

회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 이용한 7상 영구자석 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델

Simulation model of 7 Phase Brushless AC Motor Using Mixed Modeling Technique Based on Circuit and Equations

목 형 수* 김 상 훈**
Mok, Hyung-Soo Kim, Sang-Hoon

Abstract

The counter emf(electromotive forces) of a permanent magnet multi-phase brushless motor is generally a non-sinusoidal wave or a non-ideal trapezoid. So, conventional modeling using a sinusoidal wave or an ideal trapezoid counter emf can result in errors. In order to reduce modeling errors for simulation and analysis the properties of a multi-phase brushless AC motor, this paper proposes a phase variable model that is a mixed modeling technique using both Finite Element Analysis(FEA) based circuits and motor voltage equations. The phase model parameters including the counter emf voltage waveform are obtained by using of FEA, and the mixed modeling technique based on circuits and equations is used to implement a simulation model for multi-phase brushless AC motors with any counter emf voltage waveforms. Adequacy of the proposed model is established from the simulation and experimental results for a seven-phase brushless motor.

키워드 : 전동기 구동 시스템 시뮬레이션, 부하 시스템 모델링
Keywords : 7상 Brushless AC Motor, FEA(Finite Element Analysis), Modeling, Simulation

1. 서론

다상 교류전동기는 기존의 같은 크기의 3상 교류전동기에 비해 단위 전류당 출력토크가 클 뿐만 아니라 상당 전압을 크게 하지 않아도 상당전류의 크기를 줄일 수 있고, 토크 리플 주파수가 증가하여 토크 리플의 크기를 줄일 수 있다. 또한 1상이 결상되어도 안전하게 동작할 수 있는 안정성 때문에 범용의 분야 보다는 고신뢰도가 요구되는 하이브리드 자동차, 항공, 선박, 군수분야의 구동시스템에 사용되고 있다[1].

다상 전동기의 특성해석과 전류, 속도제어기의 설계를 위해서는 다상전동기에 대한 정확한 모델링이 필수적이다. 전동기의 모델링시 영구자석형 동기전동기의 경우에는 공극자속분포와 역기전력 전압 파형이 정현파라는 가정을 기초로 한 d-q 모델을 사용하는데 비해, BLDC의 경우에는 역기전력 파형이 이상적인 사다리꼴 형태이기 때문에 d-q 모델 대신 상변수모델(phase variable model)을 사용한다[2][3]. 최근 다상 영구자석형 동기전동기의 경우 전류당 토크밀도를 극대화하기 위해 정현파의 역기전력 전압 대신 구형파 분포에 가까운 비정현파 역기전력 전압 대신 구형파에 근접한 역기전력 전압을 갖도록 설계하고 있으며, 다상 BLDC의 경우에도 이상적인 사다리꼴 역기전력 전압보다는 구형파에 근접한 역기전력 전압을 갖도록 설계하고 있어, 기존의 모델을 사용하여 해석할 경우 오차

* 건국대학교 전기공학과 부교수, 공학박사
** 강원대학교 전기전자공학부 부교수, 공학박사

를 발생할 수 있다. 다상 전동기의 특성해석 및 제어 알고리즘의 해석을 위한 정확한 전동기 시뮬레이션을 위해서는 비선형성과 고조파특성을 고려할 수 있는 모델을 구할 필요가 있다.

최근 5상 동기전동기를 대상으로 선형 동기전류제어기의 설계를 위해 기본파와 3 고조파의 2개의 d-q 공간에서의 동기좌표모델이 제안되었다[4]. 그러나 이 모델에서는 역기전력의 비선형성은 무시하고, 기본파 및 3고조파 자속만을 고려하기 때문에 6상 이상의 다상전동기의 모델로 적용하기 어려울 뿐 아니라, 일반적인 상변수 모델에 비해 1개의 방정식 만이 줄기 때문에 단순하다고 볼 수 없다. 또 다른 연구에서는 1상을 결상된 BLDC의 해석을 위해 역기전력 파형의 실험 데이터를 기초로 구형과 역기전력 파형의 5상 BLDC 전동기에 대한 모델링을 수행하였으나, 7상의 경우에는 1상 결상에 대한 경우의 수가 많고, 회로해석이 복잡하기 때문에 이 방식을 사용하기는 어려움이 따른다[8].

