

# 이동수요 맞춤형 고출력 전기구동장치 개발 다중화 드라이브를 갖는 다상 전동기의 고장허용운전 기법 개발

1세부 : 한국전기연구원

1세부위탁 : 경남대학교

2024. 09. 27

# 순서

---

1. 과제 개요

2. 2차년도(2024년) 연구개발 실적

3. 3차년도(2025년) 연구개발 계획



# Chapter 1

## 과제 개요

## 연구개발 목표

### » 최종목표 : 다상 전동기 구동 및 고장허용운전 기술 개발

단계	연차	연구목표
1단계	1차년	다상 전동기 시뮬레이션 모델링 및 드라이브 설계/제작
	2차년	다상 전동기 구동 알고리즘 및 상태진단 기술 개발
	3차년	다상 전동기 고장 허용운전 알고리즘 개발
2단계	4차년	다상 전동기 운전 효율 최적 알고리즘 개발
	5차년	HILS 기반 다중화 드라이브 통합 운전 알고리즘 개발
	6차년	HILS 기반 다중화 드라이브 고장허용운전 알고리즘 개발
	7차년	PMS/EMS 통합 연동 시험 및 구동 성능 확립

## 연구개발 목표

### » 연구개발 목표

최종목표	o 다상 전동기 구동 및 고장 허용운전 기술 개발	
세부목표	1. HILS 기반 다중화 드라이브 최적 운전 알고리즘 개발 2. HILS 기반 다중화 드라이브 고장허용운전 기술 개발	
연차별목표	2단계 1 차년도 (2023)	① 다상 전동기의 효율 개선을 위한 제어 알고리즘 ② 인버터 운전 모드에 따른 손실 분석 ③ 다상 전동기 파라미터(역기전력, 고정자 저항/ 인덕턴스 등)에 따른 운전 특성 분석
	2단계 2 차년도 (2024)	① HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 통한 시험 체계 구축 및 검증 ② HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 기본 동작 특성 분석
	2단계 3 차년도 (2025)	① HILS 기반 다상 드라이브 상태 감시 및 고장 검출 알고리즘 개발 - 다상 전동기 운전 속도 및 위치 기반 고장 검출 - 다상 전동기 전류 기반 고장 검출 ② HILS 기반 다중화 드라이브 고장허용운전 알고리즘 개발 - 다상 전동기 상 전환 운전 - 다상 전동기 고장 상에 따른 속도 및 전류 제어
	2단계 4 차년도 (2026)	① PMS/ EMS 통합 연동 시험 및 구동 성능 검증

## Chapter 2

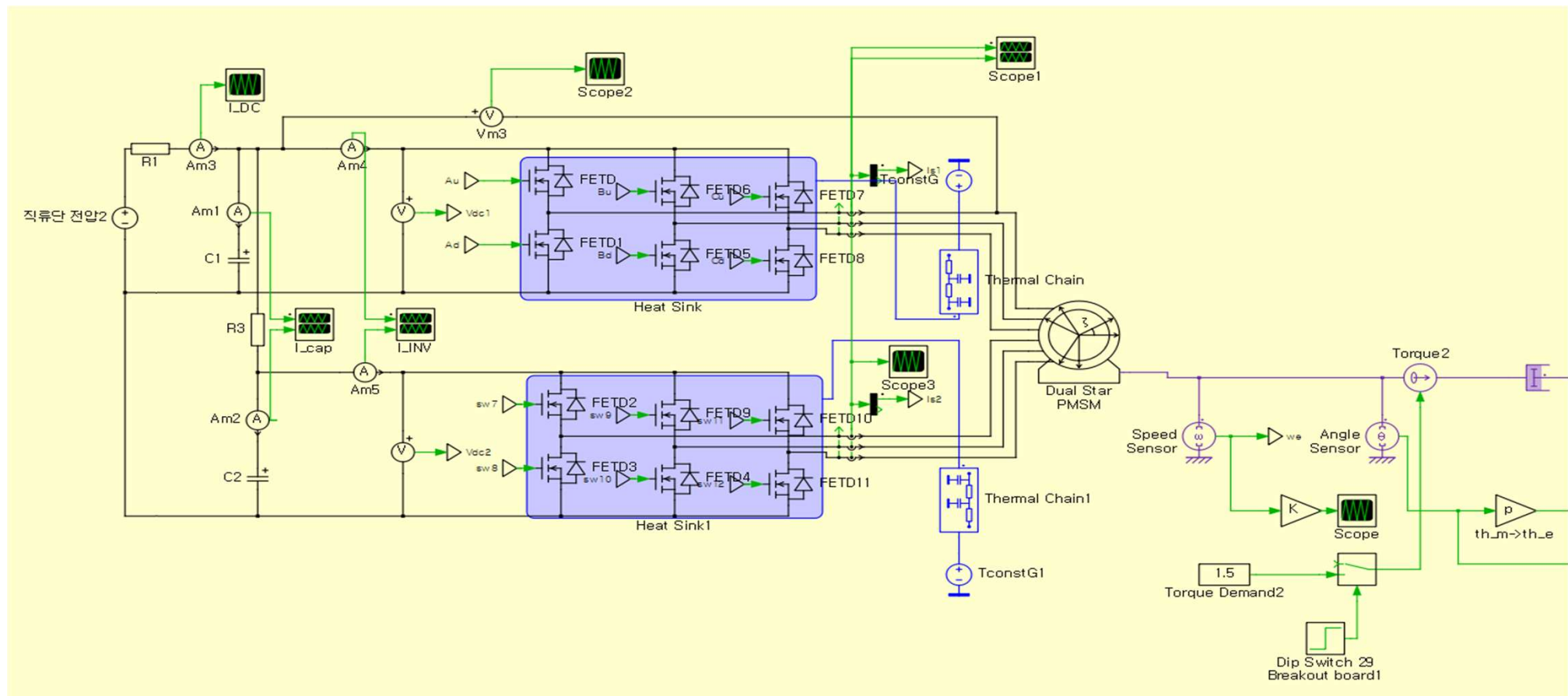
# 2차년도(2024년) 연구개발 실적

## 추진내용 및 연구개발 결과

### » 2차년도 목표 : HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 통합 운전 알고리즘 개발

- HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 통합 시험 체계 구축 및 검증
  - HILS 구현을 위한 디지털 시뮬레이션 모델 구성

