

비대칭 6상 영구자석 동기 전동기의 정지 좌표계 DQ축 전류를 이용한 스위치 개방 고장 검출 기법

Algorithm for Switch Open Fault Detection of Asymmetric 6-phase PMSM Based on Stationary Reference Frame dq-axis Currents

이 원 석*, 김 한 일*, 황 선 환*★, 이 기 창**, 박 종 원***

Won-Seok Lee*, Han-Eol Kim*, Seon-Hwan Hwang*★, Ki-Chang Lee, Jong-Won Park***

Abstract

This paper proposes the detection algorithm for switch open fault of asymmetric 6-phase PMSM based on stationary reference frame dq-axis currents. In this paper, target motor has an asymmetric structure in which two upper three windings have an electrical phase difference of 30° and a neutral point is separated. As a result, dual 3-phase PWM inverters and the detection techniques due to open failures of switch are definitely required. In this paper, the dual dq-axis current control method is used for driving the asymmetric 6-phase PMSM and the open fault switch should be detected by using variable all pass filter and low pass filter in order to detect the current amplitude. The effectiveness and usefulness of the proposed method is verified by several experiments.

요 약

본 논문에서는 정지 좌표계 dq-축 전류를 기반으로 하는 비대칭 6상 PMSM의 스위치 개방 고장 검출 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서의 해당 모터는 2개의 3상 권선이 30° 의 전기적 위상차를 갖고 중성점이 분리된 비대칭 구조를 갖는다. 따라서 듀얼 3상 PWM 인버터와 스위치 개방 고장으로 인한 검출기법이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 비대칭 6상 PMSM을 구동하기 위해 듀얼 dq축 전류 제어 방식을 사용하며 전역 통과 필터와 저역 통과 필터를 사용해 전류 변동을 감지하여 개방 고장이 발생한 스위치를 검출하는 방식을 제안한다. 제안한 방법의 효과와 유용성은 여러 실험을 통해 검증하였다.

Key words : Asymmetric 6-phase PMSM, Open Switch, Fault Detection, Stationary Reference Frame dq-axis Currents, VAPF(Variable All Pass Filter)

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

** Electric Machine and Drives Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute

*** R&D Center, GMB Korea Cooperation

★ Corresponding author

E-mail : seonhwan@kyungnam.ac.kr, Tel : +82-55-249-2744

※ Acknowledgment

This research was supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) and Unmanned Vehicle Advanced Research Center(UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea(2020M3C1C1A01086541)

Manuscript received Jan. 28, 2022; revised Mar. 21, 2022; accepted Apr. 25, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

다상 영구자석 동기 전동기는 고출력 및 고효율, 토크 맥동 저감 등의 장점으로 인해 다양한 산업 분야에 확대 적용되고 있다. 특히 항공, 자동차, 선박, 방산 등의 산업 분야에서는 전동기 구동 시스템의 고출력과 고효율 특성 뿐만 아니라 높은 신뢰성과 안정성이 필요로 하기에 고장 분석 및 검출과 고장 허용 운전에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다[1]-[4].

일반적인 전동기 구동 시스템에서 발생하는 고장 유형은 직류단 캐패시터, 스위치, 위치 및 전류센서 등으로 구분할 수 있으며 특히 전력변환을 수행하는 스위치는 스위칭 동작에 따른 열과 전기적/기계적 스트레스로 인해 고장 발생 확률이 높다[5]. 스위치는 단락 고장 시 구동 시스템에 과전류가 발생하여 별도의 하드웨어를 이용하여 고장 감지와 회로 분리를 하는 것이 일반적이며, 개방 고장은 출력 전류의 왜곡으로 인해 구동 시스템의 성능과 효율이 저하되고 주변 시스템에 추가적인 고장을 야기할 수 있기에 스위치의 개방 고장에 대한 검출과 진단 알고리즘이 필요하다[4]-[6].