전동기 설계 자료를 바탕으로 FEA(Finite Element Analysis) 프로그램을 이용하면, 특별한 모델링과정 없이도 전동기 모델을 이용할 수 있을 뿐 아니라, 비선형성을 고려할 수 있어서 비정현파 역기전력 전압 측, 고조파 특성을 포함한 경우에 대한 정확한 해석이 가능하다. 따라서 이를 다상 동기전동기 및 BLDC 전동기를 포함한 전동기 모델로 사용하기에 적합하나 계산량이 많아 계산시간이 상당하기 때문에 제어알고리즘을 포함한 구동시스템 전반의 특성을 해석하는 데에는 적합하지 않다[2][3].

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

2. 7상 브러시리스 전동기의 상변수 모델

7상 브러시리스 교류전동기의 상변수 모델은 식(1)~(5)로 표현 할 수 있다.

$$v_{abcdefg} = R_{abcdfg} i_{abcdfg} + \frac{d\lambda_{abcdfg}(i_{abcdfg}, \theta)}{dt} \quad (1)$$

$$v_{abcdefg} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \\ v_e \\ v_f \\ v_g \end{bmatrix}, i_{abcdfg} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \\ i_g \end{bmatrix}$$

$$R_{abcdfg} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{abcdfg} = L_{abcdfg}(i_{abcdfg}, \theta) i_{abcdfg} + \lambda_{r, abcdfg}(\theta) \quad (2)$$

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

$$T_m = \frac{\sum_{i=a}^g e_i \cdot i_i}{\omega_m} + T_{cogging}(\theta) \quad (3)$$

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

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

여기서, $e_i, i_i = a, b, c, d, e, f, g$ 는 각 상의 역기전력, $T_{cogging}$ 는 코깅토크, λ_{abcdfg} 는 고정자 권선의 쇄교자속, $\lambda_{r, abcdfg}(\theta)$ 는 영구자석에 의한 쇄교자속을 나타낸다.

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 $L_{abcdfg}(i_{abcdfg}, \theta)$ 는 θ 만의 함수인 $L_{abcdfg}(\theta)$ 로 나타낼 수 있다. $T_{cogging}(\theta)$, $\lambda_{r, abcdfg}(\theta)$, $L_{abcdfg}(\theta)$ 는 전동기의 설계 자료를 토대로 FEA(Finite Element Analysis)를 이용하여 구할 수 있다.

3. 7상 브러시리스 전동기의 시뮬레이션 모델

7상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델은 식(1)~(5)를 기초로 하여 수식 모델과 회로 모델을 이용하여 표현할 수 있다. 먼저, 식(2)에 식(1)에 대입하면 식(6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$v_{abcdfg} = R_{abcdfg} i_{abcdfg} + \frac{dL_{abcdfg}(\theta) i_{abcdfg}}{dt} + \frac{d\lambda_{abcdfg}(\theta)}{dt} \quad (6)$$

그림 1에서의 같이 영구자석을 회전자의 표면에 부착하

회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 이용한 7상 영구자석 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델

는 경우 자기인덕턴스 $L_{abcdefg}$ 의 회전자 위치에 따른 변화를 무시할 수 있으므로 식(6)은 식(7)로 나타낼 수 있다.

