



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

AFE 정류기의 성능개선에 관한 연구

A Study on the Performance Improvement
for AFE Rectifier



지도교수 김종수

2018年 2月

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

전 현 민

본 논문을 전현민의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 김 성 환 (인)

위 원 공학박사 김 종 수 (인)

위 원 공학박사 오 세 진 (인)



2017년 12월 20일

한국해양대학교 대학원
기관시스템공학과
전 현 민

목 차

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vii
기호설명	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	2
1.3 논문의 구성	3
제 2 장 선박의 전기추진시스템	4
2.1 전기추진시스템의 개요 및 전체구성	4
2.2 전기추진시스템의 세부구성	5
2.2.1 원동기와 발전기	5
2.2.2 전력변환장치	5
2.2.3 추진전동기	7
제 3 장 기존 전기추진시스템의 정류기	9
3.1 DFE 정류기	9
3.1.1 DFE 정류기의 구성	9
3.1.2 DFE 정류기의 직류출력과 전원 출력측의 고조파 발생정도	10
3.2 상천이변압기를 이용한 DFE 정류기	11
3.2.1 상천이변압기의 개요	11
3.2.2 12펄스 정류	12

3.2.3 18펄스, 24펄스 정류	14
3.2.4 상천이변압기를 이용한 DFE 정류기의 직류출력과 전원 출력측의 고조파 발생정도	17
3.3 AFE 정류기	18
3.3.1 AFE 정류기의 구성	18
3.3.2 AFE 정류기의 특징	19
3.3.3 AFE 정류기의 직류출력과 전원 출력측의 고조파 발생정도	23
3.4 기존 정류기의 고조파 비교	24
제 4 장 본 논문에서 제안하는 AFE 정류기	26
4.1 AFE 정류기의 수학적 모델링	26
4.2 개선된 전원 전압 위상각 제어기의 설계	27
4.2.1 좌표축 변환	27
4.2.2 제안하는 위상각 제어의 기본 원리	31
4.2.3 개선된 위상각 제어기의 설계	34
4.3 속도기전력 전향보상을 갖는 전류제어기 설계	37
4.4 DC link단 직류 출력전압 제어기	39
4.5 제안하는 AFE 정류기의 전체 제어회로	40
제 5 장 시뮬레이션	42
5.1 기존의 AFE 정류기 출력	44
5.2 제안하는 AFE 정류기 출력	48
5.3 제안하는 AFE 정류기를 활용한 전기추진시스템의 시뮬레이션	53
제 6 장 결 론	59
참고문헌	61

List of Tables

- Table 3.1** Voltage distortion limits
- Table 3.2** Comparison of Total harmonic distortion by rectifier type
- Table 5.1** System parameters used in AFE rectifier
- Table 5.2** System parameters used in induction motor



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 The 12-pulse series type diode rectifier
- Fig 3.4 Simulation results of input current and DC link voltage by 12 pulse rectifier
- Fig 3.5 The 18-pulse series type diode rectifier
- Fig 3.6 Simulation results of input current and DC link voltage by 18 pulse rectifier
- Fig 3.7 The 24-pulse series type diode rectifier
- Fig 3.8 Simulation results of input current and DC link voltage by 24 pulse rectifier
- Fig 3.9 Comparison output voltage of 6 pulse and 12 pulse
- Fig 3.10 Circuit diagram of AFE rectifier
- Fig 3.11 Single phase model of AFE rectifier
- Fig 3.12 Power Factor = 1 (in phase)
- Fig 3.13 Power Factor = -1 (negative phase)
- Fig 3.14 Block diagram of zero crossing
- Fig 3.15 Relationship between supply voltage and phase angle of zero crossing technique
- Fig 3.16 Example of voltage notching
- 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 4.4 Block diagram of proposed Reference supply voltage phase angle controller

- Fig 4.5 Actual phase θ = Error phase $\hat{\theta}$
- Fig 4.6 Actual phase $\theta <$ Error phase $\hat{\theta}$
- Fig 4.7 Actual phase $\theta >$ Error phase $\hat{\theta}$
- Fig 4.8 Coordinate transformation of input voltage
- Fig 4.9 Transformation of stationary $\alpha-\beta$ axis to rotating $d-q$ axis
- Fig 4.10 Block diagram for phase angle calculator of supply voltage
- Fig 4.11 Block Diagram of current control system for rotating $d-q$ axis
- Fig 4.12 Current controller with back EMF forward compensation
- Fig 4.13 Control block diagram of voltage controller
- Fig 4.14 Block diagram of control circuit for proposed AFE rectifier
- Fig 5.1 Basic block diagram of Electric Propulsion Ship with proposed AFE rectifier
- Fig 5.2 Schematic diagram for conventional AFE rectifier
- Fig 5.3 Simulation response for DC link voltage of conventional AFE rectifier
- Fig 5.4 Simulation response for change of load ($100\Omega \rightarrow 150\Omega \rightarrow 50\Omega$)
- Fig 5.5 Power factor for voltage and current of conventional AFE rectifier
- Fig 5.6 Total harmonic distortion for conventional AFE rectifier
- Fig 5.7 Schematic diagram for proposed AFE rectifier
- Fig 5.8 Simulation response for DC link voltage of proposed AFE rectifier
- Fig 5.9 Simulation response for change of load ($100\Omega \rightarrow 150\Omega \rightarrow 50\Omega$)
- Fig 5.10 Simulation response for change of q -axis voltage
- Fig 5.11 Power factor for voltage and current of proposed AFE rectifier
- Fig 5.12 Total harmonic distortion for proposed AFE rectifier
- Fig 5.13 Schematic diagram for Electric Propulsion System using proposed AFE rectifier
- Fig 5.14 Simulation responses for step change of speed setting ($0 \rightarrow 100[\text{rpm}]$, $0 \rightarrow 200[\text{rpm}]$, $0 \rightarrow 300[\text{rpm}]$)

- Fig 5.15** Simulation responses for step change of speed setting (0 → 500[rpm])
- Fig 5.16** Simulation responses for step change of speed setting (500 → - 500[rpm])
- Fig 5.17** Power factor for voltage and current of Electric Propulsion System using proposed AFE rectifier
- Fig 5.18** Simulation response for DC link voltage of Electric Propulsion System using proposed AFE rectifier
- Fig 5.19** Total harmonic distortion of Electric Propulsion System using proposed AFE rectifier



A Study on the Performance Improvement for AFE Rectifier

Hyeon-Min, Jeon

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

Abstract

The THD(Total Harmonic Distortion) level of AFE rectifiers is relatively lower than DFE rectifiers in the AC output of a source unit and the power factor can be improved by controlling input currents. In addition, it makes output voltages similar to DC waveforms in a DC link. However there is a disadvantage that when the source voltage is unmeasurable precisely because of harmonics or noises in circuits, a phase angle of the source can not be detected accurately, therefore the control of the rectifier will be unstable.

In this paper, the improved AFE rectifier which has the enhanced controller of a phase angle in the source unit is proposed and it also provides decoupling control by feeding forward interference factors to the synchronous rotating d and q axes.

Consequently, the simulation demonstrated that the output waveform in the DC link of the improved AFE rectifier illustrates the reduced harmonics and the improved power factor.

KEY WORDS: AFE Rectifier AFE 정류기; Phase angle controller 위상각 제어기; Current controller 전류제어기.

AFE 정류기의 성능개선에 관한 연구

전 현 민

한국해양대학교 대학원
기관시스템공학과

요 약

AFE 정류기는 DFE 정류기에 비해서 교류전원 출력측의 총고조파왜형률이 낮고, 입력 전류가 제어가 가능하므로 역률이 향상된다. 또한, DC link단의 직류 출력 파형을 일정하게 유지 할 수 있다. 하지만 전원 전압이 고조파나 잡음으로 제대로 측정되지 않을 경우 전원 전압의 위상각이 정확하게 검출되지 않으므로 정류기 제어가 불안정해지는 단점이 있다.

본 논문에서는 제안하는 전원 전압 위상각 제어기를 이용한 개선된 AFE 정류기를 설계하였고, 동기회전좌표계로 변환된 d 축, q 축 전류에 외란으로 영향을 주는 간섭성분을 전향보상하여 독립적으로 제어하였다.

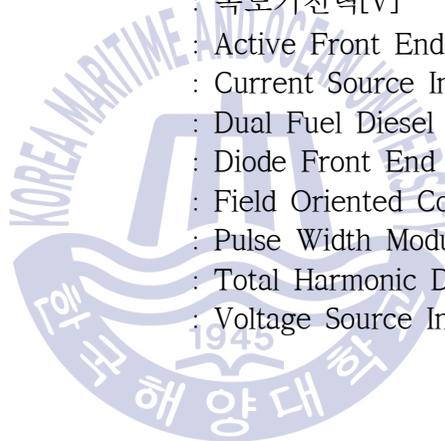
개선된 AFE 정류기의 직류출력 파형개선, 전원 출력측의 고조파 저감 및 역률 개선 등의 응답특성이 우수함을 시뮬레이션의 결과로서 증명하였다.

KEY WORDS: AFE Rectifier AFE 정류기; Phase angle controller 위상각 제어기; Current controller 전류제어기.

기 호 설 명

$\alpha - \beta$: 2축 정지좌표계
C	: DC link단 커패시터[F]
$d - q$: 2축 동기회전좌표계
δ	: 상천이변압기의 상천이각
e_a, e_b, e_c	: a, b, c 상 입력 전압[V]
e_α, e_β	: $\alpha - \beta$ 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]
E_{AB}	: 상천이변압기의 1차측 선간전압[V]
E_{ab}	: 상천이변압기의 2차측 선간전압[V]
$E_{\bar{ab}}$: 상천이변압기의 3차측 선간전압[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_α, i_β	: $\alpha - \beta$ 축 교류입력전류[A]
i_d, i_q	: $d - q$ 축 교류입력전류[A]
i_s	: 교류입력전류[A]
K	: 비례상수
L	: 인덕터[H]
M	: 전동기 관성모멘트[kg m^2]
N	: 변압기 권선수
n	: 전동기 회전수
P	: 전동기 극수
P_s	: 전원 전력
PF	: 역률
R	: 입력 저항[Ω]
V_a, V_b, V_c	: a, b, c 상 정류기의 입력전압[V]

V_{α}, V_{β}	: $\alpha - \beta$ 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]
θ	: 실제 위상각[rad]
ω	: 각속도[rad/s]
$\Delta\omega$: 미소각속도[rad/s]
ω_e	: 동기회전각속도[rad/s]
$\omega Li_d, \omega Li_q$: 속도기전력[V]
<i>AFE</i>	: Active Front End
<i>CSI</i>	: Current Source Inverter
<i>DFDE</i>	: Dual Fuel Diesel Electric
<i>DFE</i>	: Diode Front End
<i>FOC</i>	: Field Oriented Control
<i>PWM</i>	: Pulse Width Modulation
<i>THD</i>	: Total Harmonic Distortion
<i>VSI</i>	: Voltage Source Inverter



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 국제사회는 지구환경을 보호하기 위한 각종 규제를 대폭 강화하고 있으며, 해상분야에서는 국제해사기구를 중심으로 선박에서 배출되는 환경오염 물질을 줄이기 위한 여러 규제책을 마련하여 시행하고 있다. 특히 선박의 주기관으로 사용하는 디젤엔진에서 배출되는 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 미세먼지 등 대기환경 오염물질의 배출저감을 위한 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 이러한 해결책의 한 가지 방안으로 발전기에서 생산된 전기에너지를 연료전지, 배터리, 태양광 에너지 등의 친환경 신재생에너지원과 결합하여 사용할 수 있도록 하는 전기추진시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

전기추진시스템은 발전기에서 생산된 교류전력을 직류로 변환하는 과정이 필수적이며, 기존에는 ON/OFF 제어가 불가능한 다이오드 소자를 이용하는 DFE 정류기를 사용하여 6펄스, 12펄스, 18펄스 등의 직류 파형을 출력했다. 하지만 이 방식은 교류입력 전원 측에 높은 수준의 고조파가 포함되어 전원 측의 전력 품질을 현저히 저하시키고, 입력 역률저하로 시스템 전체의 효율 감소와 펄스 형태의 직류 출력으로 인해 파형이 왜곡되는 현상이 발생한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 대용량의 수동필터(Passive filter)와 상천이변압기(Phase shifting transformer)를 설치해야하므로 전체 시스템의 부피가 크게 증가하고, 설비가격도 상승되는 단점이 있다.

반면에 AFE 정류기는 교류전원의 입력전류를 정현적으로 제어 가능하여 입력전류에 포함된 고조파를 크게 감소시킬 수 있고 입력 전압과 전류의 역률제어가 가능한 장점이 있지만, 전원 전압이 고조파나 잡음으로 인한 노칭(Notching) 등의 이유로 제대로 측정되지 않을 경우 전원 전압의 위상각이 정확하게 검출되지 않으므로 정류기의 제어가 불안정해지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 정류기 제어의 정확성을 높이기 위한 전원 전압 위상각 제어기를 적용한 AFE 정류기를 제안한다.

1.2 연구내용

AFE 정류기나 계통 연계형 인버터는 전압과 전류제어기의 설계 시 3상/2축 좌표변환이 필요하며, 이를 위해 전원 전압의 위상각 θ 를 정확하게 검출하는 것이 매우 중요하다. 기존의 위상각 검출은 전원 전압이 양에서 음으로 바뀌는 순간을 기준각으로 설정하여 위상각을 구하는 영점 교차(Zero Crossing)회로를 주로 이용하며, 이 방식은 왜곡된 파형의 전원 전압이 측정될 경우에는 정확한 위상각을 얻을 수 없기 때문에 정류기 제어에 오차가 발생한다.

본 논문에서 제안하는 위상각 제어기를 이용한 개선된 AFE 정류기는 측정된 전원 전압이 고조파나 잡음에 의해 전압 노칭이 발생하여 불규칙한 파형을 검출하는 경우에도 실제 위상각과 일치하는 제어 위상각을 구하는 것이 가능한 전원 전압 위상각 제어기를 사용한다. 새로운 위상각 제어기는 전원 전압을 동기회전좌표계 $d-q$ 축으로 변환한 뒤 임의로 d 축에 모든 유효전력의 값을 위치시켜 q 축의 전압크기를 항상 0이 되도록 제어하며, 이 과정에서 비례적분제어기를 거쳐 출력된 제어 위상각을 실제 위상각과 실시간으로 비교하여 전원 전압의 위상각 θ 를 검출한다. 이 제어기는 고조파나 잡음 등으로 인해 전원 전압이 정확하게 측정되지 않으면 위상각에 오차가 발생하는 기존의 영점 교차기법에 비해 어떤 상황에서도 빠르고 정확하게 위상각을 검출할 수 있다. 또한 정류기에서 출력되는 DC link단의 직류 출력파형을 전압제어기로 실시간 피드백하여 지령 전압값과 비교하며 정상상태에서 오차없이 지령값을 추종할 수 있도록 제어하므로 DFE 정류기에 비해 작은 크기의 커패시터를 DC link단에 설치해도 직류 출력파형이 크게 개선되는 것을 확인할 수 있다.

제안하는 전원 전압 위상각 제어기는 위상각 θ 를 정확하게 검출할 수 있으므로 정류기의 제어에 있어 신속하게 지령값을 추종가능하며, 정상상태에서 오차가 줄어든다. 또한, 교류입력을 정현적으로 제어가 가능하기 때문에 전원 출력의 총고조파왜형률을 현저히 감소시킬 수 있고, 전압과 전류의 역률이 개선되며 원하는 크기의 DC link단 직류 출력파형을 얻을 수 있다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다.

1장 서론에서는 연구배경, 내용 및 논문의 구성에 대해 기술하고,

2장에서는 선박 전기추진시스템의 개념 및 각 부 구성에 대해 설명하였다.

3장에서는 기존 전기추진시스템 정류기의 종류별 구성 및 특징을 상술하였으며,

4장에서는 본 논문에서 제안하는 새로운 전원 전압 위상각 제어기법을 활용한 AFE 정류기에 대해 자세히 서술하였다.

5장에서는 제안하는 새로운 전원 전압 위상각 제어기법을 활용한 AFE 정류기의 유효성을 확인하기 위해 기존의 AFE 정류기를 사용하는 경우와 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, 또한 새로운 방식을 적용한 소형전기추진시스템의 회로를 설계하고 시뮬레이션을 통해 역률 및 총고조파왜형률의 개선정도를 분석하였다.

6장에서는 본 논문의 새로운 전원 전압 위상각 제어기법을 활용한 AFE 정류기를 이용한 전기추진시스템에 대한 연구결과를 요약하고 평가하였으며, 향후 과제의 방향에 대하여 언급하였다.

제 2 장 선박의 전기추진시스템

2.1 전기추진시스템의 개요 및 전체구성

20세기 초반 군함의 추진시스템으로 처음 도입된 전기추진시스템은 당시 여러 가지 기술적인 한계로 일부 특수선을 제외한 일반선박에서는 적용이 제한적이 었다. 하지만 최근 전력전자기술의 발전에 기인한 전력변환장치의 급격한 성능 개선으로 전기추진시스템의 제어기법이 다양하게 개발되어 선박에서 적용되고 있으며 선박으로부터 배출되는 대기오염물질의 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 나타 낼 수 있으며 크게 원동기, 발전기, 전력변환장치 그리고 추진전동기로 구성된다.