6상 전동기는 2조의 3상 권선이 60°의 위상차를 가져 제어가 용이하지만 6고조파로 맥동하는 토크 맥동이 존재하는 대칭 6상 영구자석 동기 전동기와 30°의 위상차를 통해 6고조파의 토크 맥동 저감 효과를 가지는 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기로 나뉜다. 본 논문은 토크 맥동 저감을 위하여 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기로 설계되었다. 또한, 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기의 전류 제어를 위해 동기 좌표계 듀얼 dq축 전류 제어를 적용하였고 고정자 전류와 정자 좌표계 dq축 전류 정보를 토대로 정규화된 전류신호를 기준으로 가변속 운전에 따른 한 풀의 스위치 개방 고장 여부를 판단할 수 있는 기법을 제안한다. 제안된 기법의 타당성은 다수의 실험을 통해 검증하였다.

II. 스위치 개방 고장 특성 분석

앞서 언급했듯이 인버터 시스템에서 야기되는 스위치의 고장은 단락과 개방 고장으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기를 구동하기 위하여 듀얼 3상 인버터를 적용하였다. 한 풀의 스위치 개방 고장은 게이팅 신호의 온/오프 신호를 개방 고장 모드로 제어하여 해당되는 풀의 고장을 모의하고 특성을 분석하였다.

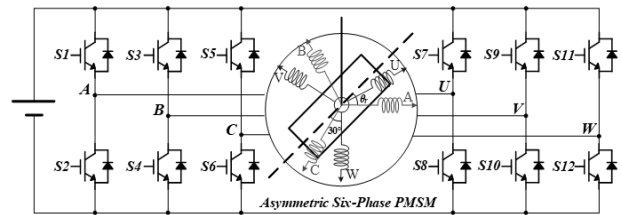


Fig. 1. Dual PWM inverter configuration of asymmetric 6-phase PMSM.

그림 1. 비대칭 6상 PMSM의 듀얼 PWM인버터 구성

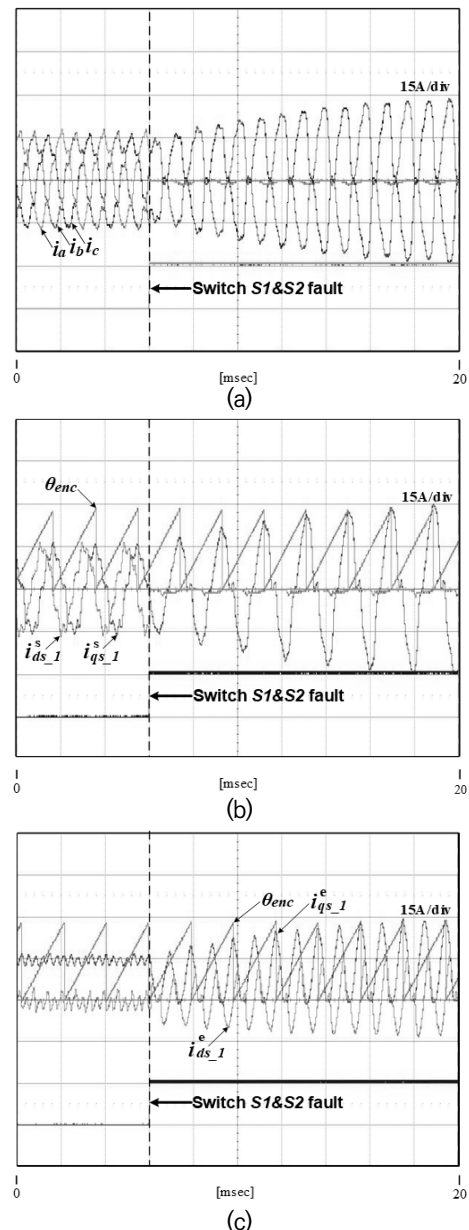


Fig. 2. Currents characteristics according to open fault. (a) Phase currents. (b) Stationary reference frame dq-axis currents. (c) Synchronous reference frame dq-axis currents.

그림 2. 스위치 개방 고장에 따른 전류 특성. (a) 상전류 (b) 정자좌표계 d-q축 전류 (c) 동기좌표계 d-q축 전류

듀얼 3상 인버터 시스템에서 A상 스위치 개방고장 발생 시 상전류는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{a_open}^s &= 0 \\ i_{b_open}^s &= -i_{c_open}^s \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)의 상전류를 정지 좌표계 dq축 전류로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{ds_open}^s &= 0 \\ i_{qs_open}^s &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{b_open}^s - i_{c_open}^s) \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}}I_m \cos\theta_e \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, I_m 은 상전류의 최댓값, θ_e 는 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기의 회전자 위치각이다.