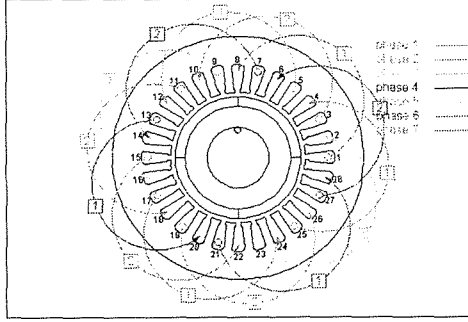


그림 1 7상 브러시리스 교류전동기의 단면과 결선

$$v_{abcdefg} = R_{abscefg} \cdot i_{abcdefg} + L_{abcdefg} \frac{di_{abcdefg}}{dt} + \frac{d\lambda_{abcdefg}(\theta)}{dt} \quad (7)$$

$$\text{한편, } \frac{d\lambda_{abcdefg}(\theta)}{dt} = \frac{d\lambda_{abcdefg}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\lambda_{abcdefg}}{d\theta} \cdot \omega_m = k_{e,abcdefg}(\theta) \cdot \omega_m = e_{abcdefg}$$

의 관계가 성립하므로 각 상의 전압방정식을 식(8)로 표현할 수 있다.

$$v_{abcdefg} = R_{abscefg} i_{abcdefg} + L_{abcdefg} \frac{di_{abcdefg}}{dt} + e_{abcdefg} \quad (8)$$

$$e_{abcdefg} = \omega \begin{bmatrix} k_{ea} \\ k_{eb} \\ k_{ec} \\ k_{ed} \\ k_{ef} \\ k_{eg} \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} k_{ea} \\ k_{eb} \\ k_{ec} \\ k_{ed} \\ k_{ef} \\ k_{eg} \end{bmatrix}$$

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

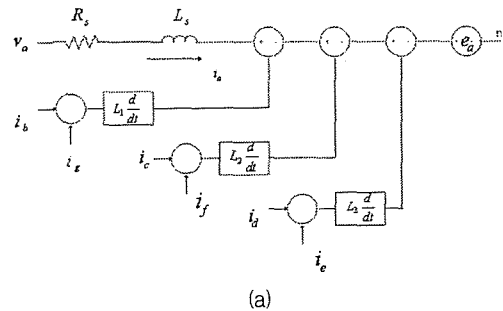
또한 각상의 자기인덕턴스와 상호 인덕턴스는 아래의 관계를 갖는다.

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

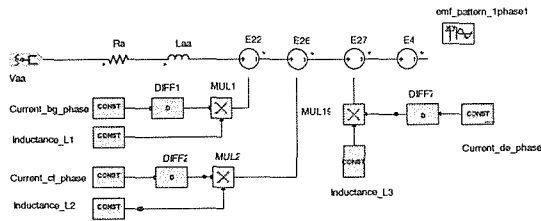
식(8)에서 a상의 경우에 대해 살펴보면 a상의 인가전압은 저항 R_s 에 의한 전압강하와 자기인덕턴스에 의한 전압강하성분 $L_s \frac{di_a}{dt}$, 상호인덕턴스에 의한 강하성분 $L_1 \frac{d}{dt}(i_b + i_g)$, $L_2 \frac{d}{dt}(i_c + i_f)$, $L_3 \frac{d}{dt}(i_d + i_e)$, 역기전력 전압 e_a 으로 구분되므로 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$v_a = R_s \cdot i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + L_1 \frac{d}{dt}(i_b + i_g) + L_2 \frac{d}{dt}(i_c + i_f) + L_3 \frac{d}{dt}(i_d + i_e) + e_a \quad (9)$$

본 논문에서는 그림 2와 같이 저항 R_s 에 의한 전압강하와 자기인덕턴스에 의한 전압강하성분 $L_s \frac{di_a}{dt}$ 은 회로모델을 사용하고, 상호인덕턴스에 의한 강하성분 $L_1 \frac{d}{dt}(i_b + i_g)$, $L_2 \frac{d}{dt}(i_c + i_f)$, $L_3 \frac{d}{dt}(i_d + i_e)$ 은 수식 모델을 회전자의 위치에 따른 역기전력상수 e_a 는 실험 혹은 FEA 결과를 테이블로 저장하여 사용한다.