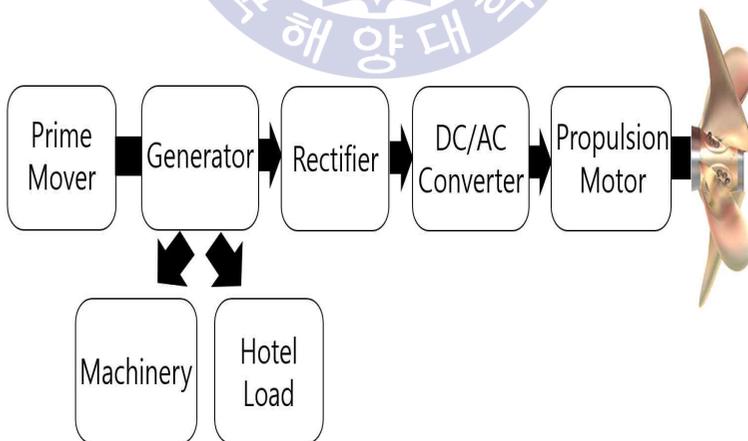


Fig 2.1 Block diagram of Electric Propulsion System

2.2 전기추진시스템의 세부구성

2.2.1 원동기와 발전기

원동기는 일반적으로 4행정 디젤엔진을 주로 사용하며, 최근 LNG 운반선이나 LNG 연료선박에서는 선박용 중유와 기화된 LNG를 동시에 연료로 사용하는 이중연료엔진(DFDE)을 사용한다. 그리고 원동기의 구동력으로 운전되는 발전기는 동기속도 ($N_0 = (120f)/P$) 로 회전하는 브러시리스 동기발전기가 주로 설치된다. 이것은 회전전기자형 교류발전기를 여자기로서 주발전기의 축에 직결하고 여자기의 회전자에 발생한 교류전력을 회전축에 설치한 정류기에 의해 정류하여 주발전기의 계자에 공급해주기 때문에 슬립링이나 브러시가 필요 없고 동시에 브러시의 마찰에 의해 발생하는 분말로 발전기가 오손되는 일이 없으므로 운전에 대한 신뢰성이 향상되며, 기타 부속장치가 불필요하기 때문에 경제적이고 보수점검이 용이한 장점이 있다. 또한 선박의 크기에 따라 대형선박에서는 추진전동기 및 다른 대형 보조기기의 원활한 작동을 위해 발전기 출력전압을 3,300[V], 6,600[V], 12,000[V] 등의 고전압으로 설정하고, 중소형 선박에서는 일반적으로 690[V]의 출력전압을 사용하고 있다.

2.2.2 전력변환장치

전력변환장치는 교류를 직류로 변환하는 정류기와 직류를 교류로 변환하는 인버터로 나눌 수 있으며, 인버터는 크게 DC link단에 커패시터를 사용하여 전압의 크기를 일정하게 유지하는 전압형인버터(VSI)와 DC link단에 인덕터를 사용하여 전류의 크기를 일정하게 하는 전류형인버터(CSI)로 구분할 수 있다. 전압형인버터는 전류형인버터에 비해 작은 크기로 부하의 변동에 따른 동특성이 우수하고, 제어가 용이하다는 장점으로 최근 건조되는 전기추진선박에 주로 사용되고 있으며, 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 DFE 방식을 사용한 전기추진시스템의 블록도이며, 발전기에서 생산된 교류전력을 다이오드 정류기를 통해 직류로 변환하는 것을 말한다. ON/OFF 제어가 불가능한 다이오드를 정류기의 스위치로 사용하기 때문에 회로구성이 간단한 장점이 있지만 전원 입력단에 사용함으로써 입력 전류의 총고조파왜형률(THD : Total Harmornic Distortion)이 커지는 단점이 있다. 총고조파왜형률이 커지면 발생된 고조파로 인해 선박의 전체 전력시스템에 악영향을 미치게 되고, 추진전동기나 항해 및 기타 장비에 장애를 발생시킬 수 있으므로 Fig 2.2와 같이 정류기 앞단에 상천이변압기를 설치하거나 수동필터를 설치하여 고조파를 감소시킨다.

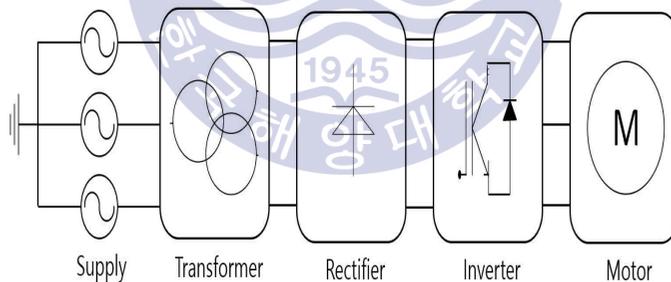


Fig 2.2 Block diagram of DFE topology

2) AFE 방식

AFE 방식은 발전기에서 생산된 교류전력을 능동적으로 제어하여 직류로 변환하는 것을 말하며, 정류기의 제어를 위해 IGBT, MOSFET, GTO 등 ON/OFF 제어가 가능한 전력용 스위치를 사용한다. 따라서 전원 측 입력전류를 정현파에

가깝게 유지할 수 있으므로 DFE 방식에 비해 총고조파왜형율이 크게 감소되는 장점이 있다. Fig 2.3은 AFE 방식 전기추진시스템의 블록도이며, DFE 방식에서 고조파 제거의 방법으로 설치한 상천이변압기가 필요 없기 때문에 전체 시스템의 전력효율이 개선되고, 차지하는 부피 또한 줄일 수 있다. 하지만 AFE 방식은 전력변환과정에서 전력용 스위치의 ON/OFF 제어가 발생하므로 DFE 방식에 비해 스위칭 손실이 증대된다.

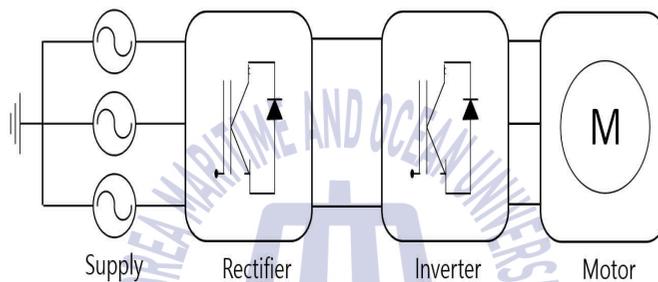


Fig 2.3 Block diagram of AFE topology

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 직류전동기는 구조가 복잡하고 유지보수에 어려움이 있어 최근에는 거의 사용하지 않고 있으며, 주로 유도전동기와 동기전동기를 추진전동기로 사용하고 있다.

1) 유도전동기

유도전동기의 구조는 고정자와 회전자로 구성되어 있으며, 고정자에 배치된

고정자 권선은 삼상 평형 교류전원을 통해 회전자계를 형성하고 이 회전자계에 의해 회전자에 유도된 기전력에 의해 회전자가 회전하는 원리를 갖는다. 간단한 구조를 가진 유도전동기는 일정 전압과 일정 주파수의 전원에 의해 거의 동기속도에 가까운 속도로 회전하는 일정 속도 전동기로 많이 사용되었으나, 최근 전력전자기술이 발전함에 따라 인버터를 이용한 전압과 주파수 조정으로 효율적이고 폭넓은 속도제어가 가능하게 되었다. 또한, 기계적으로 견고하며 유지보수가 용이한 장점이 있어 현재 추진전동기로 가장 많이 사용되고 있다.

2) 동기전동기

동기전동기의 고정자 구조는 유도전동기의 고정자와 동일하기 때문에 3상 전원을 연결하면 유도전동기와 같이 회전자계가 발생한다. 이 회전자계를 따라 동기속도로 회전하는 회전자의 구조는 원통형과 돌극형이 있으며, 통상 원통형은 고속용으로 사용되고 돌극형은 저속용으로 사용된다. 회전자의 자속은 독립된 직류전원에 연결된 계자권선으로부터 얻기 때문에 출력의 범위가 넓고 효율이 높아 수 MW급의 대용량 추진전동기로 많이 사용되어 왔지만 계자자속을 생성하기 위한 여자기를 설치해야하므로 시스템이 복잡해지는 단점이 있다. 따라서 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 어렵고 주로 소형선박의 저출력 추진시스템이나 특수선에서 사용되고 있다.

제 3 장 기존 전기추진시스템의 정류기

3.1 DFE 정류기

3.1.1 DFE 정류기의 구성

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

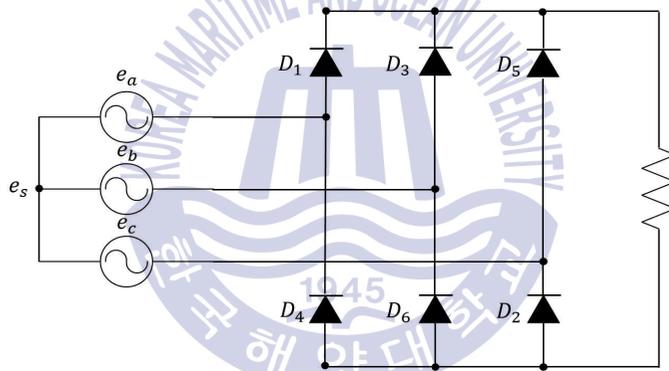


Fig 3.1 Three phase full-wave diode rectifier

정류기는 총 6개의 다이오드로 구성되며, 출력전류는 상단부 다이오드 (D_1, D_3, D_5) 중 하나와 하단부 다이오드 (D_2, D_4, D_6) 중 하나가 ON 되어 도통된다. 즉, 상단부의 3상 전원 중 임의의 시간 동안 전압의 크기가 (+)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.

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

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

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

3.1.2 DFE 정류기의 직류출력과 전원 출력측의 고조파 발생정도

DC link단 직류 출력전압은 전원 전압의 한 주기 내에서 펄스폭이 60° 이고 크기와 모양이 동일한 6개의 펄스형태를 가진 전압이 연속되어 출력되기 때문에 Fig 3.2와 같은 6펄스 형태의 출력파형을 가지며, 직류 출력의 파형개선을 위해서 정류기 출력측의 DC link단에 평활작용을 하는 대용량의 커패시터를 설치하여 출력파형을 개선한다.

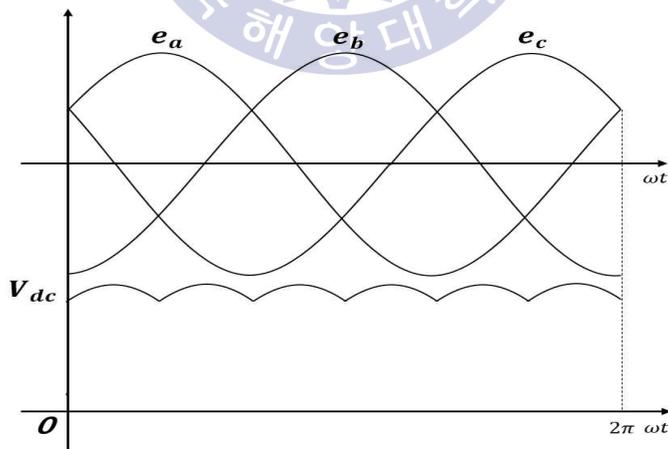


Fig 3.2 Voltage output of DC link for three phase full-wave diode rectifier

또한 입력전류에 5차, 7차, 11차, 13차 이상의 고조파가 포함되므로 총고조파 왜형률이 25[%] ~ 30[%] 정도로 커서 선박 전체 전력시스템의 품질을 심각하게 저하시키는 원인이 되며, Table 3.1에 제시된 총고조파왜형률을 규정하고 있는 IEEE Std 519-2014의 기준범위에서도 크게 벗어난다.

Table 3.1 Voltage distortion limits

Bus voltage E at PCC	Individual harmonic(%)	Total harmonic distortion THD(%)
$E \leq 1.0 kV$	5.0	8.0
$1 kV < E \leq 10 kV$	3.0	5.0
$69 kV < E \leq 161 kV$	1.5	2.5
$161 kV < E$	1.0	1.5

3.2 상천이변압기를 이용한 DFE 정류기

3.2.1 상천이변압기의 개요

상천이변압기는 전기추진선박에서 전압 및 주파수 변환을 위한 전력변환장치의 스위칭 시 발생하는 전력계통의 고조파 성분을 제거하기 위해 설치하는 장비이며, 상천이변압기의 2차측과 3차측 결선에 의해 상천이 된 교류를 정류하면 다중펄스의 DC link단 직류 출력파형을 얻을 수 있으므로 직류 파형의 개선 효과를 얻을 수 있다. 전기추진선박에서는 다수의 상천이변압기와 DFE 정류기의 조합을 통해 직류 출력파형의 펄스를 12펄스, 18펄스, 24펄스로 출력하여 사용한다. 하지만 한정된 공간을 가진 선박기관실에 상천이변압기의 설치로 인해 시스템이 차지하는 공간적인 문제와, 다수의 변압기와 정류기 설치에 따른 초기 구입비용의 상승에 대한 단점이 발생한다.

3.2.2 12펄스 정류

DFE 정류기의 앞단에 상천이변압기 한 셋트를 설치하는 12펄스 정류기는 상천이변압기를 사용하지 않는 6펄스 정류방식보다 전원 출력측의 고조파 특성을 개선한 것이며 12펄스를 발생하기 위한 상천이각은 식 (3-4)와 같이 각 상간 30°가 된다.

$$\delta = \angle E_{\overline{ab}} - \angle E_{AB} = 30^\circ \quad (3-4)$$

여기서, δ 는 상천이각, E_{AB} 는 1차측 선간전압, $E_{\overline{ab}}$ 는 3차측 Δ 결선 선간전압을 말한다.

Fig 3.3은 상천이변압기를 이용한 DFE 방식 12펄스 정류기의 블록도로서 변압기의 2차측과 3차측 결선은 각각 $Y-Y$, $Y-\Delta$ 의 결선으로 이루어져 있으며, 권선비는 식 (3-5)와 같다.

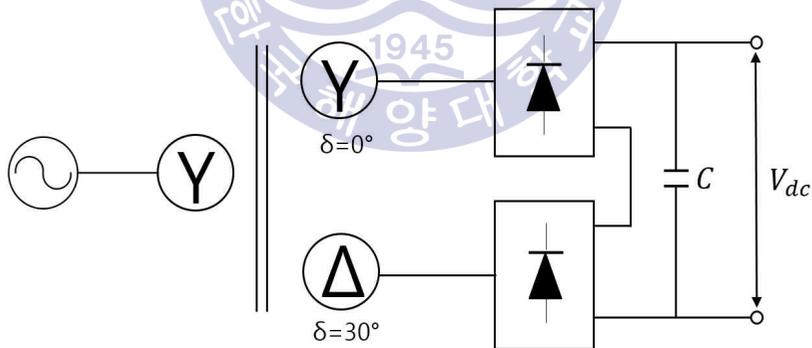


Fig 3.3 The 12-pulse series type diode rectifier

$$\frac{N_1}{N_2} = 2, \quad \frac{N_1}{N_3} = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (3-5)$$

여기서, N_1 , N_2 , N_3 는 각 1차, 2차, 3차측의 권선비를 말한다.

12펄스가 만들어지는 과정은 다음과 같다. Fig 3.3의 상단 2차측 Y결선과 정류기를 통해서 하나의 6펄스 직류 파형이 출력되며 또한, 3차측 Δ 결선과 정류기를 통해서 추가로 6펄스의 직류 파형이 만들어진다. 상천이변압기의 2차측 Y결선과 3차측 Δ 결선간의 위상이 30° 차이가 나기 때문에 각 단에서 만들어진 6펄스 직류 파형의 위상도 30° 차이가 발생하므로 정류기를 통과한 DC link단의 직류 출력파형은 12펄스 형태가 된다. Fig 3.4는 12펄스 정류기를 사용하여 구성한 정류기의 시뮬레이션 결과로서 상천이변압기 전후 a 상에서 발생하는 전류파형과 DC link단의 직류 출력파형을 나타내며, 입력측에 나타나는 고조파는 5차, 7차의 고조파가 제거된 11차, 13차 이상의 고조파만 발생하므로 총고조파 왜형률이 약 8.98%로서 6펄스 정류에 비해 크게 감소하였으나, 입력 측 a 상 전류파형은 완전한 정현파의 형태가 아닌 것을 확인할 수 있다. 또한 DC link 단의 출력파형도 한 주기당 12펄스의 형태를 나타내는 것을 알 수 있다.

