



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

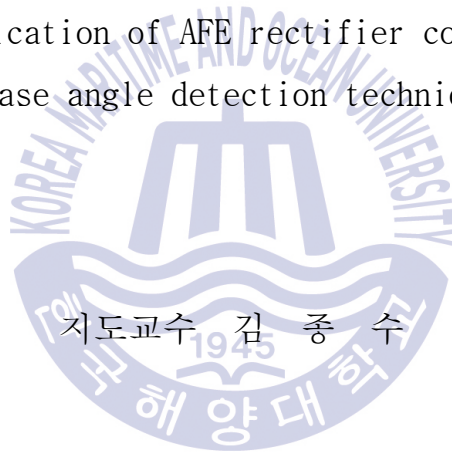
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

개선된 위상각 검출기법을 통한  
AFE 정류기 제어의 검증에 관한 연구

A Study on verification of AFE rectifier control by improved  
phase angle detection technique




2019年 2月

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

배영준

본 논문을 배영준의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 김 성 환 

위 원 : 김 중 수 

위 원 : 오 세 진 

2018년 12월 26일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 목 차 .....                      | i    |
| List of Tables .....           | iii  |
| List of Figures .....          | iv   |
| Abstract .....                 | vi   |
| 기호설명 .....                     | viii |
| <br>                           |      |
| 제 1 장 서론 .....                 | 1    |
| 1.1 연구배경 .....                 | 1    |
| 1.2 연구내용 .....                 | 2    |
| 1.3 논문의 구성 .....               | 3    |
| <br>                           |      |
| 제 2 장 선박의 전기추진시스템 .....        | 4    |
| 2.1 전기추진시스템의 개요 .....          | 4    |
| 2.2 전기추진시스템의 구성 .....          | 5    |
| 2.2.1 발전기와 배전시스템 .....         | 5    |
| 2.2.2 전력변환장치 .....             | 5    |
| 2.2.3 추진용전동기 .....             | 7    |
| <br>                           |      |
| 제 3 장 전기추진시스템의 정류기 .....       | 9    |
| 3.1 DFE 정류기 .....              | 9    |
| 3.1.1 DFE 정류기의 구성 .....        | 9    |
| 3.1.2 DFE 정류기의 직류출력과 고조파 ..... | 10   |
| 3.2 AFE 정류기 .....              | 11   |
| 3.2.1 AFE 정류기의 구성 .....        | 11   |
| 3.2.2 AFE 정류기의 전력변환 특성 .....   | 12   |
| <br>                           |      |
| 제 4 장 AFE 정류기의 제어 .....        | 15   |
| 4.1 AFE 정류기의 수학적 모델링 .....     | 15   |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2 AFE 정류기의 제어기 설계 .....                                     | 16        |
| <b>제 5 장 제안하는 AFE 정류기의 위상검출기법 .....</b>                       | <b>20</b> |
| 5.1 기존 AFE 정류기의 위상각 검출기법 .....                                | 20        |
| 5.2 제안하는 AFE 정류기의 위상각 검출기법 .....                              | 21        |
| <b>제 6 장 개선된 위상각 검출기법을 통한 AFE 정류기의 검증을 위한<br/>시뮬레이션 .....</b> | <b>24</b> |
| 6.1 기존 AFE 정류기의 위상각 검출기법 시뮬레이션 .....                          | 25        |
| 6.1.1 전원전압에 영점 노이즈가 발생하는 경우의 시뮬레이션 .....                      | 26        |
| 6.1.2 전원전압의 위상이 변이되는 경우의 시뮬레이션 .....                          | 27        |
| 6.1.3 전원전압에 고조파가 포함된 경우의 시뮬레이션 .....                          | 28        |
| 6.2 전원전압 위상각 검출기를 적용한 전기추진시스템의 시뮬레이션 .....                    | 29        |
| 6.2.1 전원전압에 영점 노이즈가 발생하는 경우의 시뮬레이션 .....                      | 30        |
| 6.1.2 전원전압의 위상이 변이되는 경우의 시뮬레이션 .....                          | 31        |
| 6.1.3 전원전압에 고조파가 포함된 경우의 시뮬레이션 .....                          | 32        |
| <b>제 7 장 결론 .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>참고문헌 .....</b>   | <b>34</b> |

## List of Tables

- Table 3.1** Voltage distortion limits
- Table 6.1** Ship speed parameters used in simulation
- Table 6.2** System parameters used in simulation



## List of Figures

- Fig 2.1 Block diagram of Electric Propulsion System
- Fig 2.2 Block diagram of DFE topology
- Fig 2.3 Block diagram of AFE topology
- Fig 3.1 Three phase full-wave diode rectifier
- Fig 3.2 Voltage output of DC link for three phase full-wave diode rectifier
- Fig 3.3 Circuit diagram of AFE rectifier
- Fig 3.4 Single phase model of AFE rectifier
- Fig 3.5 Power Factor = 1 (in phase)
- Fig 3.6 Power Factor = -1 (negative phase)
- Fig 4.1 Circuit diagram of AFE rectifier
- Fig 4.2 Transformation of stationary  $a, b, c$  axis to stationary  $\alpha - \beta$  axis
- Fig 4.3 Transformation of stationary  $\alpha - \beta$  axis to rotating  $d - q$  axis
- Fig 5.1 Block diagram of zero crossing
- Fig 5.2 Relationship between supply voltage and phase angle of zero crossing technique
- Fig 5.3 Block diagram of proposed Reference supply voltage phase angle controller
- Fig 5.4 Actual phase  $\theta =$  Error phase  $\hat{\theta}$
- Fig 5.5 Actual phase  $\theta <$  Error phase  $\hat{\theta}$
- Fig 5.6 Actual phase  $\theta >$  Error phase  $\hat{\theta}$
- Fig 5.7 Block diagram of proposed Reference supply voltage phase angle controller
- Fig 5.8 Coordinate transformation of input voltage
- Fig 5.9 Transformation of stationary  $\alpha - \beta$  axis to rotating  $d - q$  axis
- Fig 5.10 Block diagram for phase angle calculator of supply voltage

- Fig 6.1 Schematic diagram for electric propulsion system with traditional AFE rectified which comply with original phase angle detection.
- Fig 6.2 Simulation responses for step change of speed setting  
(Dead slow 100[rpm] -> Slow 200[rpm])
- Fig 6.3 Simulation responses for step change of speed setting  
(Slow 200[rpm] -> Half 300[rpm])
- Fig 6.4 Simulation responses for step change of speed setting  
(Half 300[rpm] -> Full 400[rpm])
- Fig 6.5 Simulation responses for step change of speed setting  
(Full 400[rpm] -> Nav. Full 500[rpm])
- Fig 6.6 Simulation responses for step change of speed setting  
(Nav.Full 500[rpm] -> Crash astern -500[rpm])
- Fig 6.7 Schematic diagram for electric propulsion system with proposed AFE rectified which comply with improved phase angle detection.
- Fig 6.8 Simulation responses for step change of speed setting  
(Dead Slow 100rpm] -> Slow 200[rpm])
- Fig 6.9 Simulation responses for step change of speed setting  
(Slow 200[rpm] -> Half 300[rpm])
- Fig 6.10 Simulation responses for step change of speed setting  
(Half 300[rpm] -> Full 400[rpm])
- Fig 6.11 Simulation responses for step change of speed setting  
(Full 400[rpm] -> Nav. full 500[rpm])
- Fig 6.12 Simulation responses for step change of speed setting  
(Nav.full 500[rpm] -> Crash astern -500[rpm])



# A Study on verification of AFE rectifier control by improved phase angle detection technique

Young-jun, Bae

Department of Marine Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The environmental factor such as sea depth, vessel draft, ship speed, wind makes the fluctuation of ship's electric propulsion power and also ship's generator voltage and current unstable. But those variation at input power source affect inaccurate detection of a phase angle which is the essential factor for controlling of AFE rectifier.

In this paper, the improved AFE rectifier by detecting phase angle do not obtain from input power source which seems to be unstable during ship's navigation but from identical three phase power source which is independent on ship's power network.

Consequently, the simulation demonstrated that improved reference speed of the propulsion motor upon change of speed order and the output waveform in the DC link of the improved AFE rectified.

**KEY WORDS:** AFE Rectifier AFE 정류기, Phase angle controller 위상각 제어기

# 개선된 위상각 검출기법을 통한 AFE 정류기 제어의 검증에 관한 연구

배 영 준

한국해양대학교 대학원  
기관시스템공학과

## 요 약

전기추진시스템을 적용한 선박의 경우에 수심, 흘수, 속도 및 바람 등의 주위 환경 변화에 의한 부하변화로 인해 발전기에서 출력되는 전압과 전류의 변동이 빈번하게 발생한다. 이러한 발전기 출력의 변동은 전기추진시스템의 AFE정류기를 제어하는데 중요한 요소인 전원전압의 위상각 검출에 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 선박에서 발생하는 다양한 상황으로 인해 발전기 출력 변동이 발생해도 AFE 정류기의 제어에 필요한 전원전압 위상각의 정확한 검출을 위해 제안하는 전원전압 위상각 제어기를 적용하였다. 제안하는 전원전압 위상각 제어기의 유효성을 입증하기 위하여 임의로 발전기의 출력전압에 고조파, 위상차, 영점 교차 등이 포함된 불규칙한 파형을 생성하여 위상각 검출기에 주입하였다. 발전기 출력전압의 불규칙한 변동에도 제안하는 전원전압 위상각 제어기에서 검출된 위상각이 기존의 위상각을 검출하는 방법으로 주로 사용되는 영점교차기법과 비교하여 현저하게 개선된 것을 시뮬레이션 결과를 통해 입증하였다.

**KEY WORDS:** AFE Rectifier AFE 정류기, Phase angle controller 위상각 제어기

## 기 호 설 명

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| $\alpha - \beta$       | 2축 정지좌표계                     |
| C                      | DC link 단 커패시터[F]            |
| $d - q$                | 2축 동기회전좌표계                   |
| $\delta$               | 상천이변압기의 상천이각                 |
| $e_a, e_b, e_c$        | $a, b, c$ 상 입력 전압[V]         |
| $e_\alpha, e_\beta$    | $\alpha - \beta$ 축 입력 전압[V]  |
| $e_d, e_q$             | $d - q$ 축 입력 전압[V]           |
| $e_{d-fb}, e_{q-fb}$   | 전류제어기의 피드백제어 출력              |
| $e_{d-ff^*}, e_{q-ff}$ | 전류제어기의 전향보상성분                |
| $e_s$                  | 입력 전압[V]                     |
| E                      | 교류 입력 상전압의 피크값[V]            |
| $f$                    | 전압, 전류, 자속 등의 물리량            |
| $f_{sw}$               | AFE 정류기의 스위칭 주파수             |
| $i_a, i_b, i_c$        | $a, b, c$ 상 교류입력전류[A]        |
| $i_\alpha, i_\beta$    | $\alpha - \beta$ 축 교류입력전류[A] |
| $i_d, i_q$             | $d - q$ 축 교류입력전류[A]          |
| $i_s$                  | 교류입력전류[A]                    |
| K                      | 비례상수                         |
| L                      | 인덕터[H]                       |
| M                      | 전동기 관성모멘트[ $\text{kg m}^2$ ] |
| N                      | 변압기 권선수                      |
| $n$                    | 전동기 회전수                      |
| P                      | 전동기 극수                       |
| $P_s$                  | 전원 전력                        |
| PF                     | 역률                           |
| R                      | 입력 저항[ $\Omega$ ]            |

|                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| $V_a, V_b, V_c$                | $a, b, c$ 상 정류기의 입력전압[V]        |
| $V_\alpha, V_\beta$            | $\alpha - \beta$ 축 정류기의 입력전압[V] |
| $V_d, V_q$                     | $d - q$ 축 정류기의 입력전압[V]          |
| $V_{dc - link}$                | 측정된 DC link 전압[V]               |
| $V_{dc - link}^*$              | DC link 전압 지령값[V]               |
| $V_L$                          | 인덕터 전압[V]                       |
| $V_{rec}$                      | 정류기의 입력전압[V]                    |
| $\hat{\theta}$                 | 허상각[rad]                        |
| $\theta$                       | 실제 위상각[rad]                     |
| $\omega$                       | 각속도[rad/s]                      |
| $\Delta\omega$                 | 미소각속도[rad/s]                    |
| $\omega_e$                     | 동기회전각속도[rad/s]                  |
| $\omega L_{id}, \omega L_{iq}$ | 속도기 전력[V]                       |
| AFE                            | Active Front End                |
| CSI                            | Current Source Inverter         |
| DFDE                           | Dual Fuel Diesel Electric       |
| DFE                            | Diode Front End                 |
| FOC                            | Field Oriented Control          |
| LNG                            | Liquified Natural Gas           |
| PWM                            | Pulse Width Modulation          |
| TEU                            | Twenty-foot Equivalent Unit     |
| THD                            | Total Harmonic Distortion       |
| VSI                            | Voltage Source Inverter         |

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구배경

최근 국제해사기구의 환경규제와 더불어 다양한 방식의 환경보호를 목적으로 하는 기술들이 개발되어 적용되고 있다. 그 중 전기추진선박은 환경규제에 대응하는 기술 뿐 아니라 LNG선박에서 운항 중 화물의 자연적인 기화에 의해 발생하는 가스를 활용한 이중연료(Dual Fuel) 4행정엔진 발전시스템과 더불어 주요한 추진방식으로 발전해왔다.