(a)



(b) 그림 2 7상 PMSM a상의 회로 블록도

그림 2의 회로 블록도를 바탕으로 전동기의 모든 상에 대한 회로 및 수식 기반의 혼합 모델이 그림 3에 보인다.

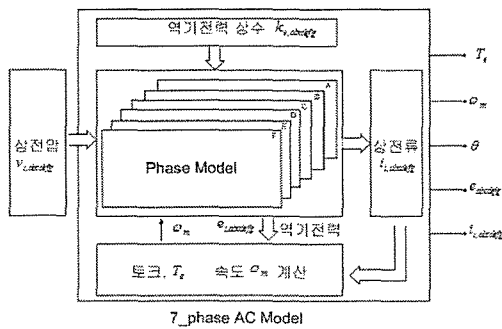


그림 3 7상 전동기의 상모델 블록도

4. FEA에 의한 7상 전동기의 파라미터 추출

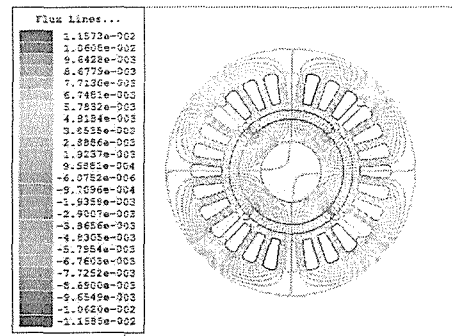
7상 전동기 모델링의 예로서 표 1의 4극, 7상, 29 슬롯수를 갖는 800[W] 7상 BLDC 전동기를 대상으로 모델에 필요한 파라미터인 역기전력, 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스를 FEA 해석을 통해 계산하였다.

표1 7상 PMSM 전동기 사양

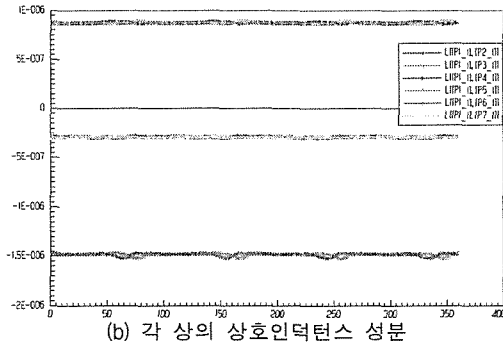
내용	특성값
극수	4
상수	7
슬롯수	28
권선방식	전절권, 단층권
정격출력	800[W]
정격토크	0.32[Nm]
토크상수	0.226[Nm/Ap]
여자방식	NdFeB 자석

각 상 권선에서의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스의 값은 전동기 설계 수식에 따라 계산 가능한데, 본 연구에

서는 그림 4에 보이는바와 같이 Ansoft상의 Maxwell을 이용한 FEA 해석을 통해 자속선 분포도와 회전자 위치에 따른 각상의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스를 계산하였다. 회전자의 위치에 따라 고정자의 슬롯 및 자기회로의 형상에 따른 인덕턴스 값의 미소한 변화가 있지만, 5% 미만의 무시할 만하다. 표 2에 각상의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스의 평균값을 나타내었다.



(a) 자속 분포도



(b) 각 상의 상호인덕턴스 성분

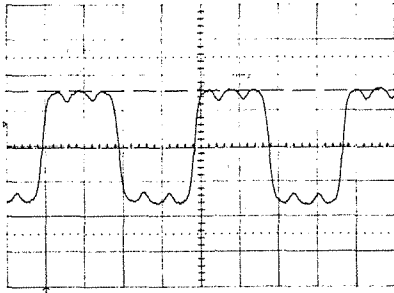
그림 4 7상 BLDC 전동기의 FEA 결과

표2 FEA 해석에 의한 전동기 파라미터

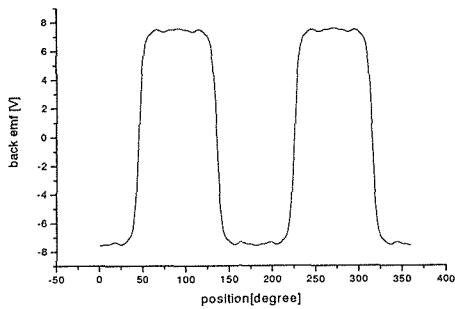
저항(R)	0.476[Ω]
자기인덕턴스(Ls)	2400[uH]
상호인덕턴스(L1)	-21.87[uH]
상호인덕턴스(L2)	-131.0[uH]
상호인덕턴스(L3)	78.73[uH]

