

## RT기반 FEMM-Simulink를 연동한 영구자석 전동기의 설계 및 해석, 평가 플랫폼 개발

김영민, 안지현, 권성준, 김용길, 문규성, 박성호, 안소현, 이나은, 정상용  
 동아대학교 전기공학과

### Development platform of Combined the FEMM-Simulink IPMSM design and analysis, evaluation in Real Time

Youngmin Kim, Jihyeon An, Sungjun Kwon, Yonggil Kim, Gysung Moon, Sungho Park,  
 Sohyeon An, Na-Eun Lee, Sang-Yong Jung  
 Department of Electrical Engineering, Dong-A University

**Abstract** - 본 논문에서는 RT(Real Time)기반의 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 설계 및 해석, 평가 플랫폼을 개발하고자한다. GUI(Graphical User Interface)로 제작 된 플랫폼 실행장에서 설계변수의 수치적 입력을 통해 설계 자동화를 구현하며, 수치해석프로그램 FEMM과 연동함으로써 전동의 전자계 해석 및 제어정수의 추출을 수행한다. 아울러 추출된 제어정수를 이용, Simulink의 실시간 시뮬레이션을 통해 IPMSM의 제어를 수행하여 통합적 설계·해석 평가를 도출한다.

#### 1. 서 론

현재 산업계 각 분야에서 시스템의 효율성, 신뢰성을 향상시키기 위해, 기존의 시스템을 PMSM의 시스템으로 대체 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하이브리드 전기자동차, 철도 차량, 풍력 발전 시스템, 전기 추진 선박 등에 이르기까지 영구자석 전동기의 응용 분야는 급속도로 증가되고 있으며, 특히 하이브리드 및 전기자동차 등의 개발이 본격화된 후, 구동시스템에 적용을 위한 연구 및 개발에 대한 노력이 이어지고 있다. 이와 같이 IPMSM의 응용분야가 폭 넓어짐에 따라 제품의 신뢰성 및 안정성이 중요시되어지며, 이를 위해서는 설계 단계에서 다양한 특성해석이 필요하다.

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)의 계자 자속은 외부 전원에 의존하지 않고 회전자의 영구 자속에 의해 공급되기 때문에 효율과 출력 밀도가 타 전동기에 비해 월등히 높다. 특히 IPMSM은 영구 자석이 회전자 내부에 매입된 구조로써, 자속에 의한 얼라인먼트 토크(Alignment Torque)뿐만 아니라 자기저항 차이에 의한 릴럭턴스 토크(Reluctance Torque)로 인해 토크밀도가 높은 장점이 있다. 또한 약자속 제어(Flux Weakening Control)를 통해 넓은 범위의 운전영역을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 실제 전동기의 시스템의 구현에 앞서 다양한 모의실험을 통해 시스템의 과도응답 및 성능을 예측하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 플랫폼 개발을 위해 전자계 유한요소 해석을 수행하는 프로그램인 FEMM을 이용하여 IPMSM을 설계 및 해석을 수행하고, 해석된 제어정수를 기반으로 Simulink에서 IPMSM의 모델링을 제어하여 결과값을 출력한다. 또한 GUI를 통해 FEMM과 Simulink를 사용자가 사용하기 용이하게 연동하는 플랫폼을 개발하고자한다. 이 플랫폼 개발을 통해서 IPMSM에 대해서 탐구하고 FEMM 및 Simulink, GUI의 활용도를 높인다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 IPMSM의 특성 방정식

전동기의 출력은 일반적으로 인버터의 전류 정격과 전동기의 열 정격에 의해 결정되는 최대 전류  $I_{max}$  및 인버터의 PWM 방법과 인버터가 공급할 수 있는 최대 직류단(DC Link) 전압에 의해 결정되는 최대 출력 전압  $V_{max}$ 에 의해 제한되며, 그 식은 다음과 같이 정의된다.[1]

$$V_{ds}^2 + V_{qs}^2 \leq V_{max}^2 \quad (1)$$

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{max}^2 \quad (2)$$

여기서  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ 는 d, q축 전류이고,  $V_{ds}$ ,  $V_{qs}$ 는 d, q축 단자전압을 뜻한다. 동기 속도로 회전하는 회전자를 기준 좌표로 한 동기 좌표계로 표현한 영구자석 전동기의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_r \lambda_{qs} \quad (3)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_r \lambda_{ds} \quad (4)$$

여기서  $\omega_r$ 은 동기 전기각속도,  $R_s$ 는 고정자 상저항, 그리고  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{qs}$ 는 각각 d, q축 고정자 쇄교자속이다.

또한 d, q축 고정자 쇄교 자속은 아래와 같이 표현된다.