- 스위칭 주파수
  - 20 [kHz]
- 전류제어기 Sampling time
  - $1/(20e^3)$  [s]
- 인버터부 구성
  - 3상 인버터 (2 Set)
  - 속도 제어기 Sampling time
    - $10/(20e^3)$  [s]
- 비대칭 6상 모터
  - 입력 DC 전압
    - 48 [V]



[PLECS를 이용한 듀얼 인버터 모델 구현]

## 추진내용 및 연구개발 결과

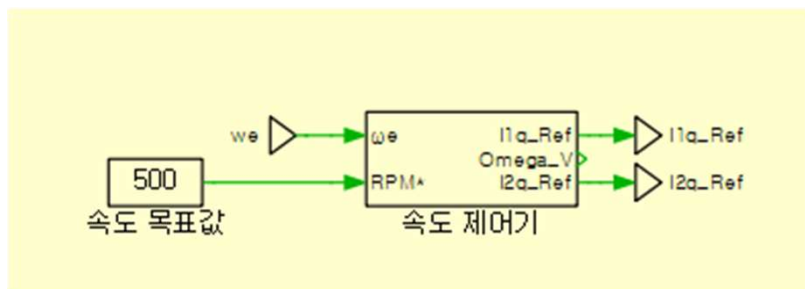
### » 2차년도 목표 : HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 통합 운전 알고리즘 개발

