

표면 부착 영구자석형 전동 시스템의 성능 해석을 위한 Simulink 모델 개발

최진철, 박성호, 이우택*
 창원대학교 대학원, 창원대학교 제어계측공학과*

Development of a Simulink Model for the Performance Analysis of SMPMSM Drive System

Chinchul Choi, Sungho Park, Wootaik Lee*

Graduate School of Changwon National University, Dept. Control & Instrumentation Engineering of Changwon National University

Abstract - This paper presents the new simulation model for the performance analysis of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor(SMPMSM) Drive System which is integrated with a controller and a power converter. To enhance reusability and compatibility, the system model is expressed by the association of independent sub-modules reflecting the real physical construction. This concept allows another independent sub-module to be effectively inserted in the model for the comprehensive analysis of larger systems such as a Machine Tool and HEV. The developed model which is composed of MATLAB/Simulink's basic blocks can rapidly analyze not only the entire behavior of system, but also the functional relationship between each components for the effective development of controller.

1. 서 론

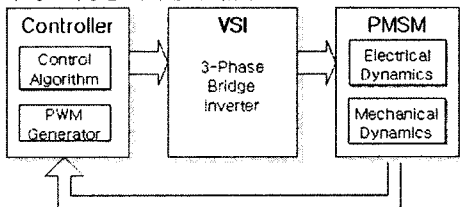
영구자석형 전동기는 그 효율과 성능이 입증됨에 따라 여러 산업분야에 적용되고 있으며, 고성능의 전동기 요구사항을 만족하기 위해서 전동기 자체만이 아닌 전동기 및 제어기, 전력 변환 장치 등을 통합한 전동 시스템의 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

이런 시스템 개발에서 모델링에 의한 시뮬레이션 기법은 큰 위험부담 없이 극한 조건의 입력에 대한 현상을 예측할 수 있고, 효율적인 제어기 개발을 가능케 하여 시스템 개발비용 및 시간을 상당히 단축시킬 수 있다. 전동 시스템의 경우도 여러 가지 시뮬레이션 기법이나 Tool이 소개 되고 있지만 시스템 전체를 다루지 못하고 각 부분의 결과를 조합하는 실정이라 그 상호작용을 제대로 파악하기 힘들며, 또한 할 수 있다 하더라도 한 부분에 치우쳐 다른 부분들은 시뮬레이션 수준이 미약하거나 원하는 결과를 얻기 위해 상당한 시간이 요구된다.

이에 MATLAB/Simulink의 기본 블록만을 사용하여 실제 물리적인 시스템 구성을 기본으로 호환성과 재사용성을 갖춘 독립적인 하부모듈을 개발하고, 이 모듈들의 간단한 조합으로서 전체 전동 시스템의 모델을 표현함으로써 전체 시스템 특성 해석 및 각 모듈간의 상호관계의 파악을 용이하게 하였다. 실제 500W급 SMPMSM의 회로 경수를 이용하여 시뮬레이션하고, 그 결과를 같은 조건에서 전동기를 구동한 결과와 비교하여 모델을 검증하였다.

2. 모델 구현

전동시스템은 실제 <그림 1>과 같이 제어기, 전력 변환 장치, 전동기로 구성된다. 각 모듈은 상호 독립적인 기능을 수행하며 각 모듈과 모듈의 연결은 실제 시스템에서의 물리적 또는 전기기적 연결을 뜻하며 이를 통해서 각 모듈간의 상호작용을 파악할 수 있다.



<그림 1> 전동 시스템 구성

2.1 전동기 모델

PMSM 전동기 모델은 전기부 동적 모델과 기계부 동적 모델의 상호 종속적인 연결 관계로 표현된다.

2.1.1 PMSM 전기부 동적 모델

일반적인 PMSM의 전압 방정식은 다음과 같다.[1]

$$U_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d}{dt} \Phi_{abc}$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L$ 고, $L_{ac} = L_{ab} = L_{ba} = L_{cb} = L_{ca} = L_{bc} = M$ 라 가정하면,

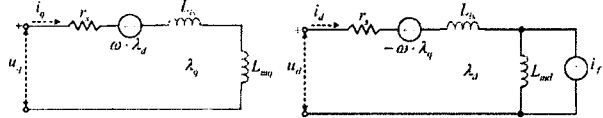
$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

으로 다시 표현할 수 있다.

