

연구자석 동기 전동 시스템의 전기적 오류 분석을 위한 시뮬레이션 모델 개발

최진철\*, 홍원복\*\*, 이우택\*\*\*

국립창원대학교 대학원\*, (주)루텍\*\*, 국립창원대학교 제어계측공학과\*\*\*

Development of Simulation Model for Electrical Fault Analysis of PMSM Drive System

Chinchul Choi\*, Wonbok Hong\*\*, Wootaik Lee\*\*\*

Graduate School of Changwon National University\*, Dept. of R&D, ROOTECH Co., Ltd\*\*,  
Dept. of Control and Instrumentation, Changwon National University\*\*

**Abstract** - This paper presents a simulation model to analyze effects of electrical faults for the Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM) drive system. The major fault modes of system are investigated and an intuitive system model is developed using MATLAB/Simulink. The developed model provides useful environments to inject and remove the various faults. Simulation results show the dynamic performances of system during the transient state from normal to fault, and those will be a great help to make a system more reliable.

1. 서 론

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

특히 자동차나 비행기 등과 같은 고안정 시스템에 적용에 있어서 전동시스템의 신뢰성을 높이기 위해 시스템에서 발생할 수 있는 모든 오류를 조사하고, 그 영향을 분석하여 오류를 최소화하고 오류가 발생하였어도 시스템을 동작 가능하게 하여야 한다.

이 논문에서는 전동시스템에서 발행할 수 있는 전기적 오류들에 대해서 회로기반의 모델링 기법을 이용하여 직관적으로 시뮬레이션 할 수 있는 모델을 개발하였다. 정상 상태에서 오류가 발생하였을 때 시스템의 영향을 분석하기 위해 오류 인가 및 제거를 쉽게 할 수 있도록 구성하였다. 시뮬레이션 통해 각 오류가 시스템에 미치는 영향을 분석하였다.

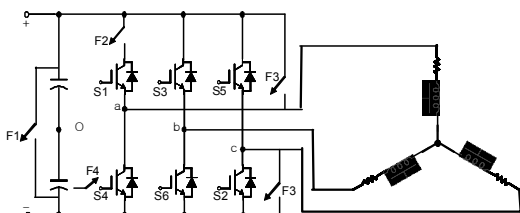
2. 본 론

2.1 오류 목록

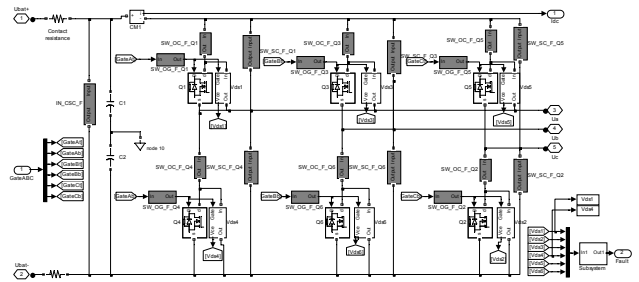
PMSM 구동시스템은 제어기, 인버터, PMSM으로 구성되어 있으며 전기적으로 발생할 수 있는 오류는 각 모듈 별로 다음과 같이 정리하였다.

- 인버터
  - DC link 콘덴서 단락 오류
  - 전력 스위치 단락 오류
  - 전력 스위치 개방 오류
  - 게이트 드라이버 신호 개방 오류
- 인버터/전동기간 인터페이스
  - 선간 단락 오류
  - 상전선 개방 오류
  - 접촉 저항 증가 오류
- 전동기
  - 코일 간 단락 오류
  - 영구자석 감자 오류

2.1.1 인버터 모델



<그림 1> 인버터 오류

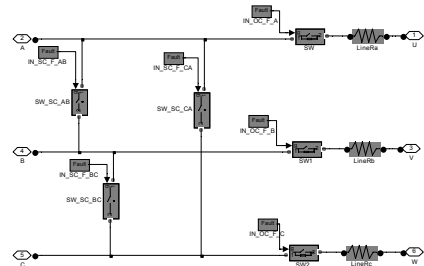


<그림 2> 인버터 모델

그림1은 PMSM을 구동하기위한 전압형 인버터의 기본회로이고, 전기적으로 발생할 수 있는 오류를 표현 할 수 있다. 이렇게 표현된 인버터 회로를 MATLAB/Simulink 및 SimPowerSystems 환경에서 회로 기반의 모델링 기법을 이용하여 그림 2와 같이 직관적인 모델링을 수행하였다. 또한 각 오류의 인가 및 제거 시간을 임의로 조정할 수 있도록 구성하였다.

