

# PMSM 속도 제어를 위한 PIL(Processor-in-the-Loop) 시뮬레이션 적용에 관한 연구

한수지, 김태규  
국립창원대학교

## Study on the application of processor-in-the-loop (PIL) simulation for PMSM speed control

Suji Han, Tae-Kue Kim  
Changwon National University

### ABSTRACT

In this paper, we presented a model design for speed control of PMSM and verified the control algorithm through PIL simulation. It can be confirmed that both the simulation results and PIL results on MATLAB Simulink stably follow the speed reference and have a low tolerance. It is expected that development time and costs can be reduced by applying this method to the motor control algorithm development stage.

### 1. 서론

영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 효율성, 응답성, 높은 전력 밀도 등의 장점으로 인하여 다양한 산업에서 속도나 토크 제어에 널리 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 그러나 실제 PMSM 속도 제어를 설계함에 있어 알고리즘의 실행 결과가 시뮬레이션과 일치하지 않는 문제들이 발생한다. 이와 같은 시뮬레이션과 알고리즘 간의 오차를 줄이고 정확성을 높이기 위해 Processor-in-the-Loop(PIL) 시뮬레이션의 중요성이 부각되고 있다.<sup>[2]</sup>

따라서 MATLAB/Simulink 환경에서 PIL 시뮬레이션을 수행하고, 이를 호스트 PC에서 시뮬레이션한 결과와 비교 검증하였다. 이를 통해 모터 제어기 설계 초기 단계에서 문제점을 파악하고, 수정 및 보완할 수 있는 PIL을 이용한 알고리즘 개발 과정에 대해 연구하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 PMSM 속도 제어기 시뮬레이션

시뮬레이션에서 사용된 PMSM FOC(Field Oriented Control) 속도 제어 블록 다이어그램은 Fig.1에 나타내었다.

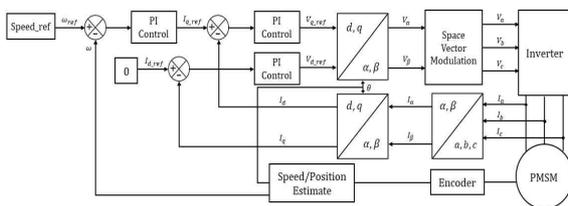


Fig. 1 PMSM FOC Speed Control Block Diagram

Table 1에 나타난 모터 파라미터를 바탕으로 PMSM을 모델링 하였고, 초기 속도 3,000[rpm]에서 1초가 되면 6,000[rpm], 3초부터 최종 속도 9,000[rpm]으로 제어하는 시스템을 설계하였다.

Table 1 Motor Parameters used in the Simulation

Parameters	Value
Number of pole pairs	8
Stator resistance	0.233Ω
d-axis and q-axis inductances	0.153mH
Rated power	150 W
Rated current	7.34A
Rated speed	10,000rpm
Moment of inertia	8.62 × 10 <sup>-6</sup> kg·m <sup>2</sup>

#### 2.1.1 Simulink 모델 구성

Simulink 모델은 아래의 Fig. 2과 같이 외부 속도 제어 루프와 두 축의 전류를 제어하여 모터의 속도와 토크를 제어하는 내부 전류 루프로 구성된다. 전류 제어 서브시스템에는 전류 제어 및 스케일링, 속도 및 회전자 위치 측정 알고리즘을 포함하고 있다.

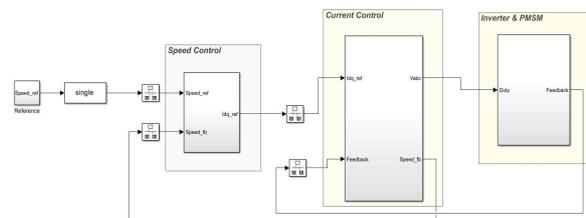


Fig. 2 Configuring Simulink Models

#### 2.1.2 PIL 시뮬레이션

PIL 시뮬레이션은 Simulink 모델을 기반으로 소프트웨어 환경에서의 시뮬레이션과 대상 컨트롤러의 상호 작용을 통해 코드 동작이 설계와 일치하는지 검증 및 알고리즘의 평균 실행 시간과 최대 시간을 파악할 수 있다.

본 논문에서는 대상 컨트롤러로 'LAUNCHXL-F28379D'를 사용하여 PIL 시스템을 구성하였으며, 시스템 구성에 대해서는 Fig. 3에 나타내었다. 호스트 PC와 대상 컨트롤러 간의 SCI(Serial Communcation Interface) 통신을 주고받으며 시뮬레이션을 수행한다.