$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} + \lambda_f, \quad \lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (5)$$

$L_{ds}$ ,  $L_{qs}$ 는 d, q축 인덕턴스이고  $\lambda_f$ 는 영구자석에 의한 쇄교 자속이다.

식(5)에 의해 식(3), (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_{qs} i_{qs} \quad (6)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_{ds} i_{ds} + \lambda_f) \quad (7)$$

두 번째 항인 d, q축 전류의 급변시 발생하는 전류 미분에 비례하는 전압 성분을 무시한다고 가정하면, 다음과 같이 전압 방정식을 간단하게 나타낼 수 있다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_r L_{qs} i_{qs} \quad (8)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_r (L_{ds} i_{ds} + \lambda_f) \quad (9)$$

식에서 보는 바와 같이 고정자의 상저항에 의한 전압 강하가 크지 않다고 가정하면 전동기의 단자 전압은 속도  $\omega_r$ 에 비례함을 알 수 있다.

한편, IPMSM의 기계적 출력은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (10)$$

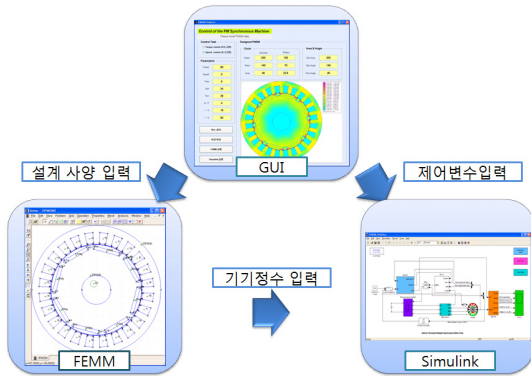
발생 토크  $T_e$ 는 식(5)를 적용하게 되면 다음과 같이 정의 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_f i_{qs} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs}] \quad (11)$$

첫째항은 영구자석에 의한 자속과 고정자 q축 전류의 상호 작용에 의해 발생하는 얼라인먼트 토크(Alignment Torque)이고 둘째 항은 d, q축의 돌극성으로 인해 발생하는 자기 저항 토크(Reluctance Torque)이다.

## 2.2 IPMSM 플랫폼 모델링

개발된 플랫폼은 그림 1에서와 같이 매트랩의 GUI 프로그램으로 실행된다. 사용자가 IPMSM의 설계변수를 입력하고, 토크 또는 스피드 추종 제어 설정을 선택 한다. 플랫폼의 변수입력버튼을 클릭하면 변수 값들이 저장된다.



〈그림 1〉 플랫폼 개요도

이어서 FEMM실행 버튼을 선택하면 IPMSM의 설계 및 해석이 실행되며, 해석된 기기정수는 자동으로 저장된다. Simulink 실행 버튼을 선택하면 RT기반 IPMSM이 모델링 된 창이 나타난다. 이 실행 창에서 Simulink를 시뮬레이션 하면 IPMSM의 해석결과 값을 나타내는 출력창이 나타난다. 사용자는 실시간으로 출력 값을 확인하며, 입력 전류에 따른 결과 값을 확인 할 수 있다.

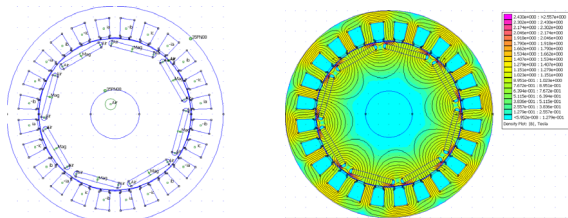
### 2.2.1 모델 사양 선정

본 논문에서는 개발된 플랫폼의 성능 및 신뢰성 검증을 위해 임의의 IPMSM 모델을 선정하여 모의실험을 실시하였다. 실험에서 사용된 IPMSM의 설계사양 및 제원은 표 1과 같다.

〈표 1〉 IPMSM의 설계사양 및 제원

IPMSM 모델 사양			
극수	8[극]	고정자직경	200[mm]
턴수	39[턴]	회전자직경	140[mm]
슬롯수	24[슬롯]	내부직경	45[mm]
강판종류	PN08	공극길이	0.8[mm]
자석종류	Neodymium	자석형태	일자형(막대형)
권선방법	분포권	적층길이	100[mm]

그림 2는 표 1의 사양에 따라 설계된 IPMSM의 해석결과를 나타낸다. 그림 2의 (a)는 본 논문의 모델의 형상을 나타내며, 그림 2의 (b)는 전자계 해석을 실행한 FEMM의 자속밀도분포도를 나타낸다. 전자계 해석을 실행하면 제어정수  $i_d, i_q$ 에 따른  $\lambda_d, \lambda_q$  값을 얻을 수 있다. 또한  $\lambda_d, \lambda_q$  값을 이용하여  $L_d, L_q$  값을 구할 수 있다.