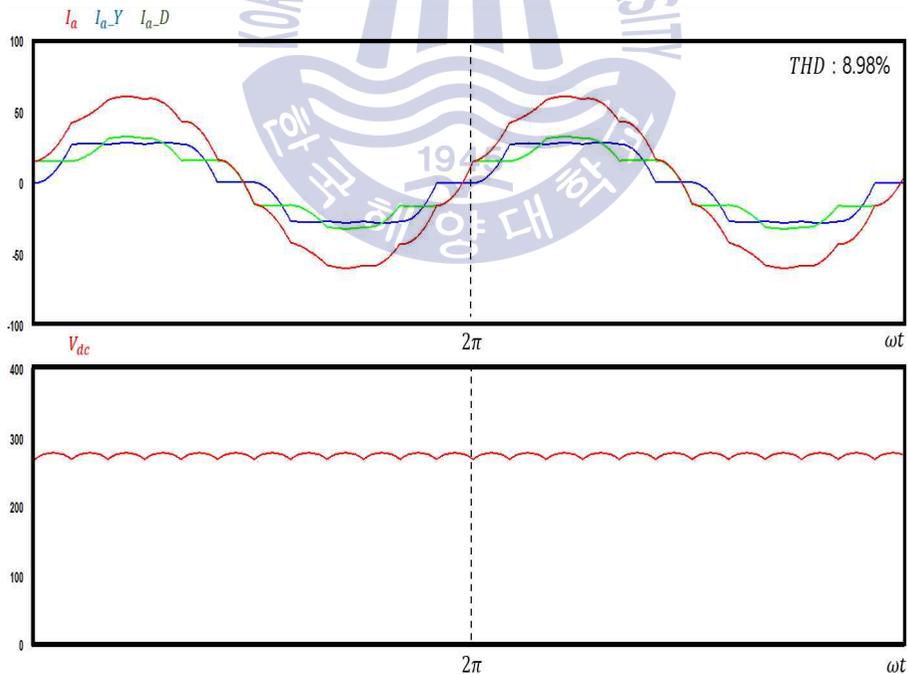


Fig 3.4 Simulation results of input current and DC link voltage by 12 pulse rectifier

3.2.3 18펄스, 24펄스 정류

6펄스와 12펄스 정류기 외에도 지그재그형 상천이변압기를 이용하여 더욱 개선된 직류 전압의 출력이 가능하며, 전원 출력측에 포함되는 고조파를 저감할 수 있는 18펄스, 24펄스 정류방법이 있다. Fig 3.5는 18펄스의 직류 출력전압을 가지는 DFE 정류기의 블록도이며, 상천이변압기의 상천이각 δ 는 다음 식 (3-6)과 같이 1차측 선간전압과 2차측 선간전압의 차로 구할 수 있다.

$$\delta = \angle E_{ab} - \angle E_{AB} = 20^\circ \quad (3-6)$$

여기서, δ 는 상천이각, E_{AB} 는 1차측 선간전압, E_{ab} 는 2차측 선간전압이다.

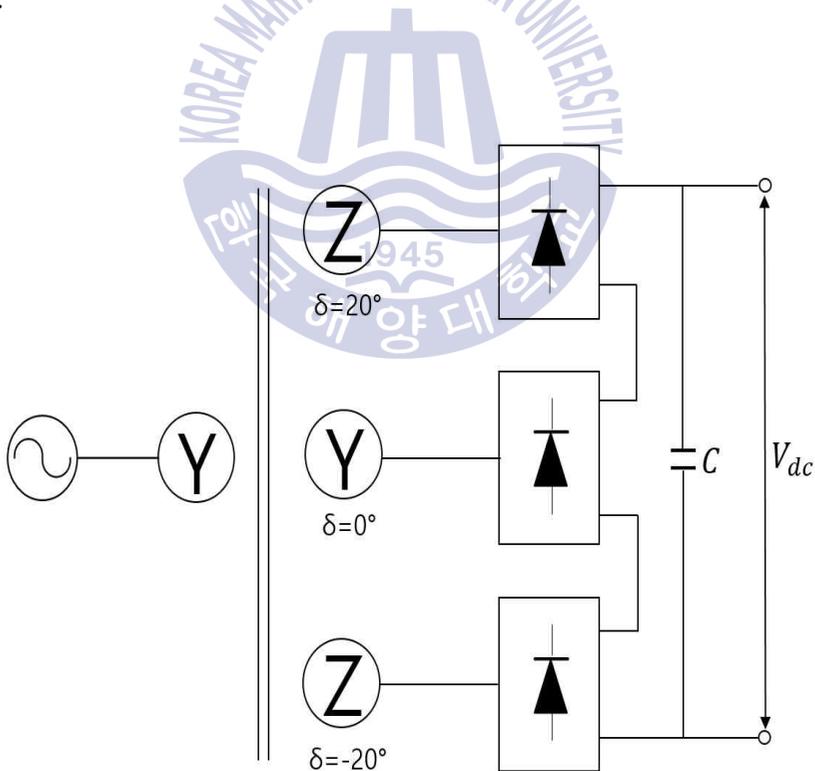


Fig 3.5 The 18-pulse series type diode rectifier

Fig 3.6은 18펄스 정류기의 시뮬레이션 결과로서 상천이변압기 전, 후 교류전원 a 상에서 발생하는 전류파형과 DC link단의 직류 출력파형을 나타내며, 전원 출력측에 나타나는 5차, 7차, 11차, 13차의 고조파가 제거되므로 총고조파왜형률이 약 4.23[%]로서 6펄스, 12펄스 정류에 비해 고조파의 크기가 크게 감소하였으며, 전원 출력 측 a 상 전류파형은 정현파의 형태를 보인다. 또한, DC link 단의 출력파형도 한 주기당 18펄스의 형태를 나타내므로 직류파형과 유사함을 알 수 있다.

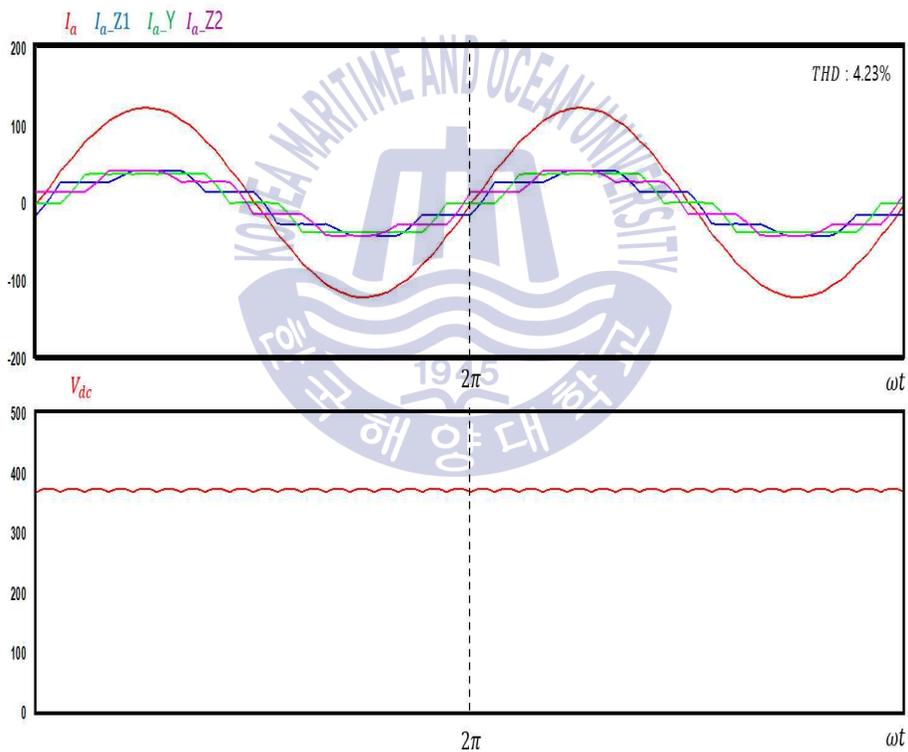


Fig 3.6 Simulation results of input current and DC link voltage by 18 pulse rectifier

Fig 3.7은 24펄스의 직류 출력전압을 가지는 정류기의 블록도이며, 상천이변압기의 상천이각 δ 는 18펄스 정류기와 동일하게 1차측 선간전압과 2차측 선간전압의 차로 구할 수 있다.

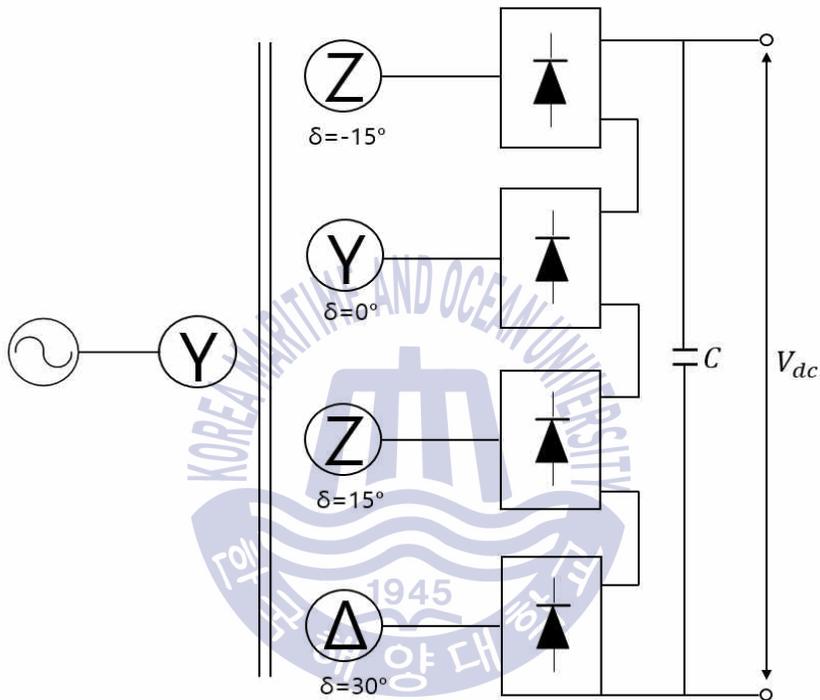


Fig 3.7 The 24-pulse series type diode rectifier

Fig 3.8은 24펄스 DFE 정류기의 시뮬레이션 결과로서 상천이변압기 전, 후 교류전원 a 상의 전류파형과 DC link단의 직류 출력파형이며, 전원 출력측에 포함되는 고조파인 5차, 7차, 11차, 13차, 17차, 19차의 고조파가 제거되어 총고조파 왜형률이 약 2.23[%]로서 앞에서 언급했던 정류기법들에 비해 크게 감소되고, 전원 출력 측 a 상 전류파형은 완전한 정현파의 형태를 보인다. 또한, DC link 단의 출력파형도 한 주기당 24펄스의 형태를 나타내므로 개선된 직류파형을 출력함을 알 수 있다.

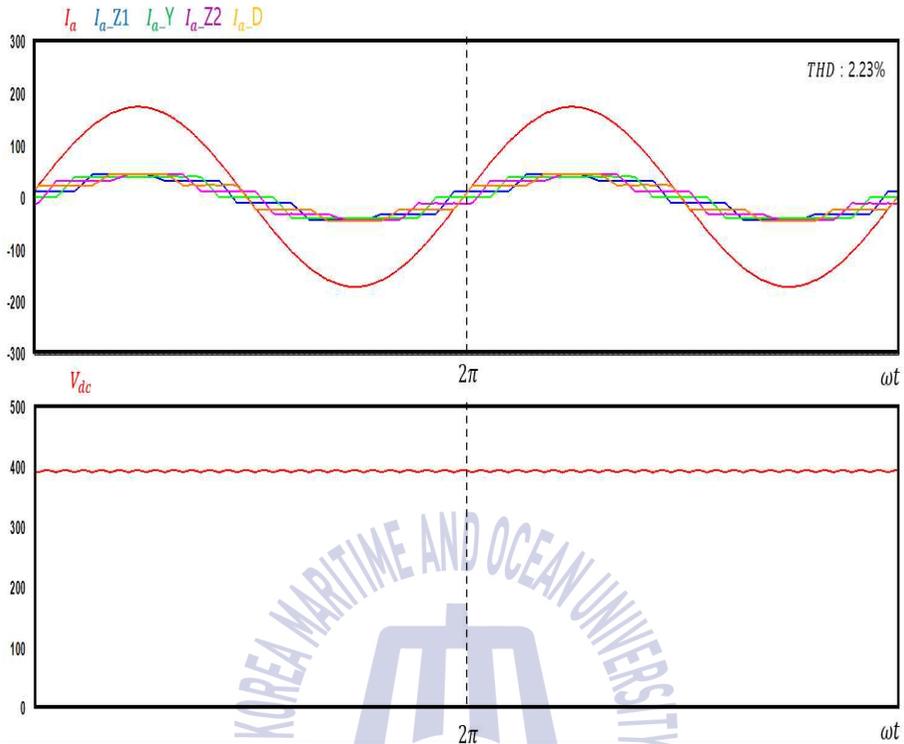


Fig 3.8 Simulation results of input current and DC link voltage by 24 pulse rectifier

3.2.4 상천이변압기를 이용한 DFE 정류기의 직류출력과 전원 출력측의 고조파 발생정도

12펄스 정류기에서는 상천이변압기의 2차측과 3차측 결선에 30° 의 위상차를 두고 DC link단의 직류 출력파형을 개선하고 전원 출력측의 총고조파왜형률을 감소시키며 18펄스와 24펄스 정류기 또한 변압기 결선의 위상차를 주는 방식을 이용하여 정류효과를 더욱 향상시킨다. Fig 3.9는 6펄스와 12펄스 정류기의 DC link단 직류출력 파형을 비교한 결과이며 6펄스 정류에 비해 12펄스 정류가 직류 출력전압의 한 주기당 12펄스를 가지므로 보다 평활한 상태를 나타냄을 알 수 있으며, 이와 같이 상천이변압기를 설치한 다중펄스 정류기법을 도입하면

DC link단의 직류 출력파형과 전원 출력측의 총고조파왜형률이 개선되지만 6펄스와 12펄스 정류의 경우에는 IEEE Std519-2014 규정을 여전히 만족시키지 못하므로 18펄스나 24펄스를 출력하는 고차의 정류기를 사용해야한다. 하지만 실제적인 구성에 있어서 18펄스나 24펄스의 효과를 갖도록 설계한다고 해도 지그재그 변압기의 설계가 복잡하기 때문에 오차가 발생하고 5차, 7차, 11차, 13차의 고조파가 완전히 제거되지는 않는다. 또한, 지그재그 변압기를 사용하는 경우가 12펄스 정류방식의 상천이변압기와 비교하여 상대적으로 변압기의 내부 구성이 어렵고, 부피가 커지는 단점이 있다.



Fig 3.9 Comparison output voltage of 6 pulse and 12 pulse

3.3 AFE 정류기

3.3.1 AFE 정류기의 구성

AFE 정류기는 ON/OFF 제어가 가능한 IGBT, MOSFET, GTO 등의 전력용 스위치를 사용하고, 제어방식에 따라 능동적으로 전력변환이 가능하기 때문에 부하

변동 시에도 직류 출력전압이 일정하게 유지된다.

Fig 3.10과 같이 AFE 3상 정류기는 3개의 단으로 이루어지며 각 단에는 2개의 스위치가 직렬로 연결되어 총 6개의 스위치로 구성되며 전원측에는 입력전류의 크기를 조절하는 역할을 하는 인덕터를 사용하며 정류기 출력측에는 직류 출력 전압을 일정하게 유지하기 위한 평활용 커패시터가 설치된다. 정류기의 동작 시, 각 단 상단부와 하단부의 스위치가 동시에 ON 동작을 하면 dv/dt 의 급격한 증가로 인해 스위치에 치명적인 손상을 받기 때문에 스위칭 시 지연시간을 두고 두 개의 스위치가 ON/OFF 되도록 상호 보완적인 동작 제어를 한다.

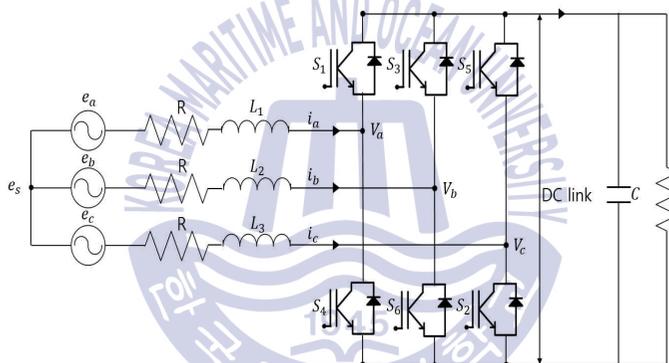


Fig 3.10 Circuit diagram of AFE rectifier

3.3.2 AFE 정류기의 특징

1) 전력변환 원리

AFE 정류기는 교류 입력전류 i_s 의 크기와 위상을 제어하면서 정류기의 전력을 변환하므로 교류전원과 정류기 사이의 인덕터 'L'에 인가되는 전압의 크기를 제어해야 한다. 하지만 교류전원은 고정되어 있으므로 결국 정류기 입력

전압 V_{rec} 의 제어를 통해서 i_s 를 조정한다. Fig 3.11은 AFE 정류기의 등가회로를 나타낸 것이다.