전기에너지와 기계에너지를 보존법칙을 이용하여 발생 토크를 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_e = \frac{P}{2} \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_e} \quad (P = \text{회전자 극수})$$

하지만 전동기의 특성에 따라 인덕턴스의 경우 전동기 고정자에 대한 회전자 상대위치와 전류의 크기에 따라 변하게 된다. a,b,c 3상의 변수를 사용한 모델은 이 인덕턴스의 변화를 표현하기 힘들기 때문에, 좌표변환을 통한 d,q변수로서 전동기를 등가하면 <그림2>와 같다.[2]



<그림 2> PMSM의 dq변수를 사용한 등가회로

dq변수를 이용하여 전압 방정식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$u_d = r_s i_d + \omega L_d i_d + \omega \lambda_f + \frac{d}{dt} (L_d i_d)$$

$$u_q = r_s i_q - \omega L_q i_q + \frac{d}{dt} (L_q i_q + \lambda_f)$$

$$\tau_e = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} (\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

영구 자석이 회전자의 표면에 동일하게 분포하고 있는 SMPMSM의 경우 L_q 와 L_d 가 같이 때문에 $\tau_e = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} (\lambda_f i_q)$ 로 다시 표현할 수 있다.

2.1.2 PMSM 기계부 동적 모델

전동기의 전기부에서 생성된 전기적 토크와 부하 토크와의 상관관계는 아래의 식과 같고, 이는 전동기의 기계부 동적 특성을 결정하게 된다.

$$J \frac{d}{dt} (\omega) + B\omega = \tau_e - \tau_l \quad (J : \text{전동기 Inertia}, B : \text{전동기 마찰계수})$$

2.2 좌표 변환(Park Transform)

전체 시스템 모델에서 dq변수를 사용한 모듈과 abc변수 모듈간의 연결을 위한 좌표 변환은 행렬 식 K로 구현된다.

$$f_{dq0} = K f_{abc}, \quad f_{dq0} = \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix}, \quad f_{abc} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

$$K = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\beta & \cos(\beta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\beta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin\beta & \sin(\beta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\beta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 1 \\ \cos(\beta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\beta - \frac{2}{3}\pi) & 1 \\ \cos(\beta + \frac{2}{3}\pi) & \sin(\beta + \frac{2}{3}\pi) & 1 \end{bmatrix}$$

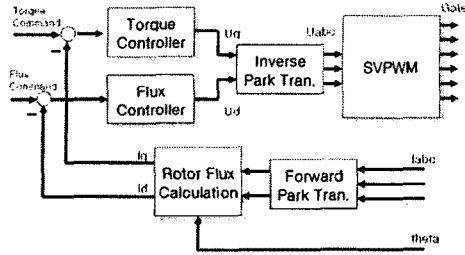
<그림 3> 전동 시스템 구성

2.3 제어기 모델

제어기 및 시스템 모델 개발에 널리 사용되는 MATLAB/Simulink 기반으로 구현된 본 모델에서 제어기는 가장 융통성 있고 효과적인 모델을 구현할 수 있다. 기본적인 PID제어, 상태 궤환 제어를 비롯한 상태 추정기 및 관측기를 추가한 센서리스 제어까지 여러 진보된 제어기술을 효과적으로 모델링 할 수 있기 때문이다.

2.3.1 전류위상제어

전류위상제어 기법은 전동기의 자속 생성 성분(direct axis)과 토크 생성 성분(quadrant axis)을 독립적으로 제어하는 방식이다. 정격 속도 까지는 q 축 성분만으로 정도크로 제어하고, 이후 더 높은 속도를 내기 위해서 부의 d축 성분인자로 약제자(Flux leakage) 제어를 하게 된다.



