

다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션을 위한 혼합 모델

(Hybrid Simulation Model of Multi-Phase Brushless AC Motor)

목형수* · 홍준희 · 김상훈

(Hyung-Soo Mok · Jun-Hee Hong · Sang-Hoon Kim)

요 약

다상 브러시리스 교류전동기의 역기전력 파형은 일반적으로 이상적인 정현파나 사다리꼴 형태가 아니다. 그러므로 이상적인 역기전력을 가정하는 기존의 모델로 다상 BLAC 전동기의 특성을 시뮬레이션 또는 해석하는 경우에는 많은 오차가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 오차를 감소시키기 위해 FEA 기반의 회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 이용한 상변수 모델을 제안하였다. FEA로부터 얻어진 역기전력 파형을 포함한 상모델의 파라미터를 사용하는 제안된 혼합 모델링기법은 임의의 역기전력 전압파형을 갖는 다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션과 해석에 사용할 수 있다. 제안한 기법을 7상 BLAC 전동기에 적용한 시뮬레이션 및 실험 결과로부터 모델의 타당성을 입증하였다.

Abstract

The emf of a permanent magnet multi-phase BLAC(Brushless AC) motor is generally a non-sinusoidal or a non-ideal trapezoid wave. So, conventional modeling using a sinusoidal or an ideal trapezoid emf can result in errors to simulate and analyze the properties of a multi-phase BLAC motor. To reduce the modeling error, this paper proposes a phase variable model, which is obtained from a hybrid modeling technique consisting of Finite Element Analysis(FEA) based circuits and equations. Since the phase model parameters including the emf waveform were obtained using FEA, the proposed hybrid modeling technique can be used to implement a simulation model for multi-phase BLAC motors with any emf voltage waveforms. Adequacy of the proposed model was established from the simulation and experimental results for a seven-phase BLAC motor.

Key Words : 7-Phase Brushless AC Motor, FEA(Finite Element Analysis), Modeling, Simulation

1. 서 론

한상이 결상되어도 안전하게 동작할 수 있는 다상 교류전동기는 일반 범용분야 보다는 높은 신뢰도가 요구되는 하이브리드자동차, 항공, 선박, 군수 분야의 구동시스템에 적용되고 있다[1]. 또한 다상 교류전동기는 기존의 같은 용량의 3상 교류전동기에 비

* 주저자 : 건국대학교 전기공학과 부교수
Tel : 02-450-3479, Fax : 02-447-9186
E-mail : hsmok@konkuk.ac.kr
접수일자 : 2007년 6월 14일
1차심사 : 2007년 6월 18일
심사완료 : 2007년 7월 9일

다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션을 위한 온입 모델

해 단위 전류당 토크가 크기 때문에 상당 전류의 크기를 줄일 수 있고, 토크 리플의 주파수가 크며 그 크기도 작다는 장점이 있다. 이러한 다상 전동기의 특성해석과 전류 및 속도제어기 설계를 위해서는 이에 대한 모델링이 필수적이다. 영구자석형 동기전동기의 경우에는 공극자속분포와 역기전력의 파형이 정현파라는 가정을 기초로 한 d-q 모델을 사용하며, BLDC의 경우에는 역기전력의 파형이 사다리꼴 형태이기 때문에 d-q 모델 대신 상변수 모델(phase variable model)을 사용하고 있다[2-3]. 최근 다상 영구자석형 동기전동기의 경우 전류당 토크 밀도를 극대화하기 위해서 정현파 역기전력 대신 구형파 분포에 가까운 비정현파 역기전력 파형을 갖도록 설계하고 있으며, 다상 BLDC의 경우에도 이상적인 사다리꼴 역기전력에서 구형파에 근접한 역기전력을 갖도록 설계하고 있어, 기존의 모델로 해석할 경우 오차를 발생할 수 있다.