근래 2행정 대형엔진에도 LNG를 연료로 하는 이중연료기술이 적용되어 전체적인 전기추진선박의 발주는 줄었으나, 쇠빙 LNG선 등과 같은 특수한 형태의 추진성능이 필요한 경우에는 지속적으로 전기추진시스템이 적용되고 있다.

전기추진시스템이 적용된 대형상선의 경우 4행정 이중연료 발전기를 통해 전력을 공급하고, 교류전력시스템에서 추진전동기 운전을 위한 속도제어 목적으로 전력변환장치가 사용된다. 전력변환장치는 정류기, DC link단, 인버터로 구성되는데 이러한 전력변환장치를 구성하고 있는 요소들의 성능개선이 전기추진시스템의 효율과 직접적인 관련이 있다.

선박 전기추진시스템의 정류시스템에는 크게 다이오드소자를 활용한 DFE 방식 정류기와 전력용반도체 소자를 이용한 AFE 방식 정류기로 나뉘며, DFE방식의 경우 6펄스·12펄스·18펄스등의 직류 과형을 출력하는데 이 경우 고조파 발생으로 인한 입력 역률저하가 발생하므로 이를 개선하기 위해 대용량의 수동 필터와 상전이 변압기를 설치한다.

AFE 정류기의 경우 고속의 스위칭이 가능한 전력용 반도체 소자를 활용하여 정현파 입력전류 유지가 가능하므로 DFE방식에 비해 수동필터나 상전이변압기의 설치가 필요 없어 가격 및 공간적인 측면에서 유리하다. AFE 정류기의 경우 용량의 제한으로 인해 대형전기추진선박에 본격적으로 적용되지 않고 있으나, 최근 전력용 반도체 기술개발로 인해 대형전기추진선박에서도 AFE 정류기

를 사용할 수 있게 되었다.

AFE 정류기는 입력전압의 위상각을 측정하여 제어하므로 입력전압의 위상각 측정이 매우 중요하며, 위상각을 측정하기 위한 방법으로 기존에는 영점교차 제어기법이 활용되었다. 하지만 영점교차 제어기법은 급격한 부하 변동으로 인한 발전기 전원측의 전압 변동이 발생하면 정류기의 제어가 부정확해지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 급격한 부하 변동에도 정확한 정류기의 위상각을 찾는 것이 가능한 전원전압 위상제어기법을 적용한 AFE 정류기를 제안한다.

## 1.2 연구내용

전기추진선박의 경우 항해조건 중 변화하는 수심, 흘수, 속도, 바람 및 파도 등에 따라 추진전동기의 부하가 변화하게 되며, 이에 따라 발전기의 입력전압과 전류 또한 변동하게 된다. 이러한 입력 전압의 변동은 정류기의 제어를 위한 위상각 제어기의 입력 전원전압에도 영향을 미친다.

AFE 정류기 제어에 있어 abc/dq 좌표변환을 위해서 필요한 위상각  $\theta$ 값을 얻기 위해 위상각 제어기법을 사용하는데 이를 통해 얻어진 위상각  $\theta$ 값의 정확성이 정류기의 제어에 매우 중요하다.

본 논문에서는 선박의 전원 전압 변동 조건에 따른 위상각  $\theta$ 를 검출기 출력 차이를 비교하여 각 조건 별 위상각 검출기법 개선을 확인한다.

### 1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다.

1장 서론에서는 연구배경, 목적 및 논문의 구성에 대하여 기술하고,

2장에서는 선박의 전기추진시스템의 개념 및 구성에 대하여 설명한다.

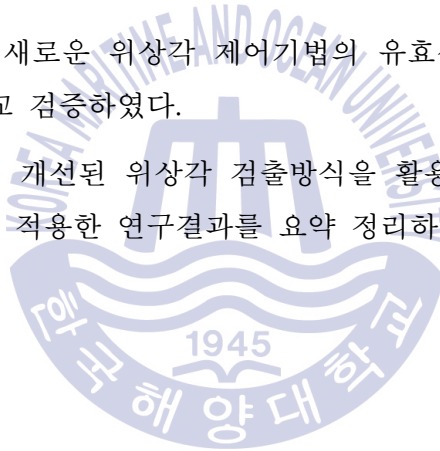
3장에서는 기존의 전기추진시스템의 정류기에 대해 서술하며,

4장에서는 AFE정류기에 대하여 자세히 알아보고,

5장에서는 기존의 위상각 검출기법과 본 논문에서 제안하는 개선된 위상각 검출기법에 대하여 기술하였다.

6장에서는 제안하는 새로운 위상각 제어기법의 유효성을 기존의 제어기법과 시뮬레이션을 통해 비교 검증하였다.

7장에서는 본 논문의 개선된 위상각 검출방식을 활용한 AFE 정류기의 제어기를 전기추진시스템에 적용한 연구결과를 요약 정리하였다.



## 제 2 장 선박의 전기추진시스템

### 2.1 전기추진시스템의 개요

전기추진시스템은 원동기의 고속, 저토크의 에너지를 저속, 고평토크로 변환하여 프로펠러를 회전시켜 선박의 항해에 필요한 출력을 얻는 방식으로서 초기 개발부터 최근까지 군함이나 크루즈선 등의 특수 목적선박에 주로 사용되어 왔다. 2000년대 이후 전력변환장치의 성능 및 효율 개선으로 인해 대형선박에서도 전기추진시스템을 적용하기 시작하였으며 최근 제어시스템의 개발 및 최적화를 통해 그 장점이 더욱 부각되고 있다. 또한, 기존 디젤엔진 추진선박에 비해 대기오염물질 저감, 선체 진동과 소음의 감소, 우수한 조정성과 제동능력 등과 같은 여러 장점을 가지고 있다.

전기추진시스템은 원동기로 발전기를 구동시켜 생산된 전기에너지를 추진전동기에 공급하여 선박을 추진하는 방식으로서 전체시스템은 Fig 2.1과 같이 나타낼 수 있으며 크게 원동기, 발전기, 전력변환장치 및 추진전동기로 구성된다.

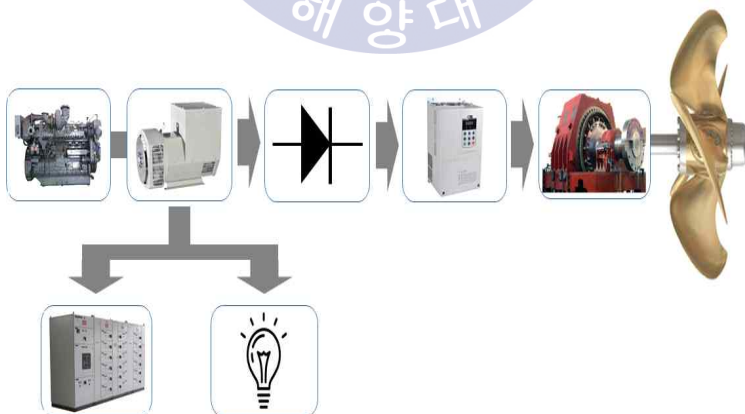


Fig 2.1 Block diagram of Electric Propulsion System



## 2.2 전기추진시스템의 구성

### 2.2.1 발전기와 배전시스템

선박의 발전기용 원동기는 일반적으로 4행정 디젤엔진을 주로 사용하며 원동기와 축계로 연결되어 운전되는 발전기로 브러시리스 동기발전기가 주로 사용된다. 동기발전기의 계자 자속 전류는 과거에는 동기기의 같은 축에 놓여진 여자기라고 불리는 직류기로부터 실립링을 통해 공급되나 근래는 대부분 교류 여자기의 교류전원이 회전자에 연결되어 있어 전류는 슬립링이 필요없이 계자 코일에 바로 공급되는 브러시리스 여자시스템이 사용된다. 이로 인해 슬립링이나 브러시가 필요 없고 동시에 브러시와 슬립링 사이 회전에 의한 카본가루도 발생하지 않아 안정적인 운전이 가능하고 보수점검이 필요치 않은 장점이 있다. 선박에서 사용하는 발전기 전압은 선박의 크기 및 전체 부하량에 따라 달라지는데 일반적으로 벌크, 탱커의 경우 부하의 양이 작아 440[V] 출력전압을 사용하고 10,000TEU이상의 컨테이너 및 LNG선과 같이 10MW이상의 부하가 필요한 선박의 경우는 선박의 크기 및 구조를 고려하여 6,600[V], 11,000[V]등의 고전압으로 사용한다. 그 외 드릴쉽이나 선사별 별도의 시스템구성 요구에 따라 690[V], 3,300[V]등이 사용되기도 한다.

### 2.2.2 전력변환장치

전력변환장치는 전력반도체 스위치를 사용하여 전력의 형태를 변환하고 흐름을 제어하는데 그 변환하는 전력의 형태에 따라서 AC-AC, AC-DC, DC-AC, DC-DC변환으로 나누어진다. DC-DC변환은 입력전류전력의 크기를 변환하여 직류출력을 내보내는 것을 말하며 DC-AC변환은 인버터(inverter)라고 한다. 인버터는 크게 DC link단에 커패시터를 사용하여 전압의 크기를 일정하게 유지하고 전압 주파수를 변환하여 전동기의 회전속도를 제어하는 전압형인버터(VSI)와 DC link단에 인덕터를 사용하여 전류의 크기를 일정하게 하고 전류 주파수를 변환하여 전동기의 회전속도를 제어하는 전류형인버터(CSI)로 구분할 수 있다.

전압형인버터는 전류형인버터에 비해 작은 크기로 출력임피던스가 작고 응답성이 우수하며, 제어가 용이하다는 장점으로 최근 건조되는 전기추진선박에 주로 사용되고 있다. AC-DC변환은 정류변환이라 하고 정류기는 전력변환 방식에 따라 구조가 비교적 간단하고 별도의 제어장치가 필요 없는 다이오드를 이용한 DFE 방식과 교류전력을 능동적으로 제어하여 직류로 변환하는 AFE 방식으로 나뉜다.

