



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

리액터에 의한 가변주파수 구동장치의
입력전류 개선에 관한 고찰

Consideration on The Improvement of Input Currents for
Variable Frequency Drive by Reactors



지도교수 김성환

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

기관시스템 공학과

김희문

본 논문을 김희문의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 이 성 근 인

위 원 공학박사 김 종 수 인

위 원 공학박사 김 성 환 인



2014년 2월

한국해양대학교 대학원

기관시스템 공학부

김 희 문

목 차

1. 서 론	
1.1 연구배경 및 동향	1
1.2 연구 목적과 구성	2
2. 고조파의 정의 및 특성	
2.1 고조파의 정의	3
2.2 고조파의 특성	5
2.2.1 펄스 수에 따른 고조파 차수	5
2.2.1 고조파의 구분	6
2.3 고조파 왜형률	8
3. 선박 및 해양플랜트에서의 고조파 발생원인과 영향	
3.1 고조파의 원인	10
3.1.1 컴퓨터를 이용한 장비들	10
3.1.2 형광등	10
3.1.3 단상 펄스 폭 변조 구동장치	10
3.1.4 3상 비선형 부하	11
3.2 고조파의 영향	12
3.2.1 발전기	12
3.2.2 전력 케이블	13
3.2.3 변압기	13
3.2.4 커패시터와의 공진	14
3.2.5 역률의 저하	15
3.2.6 유도 전동기	15
3.2.7 가변속 구동 장치	16
3.2.8 조명장치	16
3.2.9 UPS system	17
3.2.10 전력 측정 장치	17
3.2.11 전화기	18
3.2.12 회로차단기	18

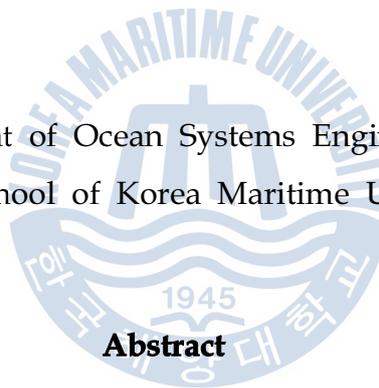
4. 고조파 저감 대책	
4.1 3상 3선 배선시스템	19
4.1.1 위상이동 (Phase shifting)	19
4.2 3상 4선 배선시스템	20
4.2.1 Zero sequence 변압기 (Zig-zag transformer)	20
4.2.2 능동필터 (Active filter)	21
4.3 광폭필터 (Wide spectrum filter)	22
4.4 이중리액터 (Duplex reactors)	23
4.5 수동 L-C 필터 (Passive L-C filters)	24
4.6 위상이동 변압기 (Phase shifting transformer)	26
4.7 전자 필터(Electronic filter)	27
4.7.1 능동필터 (Active filter)	27
4.7.2 능동-수동필터 (Hybrid active-passive filter)	28
4.8 3상 AC 및 DC 구동장치용 표준 리액터	29
4.8.1 AC line 리액터	29
4.8.2 DC bus 리액터	29
4.8.3 AC line 리액터 & DC bus 리액터	29
4.8.4 3상 AC 및 DC 구동장치용 특수 리액터	30
5. 리액터를 이용한 고조파 저감	
5.1 리액터의 효과	31
5.2 AC line 리액터와 DC link 리액터	32
6. 시뮬레이션 및 검토	
6.1 시뮬레이션 프로그램	34
6.2 시뮬레이션 결과	35
7. 결 론	42
참고 문헌	43
감사의 글	44

리액터에 의한 가변주파수 구동장치의 입력전류 개선에 관한 고찰

Consideration on The Improvement of Input Currents for Variable Frequency Drive by Reactors

Kim Hee Moon

Department of Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime University



Abstract

AC line reactors and dc link reactors are widely used in variable frequency drives(VFDs) to improve the drive performance such as reducing input current harmonics, elevating input power factor, and protecting the drives from surges, etc. The effectiveness of both types of reactors in reducing input harmonics is affected by the loading of the drives and the system source impedance. In this paper, a simulation is performed to investigate of such factors. The rules to evaluate the needs and effectiveness using ac line or dc link reactors are proposed for practical applications.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 동향

선박이나 해양플랜트의 대부분의 장비는 전기를 사용하는 장비이다. 이러한 장비에 안정되고 좋은 품질의 전력을 공급하는 것은 승무원의 안전 및 해양환경적인 측면에서 필수적인 요건이다. 전력 공급의 불안정으로 인해 선박의 안전과 환경보존에 직결 되는 장비들이 고장을 일으킨다면 그것은 큰 위험을 초래할 수 있다.