최근 5상 동기전동기를 대상으로 선형 동기전류제어의 설계를 위해 기본파와 3고조파 2개의 d-q 공간 개념을 사용한 동기좌표모델을 발표하였으나, 전동기의 역기전력의 비선형성을 고려하지 않았으며 [4], 또한 정현파 자속만을 고려하거나, 기본파와 3고조파 자속만을 고려하여 사용하기 때문에 6상 이상의 다상전동기의 모델로 적용하기 어려울 뿐 아니라, 상변수 모델에 비해 방정식 수가 단지 1개가 줄기 때문에 상대적으로 단순하다고 볼 수 없다. 또 다른 연구로서 1상을 결상하고 운전하는 BLDC 구동 방식의 해석과 역기전력 파형의 실험 데이터를 기초로 구형파 역기전력 파형을 갖는 5상 BLDC 전동기의 모델링을 수행하였으나, 7상의 경우 1상 결상에 대한 경우의 수가 많고, 회로해석이 복잡하기 때문에 이 방식을 적용하기는 어려움이 따른다[5]. 따라서 특성 해석과 제어알고리즘의 분석을 위한 다상 전동기의 정확한 시뮬레이션을 위해서는 비선형성과 고조파 특성이 고려된 모델을 구할 필요가 있다. 전동기 설계 자료를 바탕으로 FEA(Finite Element Analysis) 프로그램을 이용하면, 복잡한 모델링과 정없이 쉽게 모델을 얻을 수 있을 뿐 아니라, 비선형성을 고려할 수 있고, 비정현파 역기전력 즉, 고조파 특성을 포함한 경우에 대한 정확한 해석이 가능하여,

다상 동기전동기, 다상 BLDC 전동기를 포함한 여러 전동기의 모델로 적합하다. 그러나 이를 위한 계산 시간이 상당하기 때문에 이 모델을 이용하여 제어 알고리즘을 포함한 구동시스템 전반의 특성을 구하는데 적합하지 않다[2-3].

본 논문에서는 다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션을 위한 FEA 기반의 상변수 모델을 제안한다. FEA를 이용하여 역기전력 파형을 포함한 상모델의 파라미터를 구하고, 회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 제안하여 임의의 역기전력 파형을 갖는 다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델을 제안한다. 제안한 모델의 타당성을 7상 BLAC 전동기의 모델을 예로 하여 검증한다.

2. 7상 BLAC 전동기의 상변수 모델

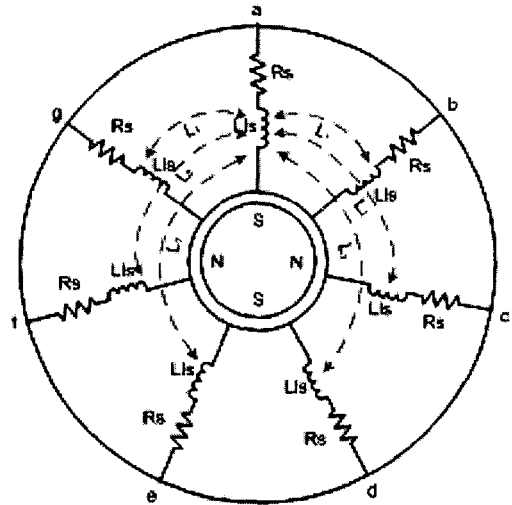


그림 1. 7상 브러시리스 교류전동기의 단면과 결선
Fig. 1. A section and winding of 7-phase Brushless AC Motor

그림 1에 보이는 7상 BLAC 전동기의 상변수 모델은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

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

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

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

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

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

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

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \\ v_e \\ v_f \\ v_g \end{bmatrix}, \quad \vec{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \\ i_g \end{bmatrix}, \quad \vec{e} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_d \\ e_e \\ e_f \\ e_g \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기에 e_k 는 각 상의 역기전력, \vec{i} 는 고정자 권선의 쇄교자속, $\vec{\lambda}_r(\theta)$ 는 영구자석에 의한 쇄교자속을 나타내고, $k = a, b, c, d, e, g$ 이다.

고정자 권선의 쇄교자속은 회전자의 공간상의 위치(θ)와 고정자 권선에 흐르는 전류의 함수로 나타내지만, 영구자석형 전동기의 경우 고정자 쇄교자속의 대부분은 영구자석에 의한 것이고, 영구자석의 투자율이 작기 때문에 권선 전류에 의한 비선형성인 포화현상을 무시할 수 있어 $\vec{L}(i_k, \theta)$ 는 θ 만의 함수인 $\vec{L}(\theta)$ 로 나타낼 수 있다. 필요한 $\vec{\lambda}_r(\theta)$ 와 $\vec{L}(\theta)$ 는 전동기의 설계 자료를 토대로 FEA(Finite Element Analysis)를 이용하여 구할 수 있다.

