

특집 : 전력전자에서의 시뮬레이션 툴 활용

PSIM을 이용한 박형동기전동기의 제어시뮬레이션

최해웅* 최규하**

(*현대자동차 선임연구원, **건국대 교수)

1. 서론

최근 전력전자 시스템이 점차로 복잡화 되면서 시스템 설계의 타당성을 검증하고 시스템 거동 및 제어성능에 대한 빠른 파악을 목적으로 시뮬레이션기술의 이용이 증가하고 있다. 현재 시스템해석을 위한 다양한 종류의 시뮬레이션 툴이 사용되고 있으나 설계자의 목적에 맞는 적절한 시뮬레이션 툴을 선정하는 기준은 그 사용목적에 따라 다르게 된다.

시뮬레이션 툴의 선정에 있어 기본적으로 고려해야할 사항으로는 사용자 중심의 인터페이스가 갖추어져 있는지의 여부와 정확한 소자모델의 제공여부 그리고 원하는 결과를 얻기 위해 소요되는 시간 등이 있다. 이는 기존에 소개되어 있는 소프트웨어마다 고유의 특징을 지니고 있어 해석 및 설계의 각 과정에서 각 응용분야에 적합한 툴을 선정하는 것이 무엇보다 중요한 일이라 할 수 있다.

여러 가지의 전력전자용 프로그램 가운데 지금으로부터 약 10여년전 국내에 소개되어 산업계와 학계에서 사용되고 있는 PSIM(PowerSim)의 경우 시스템의 상세해석(detail mode)보다는 거동해석(behavior mode)을 목적으로 사용되고 있다.

PSIM은 회로토폴로지 및 제어전략을 빠르게 검증하는데 효과적이며 시간영역 전압전류특성과 고조파특성을 제공한다. 최근에는 시스템안정성평가를 목적으로 AC sweep기능까지 추가되어 설계자에게 Bode plot상에서 시스템 전달함수의 이득과 위상정보를 제공한다. 아울러 초기 버전에 없었던 디지털해석모듈과 전동기해석모듈이 강화되어 응용범위가 크게 확대되었다. 특히 C기반언어의 컴파일을 통해 얻어지는 DLL화일을 링크시키는 기능이 추가되면서 시스템표현에 있

어 유연성이 크게 증대되었다. 결국 Symbol model 기반의 시뮬레이션 툴(예: PSpice 등)들이 갖고 있던 시스템해석의 제한이 크게 개선되었음을 의미한다.

이 시뮬레이션 툴과 가장 많이 비교되는 툴인 PSpice는 가변 time-step으로 연산이 되어 고차수의 시스템에 대한 해석에 한계를 가지고 있어 고정time-step연산을 수행하는 PSIM이 시스템의 거동해석(Behavior Analysis)측면에서 경쟁력을 가지고 있다.

그러나 아직 사용자 친화적인 인터페이스가 부족하고 간략화된 소자모델로 인한 data의 부정확성이 문제점으로 지적될 수 있으며 모델의 detail mode 해석에 한계를 가지고 있다.

본 원고에서는 앞에서 언급한 PSIM을 이용하여 자동차용 박형동기전동기의 특성을 시뮬레이션 하였고 그 결과를 고찰하였다.

2. 박형동기전동기

2.1 박형동기전동기의 구조 및 특성

본 원고에서 해석 예로 제시되는 박형동기전동기는 구조적으로 가볍고 고속에서 고효율의 특징을 가지고 있다. 특히 저속운전 시 코깅 토크가 작게 발생되어 부드러운 시동이 가능하다. 그림 1에서와 같이 고정자를 중심으로 상하로 회전자가 있는 구조이며 일반적인 전동기에 비해 공극이 큰 구조를 가지고 있다. 또한 고정자코일만을 갖는 구조이므로 자기적인 비선형성이 적어 그림 2와 같이 정현적인 역기전력특성을 얻게 된다. 응용분야로는 자동차용 Fan모터나 전동식 조향장치용 전동기가 있다.