전력의 품질을 논하는데 있어 가장 중요한 것은 발전기에서 생산된 전압과 전류의 선형성이다. 일반적으로 선박에서 사용되는 디젤 발전기가 생산하는 전류의 파형은 안정적인 정현파이다. 하지만 전기전자 장비의 비선형 부하로 인하여 고조파 전류가 유입되면 공급전원의 파형이 왜곡되게 되고, 이렇게 왜곡된 전압은 다른 전기전자 장비에 나쁜 영향을 미친다.

최근 전력전자용 스위칭 소자들의 비약적인 발전으로 인해 전기추진 선박 및 해양플랜트 등에서 가변 주파수 구동장치(VFD ; Variable Frequency Drives)의 사용이 증가하고 있다. 그러나 VFD에서 전력변환 시 사용되는 스위칭 소자들에 의해 발생하는 고조파는 현대 전력시스템에서 해결해야 될 중요한 문제로 대두되었다.

VFD 입력 측에 발생하는 고조파를 감소시키기 위해서 수동LC필터, 능동필터 위상이동 변압기 등과 같이 다양한 고조파 저감 방법이 사용되고 있다. 그러나 시스템이 복잡해지고 설치비용 및 부피가 증가한다는 단점이 있다. 그리고 선박에서처럼 대 전력을 요구하는 전기전자 장비에는 사용이 어렵다.

그에 비해 AC line이나 DC link에 리액터를 설치하는 것은 다른 방식들에 비해 보다 쉽게 입력 측의 고조파를 줄일 수 있다.

일반적으로 직렬 리액터를 적용하지 않는 경우 6-펄스 컨버터에서의 고조파 총 왜

형률은 80[%]이상이지만 3[%] 이상의 인덕턴스를 가진 리액터를 직렬 연결하면 왜형률은 40[%]이하까지 감소한다. AC line 리액터는 DC link 리액터에 비해 효율은 높고 비용과 부피는 낮다는 장점을 가지고 있다.

1.2 연구 목적과 구성

지금까지 리액터를 이용하여 고조파를 저감시키는 방법은 널리 쓰여 왔다. 하지만 필요한 리액터의 용량과 그 효과에 대하여 정량적으로 분석된 자료는 거의 없다.

본 논문에서는 대용량 전동기 구동장치를 선정하여 리액터 용량과 부하의 크기에 따라 고조파 왜형률 변화추이를 검토하여 최적의 용량선정 근거를 마련하고자 하였다. 또한, 소프트웨어 PSIM을 활용하여 각 상황에 따른 전류 고조파 왜형률을 분석하였다.

1장 서론에서는 연구배경, 동향, 연구목적 및 논문 구성에 대해 기술하고, 2장에서는 고조파의 정의 및 대한 펄스 수에 따른 고조파의 생성, 고조파 차수에 따른 총고조파 왜형률에 관한 서술을 하였다.

3장에서는 선박이나 해양플랜트 등에서 발생하는 고조파의 원인에 대해 기술하고 4장에서는 고조파 전류를 저감시키기 위해 지금까지 제안되었던 방식 및 장치들을 소개하였고 각각이 지니고 있는 특징 및 장·단점을 기술하였다.

5장에서는 리액터가 가지는 일반적인 특성 및 효과와 VFD 장치에 리액터를 선정하는 것에 관해 기술하였다.

6장에서는 PSIM을 이용한 시뮬레이션 및 결과를 고찰하고 서술하였다.

7장에서는 본 논문의 결론으로서 시뮬레이션의 결과를 요약하였고, 향후 과제에 대하여 언급하였다.

2. 고조파의 정의 및 특성

2.1 고조파의 정의

전력시스템에서 인가된 전압에 비례하는 전류가 흐르는 장치를 선형부하라 한다. 선형부하의 예로는 발열저항을 사용하는 히터, 백열등 등이 있고 선형부하에 흐르는 교류전압과 전류는 Fig. 2-1과 같다.

