

회로 및 수식 기반의 혼합 모델링을 이용한 7상 영구자석 브러시리스 전동기의 시뮬레이션 모델

이재현, 목형수, 최규하, 이정민*, 김상훈**
건국대학교, (주)효성 중공업연구소*, 강원대학교**

Simulation Model of 7 Phase Permanent Magnet Brushless Motor using Mixed Modeling based Circuit and Equation

J.H Lee, H.S Mok, G.H Choe, J.M Lee*, S.H Kim**
Konkuk Univ., R&D Institute of Hosung Corp.*, Kangwon Univ.**

ABSTRACT

영구자석을 이용한 다상 브러시리스 전동기의 역기전력의 파형은 정현파나 이상적인 사다리꼴 파형과는 다른 형태를 갖는다. 또한 다상 전동기의 경우 상호인덕턴스에 대한 이론적 해석이 쉽지 않아 시뮬레이션을 위한 모델 구현이 어렵다. 본 논문에서는 임의의 역기전력 파형을 갖는 7상 영구자석 브러시리스 전동기의 시뮬레이션 모델 구현 방법으로 회로 및 수식을 기반으로 FEA(Finite Element Analysis)를 이용한 모델을 제안하고 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 모델의 타당성을 입증한다.

1. 서론

다상 전동기의 경우 정확한 모델링이 어려워 시뮬레이션을 통한 현상 예측에 어려움이 있다. 영구자석형 동기 전동기와 BLDC의 경우 각각 역기전력 파형을 정현파와 사다리꼴 형태라는 가정을 기초로 모델을 사용하고 있다. 하지만 실제 다상 영구자석형 교류전동기의 역기전력 파형은 고조파 특성을 포함하는 형태의 파형을 나타냄으로써 모델링을 수행함에 있어 어려움이 따른다.

최근 발표된 5상에 동기전동기에 대한 상변수 모델은 전동기 역기전력의 비선형성을 고려하지 않았으며^[6], 기본파와 3고조파 자속만을 고려하여 6상 이상의 다상 전동기에 적용하기에 어려움이 따른다. 또한 실제 전동기 설계 요소를 바탕으로 한 FEA(Finite Element Analysis) 프로그램을 이용하면 모델링 없이도 모델을 얻을 수 있고, 비정현파 역기전력을 포함하는 해석이 가능하다. 하지만 이는 상당한 계산 시간을 필요로 함으로 제어 알고리즘을 포함한 전동기 구동 시스템의 특성을 얻는데 다소 어려움이 있다.^{[4][5]}

본 논문에서는 회로와 수식 그리고 FEA를 이용한 다상 영구자석형 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델을 제안하고 7상 영구자석형 브러시리스 전동기에 적용한 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 7상 브러시리스 교류전동기 상변수 모델

그림 1에서의 7상 브러시리스 교류전동기는 다음과 같은 식으로 표현 될 수 있다.

$$\vec{v} = R_s \vec{i} + \frac{d\vec{\lambda}_s(i_k, \theta)}{dt} \quad (1)$$

$$\vec{\lambda}_s = \vec{L}(i_k, \theta) \vec{i} + \vec{\lambda}_r(\theta) \quad (2)$$

$$T_e = \frac{\sum_{k=a}^g e_k i_k}{\omega_m} \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - B\omega_m - T_L \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (5)$$

$$\vec{L}(i_k, \theta) = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{ad} & L_{ae} & L_{af} & L_{ag} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bd} & L_{be} & L_{bf} & L_{bg} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cd} & L_{ce} & L_{cf} & L_{cg} \\ L_{da} & L_{db} & L_{dc} & L_{dd} & L_{de} & L_{df} & L_{dg} \\ L_{ea} & L_{eb} & L_{ec} & L_{ed} & L_{ee} & L_{ef} & L_{eg} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{fd} & L_{fe} & L_{ff} & L_{fg} \\ L_{ga} & L_{gb} & L_{gc} & L_{gd} & L_{ge} & L_{gf} & L_{gg} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\vec{v} = [v_a \ v_b \ v_c \ v_d \ v_e \ v_f \ v_g]^T, \quad \vec{i} = [i_a \ i_b \ i_c \ i_d \ i_e \ i_f \ i_g]^T \quad (7)$$