2.1.2 인터페이스 모델

인버터와 전동기는 전력 전달을 위해 3상의 전선으로 연결되고, 그 연결부에서 발생할 수 있는 오류를 인버터 모델과 같은 방법으로 그림3과 같이 쉽게 모델링 하였다.



<그림 3> 인버터/전동기 인터페이스 모델

2.1.3 PMSM 모델

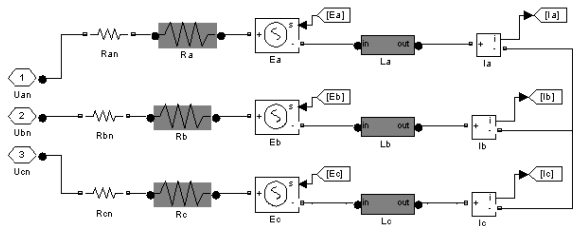
A상에 Turn to turn short error 가 발생 했을 때, PMSM의 각 상의 전압은 다음과 같이 표현 할 수 있다. 여기서  $n_s$ 는 정상 상태일 때의 권선 수 대 오류 발생 시 권선 수의 비로 정의한다. 따라서 오류 발생 시 권선 수가 줄어들어 저항 및 역기전력은  $n_s$ 의 비로 감소하고, 인덕턴스는  $n_s^2$ 의 비로 감소한다.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta^2(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$\eta = \frac{N_{error}}{N_{normal}}$$

회전자 영구자석의 감자 현상 발생은 역기전력의 감소를 초래하게 된다. 여기서  $\gamma$ 는 정상 상태일 때의 자속량 대 오류 발생 시 자속량의 비로 정의한다.

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



〈그림 4〉 PMSM 전기구 모델

## 2.2 오류 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 통해 각 오류가 시스템에 미치는 영향을 분석하였다.

- 오류 인가 시간 : 0.2초
- 오류 제거 시간 : 0.4초

### 2.2.1 인버터 오류

전력 스위치 단락 오류 발생 이후 큰 전류가 흐름을 알 수 있다. 즉, 인버터가 파괴 될 것이다. 따라서 일정 전류 이상이 흐르게 되면 회로를 차단하는 하드웨어 적인 오류 검출 및 방지 대책이 요구 된다(그림 5-b 참고). DC link 콘덴서 단락 오류와 한 상의 스위치가 모두 도통 되어 발생하는 경우 모터가 발전기로 동작하게 된다. 따라서 모터의 역기전력에 의하여 흐르는 전류가 제한되어 진다(그림 5-a 참고). 상위 스위치가 개방되면 그 상은 음의 전류만 흐르게 되며, 하위 스위치가 개방되면 그 상은 양의 전류만 흐르게 된다(그림 5-c, 5-d 참고).

### 2.2.2 인터페이스 오류

두 상의 권선이 순간 단락이 발생하면 실제 모터에 흐르는 두 상의 전류와는 달리 인버터 단에서 측정된 두 상의 전류는 항상 같은 값을 가지게 된다(그림 5-e 참고). 모터와 인버터 사이에 연결이 끊어지는 경우 끊어진 상으로는 전압이 입력 될 수 없고, 전류 또한 흐를 수 없게 된다(그림 5-f 참고). 노후화 등의 이유로 접촉 저항 및 선 저항이 증가하면 증가한 상의 전류는 줄어든다. 한 상의 저항이 증가 했을 때, 그 상에 흐르는 전류는 감소하고, 나머지 두 상에 흐르는 전류는 같은 진폭을 가지게 된다(그림 5-g 참고).