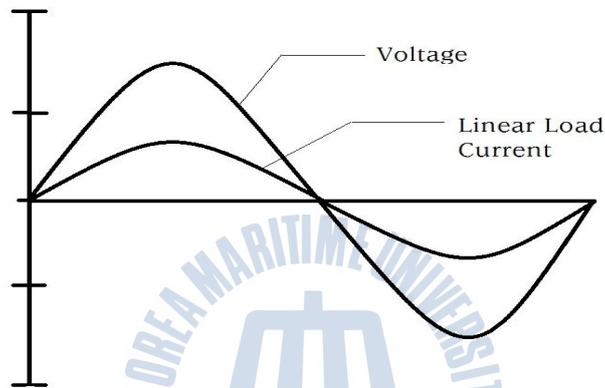


Fig. 2-1 Voltage and current waveforms for linear load

반면에, 비선형부하란 공급전압과 전류의 형상이 일치하지 않는 장치들을 의미하며 그 예로는 방전등, 컴퓨터 및 가변속 구동장치 등이 있다. 비선형부하에 흐르는 전류는 본질적으로 기본파 외에 기본파의 n 배인 다양한 주파수 성분을 함유하고 있는데 이를 n 차 고조파라 한다. 주파수에 따라 제 2 또는 제 3 고조파 등으로 불리며 파형이 정현파가 아닌 변형된 파형의 경우는 반드시 고조파를 포함하고 있다. 지 정도이다.

“고조파”(Harmonics)란 기본 주파수의 정수배 차수의 주파수를 갖는 정현파 성분을 말한다. 일반적으로 비정현파 $f(t)$ 는 식(2.1)과 같이 주파수와 진폭을 달리하는 무수히 많은 여현항과 정현항의 합인 푸리에 급수(Fourier Series)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f(t) &= a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t & (2.1) \\
 &+ b_0 + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t \\
 &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \\
 &= \text{직류} + \text{여현항} + \text{정현항}
 \end{aligned}$$

식(2.1)에서 주파수가 영(zero)일 때 상수항 a_0 는 여현항 $a_0 \cos 0t = a_0$ 이고 상수항 b_0 는 정현항 $b_0 \sin 0t = 0$ 이된다. 따라서 모든 동일주파수에 대해 여현항과 정현항을 합성하면 식(2.2)가 된다.

$$f(t) = a_0 + A_1 \sin(\omega t + \psi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \psi_2) + A_n \sin(n\omega t + \psi_n)$$

$$= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \psi_n) \quad \text{단, } A_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)}, \quad \psi_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n}$$

여기서, ψ ; 위상각, ω ; $2\pi f$, f ; 기본파 주파수 (2.2)

식(2.2)에서 a_0 는 시간과 주파수에 무관한 직류성분이고 그 외의 항은 각종 주파수를 갖는 정현파 성분이 된다. 직류성분 외의 성분 중 $A_1 \sin(\omega t + \psi_1)$ 은 비정현파 $f(t)$ 와 동일주파수 성분을 갖는 기본파가 되고, 그 외의 $A_n \sin(n\omega t + \psi_n)$ 는 기본파의 2, 3, ..., n배의 주파수 성분을 갖게 되는데 이를 각각 2차 고조파, 3차 고조파, ..., n차 고조파로 부르며 이를 합쳐 “고조파”라 한다.

Fig. 2-2는 기본파와 3차 고조파 및 이 두 파형이 합성된 파형을 보여주고 있다.

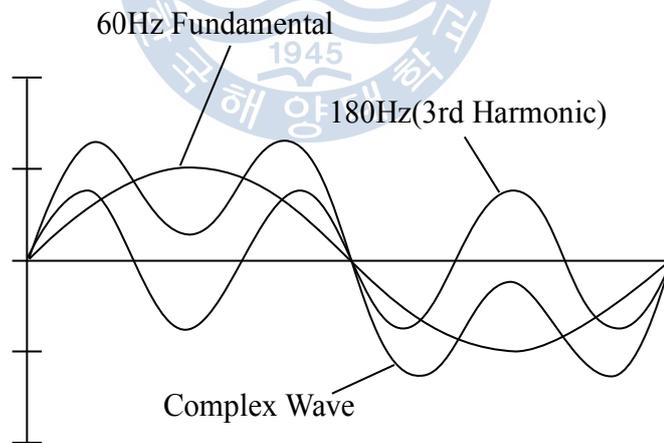


Fig. 2-2 Construction of Complex Wave

2.2 고조파의 특성

2.2.1 펄스 수에 따른 고조파 차수

앞서 언급한 바와 같이 직류 성분은 고조파를 함유하고 있지 않다. Fig. 2-3은 단상 교류 및 이를 전파 정류했을 시의 상 전압파형이고 Fig. 2-4는 3상 교류 및 전파정류 시의 상 전압파형이다.