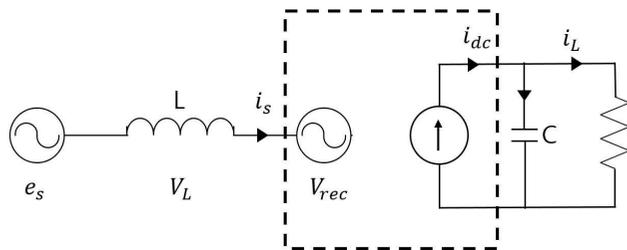


Fig 3.11 Single phase model of AFE rectifier

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.

$$e_s = V_L + V_{rec} \quad (3-7)$$

$$V_L = \omega L i_s \quad (3-8)$$

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

Fig 3.12와 Fig 3.13은 정류기의 입력전압 V_{rec} 를 제어함으로써 변화되는 교류 입력전류 i_s 를 페이지도로 나타낸 것이다. Fig 3.12에서 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 θ 도 증가시켜야 하며, 반대로 i_s 를 감소시키려면 V_{rec} 의 크기를 줄이면서 위상각 θ 를 줄여야 한다. 이러한 방식으로 항상 역률을 '1'인 상태로 유지하면서 정류기는 정류모드로 동작한다.

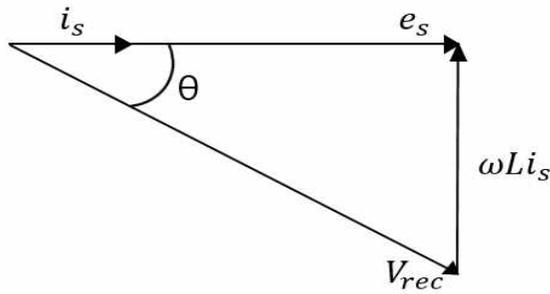


Fig 3.12 Power Factor = 1 (in phase)

Fig 3.13은 V_{rec} 의 위상이 e_s 보다 앞서게 함으로서 교류 입력전류 i_s 의 위상과 교류입력 전압 e_s 의 위상이 180° 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.

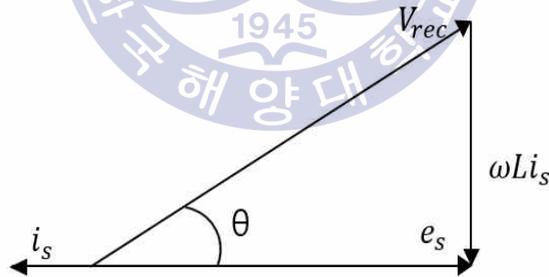


Fig 3.13 Power Factor = -1 (negative phase)

2) 기존의 전원 전압 위상각 검출

기존 AFE 정류기는 제어를 위한 위상각 θ 를 구하기 위해서 영점 교차(Zero Crossing)기법을 사용한다. 영점 교차기법은 Fig 3.14와 같이 전원 전압을 측정하여 반주기마다 나타나는 '0'을 찾아 현재 위상각 θ 를 추정한다.

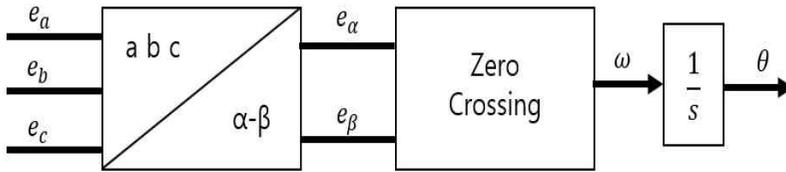


Fig 3.14 Block diagram of zero crossing

Fig 3.15와 같이 위상각을 구하기 위해 a 상의 전원 전압이 양에서 음으로 바뀌는 순간을 기준각 0° 로 설정하여 제어 위상각 θ 를 구하거나 3상 전원 a, b, c 를 정좌표계 $\alpha-\beta$ 축으로 좌표변환하여 e_α 와 e_β 를 구한 뒤 식 (3-9)와 같이 직접 필요한 위상각 θ 를 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{e_\alpha}{e_\beta}\right) \quad (3-9)$$

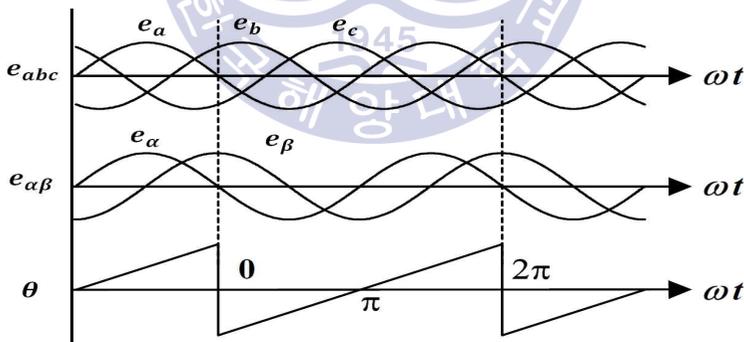


Fig 3.15 Relationship between supply voltage and phase angle of zero crossing technique

영점 교차기법은 간단하게 위상각을 구할 수 있는 장점이 있지만, 위상의 검출이 영점에서만 가능하기 때문에 위상각의 추정속도가 느리며 고조파나 Fig

3.16과 같은 전압 노칭 등의 노이즈 발생으로 식 (3-10)의 전원 전압이 순간적으로 영점을 지날 경우에는 위상 측정에 오류가 발생한다. 이와 같은 경우에는 위상각을 정확하게 측정하는 것이 불가능하고 실제 위상각과 오차가 있는 위상각의 검출로 인해 정류기 제어가 불안정해지며 출력전압에 헌팅을 동반할 수 있다.

$$e_a = \sqrt{2} E \sin \theta = \sqrt{2} E \sin (\omega t + \Phi) \quad (3-10)$$

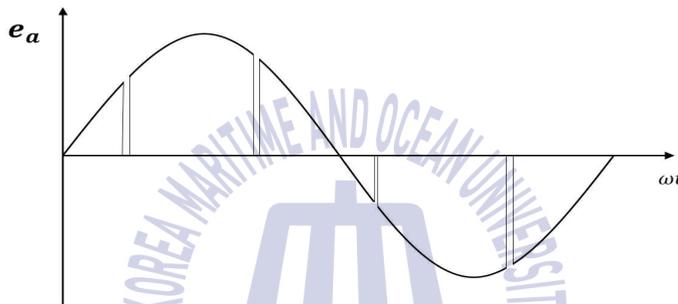


Fig 3.16 Example of voltage notching

3.3.3 AFE 정류기의 직류출력과 전원 출력측의 고조파 발생정도

AFE 정류기는 DFE 정류기 보다 DC link단에 작은 용량의 커패시터를 설치하지만, ON/OFF 제어가 가능한 스위치를 정류기에 사용함으로써 실시간으로 정류기의 제어가 가능하여 직류 출력전압의 파형이 개선되며 일정한 크기의 전압 출력 제어가 가능하다. 또한, 전원 출력측의 총고조파왜형률은 4[%] ~ 5[%] 정도로 기존 정류기 가운데 가장 낮은 수준의 총고조파왜형률을 가진다. 하지만 영점 교차회로를 사용하여 위상각을 추정할 경우에는 전원 전압의 불규칙적인 파형으로 인해 위상각의 오차가 발생하면 정류기 전체 제어가 불안정해진다.

3.4 기존 정류기의 고조파 비교

기존 전기추진시스템의 정류기에는 DFE 정류기와 AFE 정류기가 있으며, DFE 정류기는 직류 출력파형의 형태에 따라 6펄스, 12펄스, 18펄스, 24펄스 등이 있다. 가장 대표적인 종류인 3상 전파정류회로를 사용하면 한 주기 내에 펄스폭이 60° 이고 크기와 모양이 일치하는 6펄스 형태의 직류 출력파형을 얻을 수 있으나, 전원 출력측의 총고조파왜형률은 25[%] ~ 27[%]로 상당히 커지며, 직류 출력 파형의 개선을 위해서 대용량의 커패시터를 DC link단에 설치해야 한다.

6펄스 형태의 정류기를 사용할 경우에 발생하는 높은 수준의 전원 출력측의 총고조파왜형률과 DC link단의 출력파형을 개선하기 위해서 정류기 앞단에 상천이변압기를 설치하여 12펄스, 18펄스, 24펄스 형태의 직류 파형을 출력한다. 상천이변압기를 설치할 경우에는 상천이각을 조절하여 출력파형 및 전원 출력측 총고조파왜형률의 저감이 가능하지만 한정된 공간의 선박에서 상천이변압기로 인해 시스템의 부피가 커지게 되고, 가격이 상승하며 출력파형이 직류에 가까워질수록 상천이변압기의 설계가 복잡해지는 단점이 있다.

AFE 정류기는 정류 소자의 제어가 가능하므로 DC link단의 직류 출력파형이 개선되며 일정한 크기를 유지하는 것이 가능하다. 또한, 전원 출력측 총고조파왜형률은 약 4[%] ~ 5[%] 정도로서 기존 정류기 중에서 가장 낮은 총고조파왜형률을 가진다.

Table 3.2는 기존 정류기의 사용 시 발생하는 전원 출력 측 총고조파왜형률을 비교한 결과이다. DFE 정류기를 사용하는 6펄스와 12펄스에서는 IEEE Std519-2014의 규정을 만족시키지 못하므로 18펄스나 24펄스 정류기를 사용해야하지만 상천이변압기의 설치로 인해 여러 가지 단점이 발생하며, 기존의 AFE 정류기는 능동적인 정류기 제어가 가능하므로 규정을 만족하는 총고조파왜형률의 출력이 가능하지만 전원 전압의 위상각을 찾기 위해 영점 교차기법을 사용함으로써 전원 전압의 왜곡이 발생한 경우에는 정확한 위상각의 측정이 불가능하므로 정류기의 제어가 헛팅을 동반한 불안정한 상태가 되어 정류동작에 오차가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문의 4장에서는 새로운 AFE 정

류기를 제안한다.

Table 3.2 Comparison of Total harmonic distortion by rectifier type

Rectifier Type	Total Harmonic Distortion(THD)
6 Pulse	25 ~ 27 %
12 Pulse	8 ~ 11 %
18 Pulse	4 ~ 5 %
24 Pulse	2 ~ 3 %
AFE	4 ~ 5 %



제 4장 본 논문에서 제안하는 AFE 정류기

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.

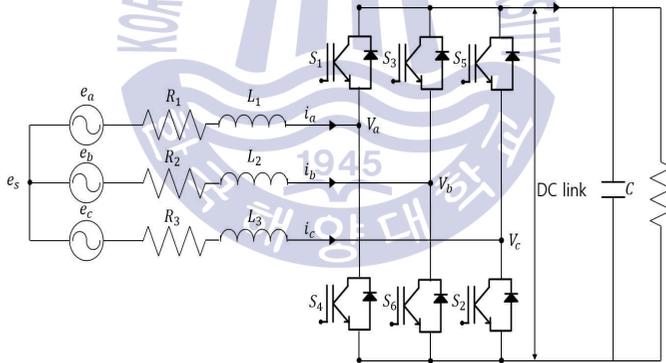


Fig 4.1 Circuit diagram of AFE rectifier

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

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

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, e_a, e_b, e_c 는 a, b, c 상의 전원 전압, i_a, i_b, i_c 는 상전류, V_a, V_b, V_c 는 정류기 입력전압이다.

4.2 개선된 전원 전압 위상각 제어기의 설계

4.2.1 좌표축 변환

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 a, b, c 를 임의의 기준축에 대하여 좌표변환하여 표현하면 일정한 직류값을 갖는 전압방정식으로 변환되어 정류기의 제어가 간단하고 정확해지며, 이러한 장점 때문에 본 논문에서 제안하는 전원 전압 위상각 제어기에서 좌표변환기법을 사용한다.

좌표축 변환은 3상 a, b, c 축을 정지좌표계 $\alpha-\beta$ 로 변환한 후 최종적으로 동기회전좌표계 $d-q$ 축으로 좌표변환하는 과정을 가지며, 먼저 $\alpha-\beta$ 축으로의 축 변환 과정은 Fig 4.2에서 임의의 시간에 대한 상변수 f_a 를 α 축 성분 $f_a \cos\theta$ 와 β 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.

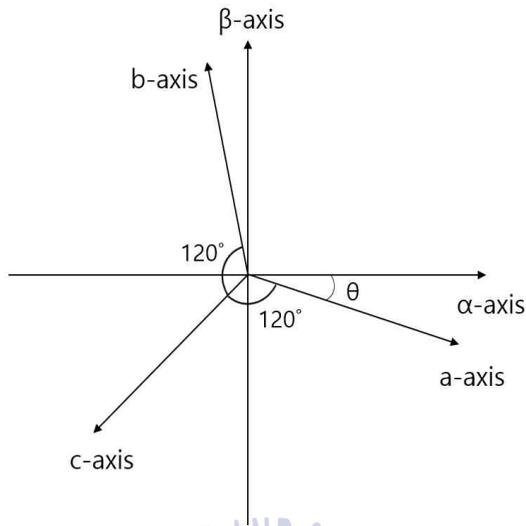


Fig 4.2 Transformation of stationary a, b, c axis to stationary $\alpha - \beta$ axis

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

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 α 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.

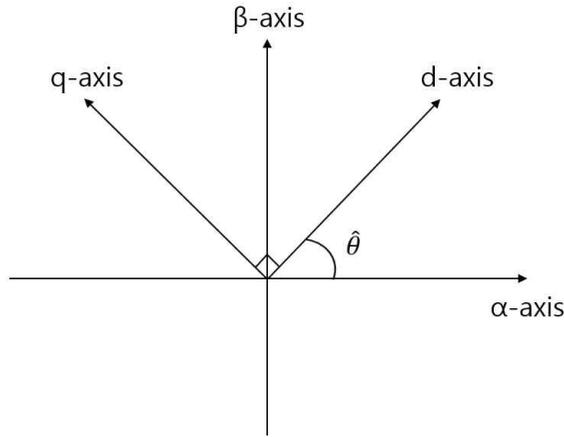


Fig 4.3 Transformation of stationary $\alpha - \beta$ axis to rotating $d - q$ axis

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

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 2개의 직류값으로 변환할 수 있고, 동기회전좌표계로 변환하여 구한 $d - q$ 축 값을 AFE 정류기의 제어에 이용한다.

4.2.2 제안하는 위상각 제어의 기본 원리

AFE 정류기에서 $d-q$ 축 좌표변환 및 전원 전압의 위상과 동상인 전류 지령치를 구하기 위해서는 정확한 위상각 θ 의 검출이 필수적이다. Fig 4.4는 위상각 θ 를 구하기 위해 본 논문에서 제안하는 전원 전압 위상각 제어기의 구성을 나타낸 블록도이다. 제어기는 3상 교류 전원 전압을 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.

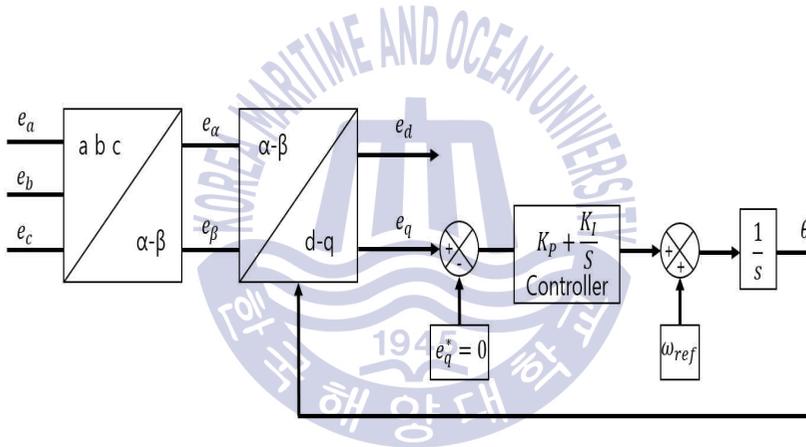


Fig 4.4 Block diagram of proposed Reference supply voltage phase angle controller

동기회전좌표계 e_q 의 전압이 0이 되도록 제어하기 위한 전압 위상각과 동기회전좌표계의 q 축 전압과의 관계를 Fig 4.5에 나타내었으며, 식 (4-14)의 P_s 는 전원에서 공급되는 유효전력을 나타낸다.

$$P_s = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) = \frac{3}{2}e_d i_d \quad (4-14)$$

식 (4-14)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 θ 가 허상각 $\hat{\theta}$ 와 일치하게 되므로 정확한 위상각 θ 를 구할 수 있다.

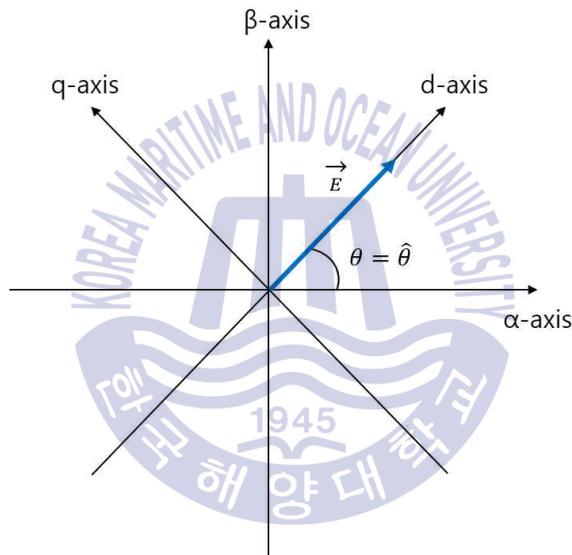


Fig 4.5 Actual phase θ = Error phase $\hat{\theta}$

Fig 4.6과 같이 실제 위상각 θ 가 허상각 $\hat{\theta}$ 보다 크기가 작은 경우에는 q 축 전압은 (-)의 값이 되고, Fig 4.7에서 보듯이 실제 위상각 θ 가 허상각 $\hat{\theta}$ 보다 크기가 큰 경우에는 q 축 전압은 (+)의 값을 가진다. 만약, 실제 위상각 θ 와 허상각 $\hat{\theta}$ 가 일치하지 않고 오차가 발생하여 q 축의 전압이 0이 되지 않으므로 무효전력 성분 e_q 값이 0이 되도록 제어하여 두 위상각이 일치되도록 한다.