정지 좌표계 dq축 전류와 위치각 θ_e 를 이용하여 좌표 변환하면 아래와 같이 동기 좌표계 dq축 전류로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{ds_open}^e &= \frac{2}{\sqrt{3}}I_m \cos\theta_e \sin\theta_e = \frac{1}{\sqrt{3}}I_m \sin 2\theta_e \\ i_{qs_open}^e &= \frac{2}{\sqrt{3}}I_m \cos^2\theta_e = \frac{1}{\sqrt{3}}I_m + \frac{1}{\sqrt{3}}I_m \cos 2\theta_e \end{aligned} \quad (3)$$

그림 2는 한 폴인 A상 스위치의 개방 고장 발생 시 상전류, 정지 및 동기 좌표계 dq축 전류 파형이다. 개방 고장에 따른 전류 특성을 볼 수 있으며 식 (3)에서 볼 수 있듯이 동기 좌표계 dq축 전류에 $\sin 2\theta_e$ 및 $\cos 2\theta_e$ 로 전기적 운전 주파수의 2배 맥동이 나타남을 확인할 수 있다.

III. 제안한 스위치 개방 고장 검출 기법

본 논문에서는 정지 좌표계 dq축 전류와 고정자 전류의 정보를 이용하여 한 폴의 스위치 개방고장을 진단하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 별도의 하드웨어를 추가하지 않고 전류 정보를 활용하여 비교적 간단하고 가변속 운전에서도 개방 고장을 검출할 수 있다. 앞서 언급했듯이 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기를 구동하기 위해 듀얼 3상 인버터를 사용하며 정상상태일 때 독립된 3상 인버터의 상전류를 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{as} &= -I_m \sin\theta_e t \\ i_{bs} &= -I_m \sin(\theta_e t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{cs} &= -I_m \sin(\theta_e t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 상전류를 정지 좌표계 dq축 전류인 i_{ds}^s 와 i_{qs}^s 를 통해 식 (5)와 같이 최댓값을 구한 후 식 (6)과 같이 정규화된 상전류를 얻을 수 있다.

$$I_m = \sqrt{(i_{ds}^s)^2 + (i_{qs}^s)^2} \quad (5)$$

$$i_{as_N} = -\sin\theta_e t \quad (6)$$

$$i_{bs_N} = -\sin(\theta_e t - \frac{2\pi}{3})$$

$$i_{cs_N} = -\sin(\theta_e t + \frac{2\pi}{3})$$

정규화된 상전류는 과도상태에서도 스위치 개방 고장 검출이 가능한 전류신호를 만들기 위한 기반이 된다.

그림 3은 제안한 한 폴의 스위치 개방 고장 진단 알고리즘의 블록도이다. 스위치의 개방 고장을 검출하기 위해 전류의 크기가 1인 정규화된 상전류를 속도 가변형 전역통과필터(Variable All Pass Filter, VAPF)를 이용하여 90°의 위상차가 가상의 정현파를 만들어 정규화된 상전류의 크기를 구한 뒤 고주파를 제거하기 위한 저역 통과필터(Low Pass Filter, LPF)를 활용하여 정규화된 검출 전류신호를 생성한다. 그림 4는 한 폴의 스위치 개방 고장 진단 알고리즘의 동작 흐름도이다. 정규화된 검출 전류신호와 검출 기준이 되는 기준을 비교하여 한 폴의 스위치 개방 고장을 검출할 수 있다.

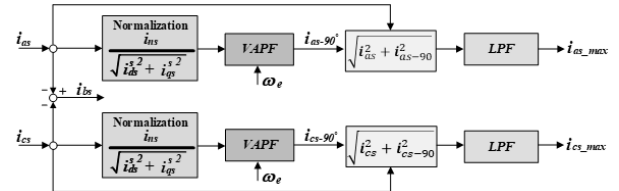


Fig. 3. Block diagram of proposed fault detection based on normalization of stationary reference frame dq-axis currents.

