

매입형 영구자석 동기 전동기 구동 시스템에서의 인버터 스위치 개방 고장에 관한 연구

강명석*, 김주일**, 현정현**, 최영준**

제주대학교 전기에너지연구센터*, 제주대학교 전기공학과**

A Study on Inverter Switch Open Faults in IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) Drive Systems

Myeong-Seok Kang*, Ju-il Kim**, Jung-Heon Hyun**, Yeong-Jun Choi**

Electric Energy Research Center, Jeju National University*, Department of Electrical Engineering, Jeju National University**

ABSTRACT

매입형 영구자석 동기 전동기는 전력밀도가 높고 효율이 좋은 특징으로 대부분의 전기차 모델에 적용되어 있다. 이러한 매입형 영구자석 동기 전동기는 인버터와 결합되어 구동되며 높은 시스템 신뢰성을 요구한다. 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기 전동기 구동 시스템에서 인버터 스위치 개방 고장에 대하여 3상전류 및 전동기 토크의 고조파 특성을 분석하고 두 가지 특성을 조합하여 인버터 스위치 개방 고장 진단 알고리즘을 제안하였다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기 전동기는 높은 전력 밀도와 높은 효율 등의 장점으로 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다.^[1] 특히 지속적인 급성장을 보이는 전기자동차 시장에서 대부분의 전기차 모델에 적용되어 있다. 높은 신뢰성과 안전성을 요구하는 전기자동차에서 구동 시스템이 정지하는 상황이 발생한다면 큰 사고로 이어질 수도 있다. 이렇듯 사용자의 안전성을 확보하기 위해 정확한 고장 진단과 모니터링은 매우 중요한 요소이다.

PMSM 구동 시스템에서 발생하는 고장 유형은 크게 모터 고장, 인버터 고장, 센서류 고장 그리고 기계적 고장으로 분류될 수 있다. 이 가운데 인버터 고장은 전원 공급선에서의 단락, 정류기 다이오드의 고장, 커패시터 파괴 및 스위칭 소자의 고장 등으로 분류될 수 있으며, 이중 게이트 드라이브 회로의 문제 혹은 소자 파괴로 인해 도통이 실패하는 스위치의 개방형 고장이 주로 발생한다. 스위치에 개방 고장이 발생하는 경우 인버터는 출력 전압을 합성할 수 없고 전류의 고조파 증가, 토크 리플 발생, 효율 저하가 나타난다.^[2]

본 논문에서는 PSIM 소프트웨어를 사용하여 인버터 스위치 개방 고장을 모델링하고, 스위치 개방 고장 시 3상전류 및 전동기 토크의 고조파 특성을 분석하여 인버터 스위치 개방 고장 진단이 가능한 알고리즘을 제안한다.

2. 본 론

2.1 인버터 스위치 개방 고장 모델링

인버터 스위치 개방 고장을 모델링하기 위하여 전력전자 해석 tool인 PSIM 소프트웨어를 사용하여 표 1의 파라미터가 적

용된 전동기 구동 시스템을 그림 1과 같이 모델링하였으며, 스위치 개방 고장을 구현할 수 있도록 PWM 시그널에 추가적인 fault signal을 배치하였다.

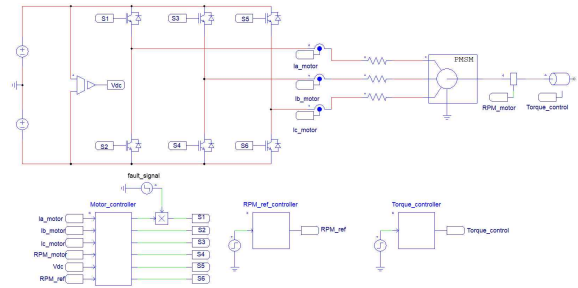


그림 1 인버터 스위치 개방 고장 시뮬레이션 모델
Fig. 1 Simulation model of inverter switch open fault

표 1 5.5kW 매입형 영구자석 동기전동기 파라미터
Table 1 5.5kW IPMSM parameter

Rated Power	5.5kW	Rs	0.2Ω
Rated Voltage	380V	Ld	2.638mH
Rated Current	8.9A	Lq	15.331mH
Rated Torque	17.5Nm	EMF	150.2[Vpeak]
Poles	6	Inertia	0.0125kgm ²

고조파 분석을 위한 시뮬레이션 기본 조건은 off-set PWM 방식을 사용하고, 10kHz의 스위칭 주파수, MTPA (Maximum Torque Per Ampere)제어 상태에서 스위치 개방 고장이 발생한 경우로 제한 한다. 본 논문에서는 전동기 속도를 2,000rpm에서 3,000rpm까지 200rpm 단위로 속도를 증가시키면서 C상의 Top, Bottom, Arm 스위치 개방 고장 상황에 대해 고조파 분석을 진행하였으며, 고조파 분석을 위한 속도별 주파수는 식(1)과 같이 계산된다.

$$F = rpm \times \frac{Pole}{120} \quad (1)$$

식(1)을 활용하여 각 속도별 1cycle 주기를 구하고 해당 주기만큼 데이터를 취득하여 고조파 분석에 사용한다. 전류 데이터의 경우 전류센서를 통해 취득한 값을 그대로 사용하고 전동기 토크 데이터는 전동기 파라미터 및 3상전류의 dq변환을 통

해 식(2)와 같이 계산하여 구할 수 있다.^[3]

$$T_{motor} = \frac{P}{2} \frac{3}{2} [\Phi i_{qe} + (L_d - L_q) i_{dc} i_{qe}] \quad (2)$$

2.2 고조파 특성 분석 결과

인버터 스위치 개방 고장에 대한 고조파 특성 분석은 속도별 기본 주파수의 크기를 기준으로 고조파 성분의 비율을 확인하였으며 그 결과는 그림 2, 그림 3과 같다.