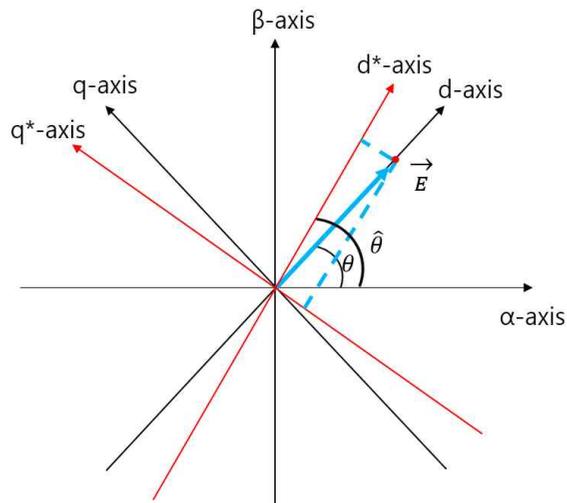


Fig 4.6 Actual phase $\theta <$ Error phase $\hat{\theta}$

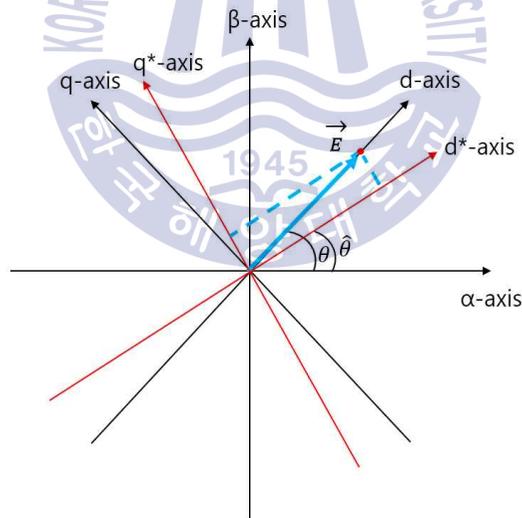


Fig 4.7 Actual phase $\theta >$ Error phase $\hat{\theta}$

이와 같은 원리를 이용한 전원 전압 위상각 제어를 구성하여 위상각을 검출하면 고조파나 잡음이 포함된 불규칙적인 전원 전압의 파형에서도 제어기의 동

기회전좌표계 q 축 전압이 항상 0이 되도록 제어할 수 있으므로 정확한 전원 전압 위상각 θ 를 찾을 수 있다. 또한 q 축이 0의 값을 가지면 식 (4-15)에서 볼 수 있듯이 전원측 전압과 전류의 위상이 동상인 단위 역률을 가지도록 제어된다.

$$PF = \frac{i_d}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (4-15)$$

4.2.3 개선된 위상각 제어기의 설계

실제 위상각 θ 를 구하기 위해서 먼저, 각주파수 ω_{ref} 를 가지는 교류전원의 3상 e_a, e_b, e_c 를 정지좌표계 $\alpha-\beta$ 축 전압으로 좌표변환하면 식 (4-16)과 (4-17)로 구할 수 있으며 Fig 4.8과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_\alpha = E \cos \theta \quad (4-16)$$

$$e_\beta = E \sin \theta \quad (4-17)$$

여기서, E 는 입력교류 상전압의 피크값이고, θ 는 a 축과 α 축 사이의 위상각이다.

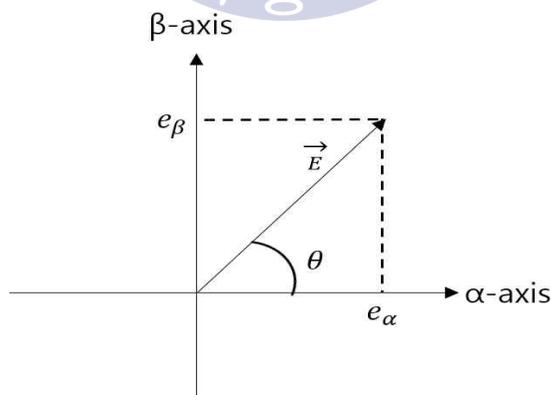


Fig 4.8 Coordinate transformation of input voltage

정지좌표계 $\alpha-\beta$ 축으로 변환된 값은 식 (4-18)을 이용하여 동기회전좌표계 $d-q$ 축으로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

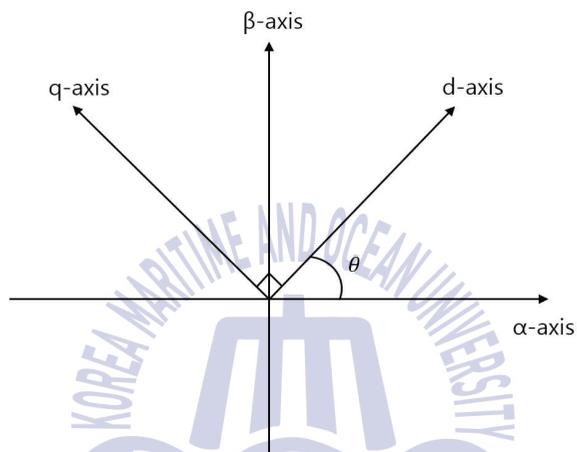


Fig 4.9 Transformation of stationary $\alpha-\beta$ axis to rotating $d-q$ axis

만약, 위상각이 실제 위상각 θ 가 아닌 허상각 $\hat{\theta}$ 인 경우에는 동기회전좌표계 $d-q$ 축의 전압값은 다음 식 (4-19)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\hat{\theta} & \sin\hat{\theta} \\ -\sin\hat{\theta} & \cos\hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

또한 식 (4-19)를 정리하면 식 (4-20)과 식 (4-21)로 표현되며, 실제 위상각에 의해 구하여진 정지좌표계상의 전압값을 구한 식 (4-16)과 식 (4-17)을 식 (4-20)과 식 (4-21)에 대입하여 정리하면 식 (4-22)와 식 (4-23)이 되며, 이 전압값은 동기회전좌표계 $d-q$ 축 상의 값으로 나타낸 것이다.

$$e_d = e_\alpha \cos \hat{\theta} + e_\beta \sin \hat{\theta} \quad (4-20)$$

$$e_q = -e_\alpha \sin \hat{\theta} + e_\beta \cos \hat{\theta} \quad (4-21)$$

$$e_d = E(\cos \theta \cos \hat{\theta} + \sin \theta \sin \hat{\theta}) = E \cos(\theta - \hat{\theta}) \quad (4-22)$$

$$e_q = E(-\cos \theta \sin \hat{\theta} + \sin \theta \cos \hat{\theta}) = E \sin(\theta - \hat{\theta}) \quad (4-23)$$

여기서, θ 는 α 축과 d 축 사이의 실제 위상각이며 $\hat{\theta}$ 는 오차가 발생한 허상각이다.

식 (4-23)에서 동기회전좌표계상의 q 축 전압값인 e_q 를 0이 되도록 조정하면 $\theta = \hat{\theta}$ 가 되며 식 (4-24)와 식 (4-25)를 구할 수 있다. 따라서 허상각 $\hat{\theta}$ 가 실제 위상각 θ 와 일치되도록 제어된다. Fig 4.10은 비례적분제어를 이용하여 구성한 개선된 위상각 제어기를 나타낸 블록도이다.

$$e_d = E \cos(\theta - \hat{\theta}) = E \quad (4-24)$$

$$e_q = E \sin(\theta - \hat{\theta}) = 0 \quad (4-25)$$

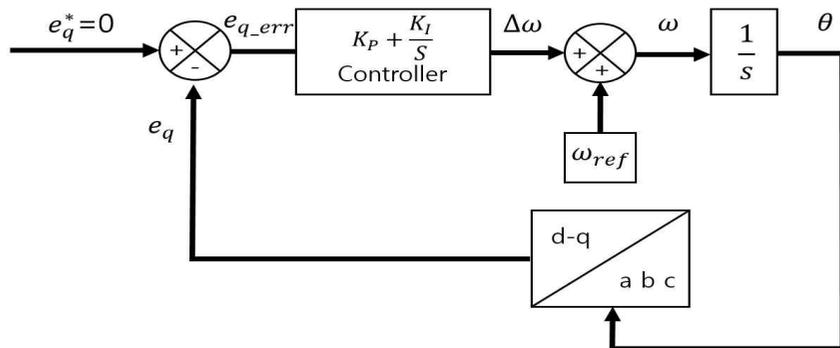


Fig 4.10 Block diagram for phase angle calculator of supply voltage

4.3 속도기전력 전향보상을 갖는 전류제어기 설계

교류전원의 3상 입력전류를 동기회전좌표계 $d-q$ 축 변환으로 구한 직류값을 이용하여 전류제어기를 설계하면 제어에 효과적이다. 식 (4-26)과 (4-27)은 4.1장에서 설명한 정류기의 정지좌표계 $\alpha-\beta$ 축을 동기회전좌표계 $d-q$ 축으로 변환한 전압방정식이다.

$$e_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + V_d \quad (4-26)$$

$$e_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + V_q \quad (4-27)$$

여기서 전압, 전류, 역기전력과 같은 모든 전기적 물리량은 정지좌표계와 다르게 정상상태에서 직류값이 되고, 이 식으로부터 동기회전좌표계 $d-q$ 축에서 표현된 전류제어시스템의 블록도를 Fig 4.11과 같이 나타낼 수 있다. 동기회전좌표계 $d-q$ 축의 값으로 설계한 전류제어기에서는 직류 전류를 제어하기 때문에 비례적분 제어를 사용하여 우수한 제어성능을 얻을 수 있다.

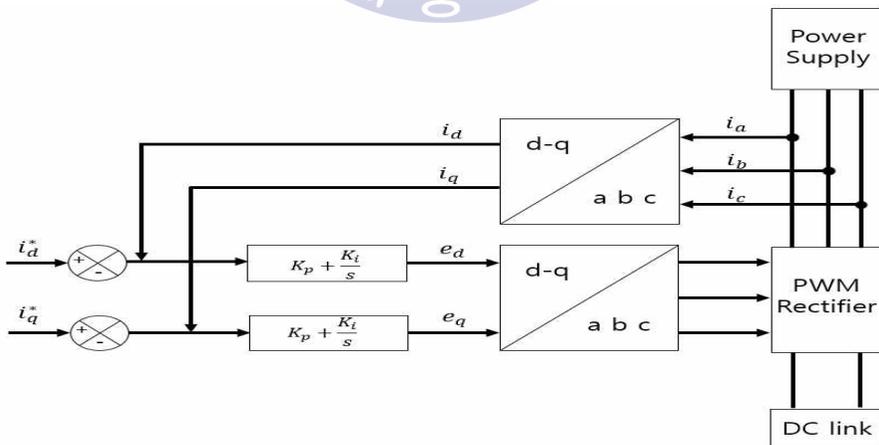


Fig 4.11 Block diagram of current control system for rotating $d-q$ axis

식 (4-26)과 (4-27)에는 전류제어기에서 외란 역할을 하는 역기전력 성분 V_d , V_q 와 기준축이 회전함에 의해 발생하는 속도기전력(Speed Voltage) 성분인 $-\omega L i_q$, $\omega L i_d$ 가 존재한다. 이 속도기전력은 각 축 간의 전류제어에 서로 영향을 주는 상호 간섭성분으로서 d 축 전류의 변동이 q 축 전류에 영향을 주며, q 축 전류 변동이 d 축 전류제어에 영향을 준다. 그러므로 동기회전좌표계에서 전류제어를 할 경우에 우수한 제어특성을 얻기 위해서는 역기전력과 속도기전력에 의한 상호 간섭성분을 전향보상 해야한다.

전향제어가 포함되는 경우에 동기회전좌표계상의 비례적분 전류제어기측의 출력전압은 식 (4-28)과 식 (4-29)와 같이 피드백제어기의 출력인 e_{d-fb}^* 및 e_{q-fb}^* 와 전향보상성분 e_{d-ff}^* 및 e_{q-ff}^* 의 합으로 구성된다.

$$e_d^* = e_{d-fb}^* + e_{d-ff}^* \quad (4-28)$$

$$e_q^* = e_{q-fb}^* + e_{q-ff}^* \quad (4-29)$$

Fig 4.12는 동기회전좌표계 $d-q$ 축으로 변환된 전압방정식을 이용한 역기전력 전향보상을 갖는 AFE 정류기의 전류제어기 블록도이다.

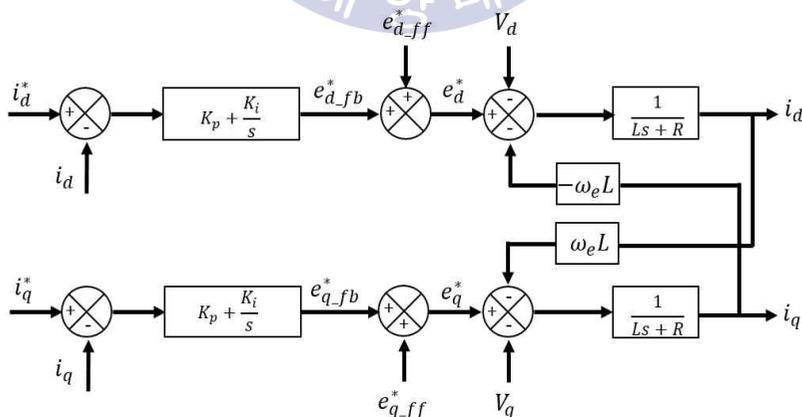


Fig 4.12 Current controller with back EMF forward compensation

4.4 DC link단 직류 출력전압 제어기

전류제어기와 마찬가지로 DC link단의 직류 출력전압 제어를 위해서 비례적분 제어기가 사용되며, 전압제어기의 대역폭보다 전류제어기의 대역폭을 충분히 크게 선정해야만 전류제어가 전압제어에 미치는 영향이 거의 없고 응답성과 안정성이 향상되기 때문에 전압제어기는 전류제어기를 내부 루프에 배치한 후 외부 루프에 위치하도록 한다.

전원에서 공급되는 입력전력이 부하에서 소비하는 출력전력보다 클 경우에는 DC link단의 직류 출력전압이 증가하고, 반대의 경우에는 직류 출력전압이 감소하므로 입력전력을 제어함으로써 DC link단의 직류 출력전압을 제어할 수 있다.

이는 곧 유효전력의 d 축 전류를 제어함으로써 DC link단의 직류 출력전압을 제어하는 방법과 동일하다. 일반적으로 d 축 전류 지령치는 DC link단의 직류 출력전압을 일정하게 유지하기 위하여 DC link단의 직류 출력전압 기준값과 측정된 실제 직류 출력전압의 오차에 대한 항으로 구성할 수 있다.

식 (4-30)은 전압제어를 통해 얻은 d 축 전류 지령값을 나타내며, Fig 4.13은 비례적분제어를 이용한 전압제어기의 블록도를 보여준다.

$$i_d^* = (V_{dc-link}^* - V_{dc-link}) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (4-30)$$

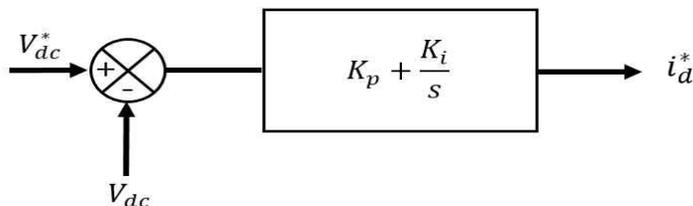


Fig 4.13 Control block diagram of voltage controller

4.5 제안하는 AFE 정류기의 전체 제어회로

본 논문에서 제안하는 AFE 정류기의 전체블록도는 Fig 4.14와 같다. (a) 부분은 제안하는 전원 전압 위상각 제어를 나타낸다. 정류기의 제어에 필요한 전원 전압, 전류의 $d-q$ 축으로 좌표변환 및 전압위상과 동일한 위상의 전류 지령 값을 생성하기 위한 정확한 위상각 θ 를 검출하기 위해 3상 전원 전압을 정좌표계 $\alpha-\beta$ 축으로 좌표변환한 후 변환된 값을 동기회전좌표계상의 $d-q$ 축 값으로 표현하여 제어가 용이한 직류값 e_d, e_q 를 구하고, 임의로 e_q 값을 무효전력 성분이 되도록 설정하여 그 값이 항상 0이 되도록 제어한다. 또한, 위상각 θ 를 구하는 과정에서 e_d 값을 유효전력성분, e_q 값을 무효전력성분으로 설정하고 e_q 의 값이 0이 되도록 제어함으로써 전원 출력측의 역률이 개선되는 효과를 얻을 수 있다.