〈그림 4〉 제어기 구조

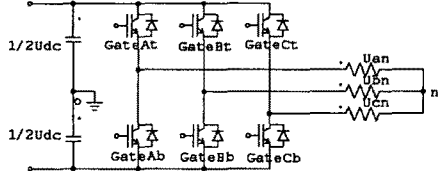
2.3.2 PWM 변조

최근 DSP를 비롯한 고급 마이크로컨트롤러는 제어 연산을 수행할 수 있는 프로세서와 전동기 구동에 알맞은 외부 I/O 장치, 효율적인 PWM 모듈을 내장하고 있다. 따라서 제어기 모델에 구동부를 포함시켜 모델링 하였다. 일반적으로 반송파(삼각파) 비교 방식의 변조방식(Carrier-based PWM)을 사용하였으며, 비교 기준 신호의 종류에 따라 일반 PWM, Sinusoidal PWM(SPWM), Space Vector PWM(SVPWM)으로 달리 구성하였다. 특히 최근 널리 사용되고 있는 SVPWM 방식은 3상 평형의 극전압에 최대치의 극전압과 최소치의 극전압의 절대 값이 동일하도록 설정한 윗셋 전압, V_{an} 을 인가함으로써 구현하였다.[3]

$$V_{max} + V_m = -(V_{min} + V_m), \quad V_m = -\frac{V_{max} + V_{min}}{2}$$

2.4 전력 변환 장치

제어기의 지령에 따라 구동부에서 생성된 PWM 신호가 3상 전압형 인버터(Voltage Source Inverter : VSI)의 6개의 전력용 스위칭 소자를 On/Off 하여 3상 가변전압 가변 주파수 전원을 얻게 된다.



〈그림 5〉 3상 전압형 인버터 (VSI)

이상적인 스위칭을 가정하면, 각 상에 극전압과 상전압은 다음과 같다.[4]

$$\begin{aligned} u_{ao} &= \frac{1}{2} u_{dc} (GateAa - GateAb) & u_{an} &= u_{ao} - u_{no} \\ u_{bo} &= \frac{1}{2} u_{dc} (GateBa - GateBb) & u_{bn} &= u_{bo} - u_{no} \\ u_{co} &= \frac{1}{2} u_{dc} (GateCa - GateCb) & u_{cn} &= u_{co} - u_{no} \\ u_{no} &= \frac{1}{3} (u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \end{aligned}$$

2.5 전체 전동 시스템 모델

독립적으로 개발된 각 하부 모듈들을 조합으로서 전체 시스템 모델을 표현한 예가 〈그림 7〉과 같다. 일반적으로 전동기 제어에 널리 쓰이는 PID 제어기로 벡터제어의 기본이 되는 dq 전류 제어기를 구성하여, 각 d, q축 전류 지령에 따른 시스템 특성을 파악하였다.

3. 시뮬레이션 결과 검증

모델 개발에 있어 완성된 모델이 실제 시스템을 얼마나 반영하는지를 검증하는 절차는 필수적이다. 고성능 공작기계를 전동기로 제작된 500W급 SMPMSM의 <표 1> 파라미터를 이용하여 시뮬레이션하고, 같은 조건에서 실제 구동한 결과와 비교함으로써 모델을 검증하였다. (P 제어기만 사용) 먼저 q축 전류 지령치(3.9A)만 인가하여 정격속도(3000rpm)까지 증가시킨 후 부의 d축 전류 지령치를 -5.0A까지 증가시켜 5000rpm까지 속도가 증가한 전류 위상 제어를 시뮬레이션을 통해 확인한 후 동일한 조건으로 실험하였다. <그림 6>은 전류 위상 제어에 의해 q축 전류만 인가 시 상전압 [(a)시뮬레이션,(b)실험], 전류 파형[(c)시뮬레이션,(d)실험]과, 부의 d축 전류 인가 시 증가한 상전류 파형[(e)시뮬레이션,(f)실험]을 보여주고 있다. 비교 결과 시스템 성능 해석이라는 본 모델의 개발 목적을 만족함을 알 수 있다.

〈표 1〉 500W SMPMSM 파라미터

파라미터	기호	값	단위
q축 인덕턴스	L_q	3.4	mH
d축 인덕턴스	L_d	3.4	mH
상저항	R_s	0.938	Ω
쇄교 자속	Ψ_m	0.056235	Wb
극수	P	4	EA
관성 모멘트	J	0.0001517	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
마찰계수	B	$1 \cdot 10^{-4}$	$\text{Nm}/(\text{rad}/\text{s})$