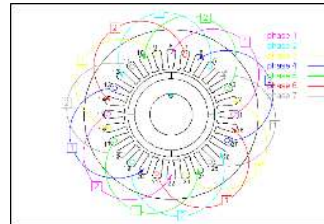


그림 1. 7상 브러시리스 교류전동기의 단면과 결선
Fig. 1. A section and winding of 7-phase Brushless AC Motor

여기서, R_s 는 고정자 저항, θ 는 영구자석의 공간상 위치, $\vec{\lambda}_s$ 는 고정자 권선의 쇄교자속, $\vec{\lambda}_r$ 는 영구자석에 의한 쇄교자속, $k = a, b, c, d, e, f$ 이다. 영구자석형 전동기의 경우 고정자 쇄교자속의 대부분은 영구자석에 의한 것이고, 영구자석의 투자율이 작기 때문에 상대적으로 권선에 흐르는 전류에 의한 비선형적특성인 포화현상을 무시할 수 있으므로 $\vec{L}(i_k, \theta)$ 는 $\vec{L}(\theta)$ 로 다시 표현 할 수 있다. θ 만의 함수인 $\vec{\lambda}_r$ 과 \vec{L} 은 FEA(Finite Element Analysis)를 이용하여 얻을 수 있다.

3. 7상 영구자석형 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델

3.1 제안하는 복합 모델링

식(1)~(5)와 FEA를 기반으로 다음과 같은 7상 영구자석형 브러시리스 전동기의 모델을 구현 할 수 있다. 여기서, 역기전력과 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스는 전동기 설계 자료를 바탕으로 한 FEA를 통하여 구현 한다. 우선 식(2)를 (1)에 대입하면 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{v} = \vec{R}_s \cdot \vec{i} + \frac{d\vec{L}(\theta)}{dt} \cdot \vec{i} + \frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{dt} \quad (8)$$

그림 1에서와 같이 표면 부착형 영구자석 전동기의 경우 자기 인덕턴스는 회전자 위치에 따른 변화를 무시 할 수 있으므로 식(8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{v} = \vec{R}_s \cdot \vec{i} + \vec{L} \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} + \frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{dt} \quad (9)$$

식(9)에서의 마지막 항은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{dt} = \frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{d\theta} \cdot \omega_m \quad (10)$$

식(10)은 역기전력 상수 벡터 $\vec{\kappa}_e$ 의 회전자 각속도 ω_m 만큼의 실수배로 표현 할 수 있다.

$$\vec{\kappa}_e(\theta) \cdot \omega_m = \vec{e} \quad (11)$$

식(8)~(11)을 정리하면 각상의 전압방정식을 구할 수 있다.

$$\vec{v} = \vec{R}_s \cdot \vec{i} + \vec{L} \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} \cdot \vec{e} \quad (12)$$

$$\text{여기서, } \vec{e} = [e_a \ e_b \ e_c \ e_d \ e_e \ e_f \ e_g]^T \quad (13)$$

각상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스로 구성된 인덕턴스 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\vec{L} = \begin{bmatrix} L_s & L_1 & L_2 & L_3 & L_3 & L_2 & L_1 \\ L_1 & L_s & L_1 & L_2 & L_3 & L_3 & L_2 \\ L_2 & L_1 & L_s & L_1 & L_2 & L_3 & L_3 \\ L_3 & L_2 & L_1 & L_s & L_1 & L_2 & L_3 \\ L_3 & L_3 & L_2 & L_1 & L_s & L_1 & L_2 \\ L_2 & L_3 & L_3 & L_2 & L_1 & L_s & L_1 \\ L_1 & L_2 & L_3 & L_3 & L_2 & L_1 & L_s \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,

$$L_s = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{dd} = L_{ee} = L_{ff} = L_{gg}$$