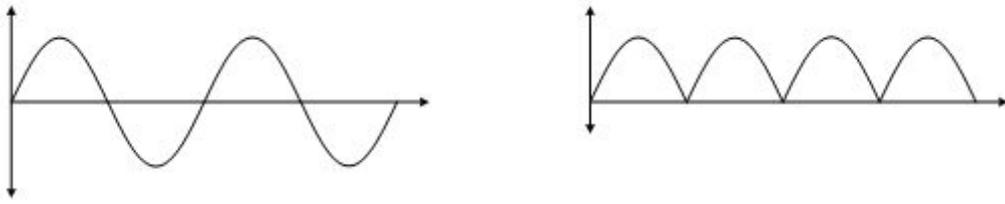


Fig. 2-3 Input and output phase voltage wave forms of 1-phase bridge rectifier

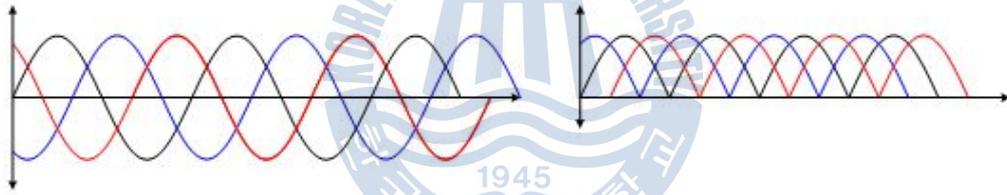


Fig. 2-4 Input and output phase voltage wave forms of 3-phase bridge rectifier

따라서 단상교류를 전파 정류한 직류 측 출력파형은 Fig. 2-5의 (a)와 같고, 3상 교류를 전파 정류한 출력파형은 (b)와 같이 된다. 여기서 단상 정류의 경우는 맥동 수는 적으나 그 정도가 심하고 3상 정류의 경우는 맥동 수는 3배로 많으나 그 정도가 작다. 즉, 3상 6펄스의 경우가 직류에 더 가깝고 펄스가 증가할수록 전파 정류했을 시의 고조파가 줄어든다.

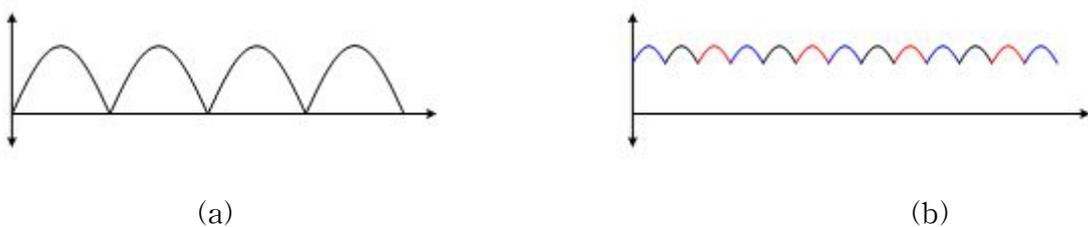


Fig. 2-5 DC output voltage wave forms of 1-phase & 3-phase bridge rectifiers

전파 정류를 사용하는 전력변환에서 나타나는 이론적인 고조파는 아래의 식과 같다.

$$h = np \pm 1 \quad (2.3)$$

여기서 h ; 고조파 차수, n ; 정수, p ; 사이클 당 펄스 수

식(2.3)에 의해 단상을 정류해서 2펄스를 만든다면, 3, 5, 7, 9차...등의 고조파가 발생할 것이고, 3상을 정류하여 6펄스를 만든다면, 5, 7, 11, 13차...등의 고조파가 발생할 것이다.