### 1) DFE 방식

Fig 2.2는 전기추진시스템에서 DFE 방식을 적용한 블록도이며, 3상교류발전기에서 생성된 교류전원을 상천이 변압기와 다이오드정류기를 사용하여 직류로 변환한 후 속도제어가 가능한 주파수제어용 인버터를 적용한 시스템이다. 다이오드 정류기는 회로구성이 간단한 장점이 있지만 전원 입력단측에 직접 연결되어 입력 전류의 총고조파왜형률(THD : Total Harmornic Distortion)이 커지는 단점이 있다. 총고조파왜형률의 상승은 고조파를 발생시키고 이러한 고조파는 선박의 전체 전력시스템에 악영향을 미치게 되고, 여러 전기,전자 장비들의 장애를 발생시킬 수 있으므로 Fig 2.2와 같이 정류기 앞단에 상천이 변압기를 설치하거나 수동필터를 설치하여 펄스 수를 증가시킴으로써 고조파를 감소시키는 역할을 한다.

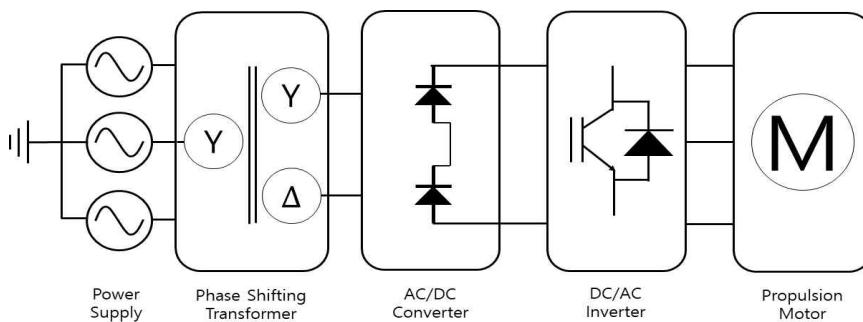


Fig 2.2 Block diagram of DFE topology

## 2) AFE 방식

AFE 방식은 발전기로부터 생산된 3상 교류전력을 능동적제어를 통해 직류로 변환하는 방식이며, 정류기 제어목적으로 ON/OFF 제어가 가능한 전력용 스위치인 IGBT, MOSFET, GTO 등을 사용한다. 이러한 방식을 통해 전원 측 입력전류를 정현파에 가깝게 유지할 수 있어 DFE 방식보다 총고조파왜형을 개선되는 장점이 있다. Fig 2.3은 AFE 방식 전기추진시스템의 블록도이며, 고조파제거가 필요없으므로 인해 DFE 방식에서 필요로하는 상천이 변압기가 필요없어 전체 시스템 전력효율 개선 및 기관실 설치공간 간소화 등에 장점이 있다. 하지만 AFE 방식은 전력용 스위치 ON/OFF 제어시 발생하는 전력손실 및 DFE 방식에 비해 가격이 비싸고 정비를 요하는 부분은 단점이다.

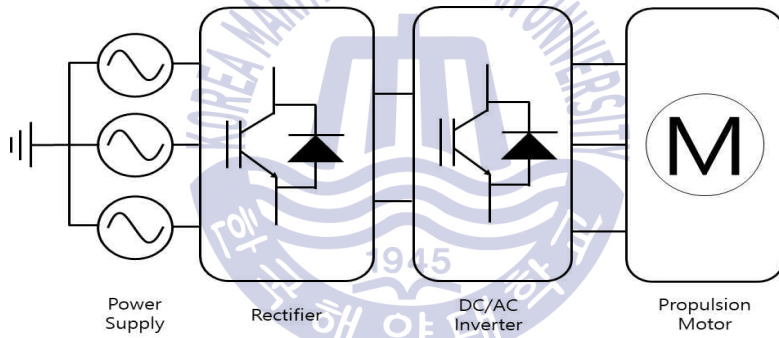


Fig 2.3 Block diagram of AFE topology

### 2.2.3 추진전동기

전기추진시스템의 추진전동기는 기존 기계식추진방식의 주기관에 비해 진동 및 소음의 발생이 적고 효율이 높으며 조종능력과 속응성이 뛰어난 장점이 있으며 구조와 동작원리에 따라 크게 직류전동기, 유도전동기, 동기전동기로 구분한다. 하지만 구조가 복잡하고 유지보수에 어려움이 있는 직류전동기는 최근에 거의 사용하지 않고 있으며, 주로 유도전동기와 동기전동기를 추진전동기로 사용하고 있다.

## 1) 유도전동기

유도전동기는 고정자 권선에 공급된 삼상 평형 교류전원으로 회전자계를 형성하고 이 회전자계로 유도된 기전력에 의해 회전자가 회전하는 원리를 갖는다. 유도전동기는 일정 전압과 일정 주파수의 전원에 의해 거의 동기속도에 가까운 속도로 회전하는 일정 속도 전동기로 많이 사용되었으나, 최근 전력전자 기술이 발전함에 따라 인버터를 이용한 전압과 주파수 조정으로 효율적이고 폭넓은 속도제어가 가능하게 되었다. 또한, 기계적으로 견고하며 회전자에 별도의 설비가 필요하지 않아 유지보수가 용이한 장점이 있어 현재 추진전동기로 가장 많이 사용되고 있다.

## 2) 동기전동기

동기전동기는 유도전동기의 고정자와 동일한 구조로 고정자에 3상 전원을 연결하면 유도전동기와 같이 회전자계가 발생한다. 이 회전자계와 동기속도로 회전하는 회전자는 원통형과 돌극형 구조로 나누며, 통상 원통형은 고속용으로 사용되고 돌극형은 저속용으로 사용된다. 회전자의 자속을 제어하기 위해서 독립된 직류전원을 계자권선에 공급하기 때문에 출력의 범위가 넓고 효율이 높아 수 MW급의 대용량 추진전동기로 많이 사용되어 왔지만 회전자에 여자기를 추가 설치해야 하므로 시스템이 복잡해지는 단점이 있다. 최근에는 회전자를 영구자석으로 만들어 손실이 발생하지 않고 출력 밀도와 효율이 높은 영구자석 동기전동기를 추진전동기로 사용하고 있지만 고가의 영구자석 비용문제로 인해 높은 출력을 요구하는 시스템에서는 적용이 어려워 저출력 추진시스템이나 특수선에서 사용되고 있다.

## 제 3 장 전기추진시스템의 정류기

### 3.1 DFE 정류기

#### 3.1.1 DFE 정류기의 구성

DFE 방식은 ON/OFF 제어가 불가능하여 도통 전류량의 제어가 용이하지 않으나 회로구성이 간단한 다이오드를 이용해 교류를 직류로 변환하는 정류기를 말하며, Fig 3.1은 대표적인 DFE 방식의 3상 전파정류회로이다.

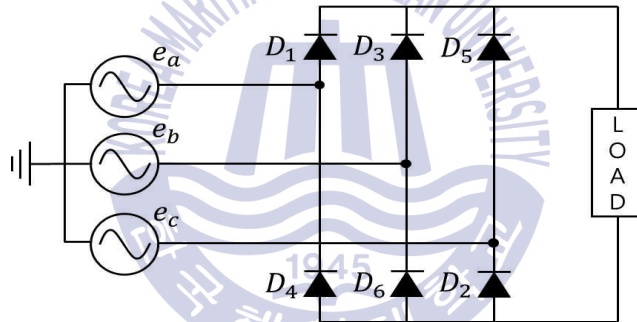


Fig 3.1 Three phase full-wave diode rectifier

정류기는 3상 전원에 총 6개의 다이오드로 구성되며, 출력전류는 하나의 상단부 다이오드( $D_1, D_3, D_5$ ) 와 하나의 하단부 다이오드( $D_2, D_4, D_6$ ) 가 ON 되어 도통된다. 즉, 임의의 시간 동안 3상 전원 중 상단부의 전압이 (+)의 방향으로 가장 큰 상의 다이오드가 ON 되고 나머지 2개의 다이오드는 역방향 바이어스 되어 OFF 상태를 유지하며, 반대로 하단부의 3상 전원 중 전압의 크기가 (-)의 방향으로 가장 큰 상의 다이오드가 ON 된다. 여기서 각 상전압  $e_a, e_b, e_c$  는 다음과 같다.

$$e_a = \sqrt{2} E \sin(\theta + \frac{\pi}{6}) \quad (3-1)$$

$$e_b = \sqrt{2} E \sin(\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) \quad (3-2)$$

$$e_c = \sqrt{2} E \sin(\theta - \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) \quad (3-3)$$

### 3.1.2 DFE 정류기의 직류출력과 전원 출력측의 고조파 발생정도

DFE 정류기는 한 주기의 전원 전압주기동안 60°의 펄스폭인 동일한 펄스형태 6개로 정류된 전압으로 Fig 3.2와 같이 DC link단에 출력되며, DC link단에 대용량의 커패시터를 설치하여 직류 출력과형을 개선한다.

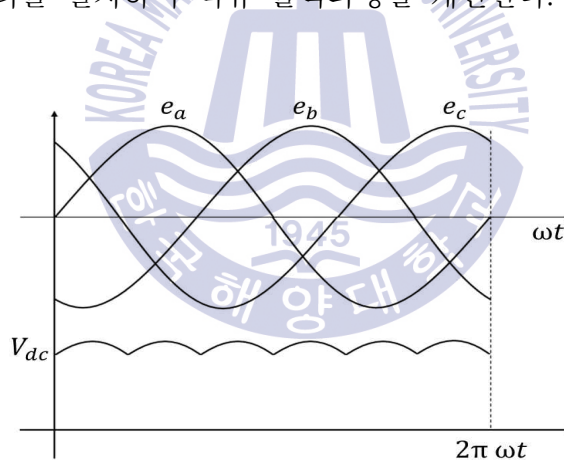


Fig 3.2 Voltage output of DC link for three phase full-wave diode rectifier

또한 입력전류에 포함된 5차, 7차, 11차, 13차 이상의 고조파로 인해 총고조파 왜형률이 25[%] ~ 30[%] 정도로 커지게 되어 Table 3.1에 제시한 총고조파왜형률을 규정하고 있는 IEEE Std 519-2014의 기준범위를 만족하지 못하며 선박의 전력시스템 전체품질을 심각하게 저하시키는 원인이 된다.

**Table 3.1** Voltage distortion limits

| Bus voltage $E$ at PCC | Individual harmonic(%) | Total harmonic distortion THD(%) |
|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| $E \leq 1.0kV$         | 5.0                    | 8.0                              |
| $1kV < E \leq 69kV$    | 3.0                    | 5.0                              |
| $69kV < E \leq 161kV$  | 1.5                    | 2.5                              |
| $161kV < E$            | 1.0                    | 1.5                              |

## 3.2 AFE 정류기

### 3.2.1 AFE 정류기의 구성

AFE 정류기는 ON/OFF 제어가 가능한 전력용 스위치인 IGBT, MOSFET, GTO 등을 사용하여 능동적으로 전력변환이 가능하기 때문에 부하변동에 영향을 받지 않고 일정한 직류 출력전압유지가 가능하다.

Fig 3.3과 같이 3개의 단으로 구성된 AFE 3상 정류기는 각 단에 각각 2개의 스위치가 직렬로 연결되어 총 6개의 스위치로 구성되며 전원측 입력전류의 크기 조절을 위한 인덕터와 출력측 직류 출력전압 개선용 평활 커패시터가 설치된다. 정류기의 동작 시, 각 단 상단부와 하단부의 스위치가 동시에 ON 동작을 하면 dv/dt의 급격한 증가로 인해 스위치에 치명적인 손상을 받기 때문에 스위칭 지연시간을 두고 두 개의 스위치가 ON/OFF 되도록 상호 보완적인 동작 제어를 한다.