$$L_1 = L_{ab} = L_{bc} = L_{cd} = L_{de} = L_{ef} = L_{fg} = L_{ga}$$

$$= L_{ba} = L_{cb} = L_{dc} = L_{ed} = L_{fe} = L_{gf} = L_{ag}$$

$$L_2 = L_{ac} = L_{bd} = L_{ce} = L_{df} = L_{eg} = L_{fa} = L_{gb}$$

$$= L_{ca} = L_{db} = L_{ec} = L_{fd} = L_{eg} = L_{af} = L_{bg}$$

$$L_3 = L_{ad} = L_{be} = L_{cf} = L_{de} = L_{ea} = L_{fb} = L_{gc}$$

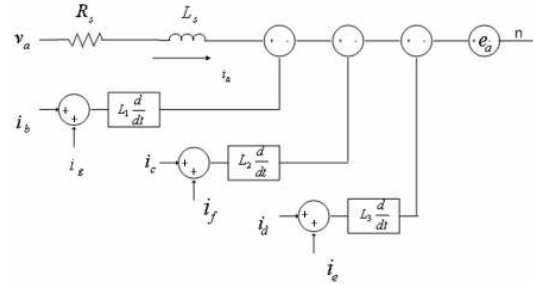
$$= L_{da} = L_{eb} = L_{dc} = L_{ed} = L_{ae} = L_{bf} = L_{cg}$$

위의 수식을 기반으로 a상에 대한 모델을 구현하면 다음과 같이 표현된다.

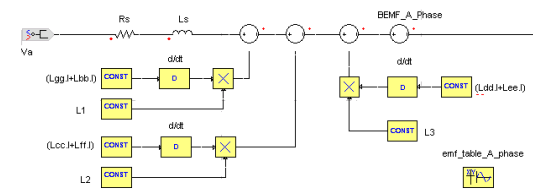
$$v_a = R_s i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + L_1 \frac{d}{dt}(i_b + i_g) + L_2 \frac{d}{dt}(i_c + i_f) + L_3 \frac{d}{dt}(i_d + i_e) + e_a \quad (15)$$

위 식에서 상전류 i_a 는 식(16)과 같이 초기값 전류와 자기 인덕턴스 양단의 전압의 적분항의 합으로 표현 된다.

$$i_a = i_a(0) + \frac{1}{L_s} \int_0^t v_{La} dt \quad (16)$$



(a) 제안하는 시뮬레이션 모델
(a) Proposed Simulation Model



(b) Simplorer를 이용한 모델 구현
(b) Model implementation using Simplorer

그림 2. 제안된 7상 BLAC a상 모델
Fig. 2. Proposed A Phase Model of 7-phase BLAC

그림 2(a)는 본 논문에서 제안된 영구자석형 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델이고 (b)는 Ansoft사의 Simplorer를 이용하여 제안된 모델의 구현을 나타낸다. 역기전력항 e_a 는 FEA 결과를 테이블로 저장하여 이용한다.

3.2 FEA에 의한 전동기 파라미터 추출

표 1에서 주어진 전동기 설계 정보로부터 역기전력, 자기인덕턴스, 상호 인덕턴스를 FEA 해석을 통해 계산 할 수 있다. 본 논문에서는 Ansoft사의 Maxwell을 이용하였다.

표.1. 7상 BLAC 전동기 사양
Table 1. 7-phase BLAC Motor Specification

내용	특성값
극수	4
상수	7
슬롯수	28
권선방식	전절권, 단층권
정격출력	800[W]
정격토크	0.32[Nm]
토크상수	0.226[Nm/Ap]
여자방식	NdFeB 자석

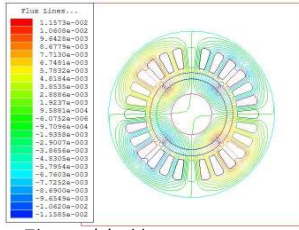


그림 3. 자속 분포도

Fig. 3. Flux Distribution

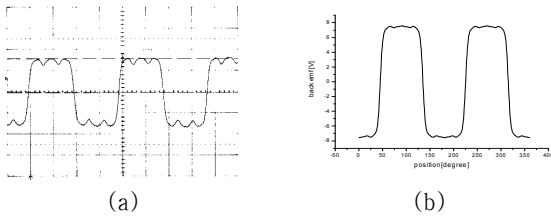
회전자의 위치에 따라 약 5% 미만의 인덕턴스 변화는 무시할 만한 수준으로 평균값을 계산하여 사용하였다. 그 결과는 표 2에서 보이는 것과 같다.