또한 이론적으로 고조파 차수의 전압에 의한 고조파 전류의 크기는 식(2.4)와 같다.

$$I = \frac{1}{h} \quad (2.4)$$

위 식에서 알 수 있듯이 총 실효전류에 대한 고조파 비율은 고조파 차수에 반비례한다. 따라서 만일 5차 고조파가 발생할 시 총 실효전류에 대한 고조파 비율은 20[%]가 될 것이고, 7차 고조파가 발생한다면, 총 실효전류에 대한 고조파 비율은 14[%]가 된다. 즉, 펄스가 많아질수록 낮은 차수의 고조파는 발생하지 않고 높은 차수의 고조파만 남게 되는데, 높은 차수의 고조파는 실효전류에 대한 고조파 함유량이 낮으므로 전력 품질에 큰 문제를 일으키지 않는다.

2.2.2 고조파의 구분

각 차수의 고조파는 기본파의 정수배가 되는 주파수와 sequence를 가진다. 또한 그 sequence는 기본파에 대한 회전 벡터를 가진다. 아래의 Table 2-1은 이상적인 6 펄스 정류기에 의한 고조파 sequence 구성표를 보여준다.

Table 2-1 Sequences of harmonics

고조파	1	5	7	11	13	17	19	23.....
sequence	+	-	+	-	+	-	+	-
회전 벡터	F	B	F	B	F	B	F	B

Table 2-1과 같이 7, 13, 19, 25차 등의 고조파는 기본파와 같은 방향인 + 방향의 sequence를 가지고 5, 11, 17, 23차 등의 고조파는 기본파와 반대 방향인 - 방향의 sequence를 가진다. 이러한 고조파 sequence는 회전기기에 영향을 미치는 요소이다.

고조파를 대칭좌표에 의하여 구분하면 Table 2-2와 같이 각각 정상분, 역상분 및 영상분 고조파 성분으로 분류된다. 정상분 및 역상분 고조파는 벡터 값이고, 영상분 고조파는 스칼라 값으로 나타난다.

Table 2-2 Sequences of harmonics by symmetrical coordinates

구분	벡터도	고조파
정상분 고조파		$(3n+1) : 4, 7, 10, \dots$
역상분 고조파		$(3n+2) : 5, 8, 11, \dots$
영상분 고조파		$3n : 3, 6, 9, \dots$

3상 기본파의 각 상의 값들은 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$R ; \cos \omega t$$

$$S ; \cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \quad (2-5)$$

$$T ; \cos \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right)$$

따라서 정상회전 고조파의 차수 $n : (3m-2) = 1, 4, 7, \dots$ 이므로 식(2-6)이 된다.

$$R ; \cos (3m-2) \omega t$$

$$S ; \cos (3m-2) \times \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) = \cos \left\{ (3m-2) \omega t - \frac{2}{3} \pi \right\} \quad (2-6)$$

$$T ; \cos(3m-2) \times (\omega t - \frac{4}{3}\pi) = \cos\left\{(3m-2)\omega t - \frac{4}{3}\pi\right\}$$

역상회전 시 n : (3m-1) = 2, 5, 8, ... 이므로 식(2-7)이다.

$$\begin{aligned} R & ; \cos(3m-1)\omega t \\ S & ; \cos(3m-1) \times (\omega t - \frac{2}{3}\pi) = \cos\left\{(3m-1)\omega t - \frac{2}{3}\pi\right\} \\ T & ; \cos(3m-1) \times (\omega t - \frac{4}{3}\pi) = \cos\left\{(3m-1)\omega t - \frac{4}{3}\pi\right\} \end{aligned} \quad (2-7)$$

또한 영상 회전 n : 3m = 3, 6, 9, ... 이 되어 식(2-8)이 된다.

$$\begin{aligned} R & ; \cos 3m\omega t \\ S & ; \cos 3m \times (\omega t - \frac{2}{3}\pi) = \cos(3m\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ T & ; \cos 3m \times (\omega t - \frac{4}{3}\pi) = \cos(3m\omega t - \frac{4}{3}\pi) \end{aligned} \quad (2-8)$$

2.3 고조파 왜형률

전력의 품질을 나타내는 수치로는 통상적으로 고조파 총 왜형률(THD ; Total Harmonics Distortion)이 사용되는데, 이는 기본파 성분 실효치에 대한 전체 고조파 성분 실효치의 비율로 다음 식들로써 정의될 수 있다.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (2-9)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100[\%] \quad (2-10)$$