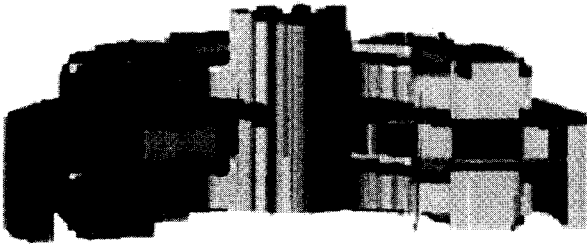


그림 1 박형동기전동기

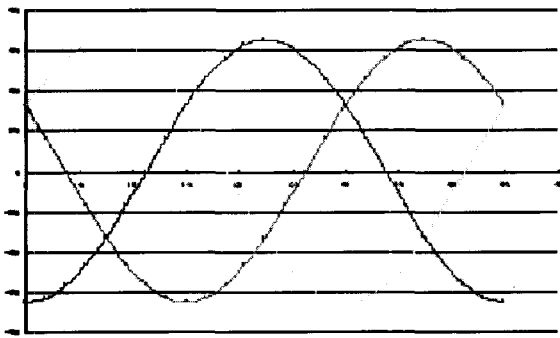


그림 2 역기전력

2.2 등가방정식

박형동기전동기의 전기적 특성해석을 위해 전동기의 매개 변수에 대해 고찰한다. 전동기의 전기특성에 영향을 미치는 중요한 변수는 인덕턴스이며 전동기의 자속분포에 따라 설계 조건에 따라 결정되게 된다.

회전자가 회전함에 따라 인덕턴스와 자속은 식 (2)와 같이 표현되며 이 관계로부터 전동기의 전기자전압이 얻어진다. 결국 전동기를 구동하는 인가전압과 모터의 내부변수와의 관계를 식 (1)을 통해 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_u & pM_{uv} & pM_{wu} \\ pM_{uv} & R_a + pL_v & pM_{vw} \\ pM_{wu} & pM_{vw} & R_a + pL_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega\phi_f \sin\theta \\ \omega\phi_f \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \omega\phi_f \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} L_u &= L_a + l_a - L_{as} \cos 2\theta \\ L_v &= L_a + l_a - L_{as} \cos(2\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ L_w &= L_a + l_a - L_{as} \cos(2\theta - \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \phi_{fu} &= \phi_f \cos\theta \\ \phi_{fv} &= \phi_f \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \phi_{fw} &= \phi_f \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \quad (3)$$

영상분을 고려한 전압방정식은 식 (4)와 같이 표현되며

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 4\pi/3) \\ \cos\theta_r & -\sin(\theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 θ_r 은 회전자의 회전각

이 변환식은 회전자의 위치에 따라 표현되는 고정자에서의 전압을 표현하게 되며 전동기에서 유기되는 전압과 전류가 모두 0이라는 가정에서 영상분을 고려하지 않으면 좌표 변환식을 거쳐 d-q축 좌표계에서의 전압방정식을 표현할 수 있으며 전압방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_d \\ \omega L_d & R_a + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}\phi_f\omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 v_d, v_q : 전기자전압의 d-q축 성분
 i_d, i_q : 전기자전류의 d-q축 성분

$$L_d = l_a + \frac{3}{2}(L_a - L_{as}) : d\text{축의 자기인덕턴스 성분}$$

$$L_q = l_a + \frac{3}{2}(L_a + L_{as}) : q\text{축의 자기인덕턴스 성분}$$

이렇게 얻어진 전압방정식에 기계적인 토크를 정리하면 전동기의 전기-기계적 특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T &= P_n \{ \phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \\ &= P_n \left\{ \phi_a I_a \cos\beta + \frac{1}{2}(l_q - L_d) i_a^2 \sin 2\beta \right\} \\ &= T_m + T_{reluc \tan ce} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $T_m = P_n \phi_a i_q = P_n \phi_a I_a \cos\beta$

$$T_{reluctance} = P_n (L_d - L_q) i_d i_q = \frac{P_n}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \quad (7)$$

3. 제어 시뮬레이션

본 장에서는 전동기의 운전특성을 확인하기 위해 Matlab의 GUI(Graphic User Interface)기능을 이용하여 박형동기 전동기의 설계 프로그램을 제작하였고 이를 통해 표 1의 사양으로 전동기를 설계하였다.(그림 3) 또한 제어 특성을 확인하기 위해 PSIM을 이용하여 전동기의 인덕턴스영향을 확인하였다.

d축의 인덕턴스와 q축의 인덕턴스가 같다고 가정할 때 그림 4의 모델에 실측모터의 인덕턴스 값을 적용할 수 있다. 이 모델은 전동기의 역기전력 상수, 기계적출력 그리고 동기신호 발생부로 구성된다. 3상구조를 기본으로 하였기 때문에 동기신호의 경우 전기각 120도의 동기신호가 발생한다.