(b) 부분은 개선된 전류제어기이며 외란 역할을 하는 역기전력 성분과 기준 축이 회전함에 따라 발생하는 속도기전력의 상호 간섭성분을 제거하기 위한 전향보상기법을 사용하여 DC link단의 직류 출력과형에서 발생하는 리플의 크기를 현저히 감소시킨다.

(c) 부분은 DC link단의 직류 출력과형을 지령 전압값과 비교하여 그 오차를 비례적분제어기를 통해 d 축 전류로 출력하여 직류 출력 전압을 제어하는 전압 제어기이며 (d)는 정류기 출력전압 과형의 제어를 위해 DC link단의 직류전압을 측정한다. 실시간으로 출력되고 있는 직류과형을 지속적으로 피드백하여 오차를 측정하고 제어하기 때문에 DFE 정류기에 비해 DC link단에 크기가 작은 커패시터를 설치해도 출력되는 직류전압의 크기는 지령 전압값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있다. 또한, 제어기를 통해 생성된 d 축과 q 축의 전압지령을 동기회전좌표계 $d-q$ 축에서 3상 a, b, c 로 역변환한 후 정현파 펄스폭변조기법을 통하여 PWM 신호를 발생시키고 AFE 정류기를 스위칭 한다.

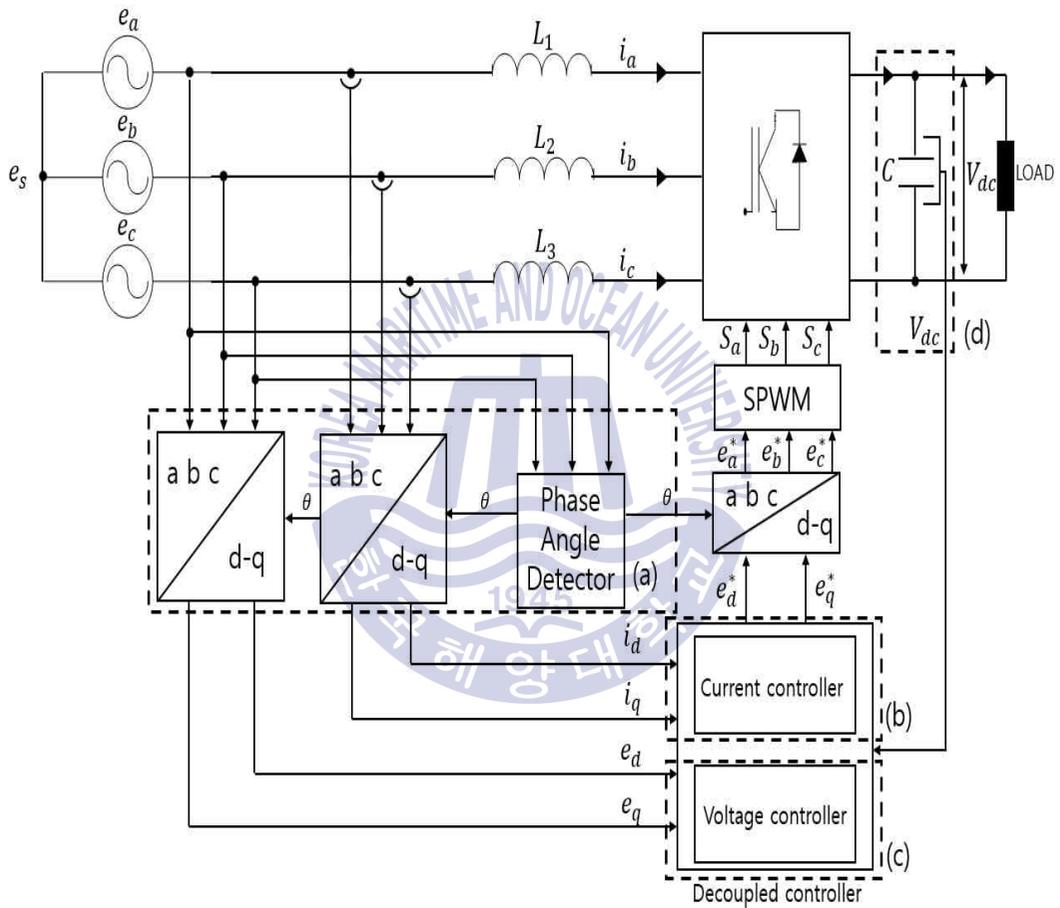


Fig 4.14 Block diagram of control circuit for proposed AFE rectifier

제 5장 시뮬레이션

전기추진시스템에서 정류된 DC link단의 직류 출력파형 개선과 전력변환과정에서 발생하는 고조파를 감소시키는 것은 시스템의 전체적인 효율향상에 큰 영향을 미친다. 하지만 기존의 정류기를 시스템에 적용할 경우에는 DC link단에 용량이 큰 커패시터를 설치하여 직류 출력파형을 개선해야 하고, 수동필터나 상천이변압기 등을 이용하여 고조파를 저감시켜야 한다. 하지만 본 논문에서는 제안하는 전원 전압 위상각 제어기법을 이용한 개선된 AFE 정류기를 이용함으로써 상천이변압기와 같은 별도의 장비를 설치하지 않고도 효과적으로 직류 출력파형 제어와 고조파의 저감이 가능하며 역기전력과 속도기전력의 전향보상을 갖는 전류제어기를 통해 직류출력 전압파형의 개선 효과를 얻을 수 있다.

제안하는 시스템에 대한 유효성을 입증하기 위해서 기존의 AFE 정류기와 제안하는 AFE 정류기를 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 시뮬레이션을 위한 시스템 환경 설정에 있어서 부하 조건은 저속, 중속, 고속 영역으로 설정하였으며 제안하는 방식의 우수성 입증에 위하여 정류기의 직류전압 출력, 전원 출력측의 역률 및 총고조파왜형률을 측정하여 분석하였다.

시뮬레이션에 적용한 시스템 파라미터 정수는 Table 5.1과 같으며, 파라미터 값의 경우 제안하는 AFE 정류기의 경우에도 같은 값을 사용한다.

Table 5.1 System parameters used in AFE rectifier

Parameter	Value
e_s	690[V]
L	250[μ H]
R	0.01[Ω]
C	2000[μ F]
f_{sw}	10[kHz]
R_{load}	100[Ω]

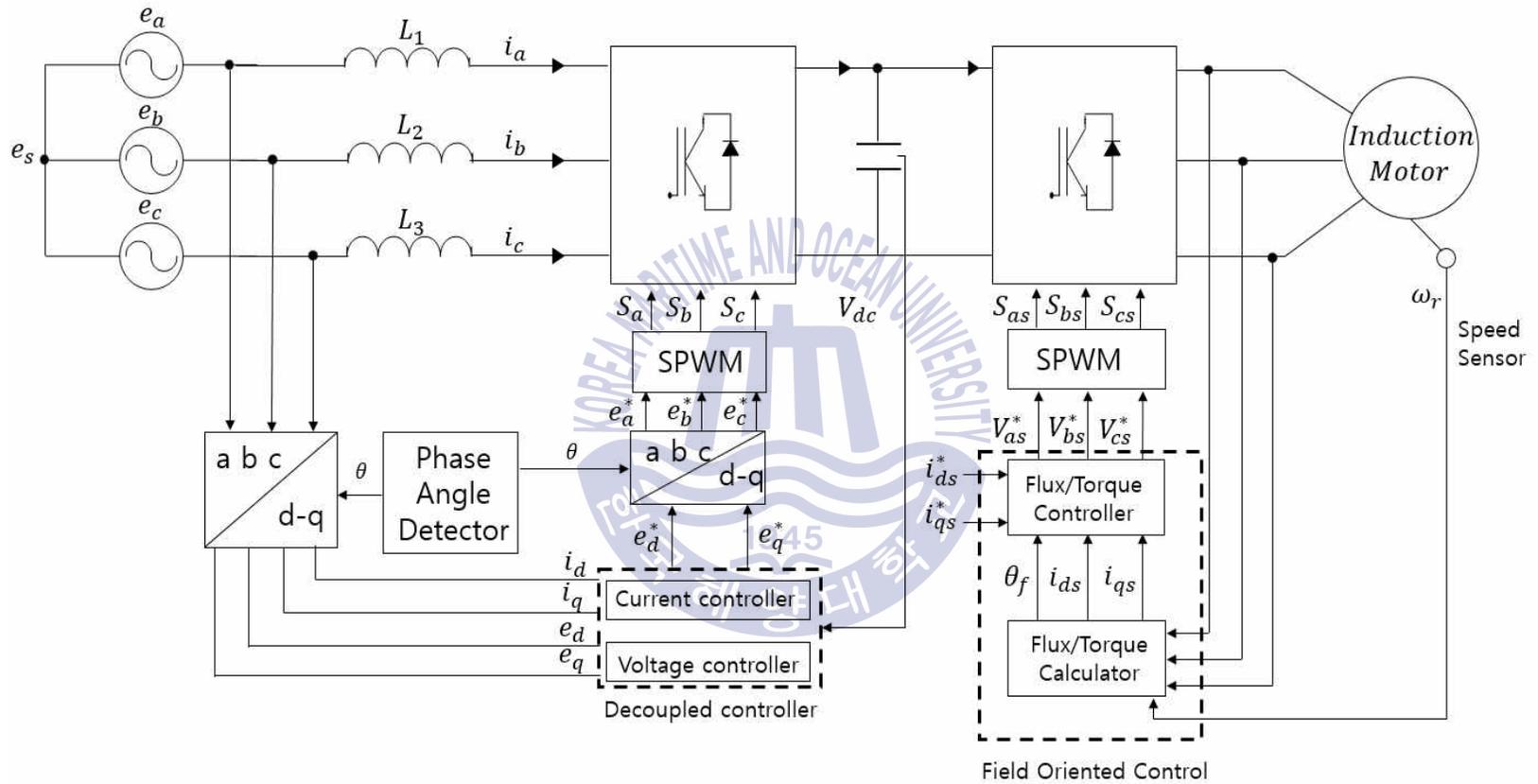


Fig 5.1 Basic block diagram of Electric Propulsion Ship with proposed AFE rectifier

5.1 기존의 AFE 정류기 출력

Fig 5.2는 기존의 AFE 정류기를 사용하는 시스템의 블록도이며 정류기의 제어를 위한 전원 전압 위상각의 검출을 위해 영점 교차회로를 적용하므로 고조파나 돌발적인 전압 노칭 등으로 왜곡된 전원 전압이 측정되면 실제 위상각과 오차가 발생한 허상각 $\hat{\theta}$ 의 검출로 인해 정류기의 제어가 불안정해지고 전압파형의 헌팅이 발생한다.

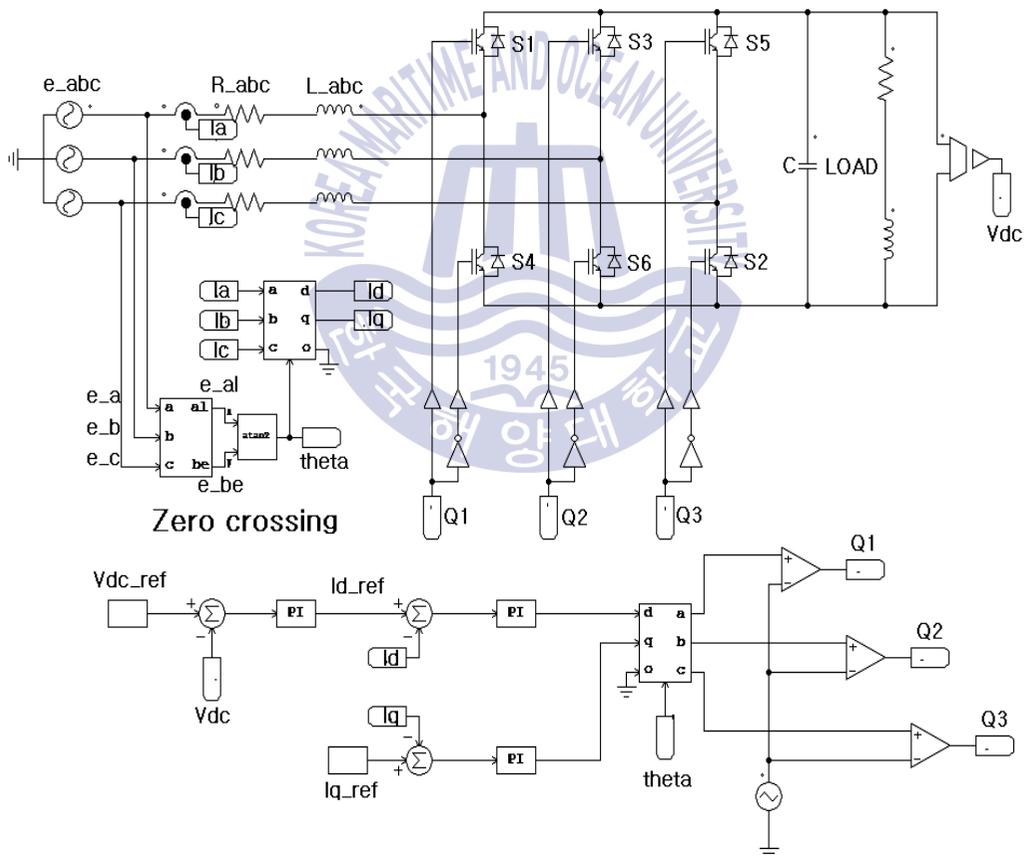


Fig 5.2 Schematic diagram for conventional AFE rectifier

Fig 5.3은 0[V] → 1500[V] 계단입력의 전압지령을 가했을 경우에 DC link단의 직류 출력전압 파형을 나타낸다. 직류 출력전압은 0.02[sec]이내에 지령값에 도달하였으나, 역기전력 성분과 속도기전력 성분의 영향으로 정상상태에서 직류 출력파형에 다량의 리플이 포함됨을 확인할 수 있다.

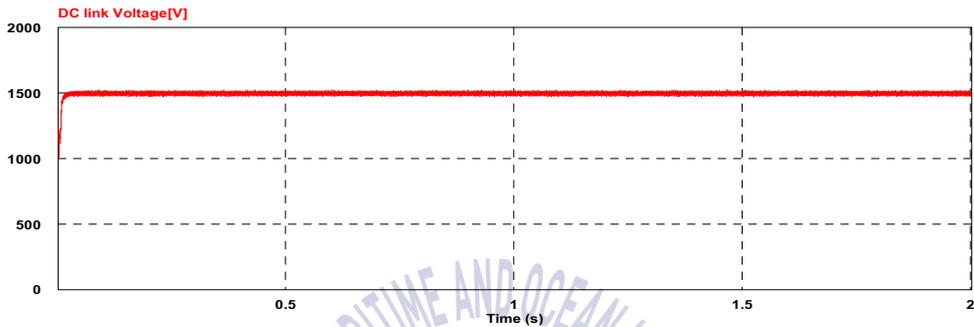


Fig 5.3 Simulation response for DC link voltage of conventional AFE rectifier

Fig 5.4는 정상상태에서 정류기 부하저항의 값을 100[Ω]→150[Ω]→50[Ω]로 가변하는 경우에 DC link단 직류 출력전압 파형의 변화를 나타낸다. 부하가 변화할 경우에 DC link단의 직류 출력전압 파형의 변화가 크게 발생함을 알 수 있다.