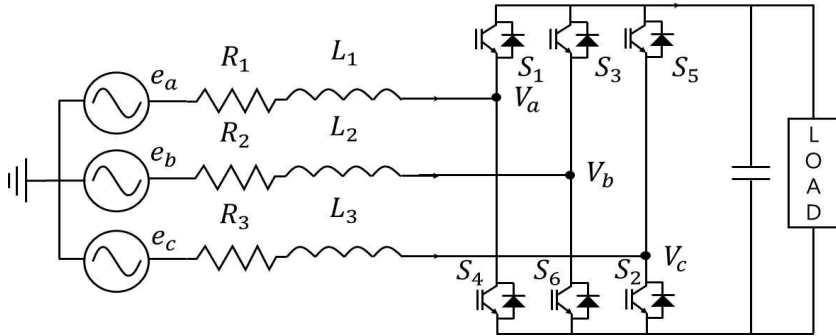


Fig 3.3 Circuit diagram of AFE rectifier

### 3.2.2 AFE 정류기의 전력변환 특성

#### 1) 전력변환 원리

AFE 정류기는 정류기의 전력변환을 위해 교류 입력전류  $i_s$ 의 크기와 위상을 제어하므로 교류전원과 정류기 사이의 인덕터 'L'에 인가되는 전압의 크기를 제어해야 한다. 하지만 교류전원은 고정되어 있으므로 정류기 입력전압  $V_{rec}$  제어를 통해서  $i_s$ 를 제어한다. Fig 3.4은 AFE 정류기의 등가회로이다.

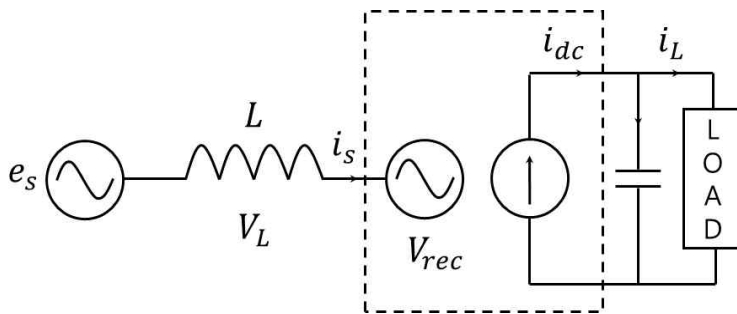


Fig 3.4 Single phase model of AFE rectifier



$V_{rec}$ 는 기본 주파수, 전압 크기 및 위상의 제어량을 가지지만 기본 주파수는 교류전원과 동일해야 하므로  $V_{rec}$ 의 크기와 위상의 제어를 통해서 전력제어를 하게 되며  $a, b, c$  각 상의 전압과 입력 인덕터에 걸리는 전압  $V_L$ 은 다음 식과 같다.

$$e_s = V_L + V_{rec} \quad (3-4)$$

$$V_L = \omega L i_s \quad (3-5)$$

여기서,  $e_s$ 는 각 상의 교류입력전원,  $V_L$ 은 인덕터 전압,  $V_{rec}$ 는 정류기 입력 전압이다.

Fig 3.5와 Fig 3.6은 정류기의 입력전압  $V_{rec}$ 를 제어함으로써 변화하는 교류 입력전류  $i_s$ 를 페이지도로 나타낸 것이다. Fig 3.5에서  $V_{rec}$ 의 크기가  $e_s$ 보다 크고, 위상은 지연되도록 하여  $i_s$ 와  $e_s$ 를 동상으로 만든다.  $i_s$ 의 크기를 증가시키려면  $V_{rec}$ 의 크기를 증가시키면서 동시에 위상각  $\theta$ 도 증가시키며, 반대로  $i_s$ 를 감소시키려면  $V_{rec}$ 의 크기를 줄이면서 위상각  $\theta$ 를 줄인다. 이러한 방식으로 항상 역률을 '1'인 상태로 유지하면서 정류기는 정류모드로 동작한다.

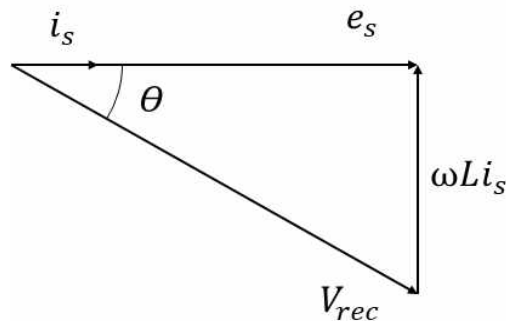


Fig 3.5 Power Factor = 1 (in phase)

Fig 3.6은  $V_{rec}$ 의 위상이  $e_s$ 보다 앞서게 함으로서 교류 입력전류  $i_s$ 의 위상과 교류입력 전압  $e_s$ 의 위상이  $180^\circ$  차이가 나도록 하는 경우이다. 이러한 동작은 직류전원으로부터 교류전원으로 전력이 회생될 때 이루어지며 이때 정류기는 인버터와 같이 동작하고 AFE 정류기의 직류에 교류전동기를 구동하고자 하는 인버터가 접속된 경우에는 교류전동기의 회생제동 시 발생하는 에너지를 교류전원으로 되돌리고자 할 때 이용한다.

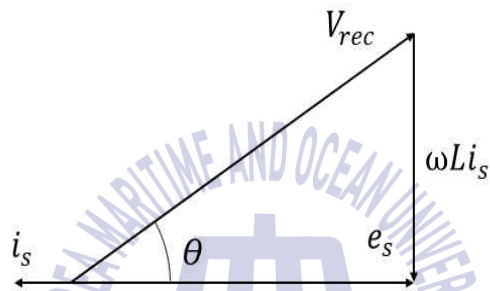


Fig 3.6 Power Factor = -1 (negative phase)

## 제 4장 AFE 정류기의 제어

### 4.1 AFE 정류기의 수학적 모델링

Fig 4.1은 AFE 3상 정류기의 기본구조이다. 앞서 3.3장에서 설명한 내용과 같이 정류기는 3개의 단과 6개의 스위치로 구성되며, 교류전원  $e_a, e_b, e_c$ 는 3상 평형을 유지한다. 또한, 전원 출력측에 설치된 인덕터  $L_1, L_2, L_3$ 는 전력변환 시 교류 전류  $i_a, i_b, i_c$ 의 크기를 제어하기 위해 사용되며, 정류기 출력측의 커패시터 “C”는 급격한 전압변동에도 DC link단의 안정된 직류전압을 출력하기 위해 설치된다.

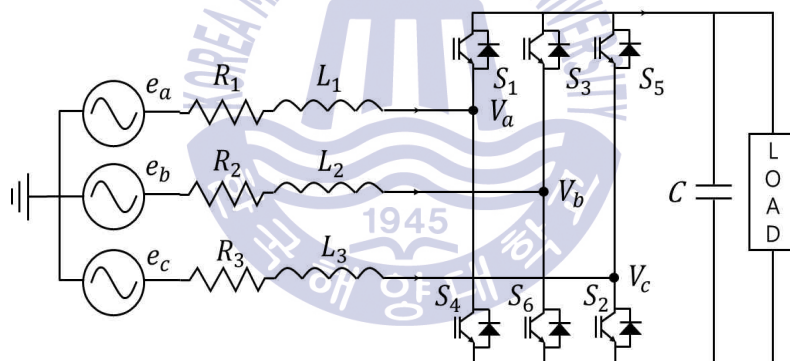


Fig 4.1 Circuit diagram of AFE rectifier

3상 교류전원의 상전압 및 상전류를 합을 나타낸 식은 (4-1), (4-2)와 같다.

$$e_a + e_b + e_c = 0 \quad (4-1)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4-2)$$

여기서,  $e_a, e_b, e_c$ 는  $a, b, c$ 상의 전원 전압,  $i_a, i_b, i_c$ 는 상전류이다.

AFE 정류기의 전압방정식은 다음과 같다.

$$e_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_a \quad (4-3)$$

$$e_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + V_b \quad (4-4)$$

$$e_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + V_c \quad (4-5)$$

여기서,  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ 는 정류기 입력전압이다.

## 4.2 AFE 정류기의 제어기 설계

AFE 정류기를 전압방정식으로 나타내면 식 (4-3) ~ (4-5)와 같이 시간의 변화에 따라 전압과 전류의 물리량이 지속적으로 변하는 3상 교류값으로 표현되므로 정류기 제어가 복잡해진다. 이러한 단점을 개선하기 위해서 3상 교류전원  $e_a^*$ ,  $b_b^*$ ,  $c_c^*$ 를 임의의 기준축에 대하여 좌표변환하여 표현하면 일정한 직류값을 갖는 전압방정식으로 변환되어 정류기의 제어가 간단하고 정확해지며, 본 논문에서 제안하는 전원전압 위상각 제어기에서도 좌표변환기법을 사용한다.

좌표축 변환은 3상  $a, b, c$ 축을 정지좌표계  $\alpha-\beta$ 로 변환한 후, 동기회전좌표계  $d-q$ 축으로 좌표변환하는 과정을 가지며 먼저  $\alpha-\beta$ 축으로의 축변환 과정은 Fig 4.2에서 임의의 시간에 대한 상변수  $f_a$ 를  $\alpha$ 축 성분  $f_a \cos\theta$ 와  $\beta$ 축 성분  $-f_a \sin\theta$ 의 합으로 나타낼 수 있음을 알 수 있고 또한,  $b, c$ 상을  $a$ 상과 같이 행렬로 표현하면 다음 식 (4-6)으로 나타낼 수 있다.

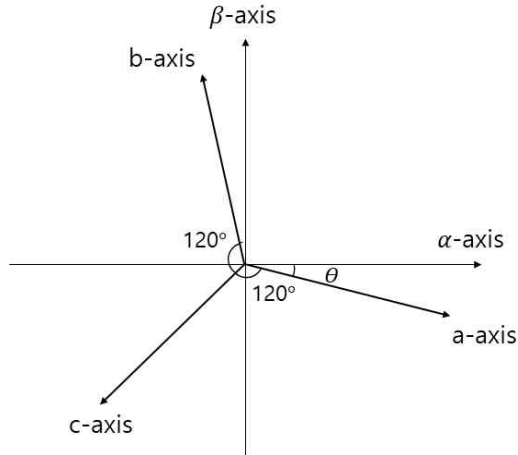


Fig 4.2 Transformation of stationary a, b, c axis to stationary  $\alpha-\beta$

$$f_{abc} = T(\theta)f_{\alpha\beta o} \quad (4-6)$$

여기서,  $(f_{abc})^T = [f_a f_b f_c]$ ,  $(f_{\alpha\beta o})^T = [f_\alpha f_\beta f_o]$

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) & 1 \end{bmatrix}$$

위 식에서  $f_o$ 는 영상분을 의미하며 3상 평형일 경우에 그 값은 0이 된다. 또한, 식 (4-6)을 역변환하면 식 (4-7)과 같이 3상 변수를 정지좌표계  $\alpha-\beta$ 축 성분으로 변환이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

여기서  $\theta=0^\circ$  로 하여  $a$ 축과  $\alpha$ 축을 일치시키고 영상분을 무시하면 식 (4-8)같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

3상  $a, b, c$ 축을 식 (4-8)을 이용하여 정지좌표계  $\alpha-\beta$ 축으로 변환한 전압방정식은 식 (4-9), (4-10)과 같다.

$$e_\alpha = Ri_\alpha + L \frac{di_\alpha}{dt} + V_\alpha \quad (4-9)$$

$$e_\beta = Ri_\beta + L \frac{di_\beta}{dt} + V_\beta \quad (4-10)$$

또한, 정지좌표계  $\alpha-\beta$ 축 성분을 동기회전좌표계상의  $d-q$ 축으로 변환하면 Fig 4.3과 같은 관계를 가지므로 식 (4-11)에 의해 동기회전좌표축상의 값으로 나타낼 수 있다.