여기서 THD_V : 전압 고조파 총 왜형률
 THD_I : 전류 고조파 총 왜형률
 V_n, I_n : 제 n차 고조파 전압, 전류의 실효치
 V_1, I_1 : 기본파 전압, 전류의 실효치

고조파 함유율은 어떤 차수의 고조파 성분 실효치와 기본파 성분 실효치에 대한 비율로 식(2-11) 및 (2-12)로 나타낸다.

$$\frac{V_n}{V_1} \times 100[\%] \quad (2-11)$$

$$\frac{I_n}{I_1} \times 100[\%] \quad (2-12)$$



3. 선박 및 해양플랜트에서의 고조파 발생원인과 영향

3.1 고조파의 원인

3.1.1 컴퓨터를 활용한 장비들(computer-based Equipment)

일반적으로 항해, 통신 및 제어시스템의 전자 장비들은 전원장치로서 Fig. 3-1과 같은 SMPS (Switched mode power supply unit)를 사용한다. 이 장치들은 교류를 정류한 후 평활 회로를 거쳐 안정된 직류를 공급하기 위하여 컨버터를 거치게 되는데 이러한 과정 중 고조파가 발생하게 된다.

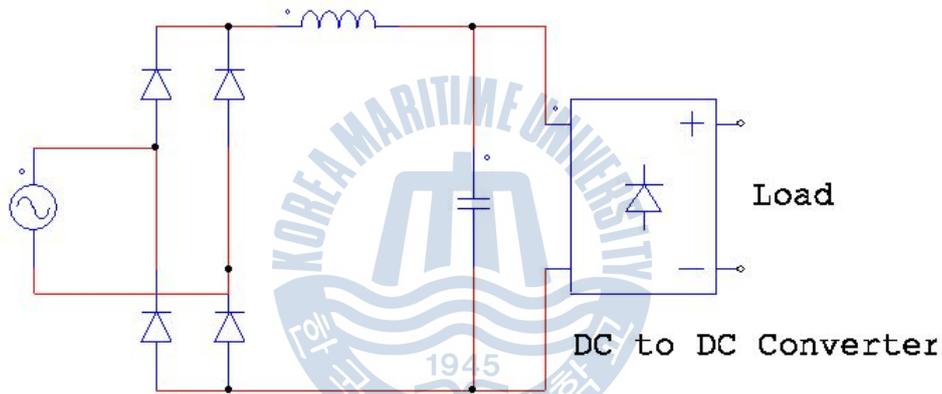


Fig. 3-1 Power supply for general computer-based Equipment

3.1.2 형광등

선박에서 사용되는 형광등 또한 고조파를 발생하는 원인이다. 일반적으로 선박이나 해양플랜트 보다는 많은 양의 형광등을 사용하는 여객선에서 큰 영향을 미친다. 형광등은 초기 점등 시 램프의 두 전극에 고전압을 공급하기 위하여 안정기가 설치되어 있는데, 이 안정기에서 생산되는 고전압 Arc로 인해 고조파가 발생한다.

3.1.3 단상 펄스폭변조 (pulse width modulation : PWM)구동장치

침실의 송풍용 팬과 같은 5[HP]정도의 단상 전동장치도 고조파를 발생시킨다. 이러한 장비들은 보통 추가적으로 리액터를 설치하지 않는다. 그 결과 총 고조파 왜형률은 135[%]에 달한다. 또한 단상 UPS 내부의 스위칭 소자들에 의해서도 고조파가 발생한다.

3.1.4 3상 비선형 부하

(1) PWM 구동장치

AC PWM 구동장치는 오늘날 선박이나 해양플랜트에서 농형 유도 전동기의 가변 구동장치로 널리 쓰이고 있다. 그러나 농형 유도 전동기는 일반적으로 순수한 정현파를 공급 받도록 설계되어 있다.