그림 3. 제안된 정지좌표계 d-q축 전류 정규화 기반 고장 검출 블록도

이때, 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기와 듀얼 인버터 시스템에서 하나의 속도제어기와 독립된 2개의 전류 제어기를 사용함에 따라 고장 상황 발생 시에도 독립된 3상으로 구동하며 속도 지령을 추종하고 있고, 고장이 발생한 3상은 한 상의 게이트 신호가 차단된 상태로 좌표변환을 하게 된다. 이와 동시에 부하 조건 및 속도 등의 조건에 따라 개방 고장 발생 시 전류 크기의 변동이 존재한다. 조건의 변동에도 일정한 고장 검출을 위하여 정규화를 진행하였으며, 검출 속도와 정확도를 중점으로 다수의 실험을 통해 Δ_1 및 Δ_2 의 값을 선정하였다.

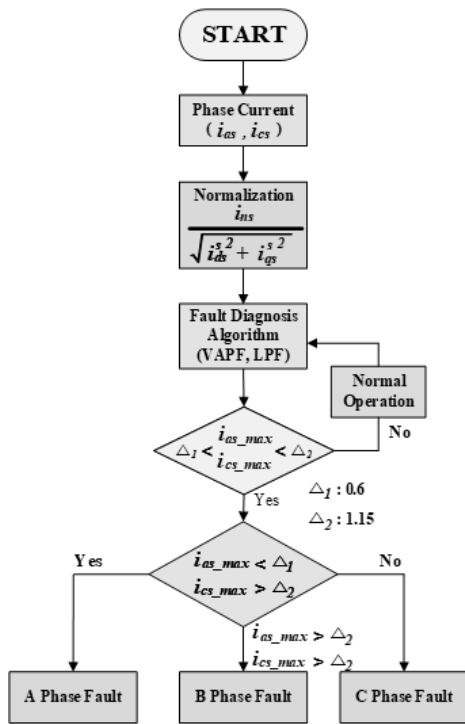


Fig. 4. Flow chart of the proposed fault detection.
그림 4. 제안된 고장 검출 플로우차트

IV. 실험

중성점이 분리된 2조의 3상 권선이 전기적으로 30° 위상차를 갖는 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기와 듀얼 dq축 전류 제어 기법을 기반한 구동시스템을 그림 5와 같이 구성하여 프롭 다이나모 실험을 진행하였다. 표 1은 비대칭 6상 PMSM과 구동 시스템의 주요 사양을 보여주고 있다. 그림 6(a)는 1,500 [rpm]에서의 A상 개방 고장을 검출한 실험 결과이다.

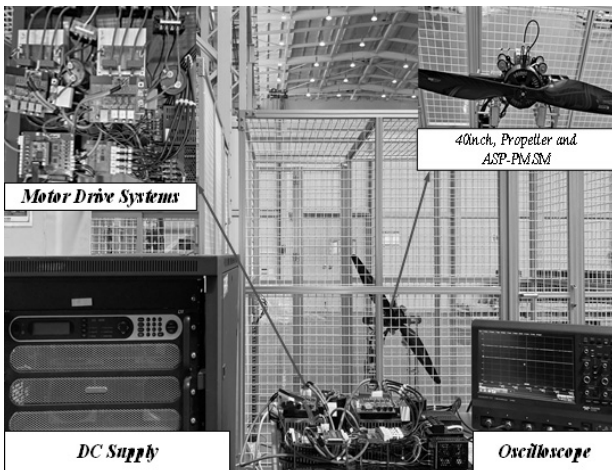


Fig. 5. Experimental setup.
그림 5. 시험 장치

개방 고장 발생 시 A상의 스위치는 환류 다이오드를 통해서만 전류 흐름이 형성되어 다음과 같은 전류 특성을 볼 수 있으며 상전류 B상과 C상은 크기가 커지며 180°의 위상차를 확인할 수 있다. 이러한 전류 특성으로 인해 $i_{as_max} < \Delta_1$ 과 $i_{cs_max} > \Delta_2$ 라는 기준을 만족하면 A상 개방 고장을 검출할 수 있다.