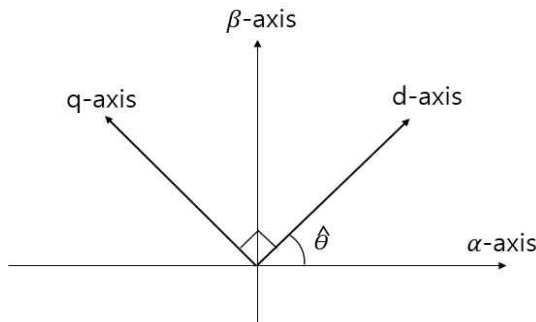


Fig 4.3 Transformation of stationary  $\alpha-\beta$  axis to rotating  $d-q$  axis

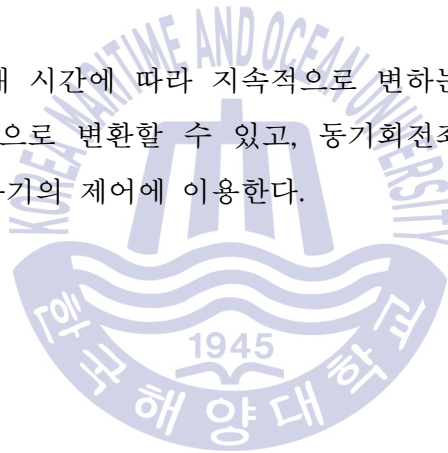
$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

식 (4-12), (4-13)은 정지좌표계  $\alpha-\beta$ 축의 전압방정식을 동기회전좌표계  $d-q$ 축으로 변환한 식이다.

$$e_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + V_d \quad (4-12)$$

$$e_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + V_q \quad (4-13)$$

좌표변환 과정을 통해 시간에 따라 지속적으로 변하는 3상 교류값을 제어가 편리한 두개의 직류값으로 변환할 수 있고, 동기회전좌표계로 변환하여 구한  $d-q$ 축 값을 AFE 정류기의 제어에 이용한다.



## 제 5 장 제안하는 AFE 정류기의 위상검출기법

### 5.1 기존 AFE 정류기의 위상각 검출기법

기존 AFE 정류기는 제어를 위한 위상각  $\theta$ 를 구하기 위해서 영점교차(Zero Crossing)기법을 사용한다. 영점교차기법은 Fig 5.1과 같이 전원전압을 측정하여 반주기마다 나타나는 영점을 찾아 현재의 위상각  $\theta$ 를 검출한다.

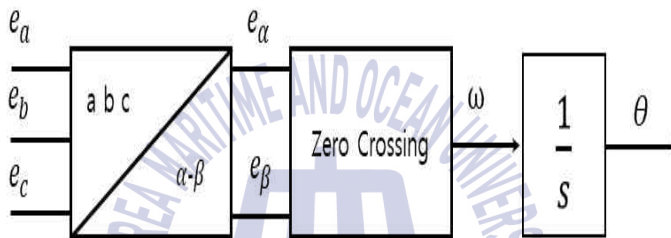


Fig 5.1 Block diagram of zero crossing

Fig 5.2와 같이 위상각을 구하기 위해  $a$ 상의 전원전압이 양에서 음으로 바뀌는 순간을 기준각  $0^\circ$ 로 설정하여 제어 위상각  $\theta$ 를 구하거나 3상 전원  $e_a, e_b, e_c$ 를 정직좌표계  $\alpha-\beta$ 로 좌표변환하여  $e_\alpha$ 와  $e_\beta$ 를 구한 뒤 식 (5-1)과 같이 직접 필요한 위상각  $\theta$ 를 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{e_\alpha}{e_\beta}\right) \quad (5-1)$$



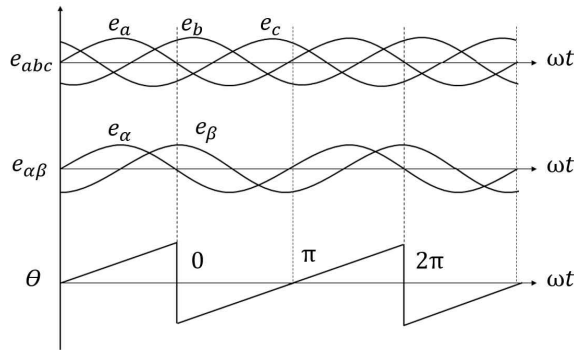


Fig 5.2 Relationship between supply voltage and phase angle of zero crossing technique

영점교차기법은 정류기의 제어를 위한 위상각을 간단히 구할 수 있는 장점이 있지만, 선박에서 수심, 흘수, 속도 및 바람 등의 주위환경 변화에 따라 갑작스럽게 변화하는 부하로 인해 발전기에서 출력되는 전압과 전류의 변동이 빈번하므로 전원전압이 불규칙한 형태로 출력되는 경우가 발생한다. 이러한 불규칙한 형태의 전원전압 파형이 위상각 검출기의 입력으로 공급될 경우 검출된 위상각에 오차가 발생하며, 정류기의 제어에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 논문에서는 순간적으로 발생하는 불규칙한 전원전압 파형의 공급에도 정확한 위상각을 검출하는 것이 가능한 위상각 검출기를 제안하였다.

## 5.2 제안하는 AFE 정류기의 위상각 검출기법

AFE 정류기에서  $d-q$ 축 좌표변환 및 전원전압의 위상과 동상인 전류 지령치를 구하기 위해서는 정확한 위상각  $\theta$ 의 검출이 필수적이다. Fig 5.3는 위상각  $\theta$ 를 구하기 위한 전원전압 위상각 제어기의 구성을 나타낸 블록도이다. 제어기는 3상 교류 전원전압을 정지좌표계  $\alpha-\beta$ 축으로 좌표변환한 후 동기회전좌표계상의  $d-q$ 축으로 변환하여 제어가 용이한 직류값을 가지는  $e_d$ ,  $e_q$  전압을 구하고 임의로  $e_d$ 는 유효전력성분,  $e_q$ 는 무효전력성분이 되도록 설정하고 무효전력성분  $e_q$ 의 값이 0이 되도록 제어한다.

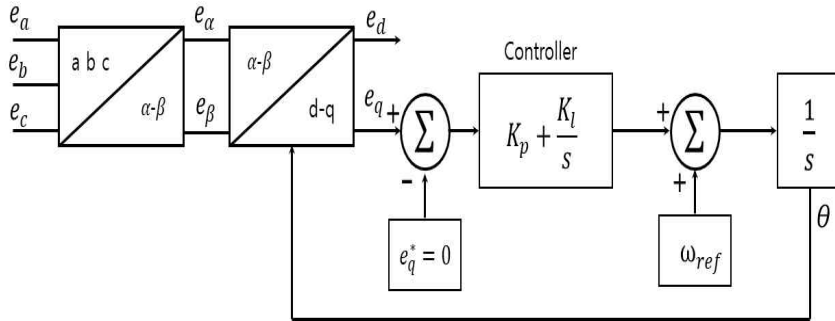


Fig 5.3 Block diagram of proposed Reference supply voltage phase angle controller

동기회전좌표계  $e_q$ 의 전압이 0이 되도록 제어하기 위한 전압 위상각과 동기회전좌표계의  $q$ 축 전압과의 관계를 Fig 5.4에 나타내었으며, 식 (5-2)의  $P_s$ 는 전원에서 공급되는 유효전력을 나타낸다.

$$P_s = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) = \frac{3}{2}e_d i_d \quad (5-2)$$

식 (5-2)에서  $e_q$  전압이 0이 되도록 제어하기 때문에 전원 전력은  $d$ 축 전압을 나타내는  $e_d$ 에 의해서만 영향을 받고,  $q$ 축 전압은 전혀 영향을 미치지 않으므로 공급전력  $P_s = \frac{3}{2}e_d i_d$ 이 된다. 따라서 모든 유효전력을  $d$ 축으로 설정하고  $q$ 축 전압은 0이 되도록 제어하면 실제 위상각  $\theta$ 가 허상각  $\hat{\theta}$ 와 일치하게 되므로 정확한 위상각  $\theta$ 를 구할 수 있다.

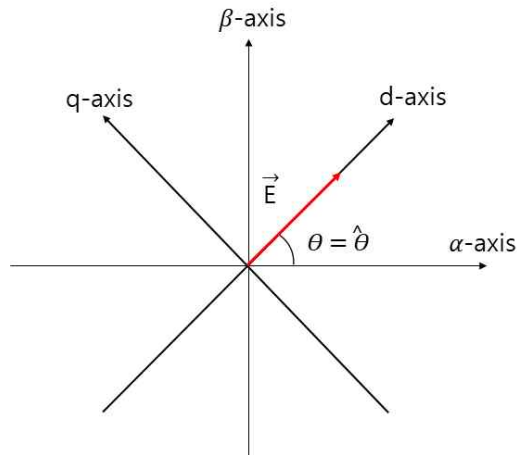


Fig 5.4 Actual phase  $\theta$  = Error phase  $\hat{\theta}$

이와 같은 원리를 이용한 전원전압 위상각 제어기를 구성하여 위상각을 검출하면 고조파나 잡음이 포함된 불규칙적인 전원전압의 파형에서도 제어기의 동기회전좌표계  $q$ 축 전압이 항상 0이 되도록 제어할 수 있으므로 정확한 전원전압 위상각  $\theta$ 를 찾을 수 있다. 또한  $q$ 축이 0의 값을 가지면 식 (5-3)에서 볼 수 있듯이 전원측 전압과 전류의 위상이 동상인 단위 역률을 가지도록 제어된다.

$$PF = \frac{i_d}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (5-3)$$

제안하는 전원전압 위상각 검출기의 유효성을 입증하기 위하여 본 논문에서는 발전기로부터 출력되는 전원전압에 영점 노이즈 주입, 각 상간 위상변화, 고조파가 포함된 파형을 공급하여 위상각 검출기에서 도출되는 위상각  $\theta$ 의 변화를 살펴보았다.

## 제 6 장 개선된 위상각 검출기법을 통한 AFE 정류기의 검증을 위한 시뮬레이션

본 논문에서는 제안하는 전원전압 위상각 검출기의 유효성을 입증하기 위하여 발전기로부터 출력되는 전원전압에 순간적인 영점 노이즈, 위상변화, 고조파가 포함된 파형을 공급하여 위상각 검출기에서 도출되는 위상각  $\theta$ 의 변화 및 그에 따른 DC link단의 출력전압의 변화를 살펴보았다.

시뮬레이션을 위한 운전환경 설정에 있어서 발전기의 출력 전원전압에 순간적인 영점 노이즈 주입, 위상의 변화 발생 및 고조파를 주입하여 불규칙한 파형을 임의로 발생시켰으며, 이 경우에 기존의 위상각 검출기법과 제안하는 위상각 검출기법에서 위상각  $\theta$ 의 출력 및 DC link단의 전압파형 출력을 시뮬레이션 결과로서 분석하였다.