4. 결 론

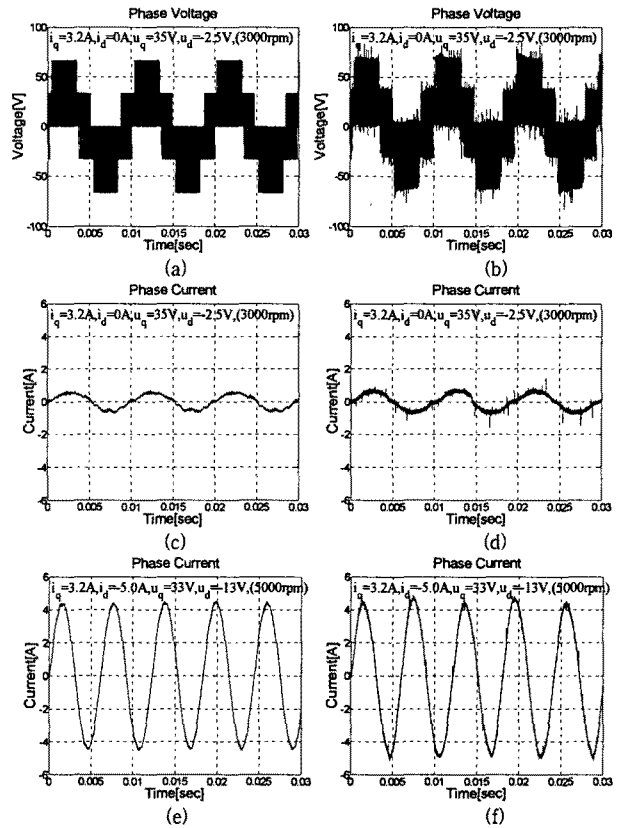
영구자석형 전동 시스템의 성능 해석을 통한 효과적인 시스템 설계 및 적용을 위해, MATLAB/Simulink 기본 블록을 이용하여 SMPMSM 전동시스템의 모델을 개발하였으며, 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 실제 실험치를 통해 모델을 검증하였다. 시스템의 파라미터의 변화, 입출력 양상 파악, 새로운 기능의 영향, 동작 방법 결정 등 제어기 설계 시 고려사항을 신속하게 파악할 수 있어 설계과정의 효율화를 증대할 수 있다. 실제로 이 논문에서도 먼저 모델을 이용하여 대략적인 전류제어기의 PI 이득을 찾은 후, 이를 토대로 실제 시스템에 적용하여 이득을 조절함으로써 이득 조정에 걸리는 시간을 상당히 단축시킬 수 있었다.

또한, 호환성과 재사용성을 염두에 두고 개발된 이 모델은 독립적인 모듈의 조합으로 구성되어 있어, 새로운 모듈의 추가가 용이하며, 모델 전체가 하이브리드 자동차의 동력 전달장치 및 고성능 공작기계의 스피드 시스템 등과 같은 보다 크고 복잡한 시스템 모델에 추가되어 성능해석이 가능하다.

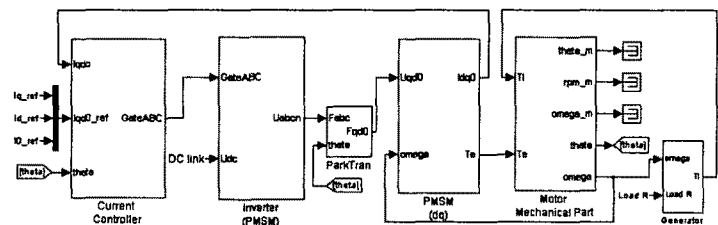
앞으로 SMPMSM보다 효율적인 Interior-magnet 타입의 PMSM (IPMSM)의 성능해석을 위해 d축과 q축의 인덕턴스 성분의 차이에 의한 릴럭턴스 토크 특성 및 d, q축 전류의 상관관계에 따른 비선형적 인덕턴스 특성을 보완할 것이다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] P.Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol.25, No.2, pp.265-273, 1989
- [2] B.K. Bose, "Modern Power Electronics And AC Drives", Prentice Hall PTR, pp. 56-70, 2001.
- [3] D.W. Chung, J.S. Kim and S.K. Sul, "Unified Voltage Modulation Technique for Real Time Three Phase Power Conversion", IEEE Trans. on Ind. Appl., pp. 374-380, 1998.
- [4] B.K. Lee and Ehsani, "A Simplified Functional Simulation Model for Three-Phase Voltage Source Inverter Using Switching Function Concept", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 48, No.2, pp. 309-201, 2001.



〈그림 6〉 시뮬레이션 결과 및 실험 결과 비교



〈그림 7〉 전체 전동 시스템 모델 구현