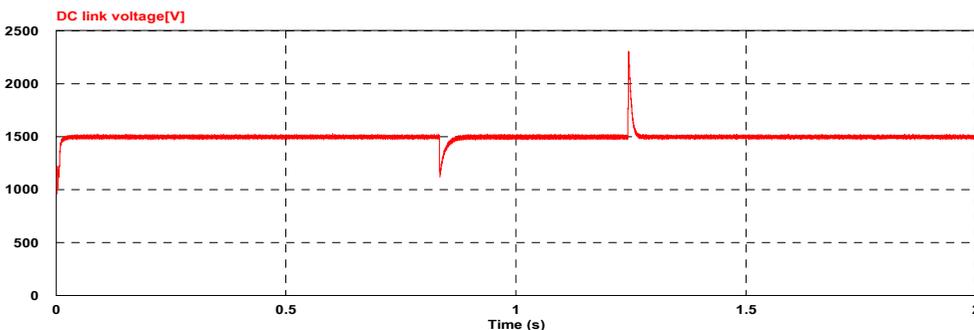
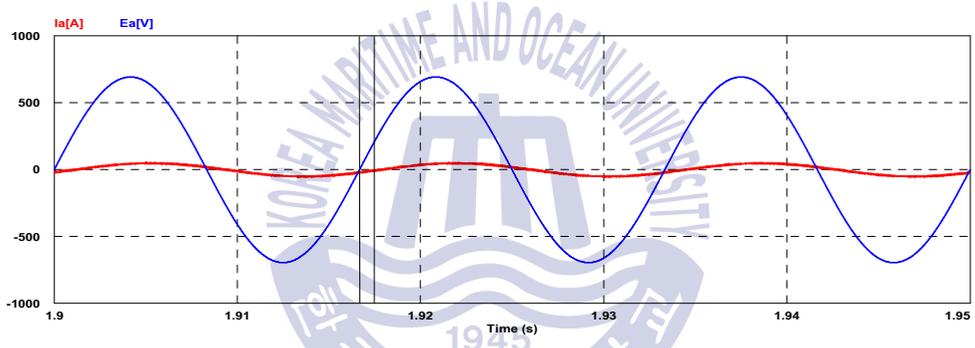
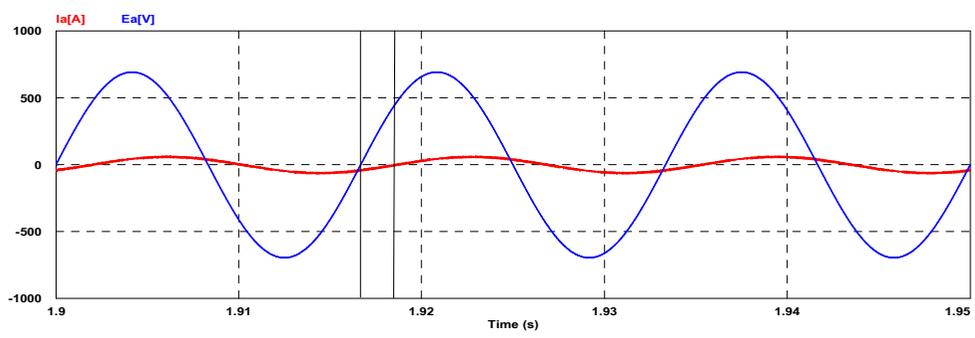


Fig 5.4 Simulation response for change of load(100[Ω]→150[Ω]→50[Ω])

Fig 5.5는 부하 인덕터의 크기를 변화했을 경우 교류전원측 전압과 전류의 크기 및 위상을 나타낸 결과이다. (a)는 부하 인덕터의 크기가 1000[mH]일 때 전압과 전류의 역률(Power Factor)이 0.90이며, 위상차가 약 22.5° 가량 발생하는 것을 알 수 있다. (b)는 부하 인덕터의 크기를 5000[mH]으로 설정하였을 경우이며, 이 때 전압과 전류의 역률은 0.82이고, 위상차는 약 38.5° 정도가 됨을 확인할 수 있다. 따라서 기존의 AFE 정류기는 부하 인덕터의 크기가 커질수록 교류전원 출력측의 전압과 전류의 역률과 위상차가 크게 발생하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.



(a) Load inductor : 1000[mH]



(b) Load inductor : 5000[mH]

Fig 5.5 Power factor for voltage and current of conventional AFE rectifier

Fig 5.6은 전원 출력측에 포함된 총고조파왜형률의 시뮬레이션 결과로서 총고조파왜형률은 약 5[%]정도로 측정되었으며 이는 IEEE Std519-2014에서 정하고 있는 1[kV] 미만의 발전기의 총고조파왜형률의 기준인 8[%]의 보다 낮은 값을 가진다.

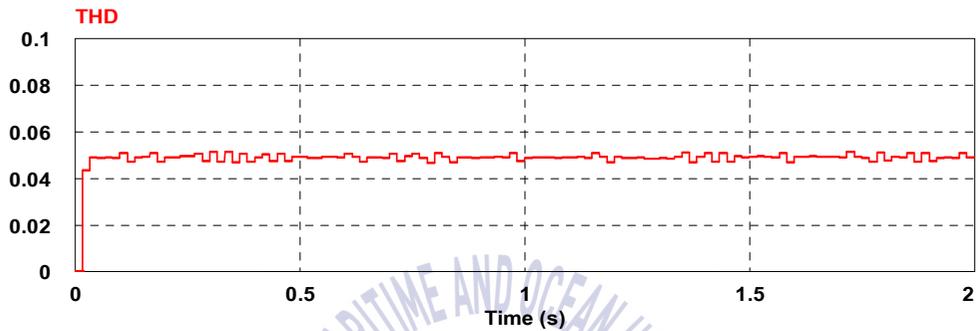
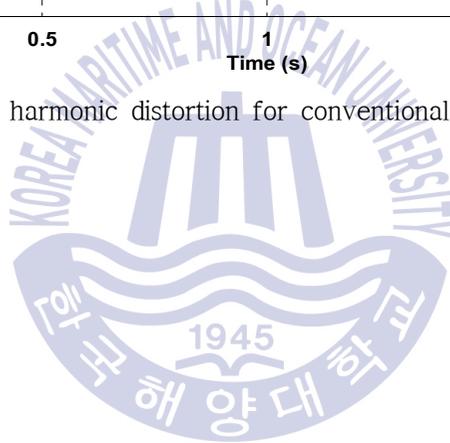


Fig 5.6 Total harmonic distortion for conventional AFE rectifier



본 논문에서는 AFE 정류기의 제어를 위해 제안하는 전원 전압 위상각 제어를 활용하여 동기회전좌표계 $d-q$ 축으로 변환된 무효전력성분인 q 축 전압을 항상 0이 되도록 제어하여 실제 위상각과 허상각을 일치시키므로 전원 전압의 왜곡에도 실제 위상각과 오차가 발생하지 않는 위상각 θ 를 구할 수 있어 정류기 제어의 정확성을 향상시키고, 더불어 전원 출력측의 전압과 전류의 역률을 개선시키는 효과를 얻을 수 있다.

그리고 개선된 전류제어기는 외란 역할을 하는 역기전력 성분과 기준 축이 회전함에 따라 발생하는 속도기전력의 상호 간섭성분을 제거하기 위한 전향보상 기법을 사용하여 DC link단의 직류 출력파형에 발생하는 리플을 감소시킬 수 있다. 또한 DC link단에서 측정된 직류 출력파형을 실시간으로 지령 전압값과 비교하고, 발생된 오차는 비례적분제어기를 통해 d 축 전류로 변환 출력하여 직류 출력 전압을 지령값으로 제어하므로 DFE 정류기에 비해 DC link단에 크기가 작은 커패시터를 설치해도 출력되는 직류전압의 크기는 지령값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있다.

Fig 5.8은 0[V] \rightarrow 1500[V]의 계단입력 전압지령에 따른 DC link단 직류 출력 전압 파형의 시뮬레이션 결과를 도시하고 있다. 지령값에 대한 DC link단 출력 전압의 추종성능이 우수하며 정류기의 개선된 전류제어기를 통해서 외란의 역할을 하는 상호 간섭성분을 제거하여 전향보상 함으로서 출력파형에 리플이 거의 포함되지 않음을 알 수 있다.

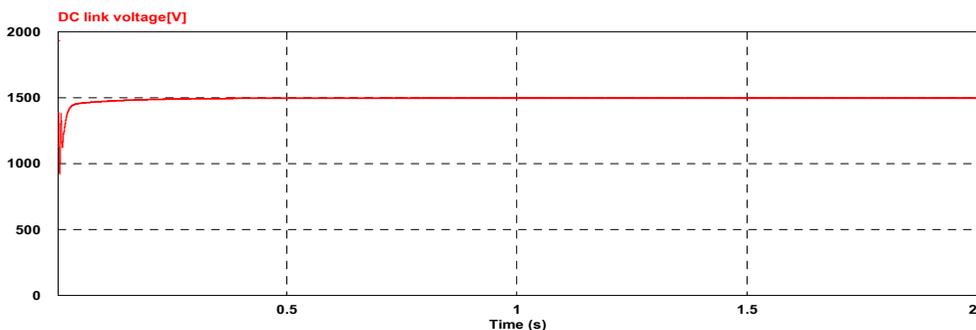


Fig 5.8 Simulation response for DC link voltage of proposed AFE rectifier

Fig 5.9는 정상상태에서 부하의 가변에 따른 DC link단 직류 출력전압 파형의 변화를 나타낸 결과이다. 부하의 급격한 변화에도 직류 출력파형이 지령값에 일치함을 보여주며, 정류기의 제어시스템이 안정함을 확인 할 수 있다.

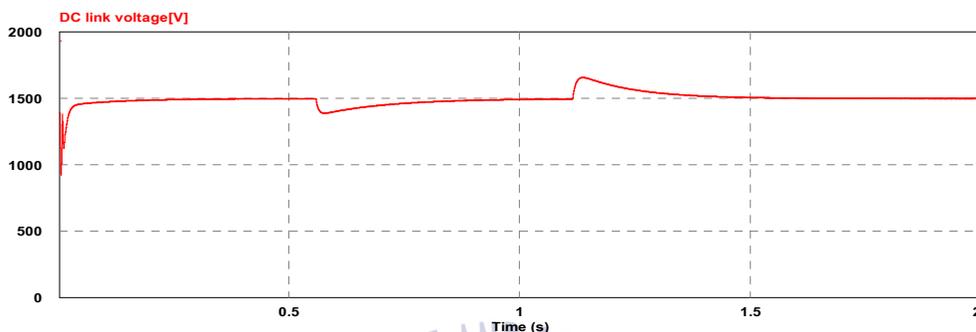
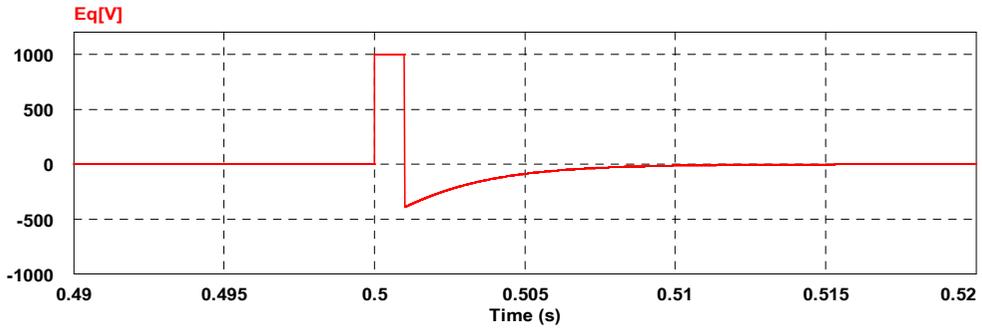
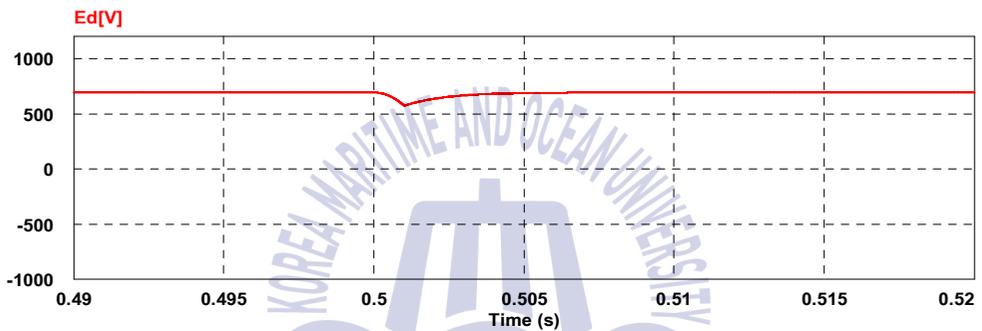


Fig 5.9 Simulation response for change of load(100[Ω]→150[Ω]→50[Ω])

Fig 5.10은 제안하는 전원 전압 위상각 제어를 사용하여 정상상태에서 동기 회전자표계 $d-q$ 축으로 변환된 무효전력성분인 q 축 전압의 크기를 순간적으로 변화시키는 경우에 q 축 전압의 값이 0으로 제어되는 응답특성을 알아보기 위한 시뮬레이션 결과이다. (a)는 0.5[sec]에서 임의로 q 축 전압의 지령값을 1000[V]로 변화시킬 경우에 q 축 전압의 값이 다시 0[V]의 값으로 제어되는 시간이 0.01[sec]로 위상각 제어기의 제어성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 (b)는 무효 전력성분인 q 축 전압의 변화에 따른 유효전력성분 d 축 전압의 크기 변화를 나타낸 결과이며, 0.5[sec]에서 임의로 q 축 전압의 지령값이 1000[V]로 변화될 경우에 q 축 전압이 정상상태로 유지하는 제어 시간에 맞게 d 축 전압값도 안정적으로 제어되는 것을 볼 수 있다.



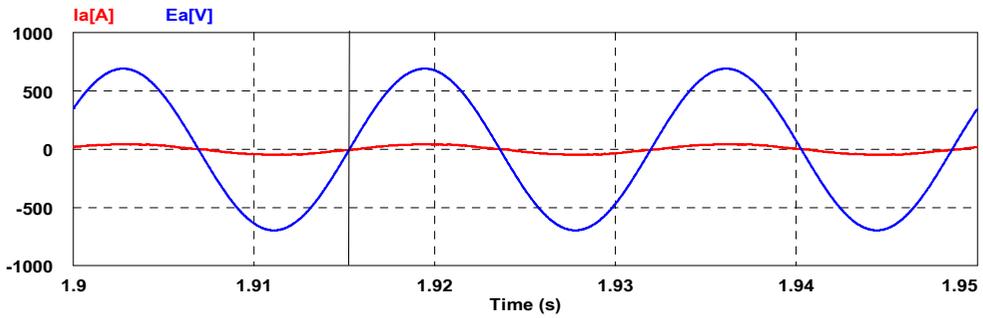
(a)



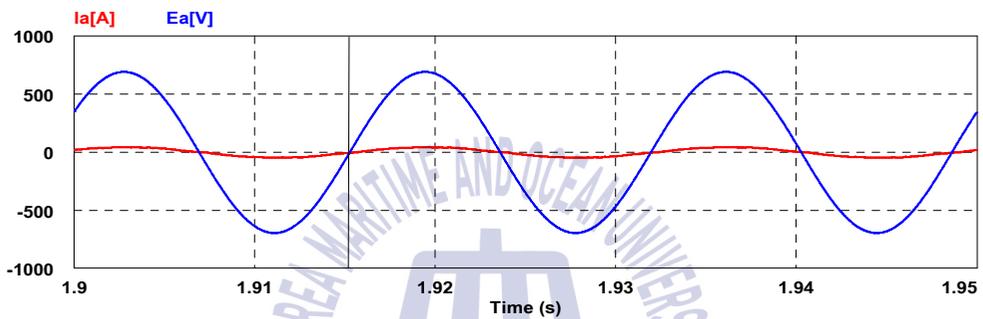
(b)

Fig 5.10 Simulation response for change of q -axis voltage

Fig 5.11은 부하 인덕터의 크기를 변화했을 경우 교류전원측의 전압과 전류의 크기와 위상을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. (a)는 부하측의 인덕터 크기를 1000[mH]으로 하였을 경우이고 입력 전압과 전류의 위상이 동위상을 유지하며 역률은 단위역률의 값을 가짐을 알 수 있다. (b)는 부하측의 인덕터를 5000[mH]으로 하였을 경우이며 입력 전류의 위상이 동위상을 나타내고, 역률은 단위역률로 출력되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 전원 전압 위상각 제어 기법을 사용할 경우에 부하 인덕터의 크기 변화에도 전원 출력측 전압과 전류는 동위상이 되도록 제어되며 단위역률 값이 출력되는 것을 확인할 수 있다.



(a) Load inductor : 1000[mH]



(b) Load inductor : 5000[mH]

Fig 5.11 Power factor for voltage and current of proposed AFE rectifier

Fig 5.12는 전원 출력측에 포함된 총고조파왜형률의 시뮬레이션 결과로서 그 값이 약 3[%] 정도로 기존 AFE 정류기의 총고조파왜형률의 값보다 향상된 결과를 보여준다.

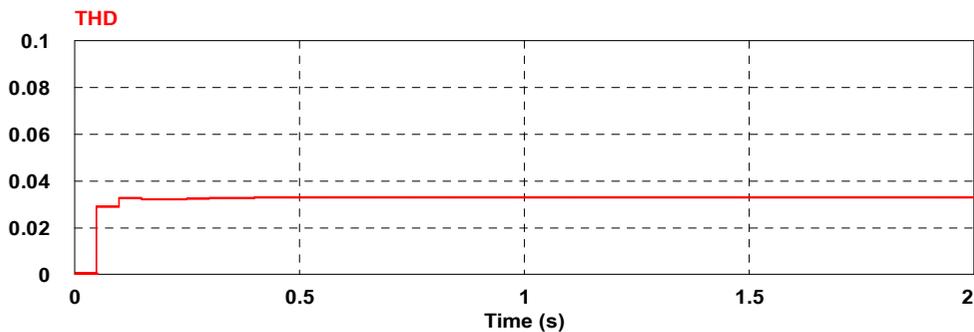


Fig 5.12 Total harmonic distortion for proposed AFE rectifier

5.3 제안하는 AFE 정류기를 활용한 전기추진시스템의 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 전원 전압 위상각 제어기법을 이용한 AFE 정류기의 유효성을 입증하기 위해 소형전기추진시스템을 구성하였으며, 선박은 속도변화에 따른 부하 특성을 가지므로 저속, 중속, 고속의 영역으로 구분하여 시스템의 속도응답특성을 분석하였다. 소형전기추진시스템은 발전기에서 출력된 교류전원을 제안하는 AFE 정류기를 통해 지령값에 일치하는 직류 출력전압으로 변환하고, 추진전동기의 속도제어를 위해서 간접벡터제어기법[FOC : Field Oriented Control]을 사용하였다.