- HILS 기반 다중화 드라이브 통합 시험 체계 구축 및 검증

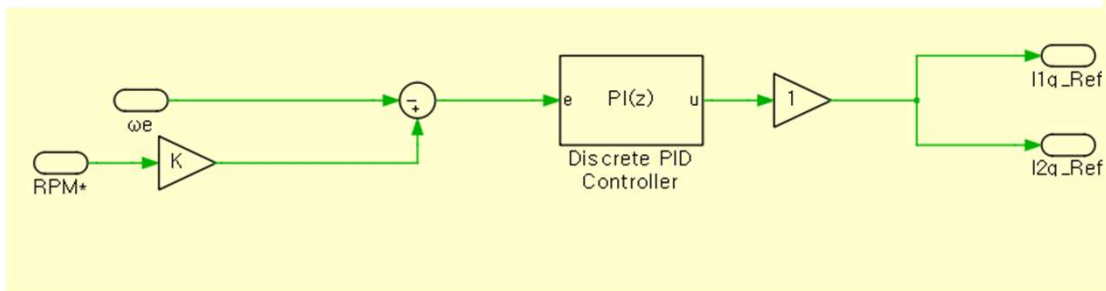
#### • 제어부

##### ▶ 제어부 구성

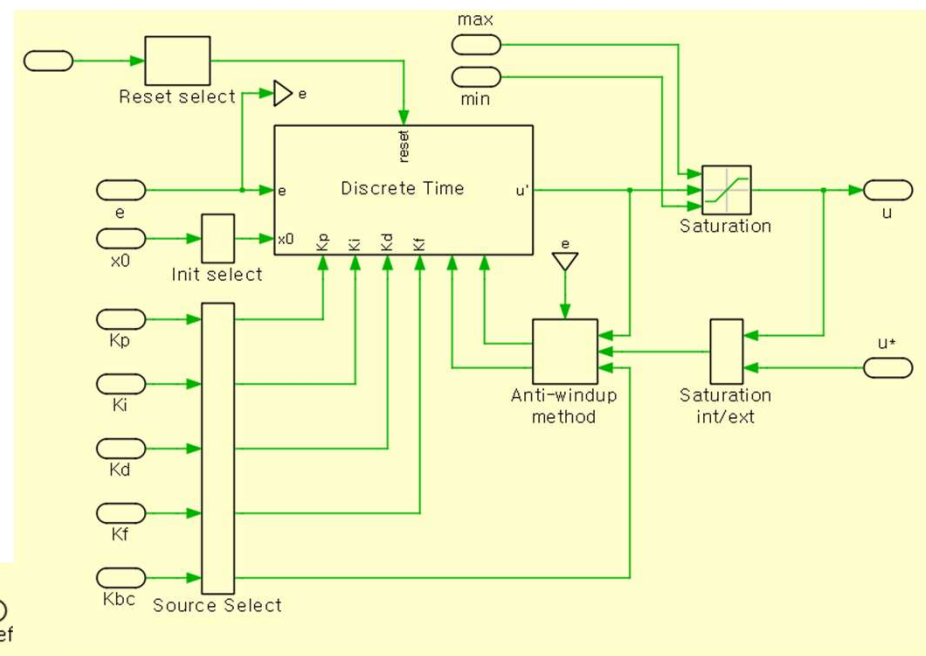
- 속도 제어기



- PI제어기 사용



- PI제어기 내부





# 추진내용 및 연구개발 결과

## » 2차년도 목표 : HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 통합 운전 알고리즘 개발

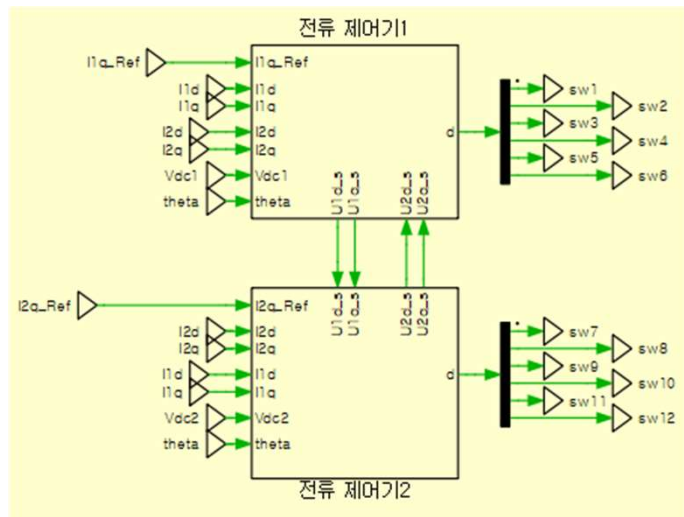
- HILS 기반 다중화 드라이브 통합 시험 체계 구축 및 검증

### 제어부

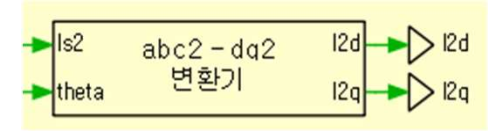
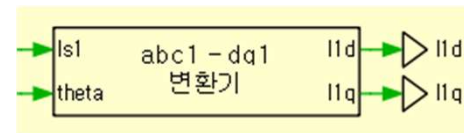
#### ▶ 제어부 구성

- PWM Generator (2 Set)
- 듀얼 dq축 전류 제어기 (2 Set)
- abc - dq 변환기 (2Set)

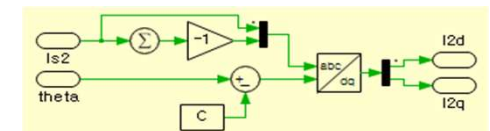
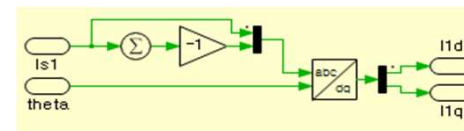
#### 전류 제어기 (2set)



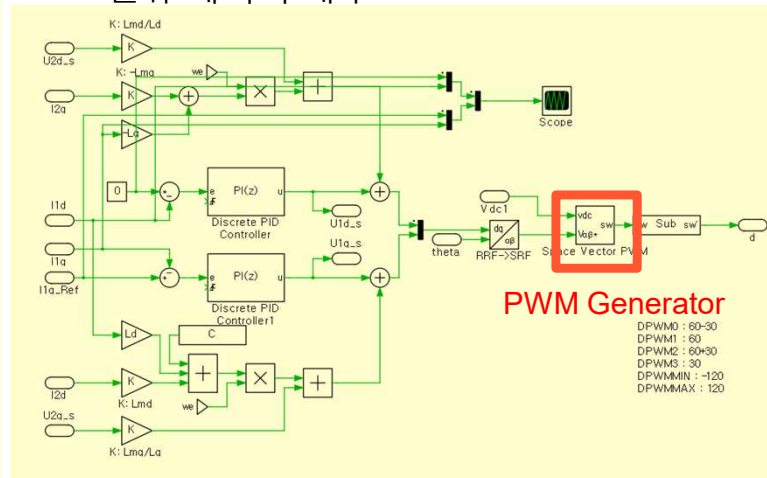
- abc - dq 변환기 (2 Set)



- abc - dq 변환기 내부 (2 Set)



#### 전류 제어기 내부



## 추진내용 및 연구개발 결과

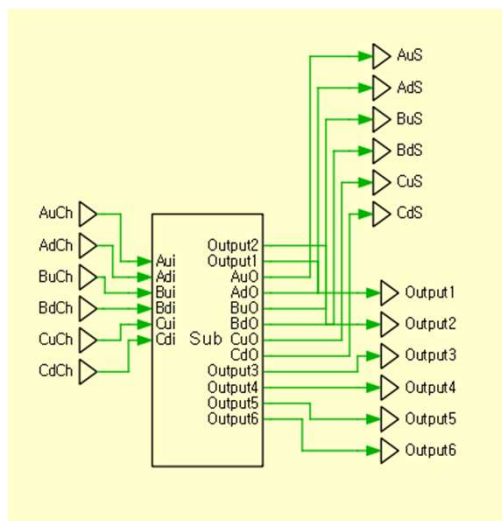
### » 2차년도 목표 : HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 통합 운전 알고리즘 개발