그림 5는 박형동기전동기를 구동하기 위한 제어시스템으로 앞에서 얻어진 전동기의 모델을 Sub모델로 하여 구동을 위한 인버터부 그리고 d-q변환과 벡터변조를 위한 제어부로 구성

표 1 전동기 사양

내용	단위	값
입력전압	[V]	300V
정격출력	[W]	216
토크	[Nm]	1.8
회전수	[rpm]	1200
정격전류	[A]	1.5
극수		12
상수		3
코일 수		9
자석		Nd-Fe-B

된다. 전술한대로 제어기의 경우 직류제어개념을 적용하기 위해 축변환관계와 벡터변조 일반식을 소프트웨어적으로 구현해야 하는데 PSIM의 C언어 링크기능을 이용하여 쉽게 구현하였다.

이렇게 만들어진 모델을 통해 박형동기전동기의 인덕턴스 영향도를 전류파형을 통해 확인할 수 있었으며 자기인덕턴스의 값이 코어를 갖는 전동기에 비해 상대적으로 작아서 전류의 기울기가 급격히 커지는 것을 그림 6을 통해 확인할 수 있다.

그림 7은 철심코어를 갖는 일반적인 축방향 모터의 운전특성을 나타낸다. 본 결과를 통해 상전류의 상승기울기가 상대적으로 천천히 상승함을 알 수 있으며 이는 철심코어에 의해 전기적인 인덕턴스 값이 커지는 것임을 알 수 있다. 본 시뮬레이션에 사용된 인덕턴스 값은 시제작된 전동기에서 실측한