### 2.2.3 전동기 오류

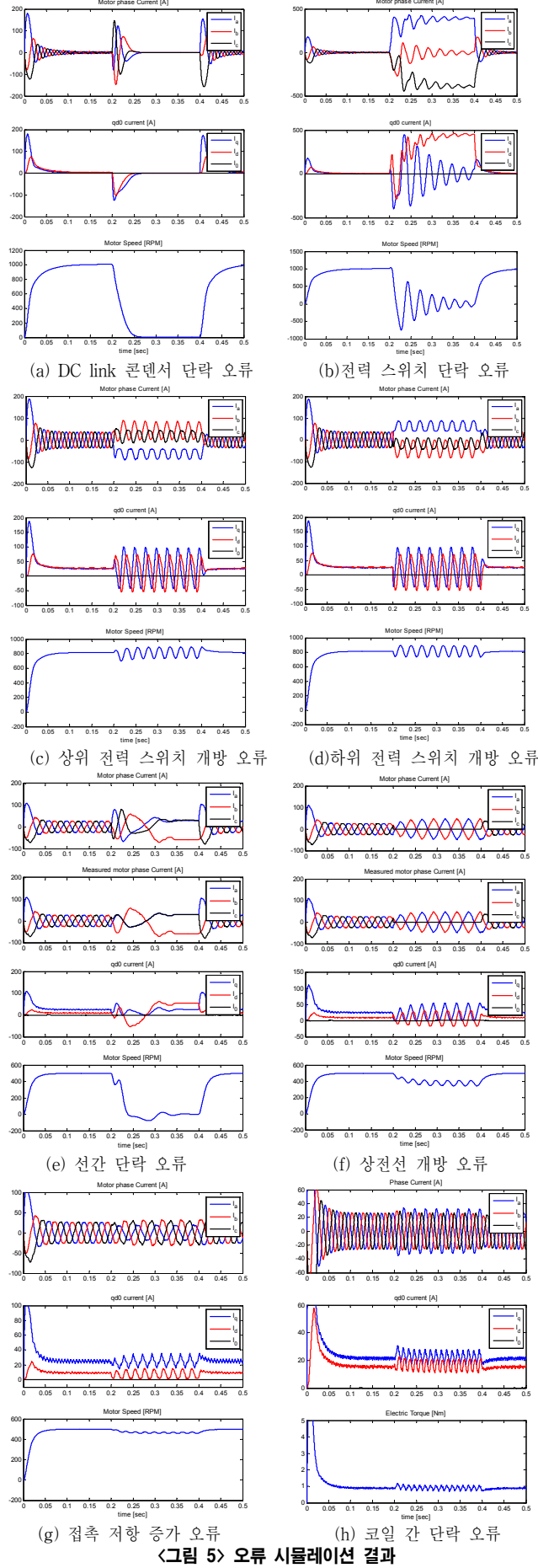
전동기 코일 간 단락 오류가 발생하였을 경우 한상의 임피던스가 줄어들어 실제 전동기에 인가되는 전류의 불평형이 발생한다(그림 5-h 참고).

## 3. 결 론

PMSM 전동시스템에서 발행할 수 있는 전기적 오류 목록을 조사하고, MATLAB/Simulink 및 SimPowerSystems 환경에서 회로기반의 모델링 기법을 이용하여 직관적으로 시뮬레이션 할 수 있는 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 오류 인가 및 제거를 쉽게 할 수 있도록 구성되어 정상상태 동작 중 발생한 오류가 시스템에 미치는 영향을 분석할 수 있었다. 개발된 모델 및 시뮬레이션 결과를 시스템 오류 검출 및 대책 개발 시 이용하면 보다 신뢰성 있는 PMSM 전동 시스템 개발이 가능하다.

### 〈참 고 문 헌〉

- [1] 최진철 홍원복, 이우택, "스핀들 구동용 배입형 영구자석 동기 전동기의 동적 해석 모델 개발", 한국공작기계학회 2006 춘계학술대회 논문집, p.273-278, 2006
- [2] 최진철, 이우택, 홍정표, "자동차 전자식 조향장치용 PMSM 구동 시스템의 신속한 동적해석을 위한 비선형 인버터 모델 개발", 대한전기학회 제38회 하계학술대회 논문집, 1132-1133, 2007
- [3] 최진철, 박성호, 이우택, "표면 부착 영구자석형 전동시스템의 성능 해석을 위한 Simulink 모델개발", 대한전기학회 제37회 하계학술대회 논문집, B권, 625~626, 2006.
- [4] Chinchul Choi, Wootaik Lee, Jung-Pyo Hong, SeongJoo Kim, JaeGoo Kim, JunGyu Song, JunNam Oh, "Multi-domain modeling of Electric Power Steering with PMSM Drive System", IEEE International Electric Machines&Drives Conference 2007, Vol. 2 , p1355~1360, 2007.
- [5] Wonbok Hong, Wootaik Lee, Byoung-Kuk Lee, "Dynamic Simulation of Brushless DC Motor Drives Considering Phase Commutation for Automotive Applications", IEEE International Electric Machines&Drives Conference 2007, Vol. 2 , p1377~1383, 2007.



〈그림 5〉 오류 시뮬레이션 결과