- HILS 기반 다중화 드라이브 통합 시험 체계 구축 및 검증

#### • 제어기 및 고장 관련 시뮬레이션 구성도

##### ▶ 고장 알고리즘 구성

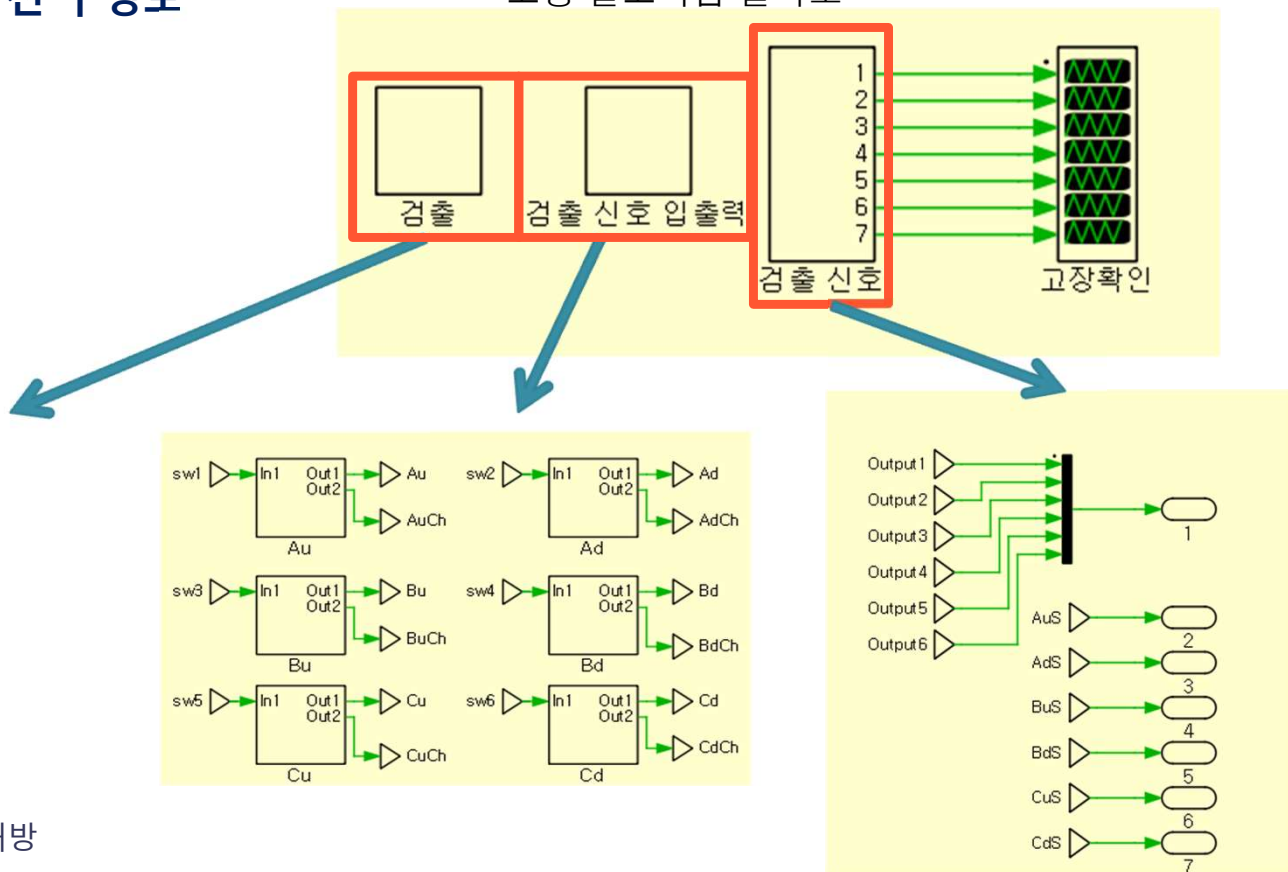
- 고장 알고리즘 블록도



##### ▶ 고장 발생 시간에 따른 고장 신호 검출

##### ▶ 고장 신호 검출 후 고장 부분 스위치 개방

- 고장 알고리즘 블록도

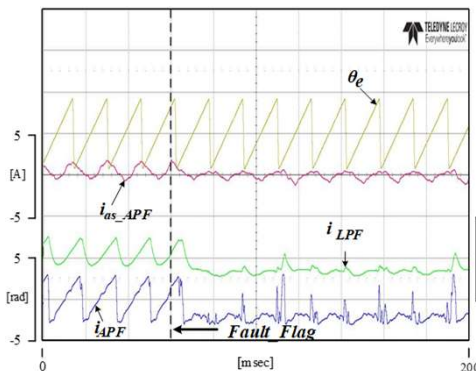
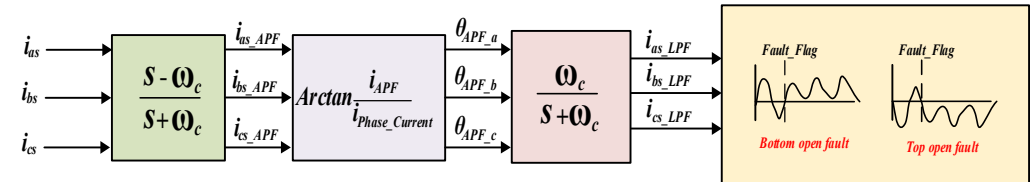


# 추진내용 및 연구개발 결과

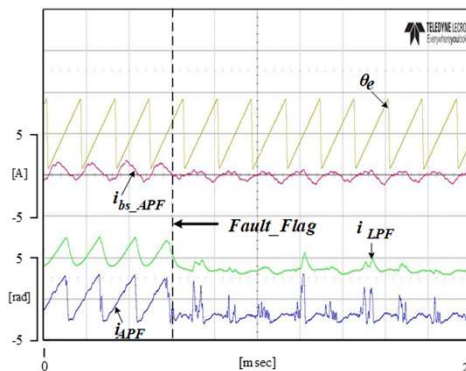
## » 2차년도 연구결과

### • 전역통과필터를 이용한 고장 검출 알고리즘

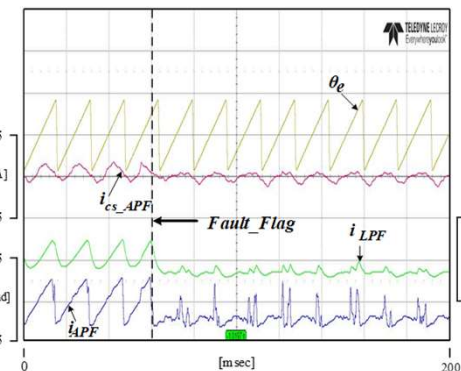
- 전역통과필터 통과 → 정지 좌표계와 유사하게 90도 위상차를 만들어줌
- 상전류와 전역통과필터를 통과한 전류값을  $\arctan$  → 위상각 형태로 변경
- 고장 발생 시 현상 분석 및 고장 검출 → 상/하단 고장 진단 가능
- 간단한 구조, 정상상태 및 과도상태에서도 비교적 빠른 검출 속도