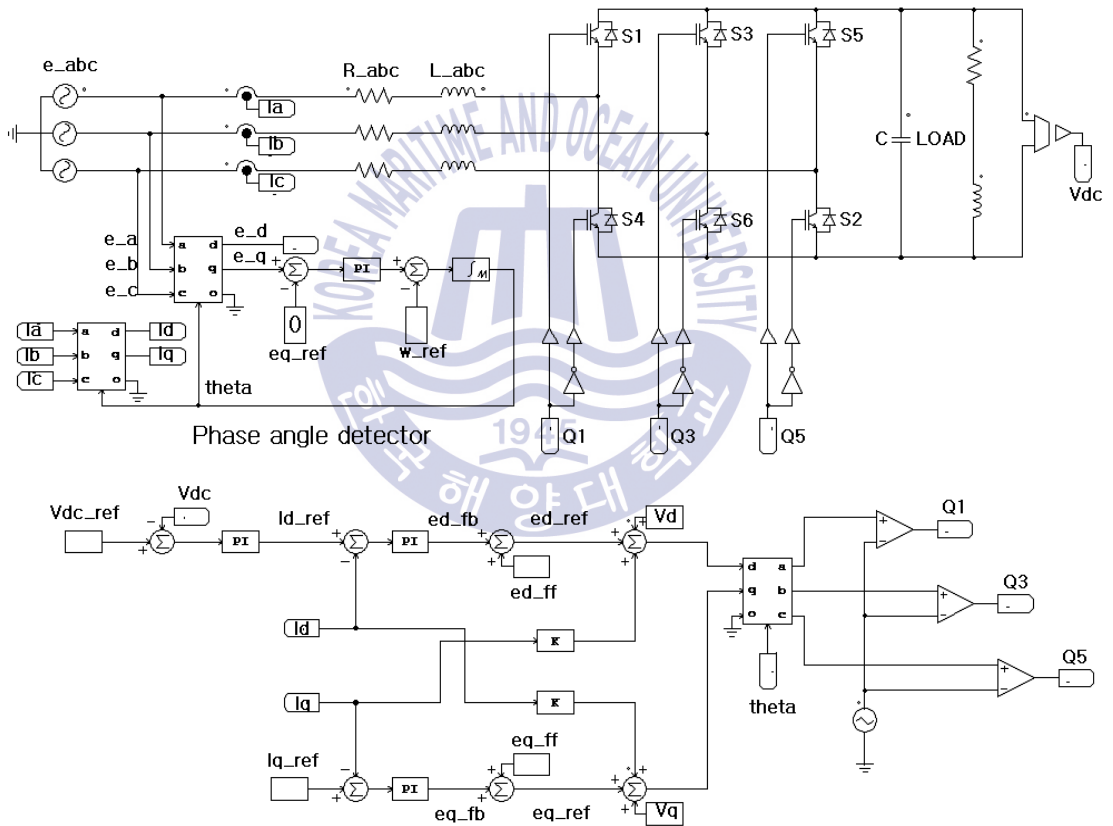
시뮬레이션에 적용한 시스템 파라미터 정수는 Table 6.2와 같다.

**Table 6.2** System parameters used in simulation

| Parameter | Value            |
|-----------|------------------|
| $e_s$     | 690[V]           |
| $L$       | 250[ $\mu$ H]    |
| $R$       | 0.01[ $\Omega$ ] |
| $C$       | 5000[ $\mu$ F]   |
| $f_{sw}$  | 10[kHz]          |

## 6.1 기존 AFE 정류기의 위상각 검출기법 시물레이션

Fig 6.1은 기존의 위상각을 검출방식인 영점교차 위상각 검출기법을 적용한 AFE 정류기의 다이어그램이다. 이 방식은 전원전압을 측정하여 반주기마다 나타나는 영점을 찾아 현재의 위상각  $\theta$ 를 검출한다.



**Fig 6.1** Schematic diagram for AFE rectifier system with traditional AFE rectified which comply with original phase angle detection.

### 6.1.1 전원전압에 영점 노이즈가 발생하는 경우의 시뮬레이션

Fig 6.2는 1[sec] 시점에서 전원전압에 영점 노이즈를 주입한 후, 검출된 위상각과 DC-link단의 출력특성을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 영점 교차기법을 통해 구한 위상각이 영점 노이즈를 발생시킨 1[sec] 구간에서 순간적으로 틀어지는 현상을 확인하였으며, 이 구간에서 DC link단의 직류출력전압에 변동이 발생하였다.

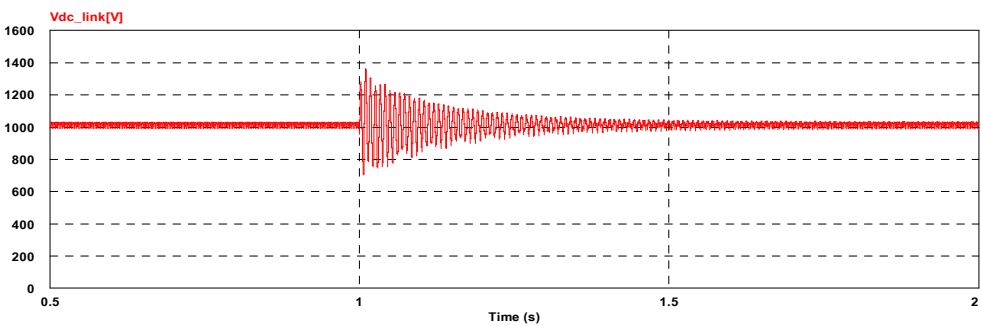
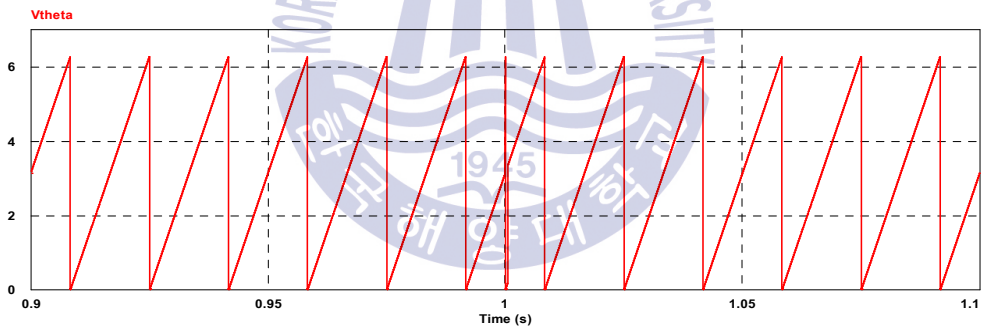
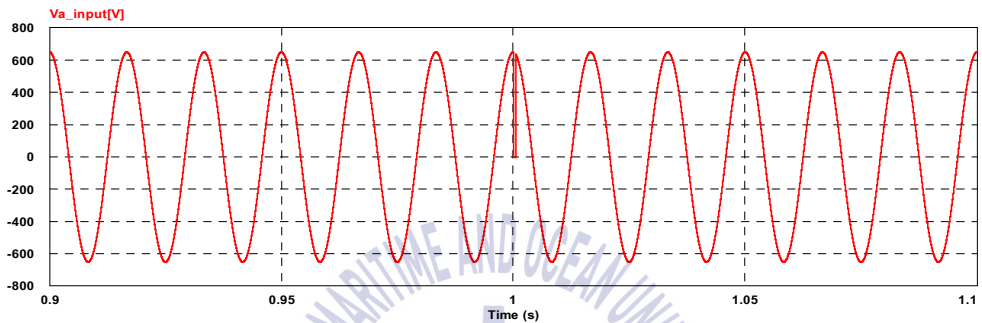
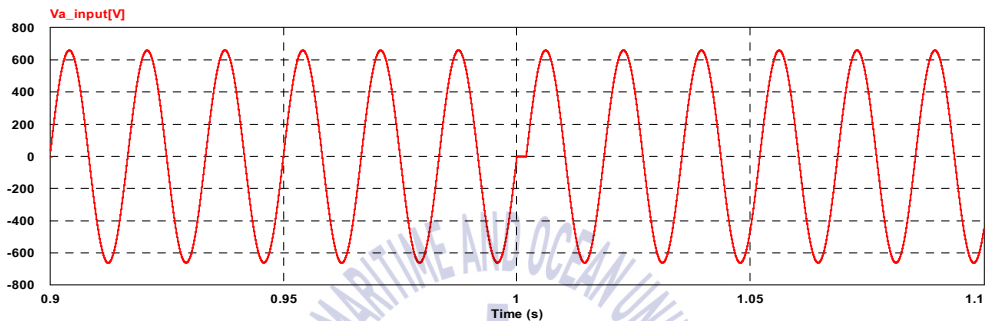


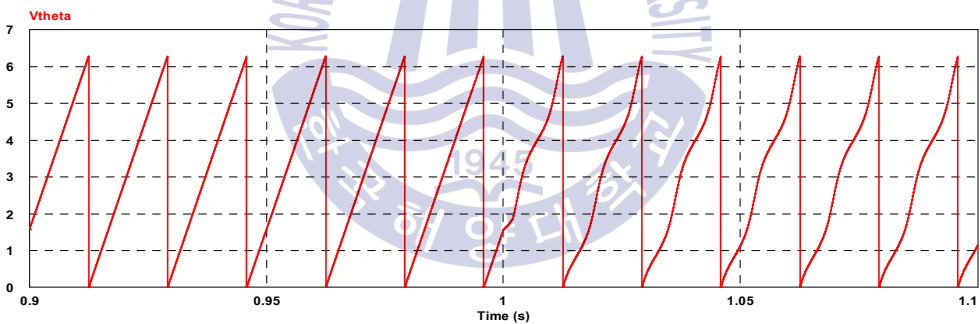
Fig 6.2 Simulation responses for AFE rectifier with zero crossing

### 6.1.2 전원전압의 위상이 변이되는 경우의 시뮬레이션

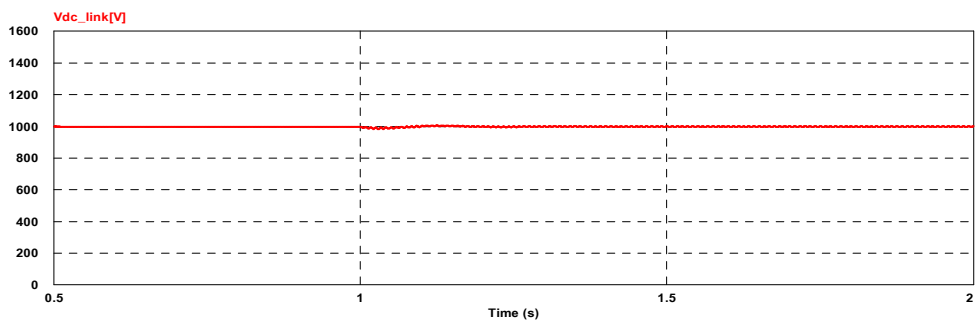
Fig 6.3은 1[sec] 시점에서 위상이 지연된 전원전압을 공급한 후, 검출된 위상각과 DC-link단의 출력특성을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 영점 교차기법을 통해 구한 위상각이 위상 지연을 발생시킨 1[sec] 구간에서 순간적으로 찌그러지는 현상을 확인하였으며, 이 구간에서 DC link단의 직류출력전압에 약간의 변동이 발생하였다.