표.2 FEA 해석에 의한 전동기 파라미터

Table 2. Motor Parameters analyzed by FEA

저항(R)	0.476[Ω]
자기인덕턴스(Ls)	2400[uH]
상호인덕턴스(L1)	-21.87[uH]
상호인덕턴스(L2)	-131.0[uH]
상호인덕턴스(L3)	78.73[uH]

그림 3(a)는 실제 제작한 7상 BLAC의 1554rpm에서의 역기전력 파형이고 (b)는 본 논문의 시뮬레이션에 사용된 FEA를 통한 역기전력 파형으로 그 결과가 유사함을 볼 수 있다.



(a)

(b)

(a) 역기전력 실험파형 (상전압:6.05V, 평균부분:153.9°)

(b) FEA를 통한 역기전력 파형

(a) Experimental emf Waveforms

(b) Emf Waveforms analyzed by FEA

그림 4. 무부하 역기전력 파형

Fig. 4. Emf Waveforms at no load

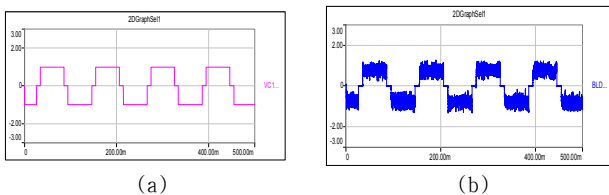
4. 제안된 모델의 검증

모델 검증을 위하여 250rpm에서 전류 기준값을 1A로 하였을 때 시뮬레이션 파형과 실험파형을 비교하였다..



그림 5. 실험 세트

Fig. 5. Experimental Set



(a)

(b)

(a) a상 기준전류

(b) a상 전류

(a) a phase current reference

(b) a phase current

그림 6. 250rpm에서의 전류파형 (시뮬레이션)

Fig. 6. Current Waveform at 250rpm (Simulation)

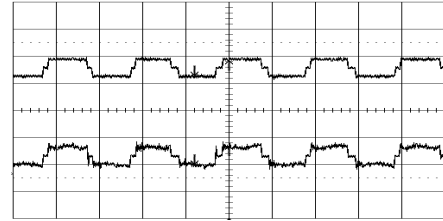


그림 7. 250rpm에서의 전류 파형 (실험)

(위: 기준전류 아래: 실제전류) [2A/Div]

Fig. 7. Current Waveform at 250rpm (Experiment)

(Upper: reference Lower: real current)

5. 결론

본 논문에서는 비정현적인 역기전력 파형과 상호인덕턴스에 대한 이론적인 해석의 어려움으로 인하여 시뮬레이션을 통한 특성해석이 이상적인 정현파 역기전력 혹은 사다리꼴 형태의 역기전력으로 국한된 모델의 대안으로 임의의 역기전력 파형을 갖는 다상 브러시리스 전동기에 대해 회로 및 수식 그리고 FEA를 통한 시뮬레이션 모델을 제안하고 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

6. 참고 문헌

- [1] P. Pillay, and R. Krishnan, "Modeling of permanent magnet motor drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 35, No. 4, pp. 537-541, 1998.
- [2] N. Hemati and M. C. Leu, "A complete model characterization of brushless DC motors," IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 28, No. 1, pp. 172-180, 1992.
- [3] H. A. Toiyat, "Analysis and Simulation of Five-Phase Variable-Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, No. 4, pp. 748-756, 1998.
- [4] Osama A. Mohammed, S. Liu, and Z. Liu, "A Phase Variable Model of Brushless dc Motors Based on Finite Element Analysis and Its Coupling With External Circuits", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 5, May 2005, pp. 1576-1579.
- [5] O. A. Mohammed, S. Liu, and Z. Liu, "Physical modeling of PM synchronous motors for integrated coupling with machine drives", IEEE Trans. Magn., vol 41, no.5, pp. 1628-1631, May 2005.
- [6] S. J. Kang, and S. K. Sul, "Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Nonideal Trapezoidal Back EMF," IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 10, No. 6, pp. 796-802, 1995.