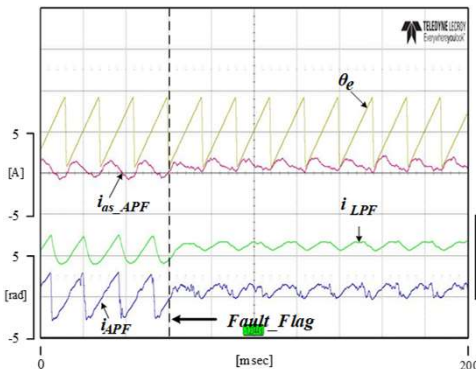
< A상 상단 개방 고장 >



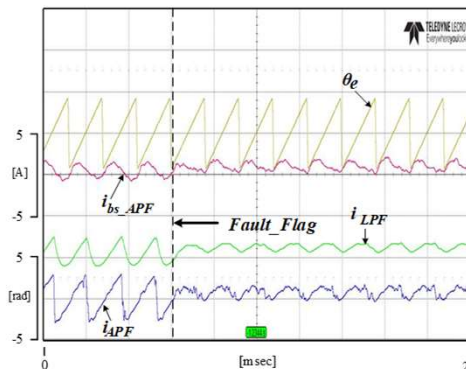
< B상 상단 개방 고장 >



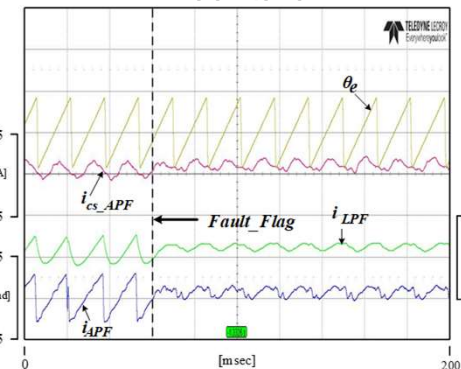
< C상 상단 개방 고장 >



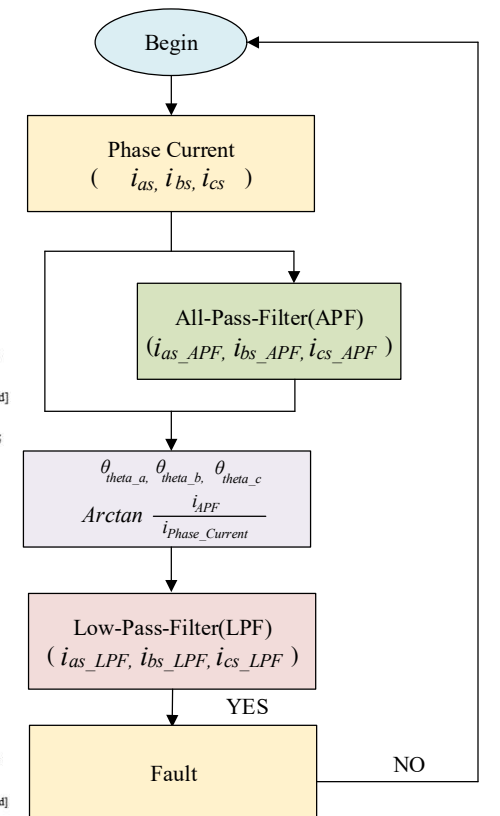
< A상 하단 개방 고장 >



< B상 하단 개방 고장 >



< C상 하단 개방 고장 >



[스위치 개방 고장 검출을 위한 블록도]