(a) Input voltage



(b) Theta

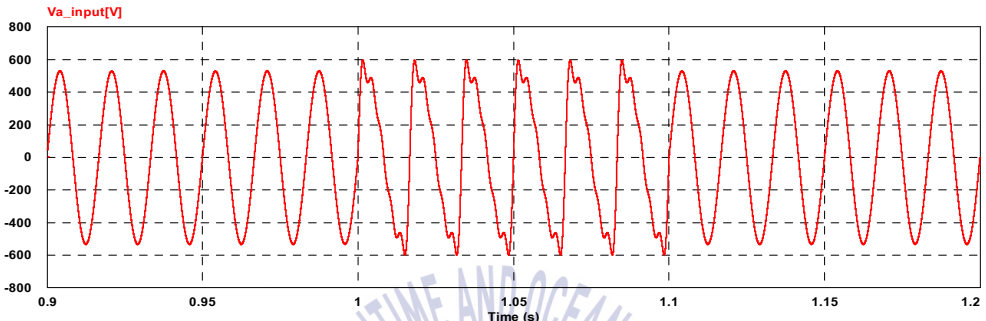


(c) Voltage of DC\_link

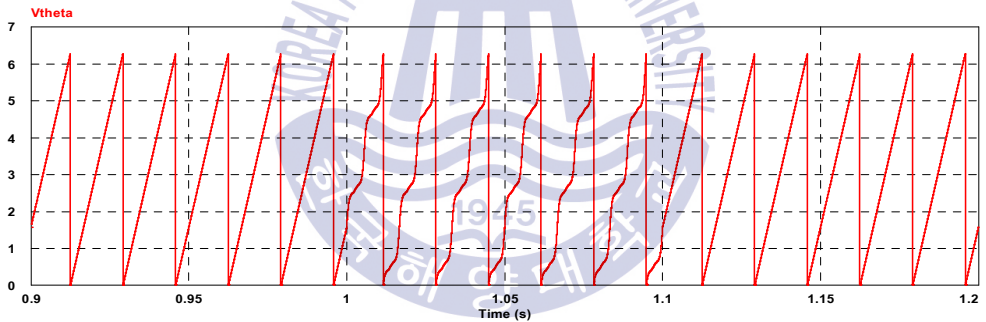
**Fig 6.3** Simulation responses for AFE rectifier with zero crossing

### 6.1.3 전원전압에 고조파가 포함된 경우의 시뮬레이션

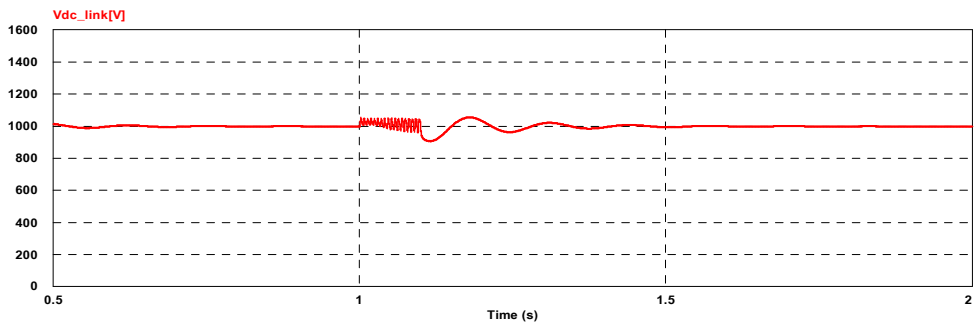
Fig 6.4는 1 ~ 1.1[sec] 동안 전원전압에 고조파를 주입한 후, 검출된 위상각과 DC-link단의 출력특성을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 영점 교차기법을 통해 구한 위상각이 고조파를 발생시킨 구간에서 심하게 틀어지는 현상을 확인하였으며, 이 구간에서 DC link단의 직류출력전압이 헛팅하는 것을 확인하였다.



(a) Input voltage



(b) Theta



(c) Voltage of DC\_link

**Fig 6.4** Simulation responses for AFE rectifier with zero crossing



## 6.2 전원전압 위상각 검출기법을 적용한 AFE 정류기의 시뮬레이션

본 연구에서 제안하는 위상각 검출기를 적용한 AFE 정류기 제어시스템의 다이어그램을 Fig 6.5에 나타내었다.

측정된 전원전압을 통한 기존의 위상각 검출방식이 아닌 제안하는 위상각 검출방식의 유효성을 확인하기 위해 영점 노이즈, 위상 변화 및 고조파를 주입한 전원전압 파형을 위상각 검출기의 입력측에 공급하였으며, 그 결과를 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

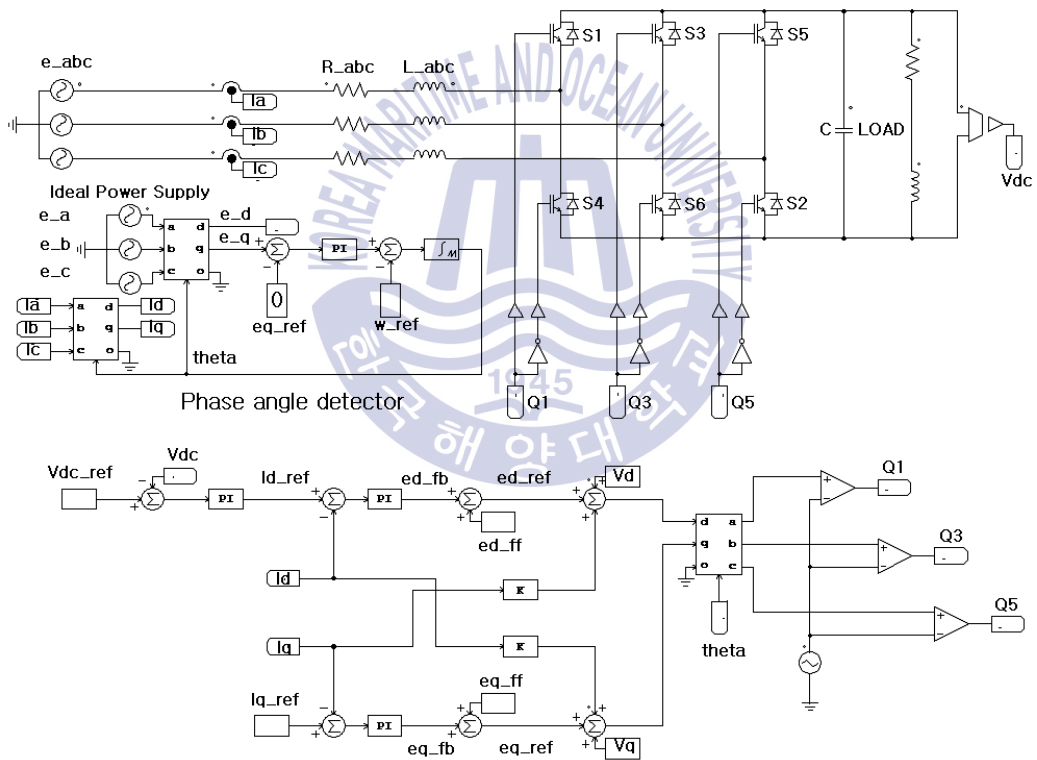
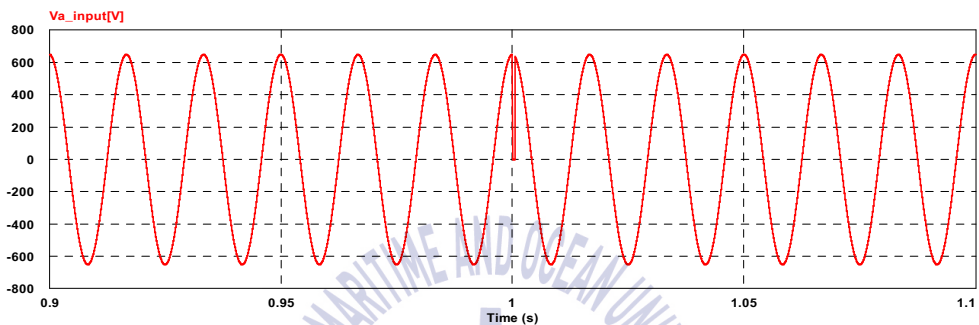


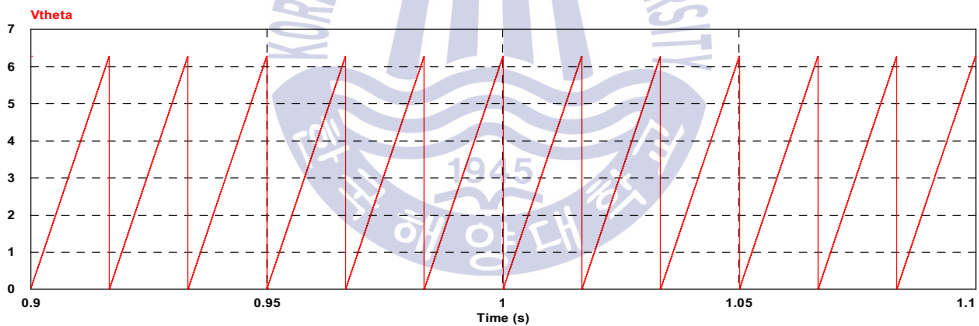
Fig 6.5 Schematic diagram for AFE rectifier system with proposed topology control method.

### 6.2.1 전원전압에 영점 노이즈가 발생하는 경우의 시뮬레이션

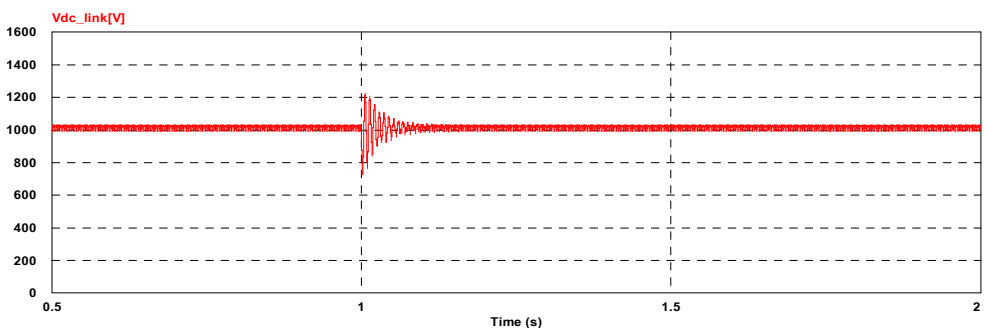
Fig 6.6은 1[sec] 시점에서 전원전압에 영점 노이즈를 주입한 후, 검출된 위상각과 DC-link단의 출력특성을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 제안하는 위상각 검출기법을 통해 구한 위상각이 영점 노이즈를 발생시킨 1[sec] 구간에서도 변함없이 위상각을 출력하는 것을 확인하였으며, 이 구간에서 DC link단의 직류 출력전압도 기존의 방식에 비해 개선된 점을 알 수 있었다.



(a) Input voltage



(b) Theta

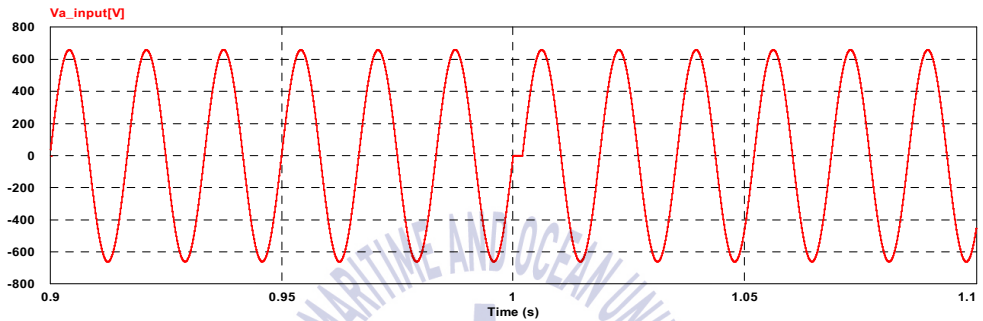


(c) Voltage of DC\_link

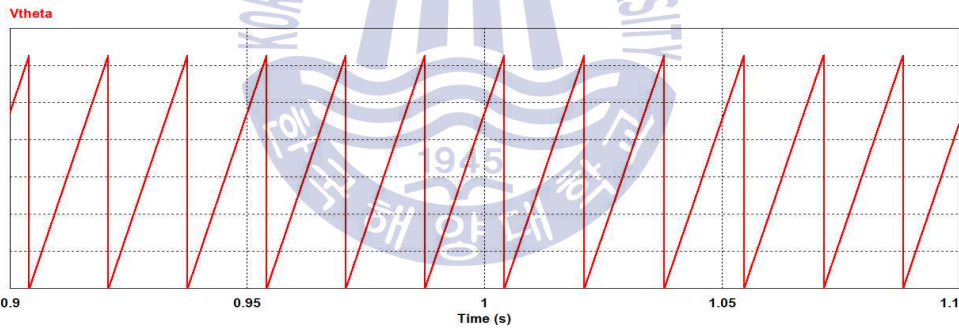
**Fig 6.7** Simulation responses for AFE rectifier with proposed control logic