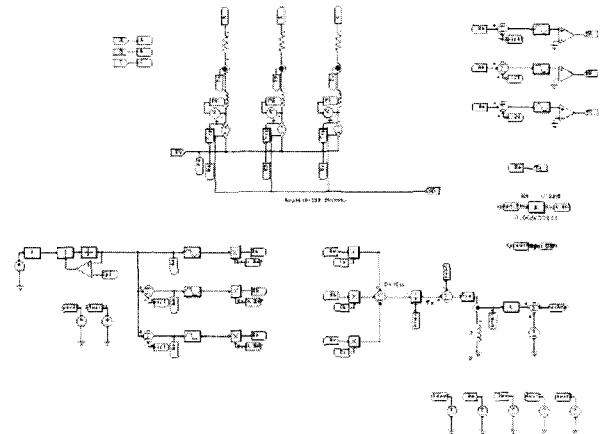


그림 4 박형동기전동기의 모델

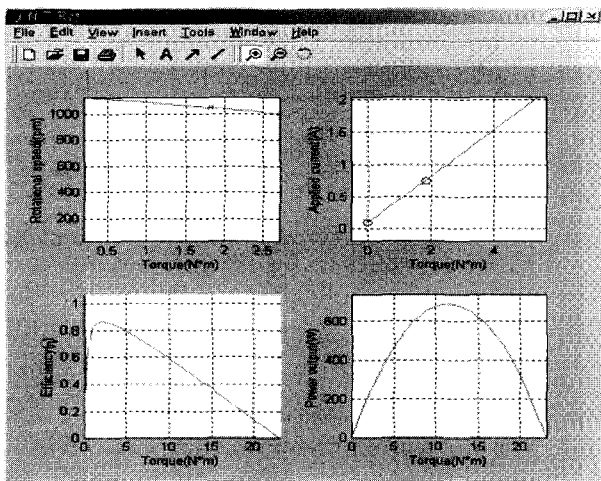


그림 3 일반화된 전동기 출력

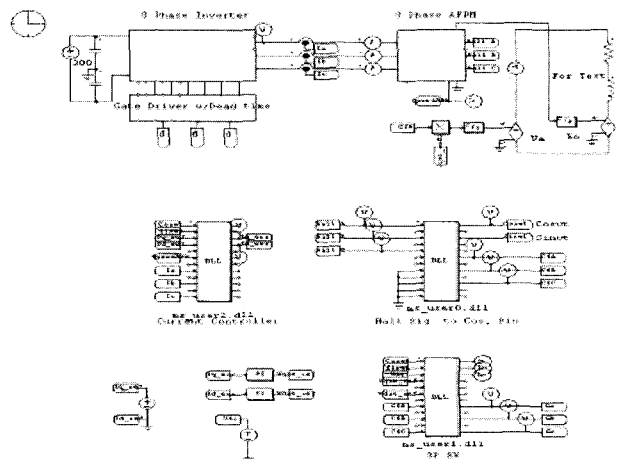


그림 5 PSIM-DLL을 이용한 제어시스템 모델

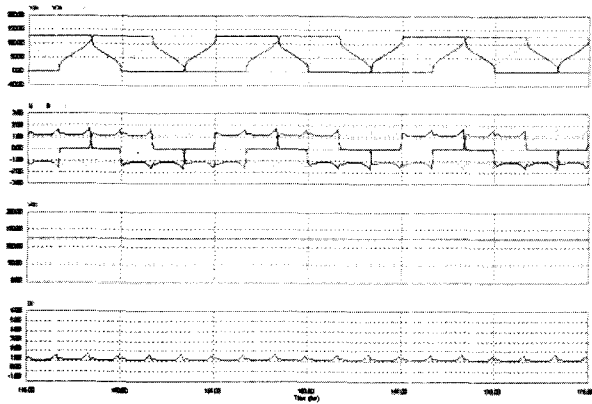


그림 6 박형동기전동기의 제어 시뮬레이션

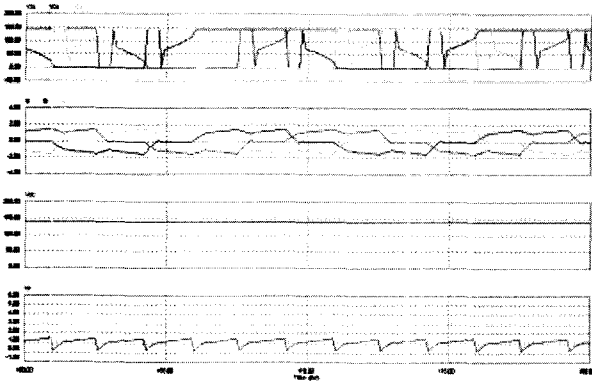


그림 7 일반적인 동기전동기의 제어 시뮬레이션

인덕턴스값을 기초로 하였다.

4. 결론

회로시스템 해석을 위한 시뮬레이션 소프트웨어인 PSIM을 이용하여 박형전동기 제어특성에 관하여 고찰하였다. 먼저 박형동기전동기를 모델링하고 이것을 기초로 인버터시스템과 통합하여 전체 제어시뮬레이션 모델을 구성하였다. 이 과정에서 PSIM이 가지고 있는 Symbol model 이외에 DLL 링

크기능을 이용하여 수렴에러(Convergency Error)없이 시뮬레이션을 수행하여 전동기의 인덕턴스특성을 확인하였다. 전동기설계에 의해 제작된 시제작 전동기로부터 얻은 인덕턴스 정보를 전동기 모델에 적용하여 전동기의 전기적 특성을 확인할 수 있었다. 이와같이 시스템의 거동해석을 목적으로 빠른 해석이 요구되는 경우 매우 효과적인 방안될 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] H.Jin, "A new computer-aided design tool forswitchmode power supplies", in High Frequency Power Conv. Proc., Las Vegas, NV, 1996.
- [2] H.Jin, "Behavior-Mode Simulation of Power Electronic Circuits", Transactions On Power Electronics, Vol. 12 No.3, MAY 1997.
- [3] 최평, 조용범, 목형수 외 "PSpice 기초와 활용" ver 7.1 pp.114~118, 1997년 8월.

< 저 자 소 개 >



최해웅(崔海龍)

1973년 2월 8일생. 1996년 건국대 공대 전기공학 학과 졸업. 1998년 동 대학원 졸업(석사). 2003년 동 대학원 졸업(공학박사). 2001년~2003년 (주) 아모텍 모터연구소 과장. 2003년~현재 현대기아자동차 연구개발본부 선임연구원.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원(석사). 1986년 동 대학원 졸업(박사). 1987년~1988년 미국 오레곤 주립대 Post-Doc. 1997년~1998년 건국대 연구처장. 현재 건국대 교무처장 및 전기공학과 교수. 전력전자

신기술연구센터 소장. 당 학회 감사.