3. 7상 BLAC 전동기의 모델링

7상 BLAC 전동기의 시뮬레이션 모델은 식 (1)~(5)를 기초로 하여 수식 모델과 회로 모델을 이용하여 구현할 수 있다. 먼저, 식 (2)를 (1)에 대입하면 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{v} = R \cdot \vec{i} + \frac{d\vec{L}(\theta) \cdot \vec{i}}{dt} + \frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{dt} \quad (7)$$

그림 1과 같이 영구자석을 회전자의 표면에 부착하는 경우에는 자기인덕턴스 L_k 의 회전자 위치에 따른 변화를 무시할 수 있으므로 이식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

또한 $\frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{dt} = \frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\vec{\lambda}_r(\theta)}{d\theta} \cdot \omega_m = \vec{k}_e(\theta) \cdot \omega_m = \vec{e}$ 이므로 각 상의 전압방정식을 식 (9)로 표현할 수 있다.

$$\vec{v} = R \cdot \vec{i} + \vec{L} \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} + \vec{e} \quad (9)$$

각상의 자기인덕턴스와 상호 인덕턴스로 구성된 인덕턴스는

$$\vec{L} = \begin{bmatrix} L_s & L_1 & L_2 & L_3 & L_3 & L_2 & L_1 \\ L_1 & L_s & L_1 & L_2 & L_3 & L_3 & L_2 \\ L_2 & L_1 & L_s & L_1 & L_2 & L_3 & L_3 \\ L_3 & L_2 & L_1 & L_s & L_1 & L_2 & L_3 \\ L_3 & L_3 & L_2 & L_1 & L_s & L_1 & L_2 \\ L_2 & L_3 & L_3 & L_2 & L_1 & L_s & L_1 \\ L_1 & L_2 & L_3 & L_3 & L_2 & L_1 & L_s \end{bmatrix} \quad (10)$$

와 같다. 여기서

$$\begin{aligned} L_s &= L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{dd} = L_{ee} = L_{ff} = L_{gg} \\ L_1 &= L_{ab} = L_{bc} = L_{cd} = L_{de} = L_{ef} = L_{fg} = L_{ga} \\ &= L_{ba} = L_{cb} = L_{dc} = L_{ed} = L_{fe} = L_{gf} = L_{ag} \\ L_2 &= L_{ac} = L_{bd} = L_{ce} = L_{df} = L_{eg} = L_{fa} = L_{gb} \\ &= L_{ca} = L_{db} = L_{ec} = L_{fd} = L_{eg} = L_{af} = L_{bg} \\ L_3 &= L_{ad} = L_{be} = L_{cf} = L_{de} = L_{ea} = L_{fb} = L_{gc} \\ &= L_{da} = L_{eb} = L_{dc} = L_{ed} = L_{ae} = L_{bf} = L_{cg} \end{aligned}$$

이다. 식 (9)에서 a상의 경우에 대해 살펴보면 a상 전압은 저항 R 에 의한 전압강하와 자기인덕턴스에 대

다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션을 위한 온압 모델

한 전압강하 $L_s \frac{di_a}{dt}$, 상호인덕턴스에 대한 강하 $L_1 \frac{d}{dt}(i_b + i_g)$, $L_2 \frac{d}{dt}(i_c + i_f)$, $L_3 \frac{d}{dt}(i_d + i_e)$ 및 역기전력 e_a 성분으로 이루어져 있으므로, 다음과 같이 표현된다.

$$v_{an} = R_s i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + L_1 \frac{d}{dt}(i_b + i_g) + L_2 \frac{d}{dt}(i_c + i_f) + L_3 \frac{d}{dt}(i_d + i_e) + e_a \quad (11)$$

이 식을 인덕터 양단의 전압으로 표현하면

$$v_{La}(t) = L_s \frac{di_a}{dt} = v_{an} - R_s i_a - L_1 \frac{d}{dt}(i_b + i_g) - L_2 \frac{d}{dt}(i_c + i_f) - L_3 \frac{d}{dt}(i_d + i_e) - e_a \quad (12)$$

와 같고, 이를 적분하여 상전류를 계산한다.

