

Spice와 FEM의 연성해석에 의한 SMC 모터 드라이브 시스템 분석

백승훈, 차현록*, 안재영, 강신영, 김광현
 전남대학교 전기공학과 & RRC, * 한국생산기술연구원

The Analysis of Motor Drive System with Coupled Simulation using Spice and FEM

Seung Hun Baek, Hyun Rok Cha*, Jae Young Ahn, Sin Young Kang, Kwang Heon Kim
 RRC & Depts. Electrical Engineering, Chonnam National University, *Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 SMC(Soft Magnetic Composite)의 특성이 고려된 구동시스템에 대한 특성 분석을 실시하였다. SMC는 기존의 전기강판과는 다른 자기적 특성으로 인해 기존 전기강판을 구동하는 시스템과 다른 특성을 지닌다. 본 논문은 이러한 SMC의 특성을 고려하기 위해서 FEM을 통해서 모터의 특성을 고려하였고, 인버터의 특성을 고려하기 위해서 Spice를 이용하여 FEM과 Spice의 연성해석을 통해 자기적 특성이 다른 모터의 구동 시스템에 대한 해석을 실시하였다.

1. 서 론

SMC(Soft Magnetic Composite)는 기존의 전기강판과는 달리 분말형태의 자성체 입자에 무기질 코팅을 실시한 것으로써 기존의 전기강판을 이용시 자유로운 형상의 자성체 Core를 형성할 수 있어, 경량화, Compact화 할 수 있는 장점이 있었다^[1].

또한 압분을 통해서 모터 코어를 형성 하므로 전기강판을 이용시 타발을 실시하여 모터 코어 형성시 보다 재료 손실이 거의 없어 원가 경쟁력 향상에 도움이 된다^[2]. 아울러 쉽게 분해가 되므로 자원 재활용의 비율이 높아 친환경적이라는 평가를 받고 있다. 따라서 현재 SMC를 이용한 다양한 분야의 모터 활용에 대해서 연구가 적극적으로 추진되고 있는 실정이다^[3].

그러나 SMC를 이용한 모터의 구동 시스템에 대한 연구는 전무한 실정이어서 자기적 특성이 전기강판과는 다른 SMC의 특성이 고려된 모터 구동 시스템에 대한 연구가 시급히 필요한 실정이다. 현재 SMC를 이용한 모터의 구동시스템은 기존의 전기 강판을 이용한 모터의 구동 방식을 그대로 적용하고 있다. 그러나 앞으로 점점 더 높아져 가는 SMC를 활용하는 모터설계 분야의 연구 동향으로 볼 때 모터 구동에 있어서도 SMC의 특성이 고려된 구동 방식에 대한 연구의 요청이 높다 하겠다.

따라서 본 논문에서는 SMC의 자기적 비선형성을 충분히 고려할 수 있는 FEM 방식과 드라이브의 특성을 고려 할 수 있는 Spice의 연성 해석을 통해 특성을 파악하는 해석 방법을 제안하였다. 이를 통해서 기존의 FEM단독해석에서 고려 할 수 없었던 구동 인버터의 고주파 특성을 고려 할 수 있었다, 아울러 Spice에서 고려 할 수 없었던 모터 재질의 변경에 따른 L_d ,

L_d 등의 특성을 고려한 드라이브 특성을 파악 할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 SMC 재질과 전기강판의 특성 비교

2.1.1 해석적 분석

그림1에서 보는 바와 같이, SMC 재질은 전기 강판에 비해 낮은 투자율을 지닌다. 그런데 식1에서 보는 바와 같이 동일 출력을 유지하기 위해서는 전체 유효 자속량이 동일해져야 함을 알 수 있다^[4]. 따라서 동일 출력을 유지 하기 위해서는 그림 1에서 보는 전계 강도가 높아 져야 동일 자속을 유지 할 수 있다. 그런데 식2에서 보듯이 일정한 동일한 모터에서 코어 재질만 쉘 경우 턴 수가 일정하므로 전류가 상승됨을 예상 할 수 있었다. 전류가 증가의 예상은 식3에서도 알 수 있는데 투자율이 낮아지면 인덕턴스가 낮아지고 인덕턴스가 낮아지는 것을 전류가 증가로 나타 낼수 있기 때문이다. 따라서 전류 증가를 적절히 고려 할 수 있는 제어기 설계에 방향을 설정하는 것이 필요 하리라 사료 된다.