# 추진내용 및 연구개발 결과

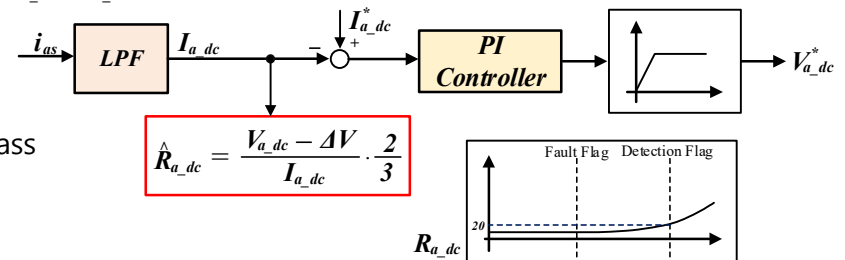
## » 2차년도 연구결과

### 직류 신호 주입 기반의 고정자 저항 추정을 이용한 고장 검출

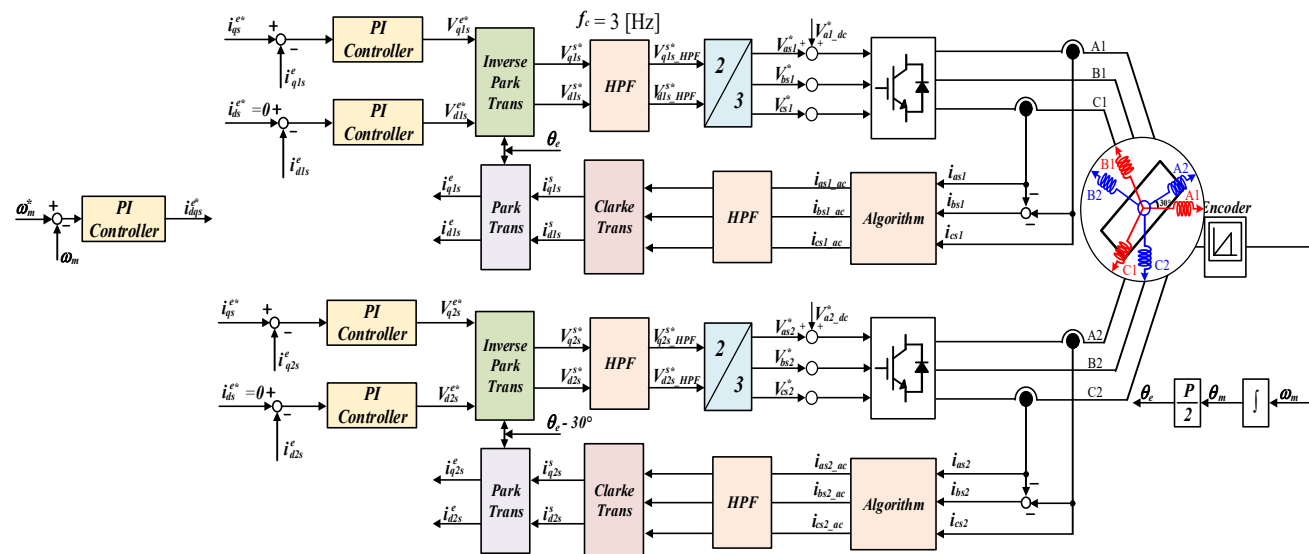
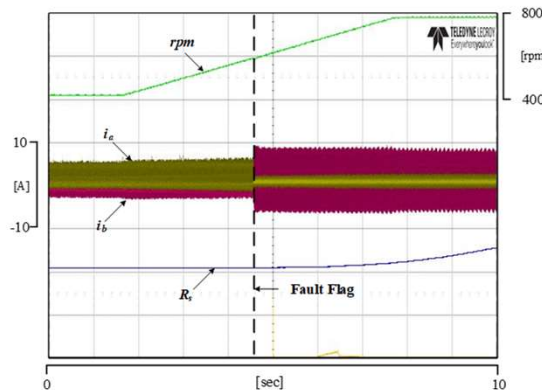
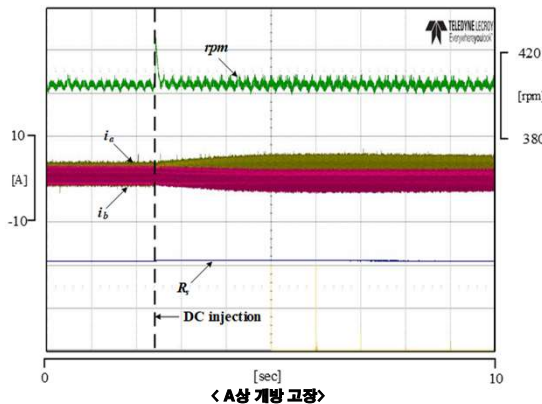
• 상전류 전압 지령에 별도의 DC전류 제어기를 이용 → DC전압 인가  $i_{as} = i_{as\_ac} + I_{a\_dc}$

• 위상 지연 및 크기 감쇄, DC 성분 제거 → HPF(High Pass Filter) 적용

• DC 전류 제어기의 DC 전압 지령에 영향주는 AC 성분 제거 → LPF(Low Pass Filter) 적용



• 개방고장 발생 시 고정자 저항 추정값 변동 → 고장 검출 진행



[스위치 개방 고장 검출을 위한 블록도]



## 추진내용 및 연구개발 결과

### » 2차년도 연구결과

- 10kW Pusher 전동기 4엽 프로펠장착 풍동시험 지원



## 연구개발 실적

## » 2차년도 학술적 성과

연차	구분	학회	논문명	비고
5차년도	학술대회	ECCE 2024	Switch Open Fault Detection of Asymmetric 6-phase PMSM Based on Normalized Stationary Reference Frame $dq$ -axis Currents	10월 개최 예정
			Switching Open Fault Detection Method for Asymmetric 6-phase Motor Drives Based on Stationary Reference Frame $dq$ -axis Currents	10월 개최 예정



# Switch Open Fault Detection of Asymmetric 6-phase PMSM Based on Normalized Stationary Reference Frame $dq$ -axis Currents

Myeongjae Kim  
Electrical Engineering  
Kyungnam University  
Changwon, Korea  
sofesimon@naver.com

Yeongyu Bae  
Electrical Engineering  
Kyungnam University  
Changwon, Korea  
godusrb135@naver.com

Soyoung Jun  
Electrical Engineering  
Kungnam University  
Changwon, Korea  
hdud0232@naver.com

Seonhwan Hwang  
Electrical Engineering  
Kyungnam University  
Changwon, Korea  
seonhwan@kyungnam.ac.kr

Kichang Lee  
Korea Electrotechnology Research  
Institute  
Changwon, Korea  
leekc@ketri.re.kr

Hui Li  
Electrical and Computer Engineering  
Florida State University  
Tallahassee, USA  
hli@caps.fsu.edu

**Abstract**—This paper proposes a switch-on/off fault detection algorithm for multiphase drive to detect asymmetric inductive phase permanent magnet synchronous motor based on the current measurement. The proposed algorithm is implemented in this paper has an asymmetric structure with 10° of electric phase difference in each of the three-phase windings and a neutral point reference. Compared to the existing three-phase fault detection algorithm, the proposed algorithm has a lower torque pulsation and torque ripple, and continuous output can be obtained through the role three-phase drive even in the event of a single phase failure. The proposed algorithm is applied to the application of switch opening failure detection and permanent operation technique, the switch-on/off fault detection algorithm of the multiphase drive topology proposed in this paper is applied to the fault detection of the motor phase current through the variable all pass filter and the low pass filter using the discrete stationary coordinate system of the proposed algorithm. The proposed algorithm is applied to the experimental verification was verified through various experiments.