$$i_a = i_a(0) + \frac{1}{L_s} \int_0^t v_{La}(t) dt \quad (13)$$

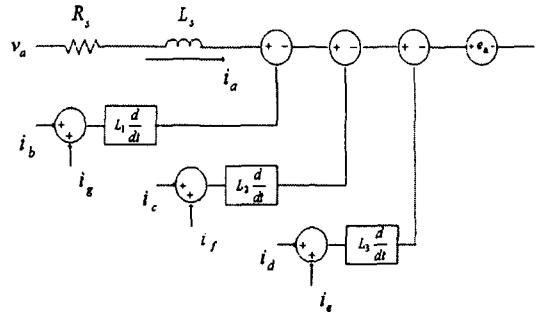
그림 2에서처럼 저항 R_s 에 의한 전압강하와 자기 인덕턴스에 의한 전압강하성분 $L_s \frac{di_a}{dt}$ 는 회로모델을 사용하고, 상호인덕턴스에 의한 전압강하는 수식 모델을 회전자의 위치에 따른 역기전력 e_a 는 실험 혹은 FEA 결과를 테이블로 저장하여 사용한다. 이러한 회로 모델을 그림 2에 나타내었다.

그림 2의 한 상에 대한 회로 및 수식 기반의 혼합 모델을 7상으로 구성하면 그림 3과 같다.

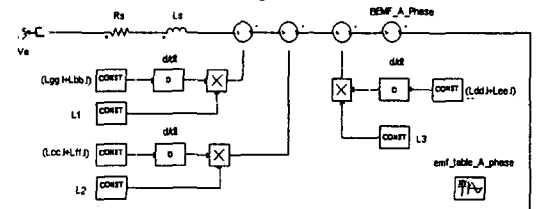
4. FEA에 의한 전동기 파라미터 추출

다상 교류전동기 모델링의 예로서 표 1과 같은 7상 BLAC 전동기를 대상으로 모델에 필요한 파라미터인 역기전력, 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스를 FEA 해석을 통해 계산하였다.

각 상 권선에서의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 값은 전동기 설계 수식에 따라 계산이 가능하다. 본 연구에서는 Ansoft의 Maxwell을 이용한 FEA 해석을 통해 자속선 분포도와 회전자의 위치에 따른



(a) 회로 블록도
(a) Circuit Block Diagram



(b) Simplorer로 구현한 회로 블록도
(b) Circuit Block Diagram implemented by Simplorer

그림 2. 7상 BLAC a상의 회로 블록도
Fig. 2. A Phase Circuit Block Diagram of 7-phase BLAC

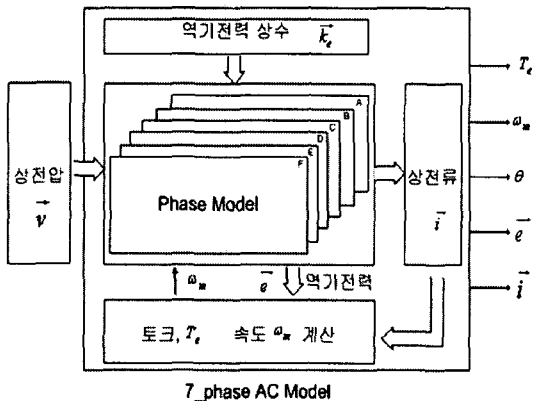


그림 3. 7상 PMAC 상변수 모델의 블록도
Fig. 3. Block Diagram of Phase Variable Model of 7-Phase BLAC

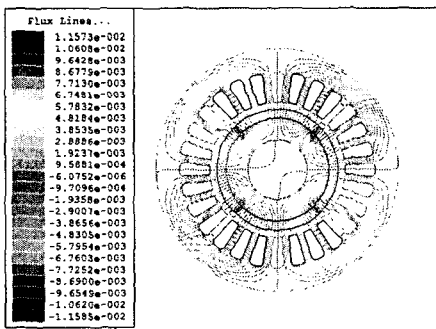
각상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 계산하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

회전자의 위치에 따라 고정자의 슬롯 및 자기회로

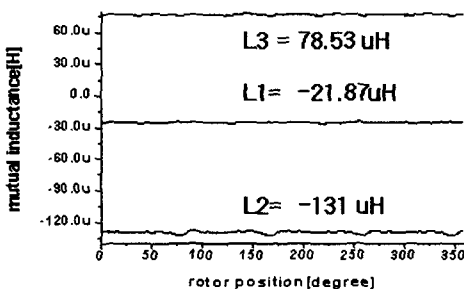
의 형상에 따른 인덕턴스 값의 미소한 변화가 있지만, 5[%] 미만의 무시할 만한 수준으로 표 2에 각상의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스 성분의 평균값을 계산하여 사용하였다.