그림 2과 같이 7상 BLDC 전동기를 모델링하기 위해서는 각 상에 대한 역기전력 파형이 필요하다. PMSM의 경우는 정현파를, BLDC의 경우 이상적인 사다리꼴의 파형을 가정하지만, 다상의 경우 실제 전동기의 무부하 역기전력 파형은 그림 5와 같이 대개 정현파와 이상적인 사다리꼴 파형에서 벗어난다. 이는 다상의 경우 회전자에 자석의 형상을 정현파 혹은 사다리꼴의 형태로 구현하기가 어렵고, 착자 시에 착자 요크를 사용하지 않고 동심 슬레노이드를 사용하는 경우는 자석이 균일하게 착자될 수 없기 때문이다.

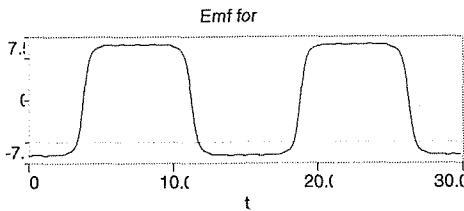
회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 이용한 7상 영구자석 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델



(a) 전동기 속도 1554rpm시 역기전력 실험파형
(상전압:6.05V, 평탄부분:153.9°)



(b) FEA에 의한 역기전력 파형



(c) 제한한 모델을 이용한 역기전력
시뮬레이션 파형

그림 5 무부하 역기전력 파형

이러한 경우 PMSM 혹은 BLDC 전동기에서 사용하는 일반적인 모델링 수식을 사용하게 되면 실제 전동기와 큰 오차를 발생하기 때문에, 실제의 역기전력을 계산하거나 측정된 값을 사용하여 모델링을 수행해야 한다. 그림 5(a)에 제작한 7상 BLDC 전동기를 1554rpm으로 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 브러시리스 전동기 모델링에서 역기전력 값으로 사용하였다.

4. 회로 및 수식 기반의 혼합 모델의 검증

본 논문에서 제안한 회로 및 수식 기반의 혼합모델의 타당성을 검증하기 위하여 그림 6과 같이 7상 브러시리스 전동기 모델과 구동시스템을 Simplorer로 작성하였고, 그림 7은 실험을 위해 제작된 7상 브러시리스 전동기 구동시스템이다.

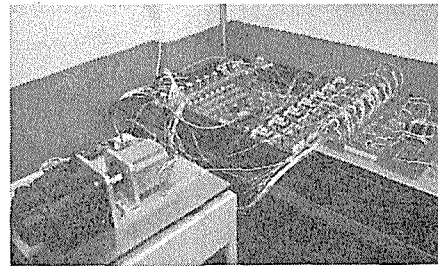
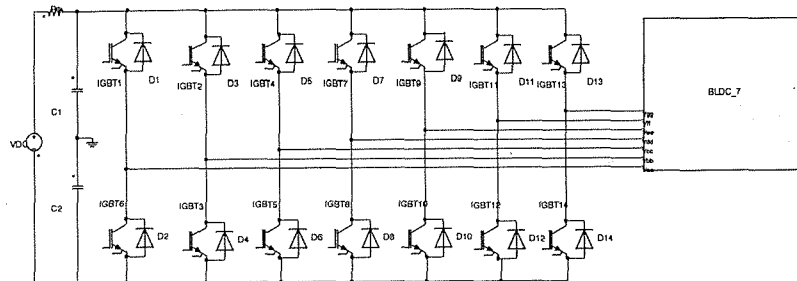