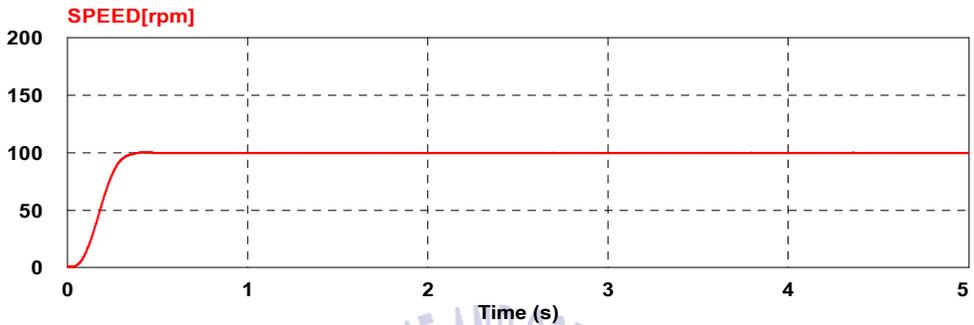
적용대상 선박의 전기추진시스템 파라미터 정수는 앞서 나타낸 Table 5.1과 같으며, 추진전동기로 사용되는 유도전동기의 파라미터 정수는 Table 5.2와 같다.

Table 5.2 System parameters used in induction motor

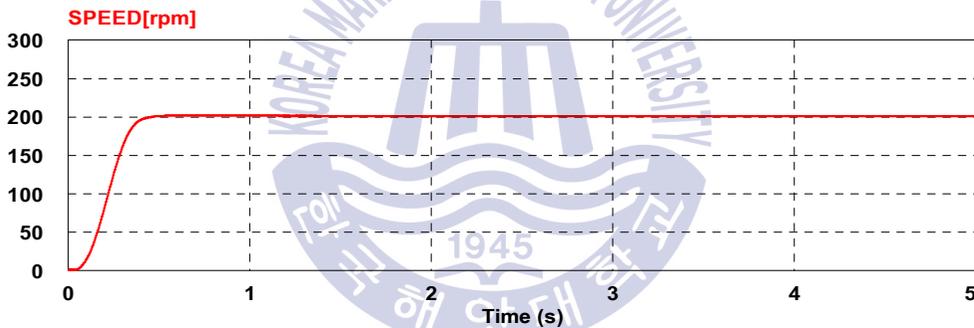
Parameter	Value
<i>Rated power</i>	460[kW]
<i>P</i>	10
<i>n</i>	680[rpm]
<i>R_s</i>	0.009[Ω]
<i>L_s</i>	297[uH]
<i>R_r</i>	0.011[Ω]
<i>L_r</i>	559[uH]
<i>L_m</i>	12.9[uH]
<i>M</i>	13.9[kg · m ²]

Fig 5.13은 본 연구에서 제안하는 전원 전압 위상각 제어기법을 이용한 AFE 정류기를 적용하여 구성한 소형전기추진시스템의 다이어그램이다.

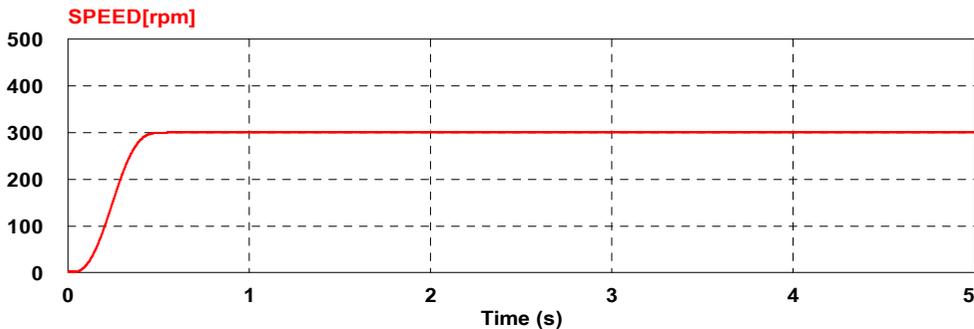
Fig 5.14는 100[rpm], 200[rpm], 300[rpm]의 저속과 중속영역에서의 계단 속도 지령에 대한 추진전동기의 속도응답 시뮬레이션 결과를 도시하고 있으며, 지령 값에 따라 양호하게 추종하는 속도제어특성을 보임을 알 수 있다.



(a) 0 → 100[rpm]



(b) 0 → 200[rpm]



(c) 0 → 300[rpm]

Fig 5.14 Simulation responses for step change of speed setting (0 → 100[rpm], 0 → 200[rpm], 0 → 300[rpm])

Fig 5.15는 고속영역에서의 추진전동기의 속도제어특성을 확인하기 위한 결과로서 500[rpm]의 고속영역에서 계단 속도지령에 대한 속도응답 시뮬레이션 결과를 도시하고 있으며, 전반적으로 양호한 속도제어특성을 확인할 수 있다.

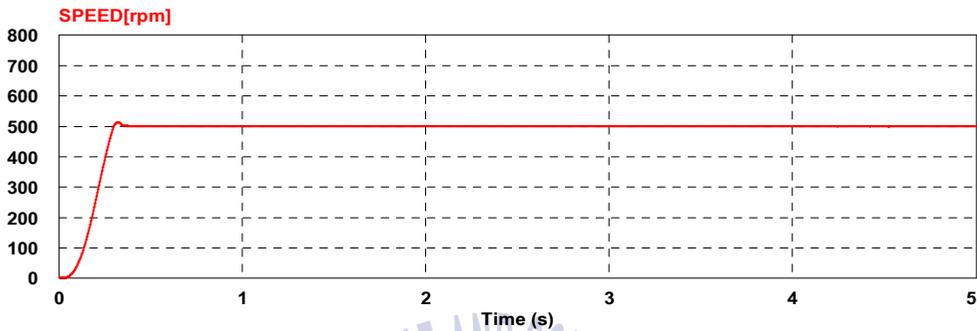


Fig 5.15 Simulation responses for step change of speed setting (0 → 500[rpm])

Fig 5.16은 추진전동기가 500[rpm]까지 고속으로 운전 중, -500[rpm]의 반전 속도지령을 인가한 경우의 속도응답을 나타내고 있으며, 속도의 급격한 변화에도 신속하게 지령값을 추종하므로 전동기 제어시스템의 속응성이 우수함을 확인할 수 있다.

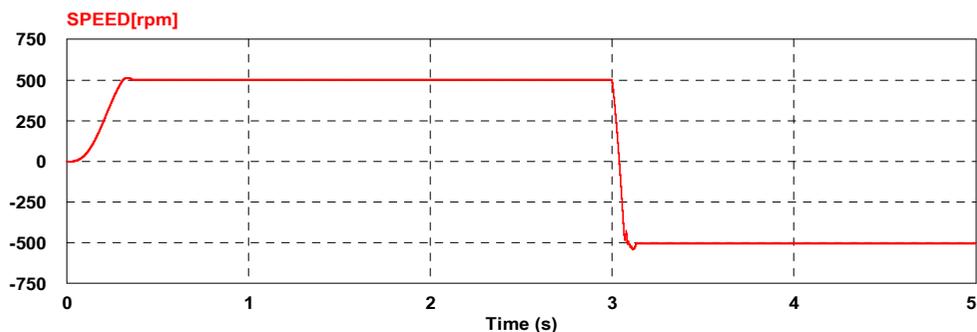


Fig 5.16 Simulation responses for step change of speed setting (500 → -500[rpm])

Fig 5.17은 전기추진시스템의 추진전동기 제어 시 전원 전압과 전류의 크기와 위상을 나타낸 결과이며 전압과 전류의 위상이 동위상을 유지하며, 단위역률의 값을 가진다. 또한 입력 전류의 파형도 잡음이 포함되지 않은 정현파 형태로 출력된다.

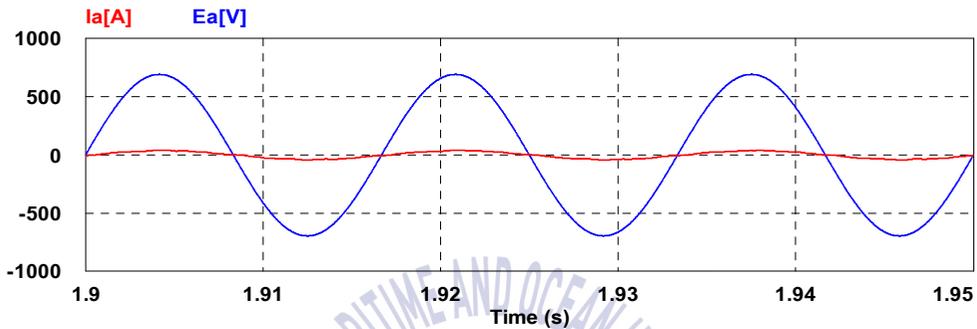


Fig 5.17 Power factor for voltage and current of Electric Propulsion System using proposed AFE rectifier

Fig 5.18은 추진전동기 속도 변화 시 DC link단의 직류 출력전압을 보여준다. 지령속도에 대한 응답 특성이 양호하며 안정된 상태로 DC link단의 직류 출력 전압을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

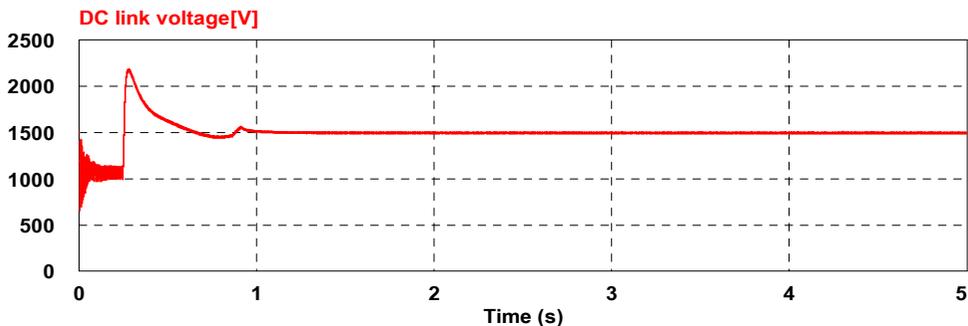


Fig 5.18 Simulation response for DC link voltage of Electric Propulsion System using proposed AFE rectifier

Fig 5.19는 전원 출력측에 포함된 총고조파왜형률의 시뮬레이션 결과이며, 측정값이 약 3[%]정도로서 IEEE Std519-2014에서 정하고 있는 1[kV] 미만의 출력 발전기의 총고조파왜형률의 기준치인 8[%]를 충족한다.

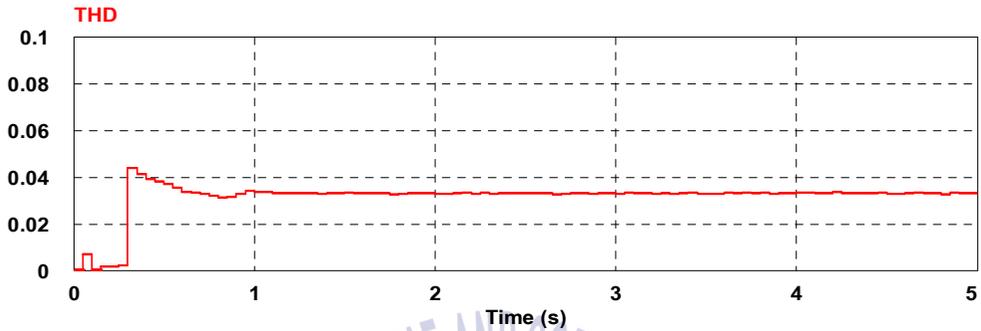


Fig 5.19 Total harmonic distortion of Electric Propulsion System using proposed AFE rectifier



제 6장 결 론

본 논문에서 제안하는 AFE 정류기를 활용한 전기추진시스템은 DFE 정류기와 기존의 AFE 정류기를 사용할 경우에 발생하는 전원 출력측의 높은 고조파와 역률저하, DC link단 직류 출력과형 손상 등을 개선하기 위한 방법이다.

특히, 제안하는 전원 전압 위상각 제어기법을 사용한 AFE 정류기는 고조파나 잡음 등이 포함되어 전원 전압이 정확하게 측정되지 않으면 위상각에 오차가 발생하여 정류기의 제어가 불안정해지는 기존의 방식과는 달리 어떤 상황에서도 빠르고 정확하게 전원 전압의 실제 위상각을 검출할 수 있으므로 정류기를 안정적으로 제어할 수 있으며, 개선된 전류제어기에서는 동기회전좌표계 $d-q$ 축으로 변환 시 발생하는 역기전력과 속도기전력 성분을 전향보상 함으로서 정류기 DC link단의 직류 출력 성능을 개선하였다.

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존의 AFE 정류기는 전원 전압의 위상각을 찾기 위해 영점 교차기법을 사용함으로써 고조파나 잡음 등의 영향으로 왜곡된 전원 전압이 측정될 경우 오차가 발생한 위상각으로 인해 정류기의 제어가 불안정해지므로 본 논문에서는 정확한 위상각을 찾기 위해 제안하는 전원 전압 위상각 제어기를 사용하였다. 또한, 개선된 전류제어기를 사용하여 DC link단 직류 출력을 실시간으로 피드백하고 외란으로 작용하는 역기전력과 속도기전력 성분을 전향보상하여 직류 출력과형을 개선한 AFE 정류기를 제안하였다.
- 2) 제안하는 전원 전압 위상각 제어기는 전원 전압을 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 설정한다. 그리고 무효전력성분 e_q 의 값이 0이 되도록 제어하므로 정확한 위상각 θ 를 구할 수 있었으며 제안하는 전원 전

압 위상각 제어를 이용한 AFE 정류기의 전원 출력측 전압과 전류의 역할이 개선되었다.

- 3) 또한, 실시간으로 DC link단의 직류 출력파형을 피드백하고 동기회전좌표계 $d-q$ 축의 값을 제어할 때 발생하는 역기전력 성분과 속도기전력 성분을 전향보상 함으로서 각 축 간의 전류제어에 서로 영향을 주는 성분을 제거하므로 정류기의 DC link단 출력파형에 포함된 리플이 감소되고 안정적으로 지령값에 추종하였으며, 전원 출력측의 고조파가 저감되는 효과를 시뮬레이션 결과로서 확인할 수 있었다.
- 4) 제안하는 AFE 정류기의 유효성 입증을 위해 소형전기추진시스템을 구성하여 시뮬레이션을 실시하였으며, 추진전동기의 운전속도 영역을 저속, 중속, 고속의 영역으로 구분하여 속도부하에 따른 부하운전특성을 살펴본 결과 속도 지령 및 부하 변동 시에도 추진전동기의 속도가 지령값에 신속하게 추종함을 확인할 수 있었다. 그리고 정류기의 제어를 위해 제안하는 전원 전압 위상각 제어를 사용함으로써 전원 출력측 전압과 전류의 역할이 개선되었으며, 전류제어를 이용하여 DC link단 직류 출력파형에 포함된 리플을 제거하고 고조파를 저감하였으며, 직류 출력파형이 지령값에 빠르게 추종하는 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] 설승기, 2009. *전기기기 제어론*. 홍릉과학출판사.
- [2] Ali Keyhani, 2011. *Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems*. Wiley-IEEE.
- [3] William F. Egan, 2007. *Phase-Lock Basics*. Wiley-IEEE.
- [4] A, Fitzgerald. Charles, Kingsley. & Stephen, Umans., 2017. *Electric Machinery*. Mc Graw Hill.
- [5] C, A. M. Vasquez., 2014. *A methodology to select the electric propulsion system for Platform Supply Vessels*. Degree of Master. Sao Paulo: Naval Architecture and Ocean Engineering.
- [6] T, J. McCoy., 2002. Trend in ship electric propulsion. *Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, July 21-25, 2002, pp. 343-346.
- [7] 박제욱, 김성엽, 2014. 선박 전기 추진 시스템의 기술 동향. *전력전자학회논문집*, 19(3), pp. 31-37.
- [8] 김종수, 최재혁, 윤경국, 서동환, 2012. 새로운 정류방식을 이용한 전기추진 선박의 고조파 저감. *한국정보통신학회논문지*, 16(10), pp. 2230-2236.
- [9] P, N. Kapil. & Cheta, M. Dhrangadharia., 2014. Design and Simulation of Three-Phase Voltage Source Based Converter for HVDC Applications. *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, 7(6), pp.

573-579.

[10] Alan, J. Watson., Patrick, W. Wheeler. & Jon, C. Clare., 2007. A Complete Harmonic Elimination Approach to DC Link Voltage Balancing for a Cascaded Multilevel Rectifier. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 54(6), pp. 2946-2953.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Haresh, P. & Ankit, S., 2016. A novel control method for UPS battery charging using Active Front End(AFE) PWM rectifier. *IEEE Power Electronics, Drives and Energy Systems*, Trivandrum, India, December 14-17, 2016, pp.978-980.