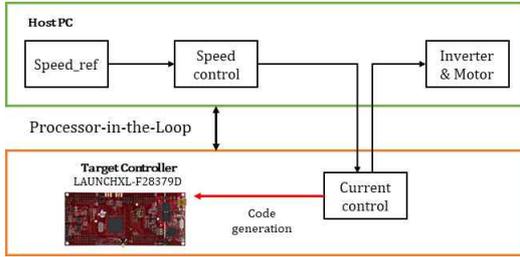


Fig. 3 Processor-in-the-Loop System

호스트 PC와 대상 컨트롤러를 연결하고, Simulink 상에서 하드웨어 설정을 컨트롤러와 일치하게 설정하였다. 전류 제어 서브 시스템의 코드를 검증하기 위해 이에 대한 PIL 블록을 생성하여 아래의 Fig. 4와 같이 연결하였다. ‘SIL/PIL Manager’ 앱을 통해 PIL 시뮬레이션을 진행하고 시뮬레이션 데이터 및 PIL 프로파일링을 확인해 보았다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

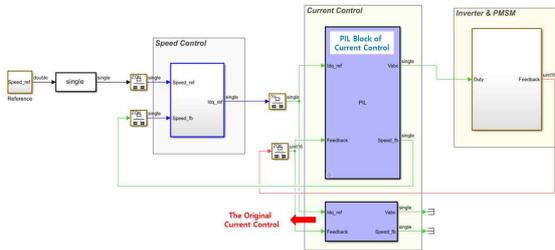


Fig. 4 Configuring PIL Simulation

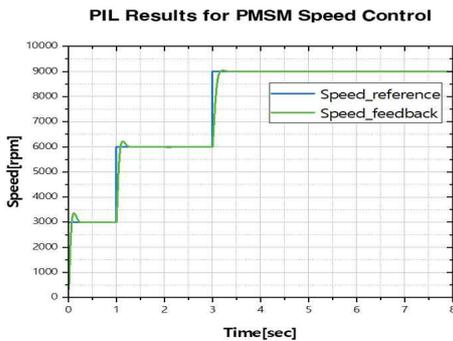


Fig. 5 PIL Results for PMSM Speed Control

## 2.1 Simulink/PIL 시뮬레이션 결과 비교

컴퓨터상에서의 시뮬레이션 결과와 PIL 시뮬레이션 결과를 비교한 데이터를 Fig. 6에 나타내었다. 데이터를 4.1초부터 4.4초까지 확대한 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

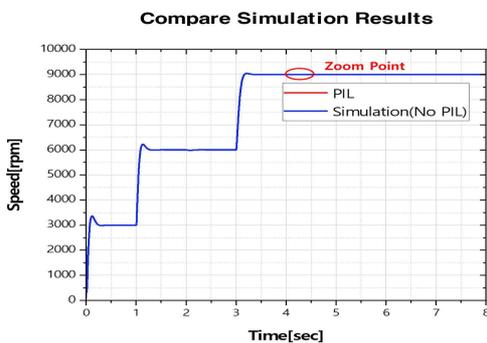


Fig. 6 Compare Simulation Results

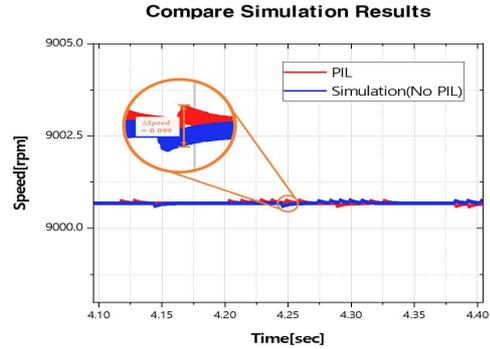


Fig. 7 Zoom-in Compare Simulation Results

큰 스케일에서는 차이가 없는 것과 같이 보이지만, 스케일을 확대하면 4.25[sec]에서 0.099[rpm]의 영향을 주지 않을 만큼의 데이터 오차가 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이 오차가 제어에 있어서 영향을 줄 만큼의 값이거나, 제어 알고리즘의 실행 시간이 예상보다 1.5배 이상 길다면 제어 알고리즘의 최적화가 필요하다.

## 3. 결론

본 논문에서는 PMSM 속도 제어를 위한 Simulink 모델 설계 및 시뮬레이션과 이후 PIL 시뮬레이션을 통해 제어 알고리즘을 검증해보았다. 이는 코드의 정확성을 검증하고 알고리즘 실행 시간 및 성능을 평가할 수 있다.

그 결과 원하는 기준 속도가 증가함에 따라 안정적으로 추종하고 있는 것을 확인하였고, 컴퓨터상에서의 시뮬레이션과 PIL 시뮬레이션 결과 약간의 오차가 있지만 이는 허용 가능한 오차 범위 내에 있음을 확인하였다. 따라서 PMSM 속도 제어 알고리즘을 PIL 시뮬레이션을 통해 원하는 제어 목표를 만족하는 것을 확인하였다.

이를 이용하여 모터 제어 알고리즘을 설계한다면 알고리즘 개발 초기 단계에서 원하는 제어 목표를 만족하는 알고리즘을 제대로 설계했는지 확인하고 시뮬레이션 결과와 PIL 결과를 비교하여 오차가 크거나, 런타임 초과 등의 문제점을 조기에 발견하고 수정 및 보완할 수 있어 개발 기간 단축 및 비용 저감이 가능하다.

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-003)

## 참고 문헌

- [1] Onyou Park, Wansu Lim, “Improving PMSM Control Performance with Reinforcement Learning and Disturbance Observer” Korean Society of Automotive Engineers Fall Conference and Exhibition, pp. 1627-1630, 2023
- [2] Do-Hyung Kim, “Practical Use of Processor-in-the-Loop (PIL) Simulation in Model-Based Development”, KSAS 2016 Fall Conference, pp. 551-552, 2016