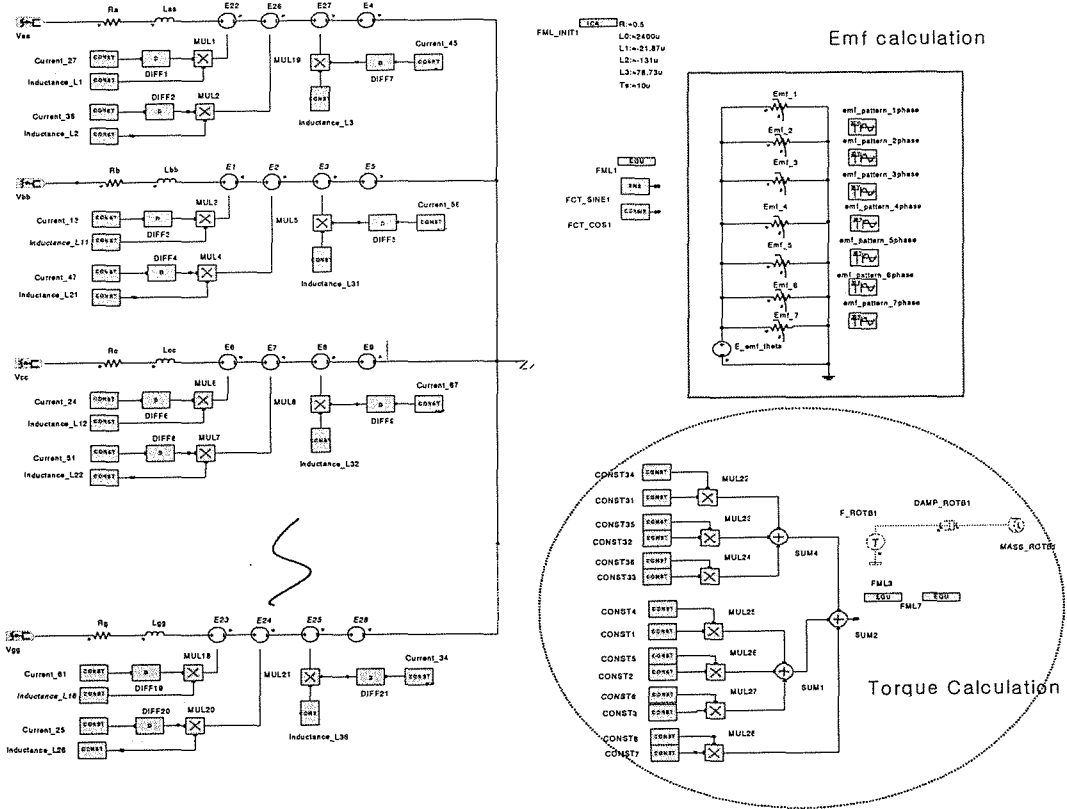
그림 7 7상 브러시리스 전동기 구동시스템

모델의 검증을 위하여 전동기의 속도가 100 rpm과 250rpm 에서 각각의 전류 기준값을 1A로 하였을 때의 시뮬레이션 파형과 실험파형을 비교하였다. 전류제어기법으로는 7상 삼각파 비교방식의 디지털 PI 전류제어기법을 사용하였다. 그림 8과 9에는 시뮬레이션에 의한 전류파형을 그림 10에는 실험파형을 나타내었다. 결과가 잘 일치하고 있어, 제안한 회로 및 수식 기반의 혼합 모델이 타당함을 알 수 있다.