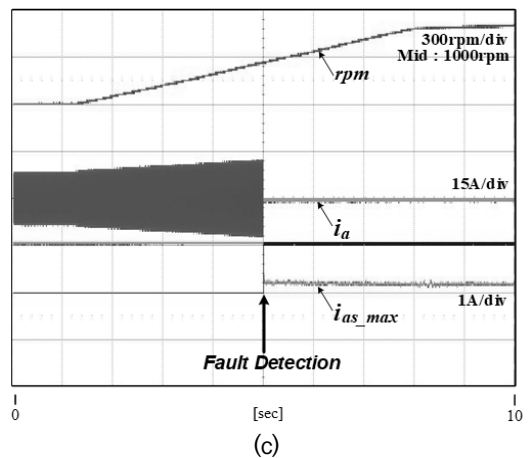
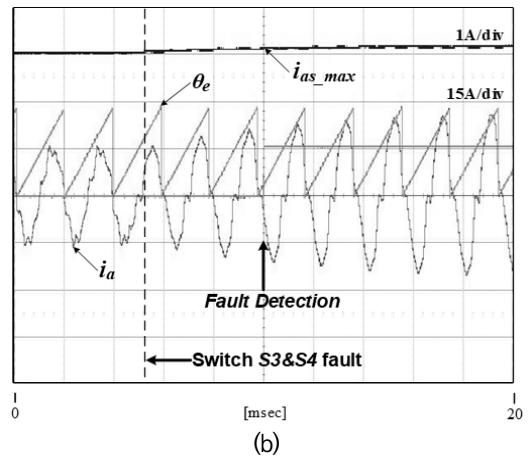
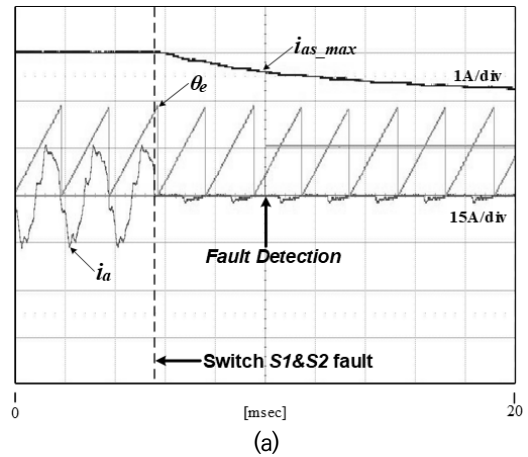


Fig. 6. Experimental results. (a) A-Phase switch open fault. (b) B-Phase switch open fault. (c) A-Phase switch open fault on transients of variable speed.
그림 6. 실험 결과. (a) A상 스위치 개방 고장 (b) B상 스위치 개방 고장 (c) 속도 가변 중 A상 개방 고장

Table 1. Specifications Of Asymmetric 6-Phase Pmsm And Drive System.

표 1. 비대칭 6상 PMSM 및 제어기 시스템 사양

Asymmetric 6-phase PMSM		Motor drive systems	
Poles	42	Switching Frequency	20[kHz]
Propeller	40[inch]	V_{dc}	48[V]
Stator Resistance	0.01845[Ω]	Switching Device [PM300CG1C065]	650[V]/300[A]
Stator Inductance	0.0125[mH]	Capacitor	450[V]/2200[μF]
back-EMF Constant	7.7654 [V/krpm]	Current Sensor [LA-100P]	150[A]

C상 개방 고장 발생 시 앞서 언급한 스위치 개방 고장 발생 시 같은 전류 특성으로 $i_{as_max} > \Delta_1$ 과 $i_{cs_max} < \Delta_2$ 라는 조건을 통해 고장 검출할 수 있다. B상 개방 고장 일 경우 개방 고장이 발생하지 않은 상전류가 전류의 크기가 커지는 특성을 이용하여 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이 $i_{as_max} > \Delta_1$ 과 $i_{cs_max} > \Delta_2$ 라는 조건을 만족하면 B상 개방 고장을 검출할 수 있다. 그림 6(c)는 1,000 [rpm]에서 1,500 [rpm]으로 가변속하는 과도상태일 경우의 A상 개방 고장을 검출한 실험결과이다. 속도가 가변하는 과도상태에서도 정규화된 전류 신호를 통해 고장 검출이 가능함을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 비대칭 6상 영구자석 동기 전동기의 한 폴의 스위치 개방 고장 검출 기법을 제안하였다. 제안한 개방 고장 검출 기법은 정지 좌표계 dq축 전류와 고정자 전류 정보를 이용하여 정규화시키고 속도 가변 전역통과 필터(VAPF), 저역통과필터(LPF)를 통해 정규화된 검출 전류신호를 가공한다. 정규화된 검출 전류신호 i_{as_max} , i_{cs_max} 와 검출 기준인 Δ_s 를 비교하여 한 폴의 스위치 개방 고장 진단할 수 있음을 확인하였다. 또한, 추가적인 하드웨어 없이 비교적 간단하게 정상 및 과도상태에서도 빠른 검출이 가능하다는 특징이 있다. 향후 스위치 개방 고장 진단 알고리즘을 확장하여 개별 스위치 개방 고장 시 운전 특성을 분석하고 추가적인 고장 진단 및 허용 운전 알고리즘을 연구하고자 한다.