### 6.2.2 전원전압의 위상이 변이되는 경우의 시뮬레이션

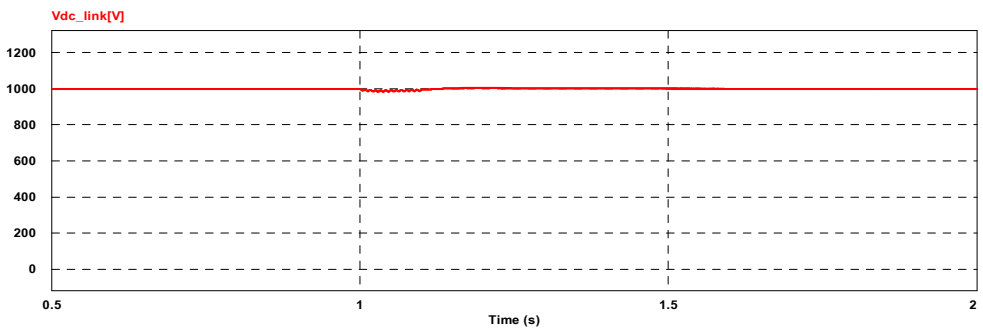
Fig 6.8은 1[sec] 시점에서 위상이 지연된 전원전압을 공급한 후, 검출된 위상각과 DC-link단의 출력특성을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 제안하는 전원전압 위상각 검출기법을 적용한 경우 위상각이 위상 지연을 발생시킨 1[sec] 구간에서도 정상적으로 출력되는 결과를 얻을 수 있었으며, 이 구간에서 DC link단의 직류출력전압도 기존의 방식에 비해 변동폭이 감소한 결과를 확인하였다.



(a) Input voltage



(b) Theta

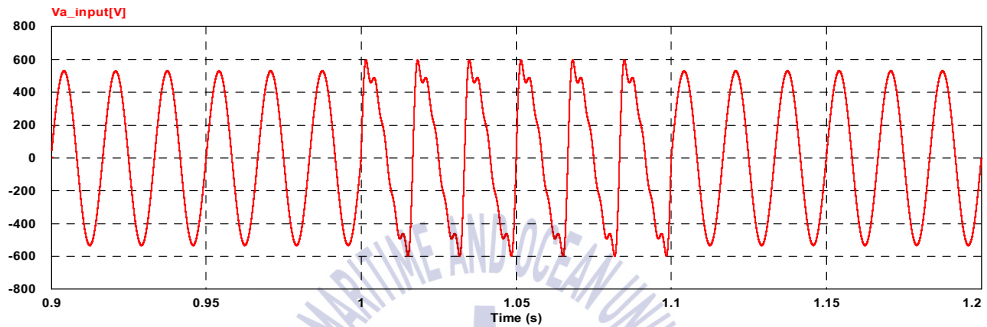


(c) Voltage of DC\_link

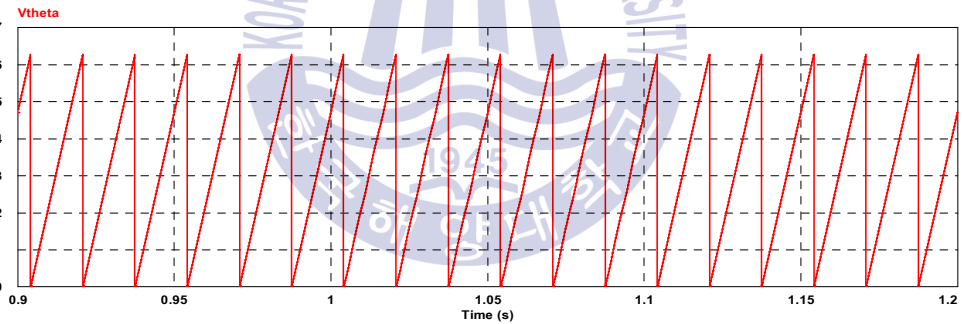
Fig 6.8 Simulation responses for AFE rectifier with proposed control logic

### 6.2.3 전원전압에 고조파가 포함된 경우의 시뮬레이션

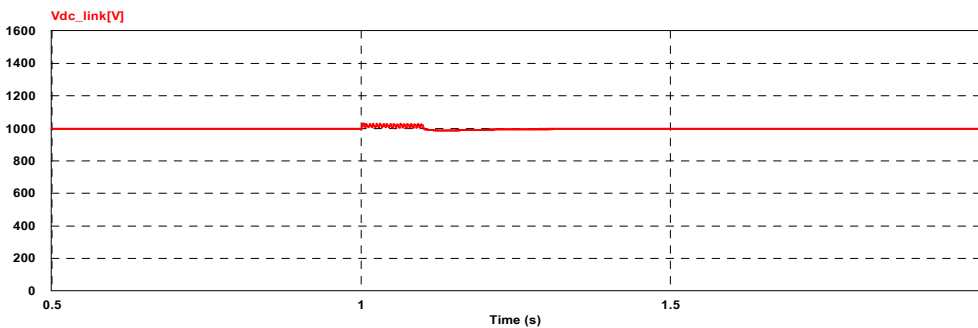
Fig 6.9는 1 ~ 1.1[sec] 동안 전원전압에 고조파를 주입한 후, 검출된 위상각과 DC-link단의 출력특성을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 제안하는 위상각 검출기법을 적용한 경우 고조파를 발생시킨 구간에서도 정확한 위상각을 구할 수 있었으며, 이 구간에서 DC link단의 직류출력전압도 기존의 방식에 비해 안정적으로 출력되는 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Input voltage



(b) Theta



(c) Voltage of DC\_link

Fig 6.9 Simulation responses for AFE rectifier with proposed control logic

## 제 7 장 결론

본 논문에서는 전기추진시스템의 AFE 정류기에 제안하는 위상각 검출기법을 적용하여 기존 AFE 정류기의 위상각 검출기법과의 출력특성을 비교하였다.

기존의 위상각 검출기법은 전원전압을 위상각 제어기입력으로 사용하므로 노이즈나 고조파 등이 포함된 전원전압이 입력될 경우 정확하지 않은 위상각  $\theta$  로 인해 정류기의 제어가 불안정해진다. 따라서 본 논문에서는 순간적인 입력 전원 파형의 왜곡에도 정확한 위상각을 얻을 수 있는 전원전압 위상각 검출기법을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안하는 방식의 유효성을 확인하였다.

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기존의 AFE 정류기는 발전기 전원전압으로부터 위상각을 검출하여 정류기의 제어에 사용하는데 선박의 발전기 출력전압은 부하변화 및 전력변환장치의 스위칭 등 여러가지 원인에 따라 순간적으로 불규칙한 파형이 출력되는 경우가 발생하므로 위상각 측정에 오차가 발생하여 정류기의 제어가 불안정해지게 된다. 본 논문에서는 제안하는 위상각 검출기의 유효성을 입증하기 위해 검출기로 공급되는 발전기 교류전원에 영점 노이즈, 위상변화 및 고조파가 주입된 불규칙한 파형을 공급하여 구해진 위상각을 기존의 위상각 검출기법과 비교하였으며, 제안하는 위상각 검출기법을 통해 순간적으로 발전기 출력전압에 불규칙한 파형이 포함되어도 위상각 및 DC link단의 전압출력의 결과가 양호함을 확인하였다.

2) 제안하는 전원 전압 위상각 제어기 방식은 정지좌표계  $\alpha - \beta$ 를 동기좌표계로  $d - q$ 축으로 변환하여  $e_d, e_q$  전압을 구하고 임의로  $e_d$ 는 유효전력성분,  $e_q$ 는 무효전력성분이 되도록 설정하여  $e_q$ 인 무효전력성분값이 0이 되도록 제어하여 위상각의 정확한 측정이 가능하며, 전원전압에 불규칙한 파형을 주입하여 출력결과의 유효성을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] 설승기, 2009. *전기기기 제어론*. 홍릉과학출판사.
- [2] H.M, Jeon, 2018. A Study on the Performance Improvement for AFE Rectifier. Degree of Master. Busan: Department of Marine System Engineering.
- [3] William F. Egan, 2007. *Phase-Lock Basics*. Wiley-IEEE.
- [4] W. Bin, 2006. *High-Power Converters and AC Drives*. Wiley-IEEE.
- [5] T, J. McCoy., 2002. Trend in ship electric propulsion. *Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, July 21-25, 2002, pp. 343-346.
- [6] 김종수, 최재혁, 윤경국, 서동환, 2012. 새로운 정류방식을 이용한 전기추진 선박의 고조파 저감. *한국정보통신학회논문지*, 16(10), pp. 2230-2236.
- [7] Kim, S. Y., Cho, B. G. & Sul, S. K., 2013. Consideration of active-front-end rectifier for electric propulsion navy ship. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, CO, September 15-19, 2013, pp.13-19.
- [8] Li, Y. W., Pande. M., Zargari. N., & Bin, W., 2010. An input power factor control strategy for high-power current-source induction motor drive with active front-end. *IEEE TRANSACTIONS POWER ELECTRON*, 25(2), pp. 352-359.
- [9] 노의철, 정규범, 최남섭, 2012. *전력전자공학*, 문운당.

## 감사의 글

먼저 부족한 저를 제자로 받아주시고 큰 가르침을 주신 김종수 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 지난 2년여의 석사과정 동안 학문적 지식과 더불어 세상을 살아가는데 필요한 많은 지혜와 조언을 배울 수 있어 영광이었습니다.

또한 바쁘신 가운데 저의 학위논문 심사위원장님과 심사위원님을 맡아주신 김성환 교수님, 오세진 교수님께 감사드립니다.

회사일로 바쁘다는 핑계로 자주 찾지 못하는 저를 항상 따뜻하게 맞아 주시는 수송대를 좋아하는 재정이형, 출장을 많이 다니는 기도형, 외국과자를 많이 사오는 내 친구 동욱이, 개그코드를 맞추기 어려운 착한 성완이, 모닝 타는 영균이, 항상 고마운 현민이, 철환이, 준영이, 모든 연구실 선후배님들께도 감사의 인사를 드립니다.

처음 대학원 진학에 대하여 조언을 구했을 때 용기를 주고 또 최고의 연구실을 소개해 준 가족을 너무 사랑하는 이원주 교수님께도 깊이 감사드립니다.

업무에 지장이 있을 수 있음을 이해해주시고 대학원을 다닐 수 있도록 많은 배려와 응원을 해주신 YAMAL TRADE 장성일 감독님께도 감사드립니다.

처음 현대중공업에서 전기업무를 시작했을 때 누구보다 아껴주시고 지도해주셨던 전성열 차장님, 심상욱 팀장님께 감사드립니다.

바르고 정직하게 살아가도록 가르쳐주신 사랑하는 부모님, 미국에 있는 하나뿐인 내 동생 미아와 가족들, 소중한 처남 종희, 그리고 누구보다 기뻐하셨을 하늘에 계신 장모님께 감사드립니다.

항상 믿어주고 나의 선택을 존중하고 적극 후원해준 든든한 평생의 반려자 정이와 우리 첫째 배달 민준, 둘째 핑크공주 민서 사랑합니다.

마지막으로 현업에서 엔지니어로서 근무하는데 꼭 필요한 지식을 가르쳐 주시고 많이 부족하지만 각자가 가진 가능성을 찾아 더 발전할 수 있도록 지도 해주신 김종수 교수님께 다시 한번 깊이 감사드리며 존경합니다. 앞으로도 우리 연구실에 도움이 되는 사람이 되도록 하겠습니다.