$$P_{out} = K_c (P\Phi_g)(N \times I_z) \tag{1}$$

$$\oint_l \vec{H} \times dI = NI = \int_s \vec{J}_F \times dS \tag{2}$$

$$B_m = \frac{P_C}{P_C + \mu_{rec}} \cdot (B_r - \mu_{rec} H_a) \tag{3}$$

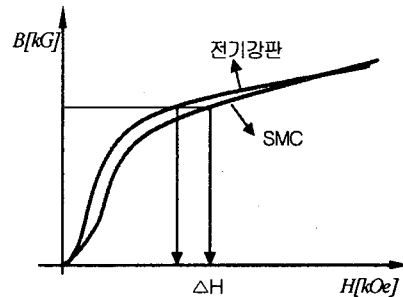


그림 1 전기강판과 SMC의 B-H 특성 비교
 Fig. 1 Comparison of B-H character between Silicon steel and SMC

2.2 분석 방법 및 내용

본 논문에서는 SMC 재질의 특성을 고려하기 위한 FEM 방법과 Spice를 이용한 드라이브 특성을 동시에 고려 하기위해서 FEM과 Spice의 연성 해석 방법을 통해서 특성을 분석하는 방법을 취하였다.

2.2.1 해석 구성도

해석을 위한 구성은 아래의 그림2와 같이 진행 하였다. SMC의 특성을 고려하기 위해서 FEM을 이용하여 Motor 특성에 대해서 모델링을 실시하였으며, 드라이브 특성을 고려하기 위해서 Spice로 Circuit 모델링을 실시하였다. 여기서 FEM 모델에서 동적 특성을 고려하여 과도 상태에서도 해석이 될수 있도록 조건을 설정 하였으며, Circuit에서는 FEM에서의 모터의 위치 정보를 받아 실제로 구동 시처럼 전류를 인가하여 주는 해석 방식을 취하였다.

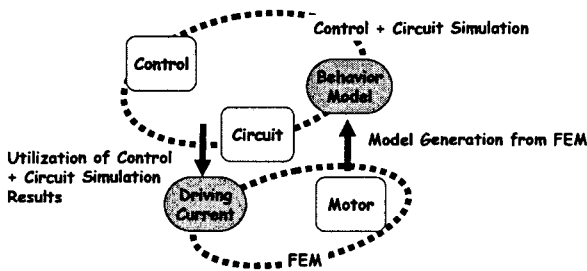


그림 2 해석환경의 구성
Fig. 2 The Composition of Analysis environment

2.2.2 FEM 모델링

FEM은 잘 알려 진바와 같이 비선형적인 재질의 특성을 고려한 모터 특성 해석에 많이 이용되어져왔다. 본 논문에서도 이러한 재질의 특성을 고려 할 수 있는 FEM 방식을 적용하여 SMC의 재질 특성이 고려된 해석 방법을 채택 하였다. 식 (4),(5),(6) 다음의 3가지 방정식을 비선형적 재질을 고려하여 FEM을 이용하여 해석 하였다. 해석에 사용된 Mesh의 형상은 그림 3의 것과 같았다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 - v_0 \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$V_k = r i_k + l \frac{d i_k}{d t} + \frac{d \Phi_k}{d t}, \quad (k = a, b, c) \quad (4)$$

