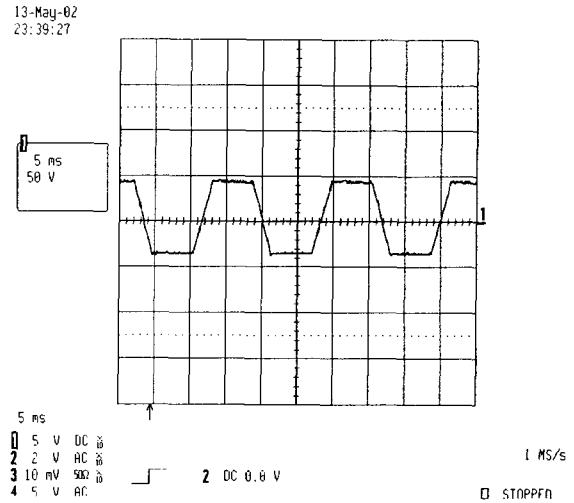


그림 9 실제 실험에서의 역기전력 파형

5. 결 론

본 논문에서는 Matlab/Simulink를 이용한 구형과 전류여자 브러시리스 직류전동기 최적모델을 제안하였으며, 브러시리스 직류전동기 구동시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 실제 구동시스템과 비교한 결과 거의 동등한 성능을 보이고 있음을 제시함으로써 제안한 모델의 유효성을 확인할 수 있었다. 또한, 전동기 통합 시스템의 개발 및 평가도구로서 BLDCM 최적모델이 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. A. Rahman, "Electric Motor Drives and Control - Past, Present, and Future", IEEE Trans. on Ind. Elec., vol. 37, no. 6, pp.562-575, Dec. 1990
- [2] MicroSim Corp, The Design Center: Circuit Analysis Reference Manual, Version 6.0, 1994
- [3] SSPA Systems, SIMNON for Window, SSPA System, Sweden, 1993
- [4] Analogy, Saber User Guide, Version 3.2, Analogy, 1993
- [5] The Math Works, SIMULINK User Guide, The Math Works, 1992