## 1. INTRODUCTION

Multi-phase permanent magnet synchronous motors are widely applied to various industrial fields due to the high output, high efficiency, and reduced torque pulsation [1]-[3]. In particular, the high reliability and stability characteristics

of motor drive required in industries such as aviation, automobiles, ships, and defense. For this reason, studies on failure analysis, detection, and their tolerance operation of the drive system have been carried out. The drive system is commonly being constructed to enhance reliability and stability by making operation as a three-phase motor even in the case of a single-phase power supply.

The system can be classified into DC-link, power switches, position and current sensors. In particular, power switches are more likely to fail due to heat and electrical stress. Therefore, the failure analysis of the power switches is an important task. In this paper, the failure analysis of the power switches is performed to degrade the performance and efficiency of the drive such as vibration and noise due to distortion of the current. The proposed algorithm is based on the Fourier series algorithm in order to detect and analyze switching operation of the power switches. The proposed algorithm is an algorithm. In this paper, it is designed as an asymmetric  $\alpha$ -phase current distortion algorithm. The proposed algorithm is a torque pulsation. In addition, we propose a technique that can control the current of the asymmetric  $\alpha$ -phase PMSM by the proposed algorithm. The proposed algorithm is a coordinate system and determine whether the switching operation fails is due to variable speed behavior of the pole based on the proposed algorithm. The proposed algorithm is a stationary coordinate system. The validity of the proposed technique has been verified through the results of the

and transient conditions without additional hardware. In the full paper, the switch open failure diagnosis algorithm will be expanded to analyze the operating characteristics in case of individual switch open failures and to study additional failure diagnosis and allowable operation algorithms.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (NRF) (No. 2020R3A5A1A0100865412260832103340202). This research was supported by 'regional innovation mega project' program through the Korea Innovation Foundation funded by Ministry of Science and ICT (Project Number: 2023-DD-UP-0026).

## REFERENCES

- [illegible]

# Switching Open Fault Detection Method for Asymmetric 6-phase Motor Drives Based on Stationary Reference Frame $dq$ -axis Currents

Soyoung Jun  
Electrical Engineering  
Kyungnam University  
Changwon, Korea  
thdud0232@naver.com

Myeongjae Kim  
Electrical Engineering  
Kyungnam University  
Changwon, Korea  
sofasimon@naver.com

Seonhwan Hwang  
Electrical Engineering  
Kyungnam University  
Changwon, Korea  
seonhwan@kyungnam.ac.kr

Kichang Lee  
Korea Electrotechnology Research  
Institute  
Changwon, Korea  
leekc@keri.re.kr

Hui Li  
Electrical and Computer Engineering  
Florida State University  
Tallahassee, USA  
li@ecse.fsu.edu

**Abstract:** This paper proposes the switch open fault detection method of a permanent-magnet motor drive with dead-beat inverter based on the stationary reference frame  $d$ -axis current. In general, multi-motor motor drives have the operation characteristics such as high tolerance operation, lower phase current and torque ripple compared to conventional  $p$ -phase motor drive systems with the same output. In this paper, the fault-tolerance operation is analysed with the variable fault current and the stationary reference frame  $d$ -axis current are used for extracting the DC component in order to deal with the switch open fault of each phase. The proposed algorithm can easily implement and detect the switch open fault in a steady and a transient state. The effectiveness and usefulness of the proposed switch open fault detection is verified through several experiments by nine prototype benches.

## 1. INTRODUCTION

Recently, multi-phase drive systems have been expanded in various industries that require high reliability, such as electric vehicles, aerospace, and electric ships. The multi-phase drive system has advantages such as torque ripple and reduction of fault tolerance compared to conventional three-phase motors [1-3]. The multi-phase system configuration is widely used among multi-phase drive systems due to its modular three-phase structure and well-established three-phase topology [4]. Fig 1 shows the control block diagram of an asymmetric six-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM) including a dual dq-axis current controller. Basically, each three-phase stator winding has an electrically 30-degree phase shift. Since there is a mutual inductance component due to the phase difference between the two three-

phase windings, it is necessary to compensate for the mutual interference component due to the deterioration of the current dynamic characteristics [5-6]. However, the dual  $dq$ -axis current control method is characterized by the ease of designing the current controller and utilizing the synchronous coordinate system  $dq$ -axis current control technique of the existing three-phase AC motor. Therefore, the  $dq$ -axis current in the synchronous coordinate system of the six-phase PMSM must be controlled by applying a phase difference in the transformation matrix as shown in Fig. 1.

Generally, power switch failures can be classified into two types: short circuit and open [7-8]. In the event of a short circuit failure, a sharp increase in phase current immediately activates the overcurrent protection circuit and shuts down the system. Conversely, long-term operation under this fault condition without an open circuit fault being detected can increase current and voltage amplitudes, causing secondary damage to other functional switches [9-10]. This can lead to three-phase current imbalances, motor overheating, and even motor damage.

This paper proposes an open fault detection algorithm by applying the operating characteristics of the dq-axis current in the stationary coordinate system when each phase switch is open. In fact, the DC component inevitably occurs due to the disproportionate phase current caused by each phase switch open fault. As a result, the switch open fault can be detected by extracting the DC component based on the multiplication operation and the low-pass filter (LPF). The effectiveness of the proposed switch open fault algorithm is demonstrated through propeller benchmark experiments.