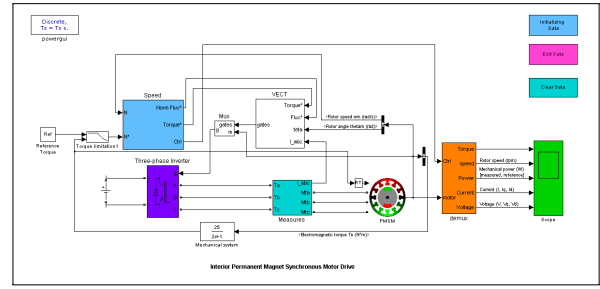


(a) IPMSM 형상 (b) 자속밀도분포도

〈그림 2〉 FEMM을 이용한 IPMSM 설계 및 해석

### 2.2.2 Simulink를 이용한 IPMSM 모델링

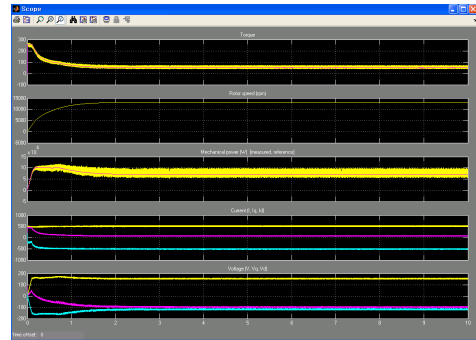
그림 3은 Simulink를 이용하여 RT기반[3]의 IPMSM을 모델링[2]한 모습이다. FEMM에서 전자계해석 후 생성된 모터정수를 전달 받아 IPMSM의 제어를 실시한다. Speed 제어와 VECT 제어 그리고 3상 Inverter를 통해 IPMSM을 제어한다.[4]



〈그림 3〉 RT기반 IPMSM 모델링

### 2.2.3 RT기반 IPMSM의 해석결과

GUI로 만들어진 플랫폼은 IPMSM의 설계사양 및 제어변수를 입력 받고, 속도 및 토크 추종을 선택할 수 있다. 그림 4는 앞서 설계된 모델의 제어정수를 이용하여 토크 추종 시 결과 값을 출력한 예시이다.



〈그림 4〉 IPMSM의 출력값 (위에서부터 토크, 속도, 출력, 전류, 전압)

그림 4의 그래프는 위에서부터 토크, 속도, 출력, 전류, 전압 값을 나타낸다. 출력창의 결과 값으로부터 설계된 IPMSM의 일정 토크영역에서의 토크값은 260[Nm], 로터회전속도 3100[rpm], 출력값은 100[kw]까지 증가한다. 로터회전속도 3100[rpm] 지점부터 일정 출력 영역으로 약제자 제어가 실행된다. 출력값은 100[kw]로 일정하게 유지되며, 토크값은 감소하고, 로터회전속도는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 로터회전속도가 10000[rpm]이후부터 특성영역으로 들어가는 것을 확인 하였다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 상용프로그램 FEMM과 Simulink, GUI를 기반으로 RT기반 매입형 영구자석 전동기 설계 및 해석, 평가 플랫폼을 개발하였다. FEMM과 연동을 통해 IPMSM의 설계와 해석을 수행 하고, 제어정수를 전달받아 IPMSM이 모델링되어 있는 Simulink에서 시뮬레이션 결과 값을 출력한다. FEMM과 Simulink를 연동하기 위해 Matlab을 이용하였고, GUI로 사용자가 사용하기 용이하게 제작하였다. 사용자가 IPMSM의 제원을 입력하면 설계에서부터 해석 및 평가까지 자동화할 수 있다. 또한 실시간 기반으로 전류 변화에 따른 결과 값을 확인할 수 있다. IPMSM 설계에 전반적인 지식이 있는 사용자라면 이 플랫폼을 활용하여 보다 정확하고 편리하게 IPMSM 설계를 할 수 있을 것으로 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1]이주, 김기찬, 안준선, 원성홍 “매입자석 동기모터의 설계 및 제어”, 도서출판 인터비전, pp 20-21, 2007
- [2]임중수, “임중수의 Simulink7”, 높이깊이, pp 136-382, 2010
- [3]Christian Dufour, Simon Abourida, Jean Belanger, “Real-Time Simulation of Permanent Magnet Motor Drive in FPGA Chip for High-Bandwidth Controller Tests and Validation”, IEEE ISIE 2006, July 9-12, 2591-2596, 2006
- [4]L.Petkovska, G. Cvertkovski, “FEM Based Simulation of a Permanent Magnet Synchronous Motor Performance Characteristics”, IEEE, 5/06, 4244-4248, 2006