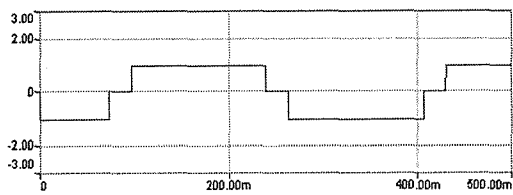
(a) Simplorer로 작성한 Drive System Model

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제27권 A호, 2007.
 목형수, 김상훈

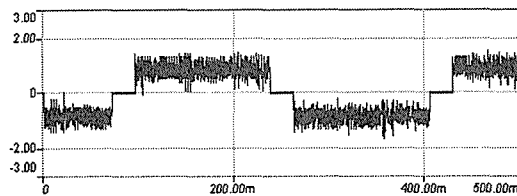


(b) 7상 BLDC 전동기의 Physical Model

그림 6 7상 BLDC전동기 구동시스템과 전동기의 Physical Model

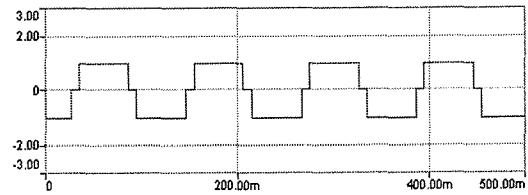


(a) 기준전류 (a상)

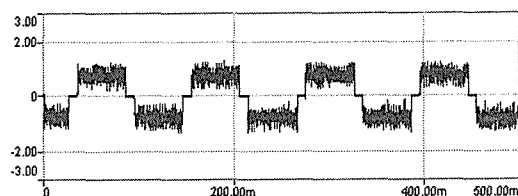


(b) 실제전류 (a상)

그림 8 100rpm에서의 시뮬레이션 파형 [1A/div]



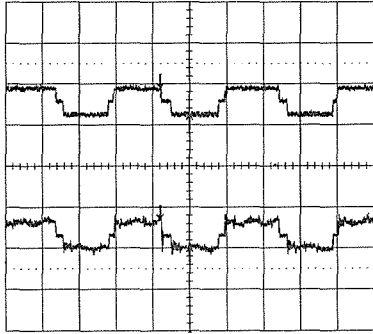
(a) 기준전류 (a상)



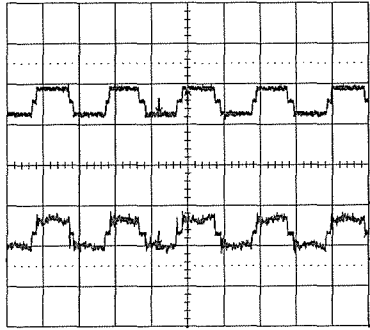
(b) 실제전류 (a상)

그림 9 250rpm에서의 시뮬레이션 파형 [1A/div]

회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 이용한 7상 영구자석 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델



(a) 100rpm에서의 기준전류 및 실제전류 [2A/div]



(b) 250rpm에서의 기준전류 및 실제전류 [2A/div]
그림 10 a상 전류 실험 파형

5. 결론

본 논문에서는 다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 및 특성해석을 위한 FEA 기반의 회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 이용한 상변수 모델을 제안하였다. FEA를 이용하여 역기전력 전압파형을 포함한 상 모델의 파라미터를 구하고, 회로 및 수식 기반의 혼합 모델링 기법을 제안하여 임의의 역기전력 전압파형을 갖는 다상 브러시리스 교류전동기의 시뮬레이션 모델의 구현 방법에 대해 연구하였다. 제안한 모델을 7상 브러시리스 전동기에 적용한 시뮬레이션과 실험결과로부터 모델의 타당성을 입증하였다. 제안한 모델링 방법은 임의의 역기전력 파형과 전류의 크기에 따라 전동기의 파라미터가 변화하는 등의 비선형성을 갖는 3상을 포함한 다상 전동기에 적용할 수 있다.

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, 1988.
[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, pp. 1576-1579, May 2005.
[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, pp.56-63, 2004.
[5] 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.
[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, pp. 30-37, Jan. 2005.
[8] M. Godoy Simoes, P. Vieira Jr., "A Five-Phase Brushless DC-Machine Direct Drive System", EPE Journal vol.14 No.3 pp. 15-24, August 2004.
[9] 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.
[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, pp. 683-690, 1994.
[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, pp. 973-982, 1997.