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

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



(a) 자속 분포도
(a) Flux Distribution



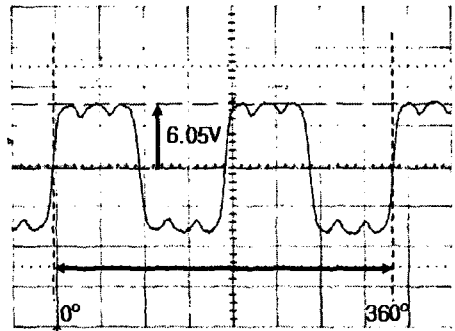
(b) 각 상의 상호 인덕턴스
(b) Mutual Inductances of Each Phase

그림 4. 7상 BLAC 전동기의 FEA 결과
Fig. 4. FEA Result for 7-Phase BLAC Motor

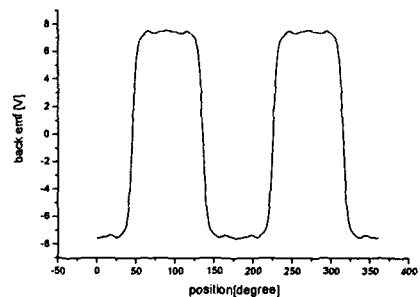
표 2. FEA 해석에 의한 전동기 파라미터
Table 2. Motor Parameters analyzed by FEA

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 2와 같이 7상 BLAC 전동기를 모델링하기 위해서는 각 상에 대한 역기전력 파형이 필요하다. PMSM의 경우는 정현파를, BLDC의 경우 이상적인 사다리꼴의 파형을 사용하지만, 다상의 경우는 그림 5와 같이 실제 전동기의 무부하 역기전력 파형이 정현파와 이상적인 사다리꼴 형태에서 벗어난 파형을 형태를 보이는 것이 일반적이다.



(a) 역기전력 실험파형(상전압 : 6.05(V), 평탄부분 : 153.9(°))
(a) Experimental emf Waveforms



(b) FEA를 통한 역기전력 파형
(b) Emf Waveforms analyzed by FEA

그림 5. 무부하 역기전력 파형
Fig. 5. Emf Waveforms at no load

다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션을 위한 혼합 모델

이러한 현상은 다상의 경우 회전자에 자석의 형상을 정현파 혹은 사다리꼴의 형태로 구현하기가 어렵고, 자석의 착자시에 착자 요크를 사용하지 않고 동심 슬레노이드를 사용하는 경우는 자석이 균일하게 착자할 수 없기 때문이다. 따라서 이러한 경우는 PMSM 혹은 BLDC 전동기에서 사용하는 모델링 수식을 사용하게 되면 실제 전동기와의 오차가 발생하여 사용할 수 없기 때문에, 실제의 역기전력을 계산하거나 측정된 값을 사용하여 모델링을 수행해야 한다. 그림 5 (a)에 제작한 7상 BLAC 전동기를 1554[rpm]으로 무부하 운전 했을 때의 역기전력 파형을 나타내었다. 그림 5 (b)는 FEA 해석을 통한 시험과 같은 조건에서의 역기전력 해석 결과로 실제 역기전력과 유사함을 알 수 있고 이 데이터를 7상 BLAC 전동기 모델링에서 역기전력 값으로 용하였다.

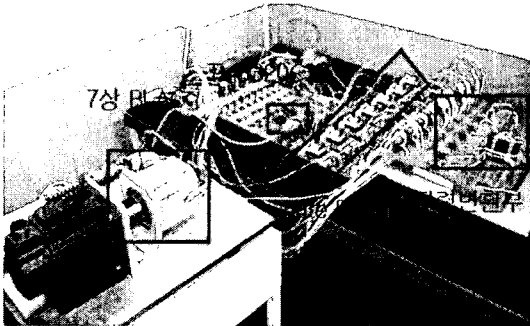
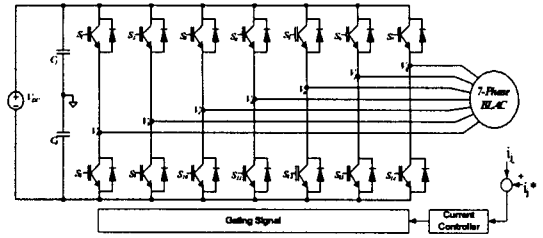