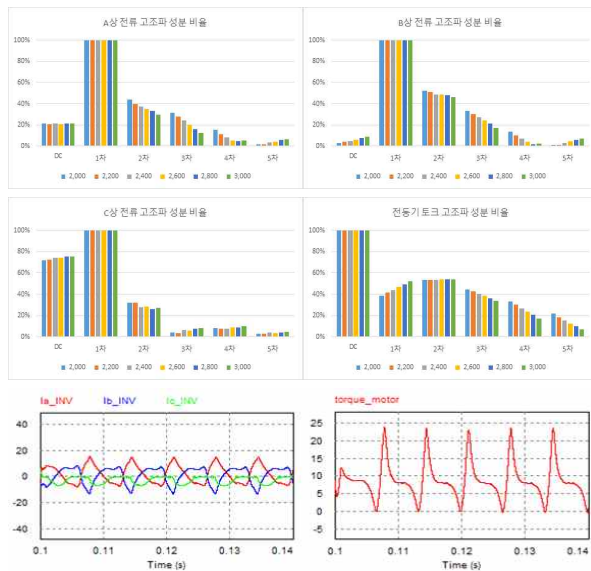


그림 2 C상 top, bottom 스위치 개방 고장 시 고조파 특성 및 시뮬레이션 결과

Fig. 2 Simulation result and harmonic characteristics for C phase Top, Bottom switch open fault

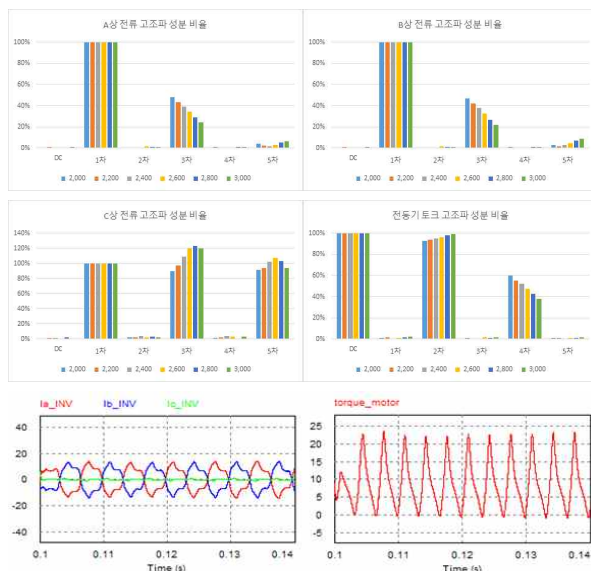


그림 3 C상 Arm 스위치 개방 고장 시 고조파 특성 및 시뮬레이션 결과

Fig. 3 Simulation result and harmonic characteristics for C phase Arm switch open fault

Top, Bottom 스위치 개방 고장의 경우, 전동기 속도와 관계 없이 3상전류에 DC 성분과 2차 고조파 성분 비율이 증가하고 전동기 토크는 기본과 성분 및 2차 고조파 성분의 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Arm 스위치 개방 고장의 경우, 고장이 발생한 상의 전류는 다이오드를 통해서만 흐르게 되고 3상전류에 3차 고조파 성분 비율이 증가하고 전동기 토크는 2차 고조파 성분 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성을 조합하여 그림 4와 같은 고장 진단 알고리즘을 구현하였다.

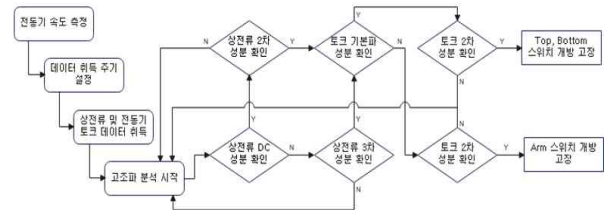


그림 4 인버터 스위치 개방 고장 진단 알고리즘

Fig. 4 Inverter switch open fault diagnosis algorithm

3. 결 론

본 논문은 매입형 영구자석 동기전동기 구동 시스템에서의 인버터 스위치 개방 고장 진단을 위해 PSIM 소프트웨어를 활용하여 인버터 스위치 개방 고장 모델링을 진행하고 고장 시 3상전류와 전동기 토크의 고조파 특성을 분석하여 두 가지 특성을 조합한 고장 진단 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 별도 추가되는 센서 없이 기존 시스템의 전류 데이터만을 사용하여 고장을 진단할 수 있다. 제안한 알고리즘을 기반으로 DSP28377D 프로세서를 활용하여 인버터 스위치 개방 고장 진단 시스템을 개발 중에 있다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “전기차 통합유지보수 기반구축사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과임(과제번호 : P0013681, 과제명 : 전기차 통합유지보수 플랫폼 기술개발)

참 고 문 헌

- [1] Dong-Uk Choi, “A Diagnosis Scheme of Switching Devices under Open Fault in Inverter-Fed Interior permanent Magnet Synchronous Motor Drive”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical installation Engineers, Vol. 26, No. 3, pp. 61-68, 2012.
- [2] Kyeong-Hwa Kim, “A Fault Diagnosis Technique of an Inverter-fed PMSM under Winding Shorted Turn and Inverter Switch Open Fault”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical installation Engineers, Vol. 24, No. 5, pp. 94-105, 2010.
- [3] 김상훈, “모터제어 제 4판”, 북두출판사, 2022.