$$J_m \frac{d \omega_m}{d t} + R_\omega \omega_m + \tau_l = \tau_s \quad (5)$$

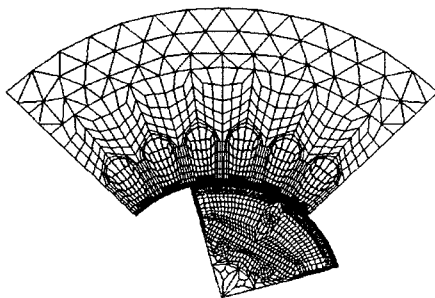
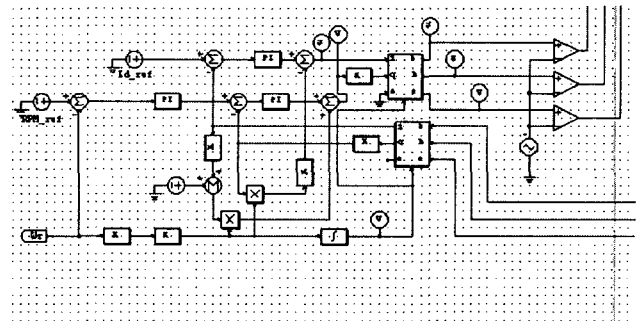
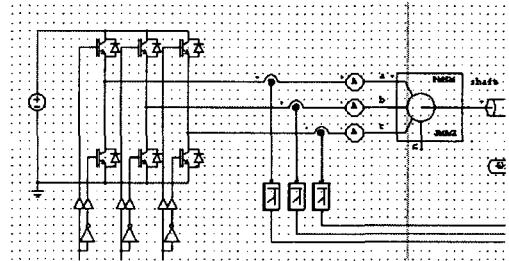


그림 3 FEM model
Fig. 3 FEM model

2.2.3 회로 모델링

본 논문에서 사용된 회로는 고성능의 토크와 자속 제어를 위해서 사용 되는 간접 벡터 제어의 알고리즘을 바탕으로 제어 되는 시스템을 시뮬레이션에 이용 하였다. 벡터제어 방식은 그림4의 Spice 모델에서 볼 수 있듯이 전동기에 공급되는 고정자 전류를 기준 자속에 직교 되는 성분(토크분 전류)과 일치되는 성분(자속분 전류)로 나누어 각각 제어 하는 방식이다. 본 논문에서는 실제 가장 유효한 성능과 고정도의 제어를 실현 할 수 있는 벡터 제어를 모델링함으로써 그 유효성을 증명 코자 하였다.

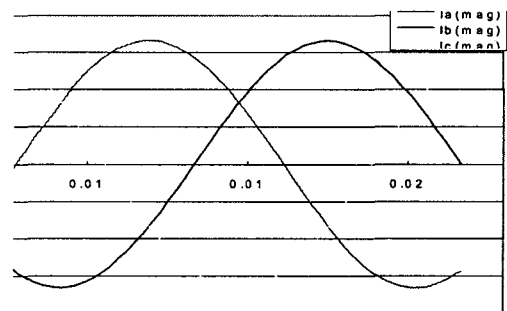


(a)
(b)

그림 4 회로 해석 구성도 (a) 인버터 부, (b) 벡터제어부
Fig. 4 The Composition of Circuit Analysis environment
(a) inverter, (b) Vector controller

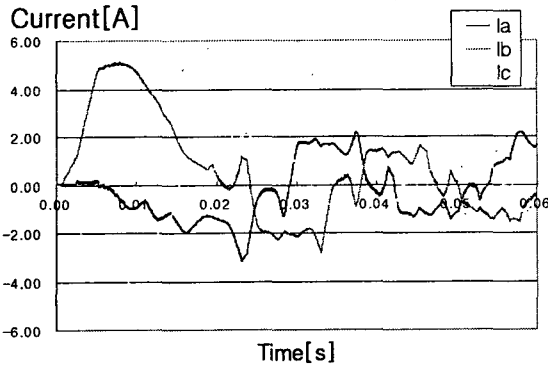
2.3 해석 결과 및 분석

그림 2에서 보는 바와 같이 일반적인 Spice 소프트웨어에서 지원하는 모터 Block 대신 FEM 방식의 모터파일을 적용하였다. 그림 4에서처럼 Spice와 FEM 방식을 연성하여 하게 되면 제어기에서 고려되어진 전류파형이 FEM 해석에 사용되어 좀 더 사실적으로 재질의 특성이 고려되어진 전류 파형 및 토크 특성을 얻을 수 있다.