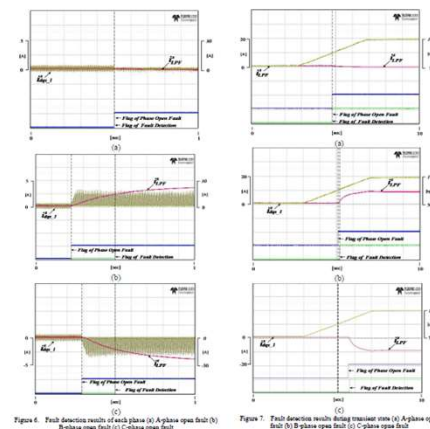


Figure 7. Fault detection results during transient state (a) A-phase open fault (b) B-phase open fault (c) C-phase open fault

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No.2020A3C1C1A0108654122608321-03840202). This research was supported by regional innovation mega project program through the Korea Innovation Foundation funded by Ministry of Science and ICT (Project Number: 2023-DD-UP-0026)

## Chapter 3

# 3차년도(2025년) 연구개발 계획

## 연구개발 목표

### » 2단계 연차별 연구 내용

1차년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다상 전동기의 효율 개선을 위한 제어 알고리즘</li> <li>• 인버터 운전 모드에 따른 손실 분석</li> <li>• 다상 전동기 파라미터(역기전력, 고정자 저항/인덕턴스 등)에 따른 운전 특성 분석</li> </ul>
2차년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 통합 시험 체계 구축 및 검증</li> <li>• HILS 적용을 위한 다중화 드라이브 기본 동작 특성 분석</li> </ul>
3차년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HILS 기반 다상 드라이브 상태 감시 및 고장 검출 알고리즘 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다상 전동기 운전 속도 및 위치 기반 고장검출</li> <li>- 다상 전동기 전류 기반 고장검출</li> </ul> </li> <li>• HILS 기반 다중화 드라이브 고장허용운전 알고리즘 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다상 전동기 상 전환 운전</li> <li>- 다상 전동기 고장 상에 따른 속도 및 전류 제어</li> </ul> </li> </ul>
4차년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PMS/EMS 통합 연동시험 및 구동 성능 검증</li> </ul>



# 연구개발 내용, 방법 및 일정

## » 3차년도 연구 계획

- 연구개발목표 : HILS 기반 다중화 드라이브 고장허용운전 알고리즘 개발

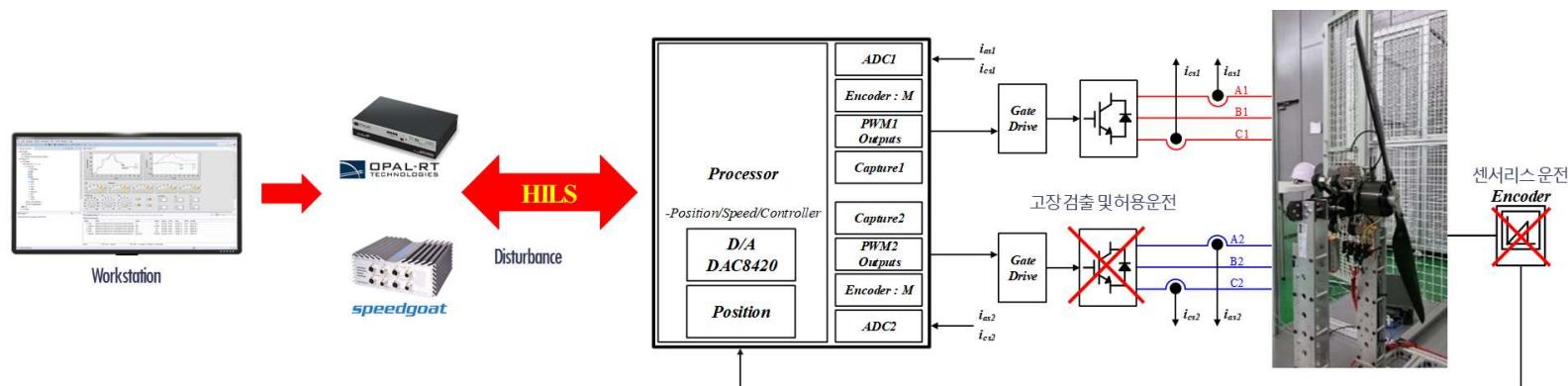
### ▶ 연구 내용

- 다중화 드라이브 상태 감시 및 고장 검출 알고리즘 개발

- 다상 전동기 운전 속도 및 위치 기반 고장 검출
- 다상 전동기 전류 기반 고장 검출 기법 적용

- 다중화 드라이브 고장허용운전 알고리즘 개발

- 다상 전동기 상 전환 운전
- 다상 전동기 고장 상에 따른 속도제어 및 전류분배 운전
- 위치센서 고장에 의한 센서리스 운전



[HILS 기반 다중화 드라이브 연동 블록도]

## 연구개발 내용, 방법 및 일정

## 3차년도 연구 추진 일정

[illegible]

## 결론

### » 활용방안 및 기대효과

- HILS 연동을 위한 시뮬레이션 구성
  - ▶ 듀얼 인버터, 전류 제어기, 속도 제어기 구성
  - ▶ HILS 연동 → 차년도 목표 도달을 위해 전기연구원과 협업
- 다상 구조 기반의 전기 추진 시스템 응용
  - ▶ 정상 및 비정상 조건에 대한 고장 검출 신호 및 기법의 다양화 → 기술 수준 향상
  - ▶ 듀얼 3상 구조 기반의 발전 시스템의 고장 검출의 다변화 → HILS 시스템 적용
  - ▶ 제안한 알고리즘의 허용 운전으로 발전

지금까지 경청해 주셔서  
**감사합니다**