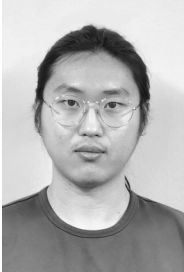
References

- [1] Y. Hu, Z. Q. Zhu, and M. Odavic, "Comparison of two-individual current control for dual three-phase PMSM," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.53, No.5, pp.4483-4492, 2017. DOI: 10.1109/TIA.2017.2703682
- [2] R. Xiuming, Y. Bingchuan, and H. Hai, "High-power multi-phase permanent magnet (PM) propulsion motor," *Conf. Electric Machines and Systems, ICEMS*, pp.835-837, 2001. DOI: 10.1109/ICEMS.2001.971806
- [3] D. Kasta and B. K. Bose, "Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.30, No.4, pp.1028-1038, 1994. DOI: 10.1109/28.297920
- [4] A. Galassini, A. Costabeber, M. Degano, C. Gerada, A. Tassarolo, and S. Castellan, "Distributed current control for multi-three phase synchronous machines in fault conditions," *Conf. Electric Machines, ICEM*, pp.1036-1042, 2016. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732653
- [5] H. Oh, B. Han, P. Mcclukay, C. Han and B. D. Youn, "Physics-of-failure, condition monitoring and prognostics of insulated gate bipolar transistor modules," *IEEE Transactions on Power Electron*, Vol.30, No.5, pp.2413-2426, 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2346485
- [6] J. Zhu, N. Ertugrul and W. L. Soong, "Detection and remediation of switch faults on a fault tolerant permanent magnet motor drive with redundancy," *Conf. Industrial Electronics and Applications*, Vol.24, pp.96-101, 2007. DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318377
- [7] R. de Araujo Riveiro, C. Jacobina, E. Cabral da Silva and A. Li, ma, "Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.18, No.2, pp.587-593, 2003. DOI: 10.1109/TPEL.2003.809351

BIOGRAPHY

Won-Seok Lee (Member)

2020 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
 2020~2022 : MS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
 2022~present : Researcher, R&D Center for GMB Korea Cooperation.

Han-Eol Kim (Member)

2020 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
 2020~Present : MS Course in Electrical Engineering, Kyungnam University.

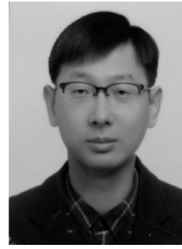
Seon-Hwan Hwang (Member)

2004 : B.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
 2006 : M.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2011 : Ph.D. degree in Electrical Engineering, Pusan National University

2011~2012 : Postdoctoral Researcher, Center for Advanced Power Systems(CAPS), Florida State University, Tallahassee, FL, USA.

2012~Present : Professor in Department of Electrical Engineering, Kyungnam University.

Ki-Chang Lee (Member)

1998: B.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2000 : M.S. degree in Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology.

2014 : Ph.D. degree in School of Mechanical Engineering, Pusan National University.

2000~Present : works in Korea Electro- technology Research Institute (KERI).

2015~Present : Principal Researcher, Unmanned Vehicle Electric Propulsion Team Leader in KERI

Jong-Won Park (Member)

2001 : B.S. degree in Control and Measurement Engineering, Pukyong National University.

2003 : M.S. degree in Mechanical Engineering, Pukyong National University.

2003~2005 : Researcher, R&D Center for KAERI.

2005~2008 : Researcher, R&D Center for Hyoseong Electric Cooperation.

2008~Present : Researcher, R&D Center for GMB Korea Cooperation.