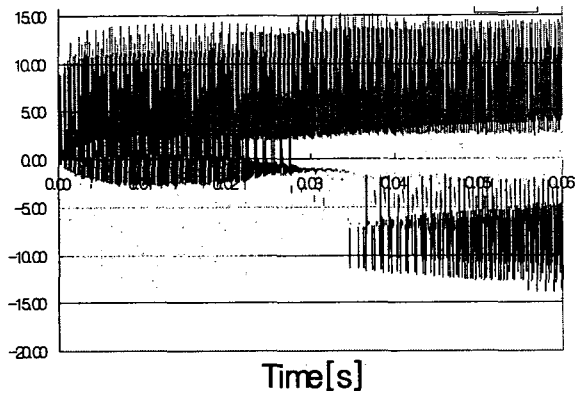


Time [s]

(a)



(b)

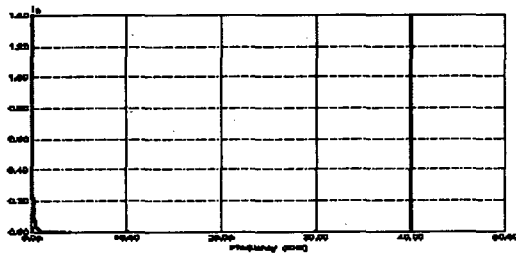


(c)

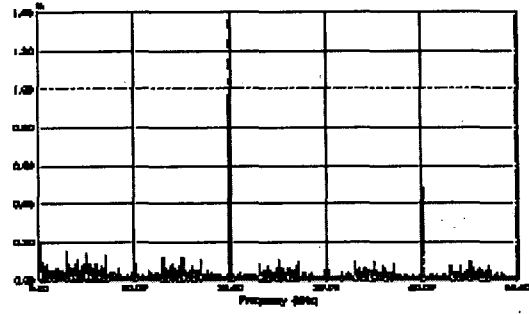
그림 4 전류 파형

- (a) FEM 만 고려한 전류 파형,
- (b) FEM & Spice를 고려한 전류 파형(기존 IPM)
- (c) FEM & Spice를 고려한 전류 파형(smC 재질)

또한 본 논문에서는 기존 재질과 smc 재질을 비교하기 위해 모든 조건을 동등하게 주어졌을 때의 전류의 파형은 그림 4-(b), (c)와 같다. 그림 4-(b)는 기존 IPM의 전류 파형을 나타내고, 그림 4-(c)는 smc 재질로 바꾼 전류 파형을 나타낸다. 그림 4-(c)에서처럼 전류가 고주파 영향에 의해 많이 변형된 것을 알 수 있었다. 인버터의 고주파 특성에 대해 알아보기 위해 Carrier Frequency 에 따른 전류파형을 주파수 영역에서 분석하여 보았다. 그림 5는 주파수를 10kHz로 하였을 경우 전류 파형을 FFT 분석을 한 그림이다. 그림에서처럼 10k의 배수에서 파형이 생성되는데 smc 재질에서는 더 큰 영향이 미치는 것을 알 수 있었다.



(a)



(b)

그림 5 전류 파형의 FFT분석 (a) 기존 전기 강판 (b) smc

또한 carrier 주파수를 변화시켜 보았을 때도 carrier 주파수의 배수의 영역에서 나타나는 것을 시뮬레이션으로 확인할 수 있었다.

위 결과 stator를 smc 재질로 하였을 경우 기존 제어기로는 모터 구동의 어려움이 있을 것이 예상 된다. 따라서 제어기의 PI 계수들의 조정과 고주파에 따른 파형을 감쇠할 수 있는 방법의 모색이 필요할 것이라고 생각된다.

3. 결론

본 논문에서는 기존 IPM의 stator의 재질로 smc를 이용하여 그에 따른 드라이브 특성의 분석을 위해 spice를 이용하였고 모터의 특성을 파악하기 위해 FEM을 이용하여 두가지 방식을 연계한 방법으로 분석하여 보았다. 분석 결과 smc 재질을 사용할 경우 회전자 자속의 감소로 인해 전류 파형이 기존과 비교하여 볼 때 좋지 않음을 알 수 있었고, 이를 위해 제어기의 PI계수에 대한 정밀한 조절이 필요함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Lars Hultman, "Soft Magnetic Composites for Advanced Machine Design", Presented at PMAAsia2005 in Shanghai, on April 6.
- [2] Zhou Ye, "Production Aspects of SMC Components", Presented at PM2004, in Vienna, Austria, October 2004.
- [3] Göran Nord, "Loss Calculations for Soft Magnetic Composites", Presented at 16th International Conference on Electrical Machines ICEM 2004.
- [4] E. ENESCU, "Composite Materials from Surface Insulated Iron Powders", Romanian Reports in Physics, Volume 56, NO. 3, 2004.