그림 6. 실험 세트
Fig. 6. Experimental Set

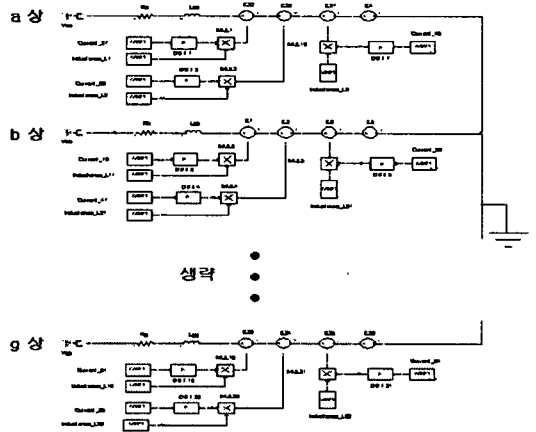
5. 제안한 혼합 모델의 검증

본 논문에서 제안한 회로 및 수식 기반의 혼합모델의 타당성을 검증하기 위하여 그림 7과 같이 7상 BL AC 전동기 모델과 구동 시스템을 Simplorer로 작성하였고, 그림 6에는 제작한 7상 BLAC 전동기 구동시스템을 나타내었다.

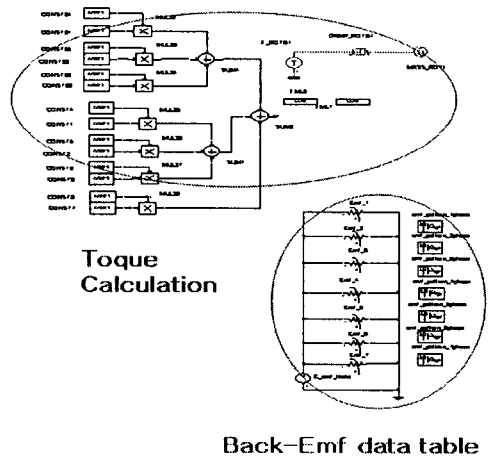
모델의 검증을 위하여 각각 250[rpm]과 100[rpm]에서 전류가 기준값을 1A로 하였을 때의 각상 전류에 대한 시뮬레이션 파형과 실험파형을 비교하였으며, 전류제어기법으로는 7상 삼각과 비교방식의 디지털 PI 전류제어기법을 사용하였다. 그림 8과 그림



(a) 7상 BLAC 구동시스템
(a) 7-Phase BLAC Drive System



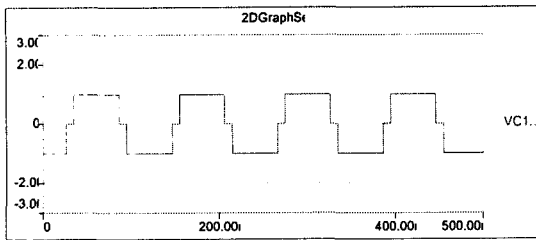
(b) 상모델
(b) Phase Model



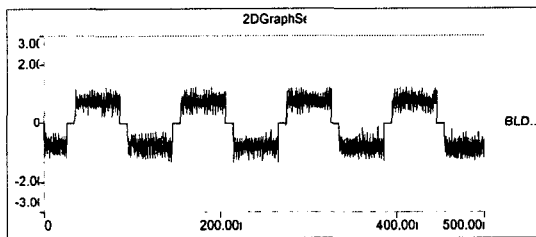
(c) 토크 및 역기전력 발생 모델
(c) Torque and EMF Generation Model

그림 7. 7상 BLAC 전동기 시뮬레이션 모델
Fig. 7. 7-phase BLAC Motor Simulation Model

9에는 시뮬레이션에 의한 전류파형을 그림 10에는 실험파형을 나타내었다. 그림 8과 그림 9, 그리고 그림 10에서 알 수 있듯이 결과가 잘 일치하고 있어, 제안한 회로 및 수식 기반의 혼합 모델이 타당함을 알 수 있다.



(a) a상 기준전류
(a) a phase current reference



(b) a상 전류
(b) a phase current

그림 8. 250(rpm)에서의 전류파형(시뮬레이션)
Fig. 8. Current Waveform at 250(rpm)
(Simulation)

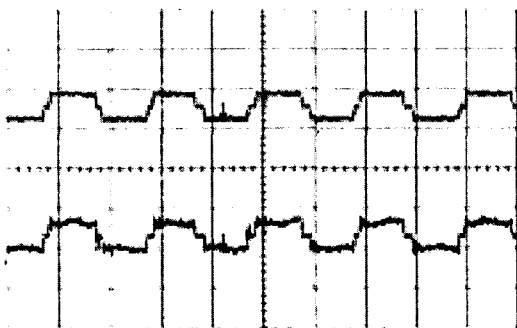


그림 9. 250(rpm)에서의 전류 파형(실험)
(위 : 기준전류 아래: 실제전류)[2A/Div]
Fig. 9. Current Waveform at 250(rpm)
(Experiment)
(Upper: reference Lower: real current)

5. 결 론

본 논문에서는 다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 및 특성 해석을 위한 FEA 기반의 회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 이용한 상변수 모델을 제안하였다. FEA를 이용하여 역기전력 파형을 포함한 상모델의 파라미터를 구하고, 회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 제안하여 임의의 역기전력 파형을 갖는 다상 BLAC 전동기의 시뮬레이션 모델의 구현 방법에 대해 연구하였다. 제안한 모델을 7상 브러시리스 전동기에 적용하여 시뮬레이션과 실험 결과로부터 모델의 타당성을 입증하였다. 제안한 모델링 방법은 임의의 역기전력 파형 또는 전류의 크기에 따라 전동기의 파라미터가 변동하는 등의 비선형성을 갖는 3상을 포함한 다상 전동기에 적용할 수 있다.

본 연구는 건국대학교와 산업자원부(R-2003-B-518)의 지원에 의해 수행된 과제임.

References

- [1] P. Pillay, and R. Krishnan, "Modeling of permanent magnet motor drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 35, no. 4, 1998, pp. 537-541.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Hyung-Min Ryu, Ji-Woong Kim, and Seung-Ki Sul, "Synchronous Frame Current Control of Multi-Phase Synchronous Motor", IAS Annual Meeting ,2004, pp.56-63.
- [5] M. Codoy Simoes, P. Vieira Jr., "A Five-Phase Brushless DC-Machine Direct Drive System", EPE Journal vol.14, no.3, August 2004, pp.15-24.
- [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.
- [7] Leila Parsa, and Hamid A. Toliyat, "Five-Phase Permanent-Magnet Motor Drives", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 41, no. 1, Jan. 2005, pp. 30-37.

다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션을 위한 온압 모델

- [8] 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, 1998, pp. 748-756.
- [9] N. Hemati and M. C. Leu, "A complete model characterization of brushless DC motors," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 28, no. 1, 1992, pp. 172-180.
- [10] I. Takahashi, "A Super High Speed PM Motor Drive System By a Quasi-Current Source Inverter," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 30, no. 3, 1994, pp. 683-690.
- [11] R. Krishnan, and S. Lee, "PM Brushless DC Motor Drive With a New Power-Converter Topology," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 4, 1997, pp. 973-982.

◇ 저자소개 ◇

목형수 (睦亨洙)

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(박사). 1993~1996년 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 1997년~현재 건국대 전기공학과 부교수.

Tel : (02)450-3479

Fax : (02)447-9186

Email : hsmok@konkuk.ac.kr

홍준희 (洪俊憲)

1963년 3월 1일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과(박사). 1995년~현재 경원대 전자전기정보공학부 부교수.

Tel : (031)750-5350

Fax : (031)750-5571

Email : hongpa@kyungwon.ac.kr

김상훈 (金相勳)

1964년 9월 11일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 1994년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 1994년 8월~1995년 11월 대우 고등기술 연구원. 선임 연구원. 1995년 12월~1997년 2월 대우 중공업 철도차량 연구소. 선임 연구원. 2002년 2월~2003년 1월 미국 San Francisco State University. 방문교수. 1997년 3월 강원대학교 전기전자정보통신공학부 부교수.

Tel : (033)250-6293

Fax : (033)241-3775

E-mail : kshoon@kangwon.ac.kr