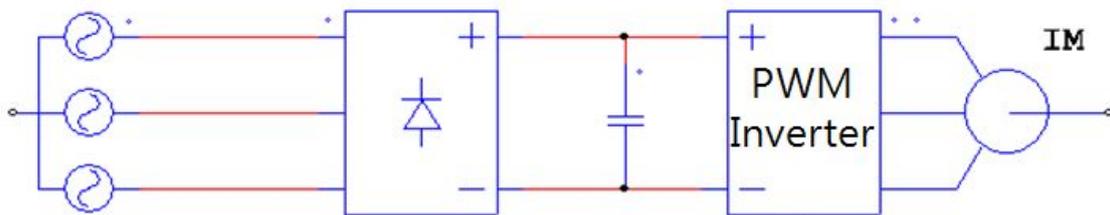


Fig. 3-2 Block diagram of general AC PWM Drive

AC PWM 구동장치는 Fig. 3-2와 같은 구조로 설계되며, 3상 교류는 다이오드 정류기를 거쳐 6-펄스의 직류로 바뀌게 된다. 이후 커패시터 평활회로를 지나 PWM 인버터에서 스위칭소자들의 스위칭에 의해 펄스폭을 조정하여 출력되는 파형이 정현파에 가깝도록 만들어 준다.

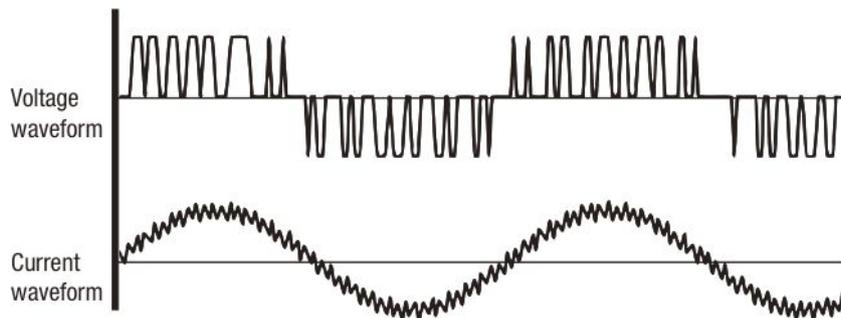


Fig. 3-3 Output waveforms of PWM Inverter by switching elements

Fig. 3-3에서 알 수 있는 바와 같이 AC PWM 구동장치에서 만들어지는 파형은 완전한 정현파는 아니지만 이론상 스위칭의 횟수가 많아지면 많아질수록 정현파와 가까워질 수 있다. 일반적으로 육상에서 사용되는 소 용량 전동기들의 경우 스위칭

주파수를 높일 수 있지만 선박에서 사용되는 대 용량 전동기의 경우는 스위칭 손실로 인하여 그 횟수가 제한 될 수밖에 없다. 따라서 선박이나 해양플랜트에서는 AC PWM 구동장치에 의해 고조파가 많이 발생하게 된다.

(2) 회전기계

비록 가변 구동장치와 같은 다른 비선형 부하에 비해 고조파의 함유량은 적지만 발전기와 유도 전동기와 같이 선형성 부하 또한 고조파를 생성할 수 있다. 회전기계의 권선은 고정자 슬롯 내에 여러 다발로 설치된다. 그 결과 기자력이 균등하게 분포되지 못해 작은 맥동이 일어나며 속도가 균일하지 않은 회전을 함으로써 고조파가 생성된다.

(3) 변압기

전압과 전류, 자기적 요소들 사이의 비선형적인 관계에 의해서 변압기에서도 고조파가 생성된다. 특히 3차 고조파와 3의 배수 고조파가 생성된다. 만일 입력 전압이 완벽한 정현파라면, 전류는 비선형일 것이고, 고조파를 함유할 것이다. 반대로, 만일 여자 전류가 완전한 정현파라면, 출력 전압은 비선형일 것이다. 그러나 회전기계와 마찬가지로, 고조파의 함유량은 다른 가변구동 장치에 비해 무시해도 될 정도로 작다.

(4) 무정전 전원시스템(Uninterruptible power supply system : UPS system)

무정전 전원시스템은 보통 발전기가 갑자기 정지되거나 정전된 상황에 대비하여 설치된다. 보통 앞서 언급한 SMPS나 개인용 컴퓨터 등의 보호를 위해 사용하지만, 3상 UPS System도 선박에서 많이 사용되며 SCR에 의한 브리지 정류회로를 이용한다.

3.2 고조파의 영향

3.2.1 발전기

선박에서 발생하는 고조파에 의해 영향을 가장 크게 받는 장치는 발전기이다. 일반적으로 선박의 발전기는 육상의 발전기에 비해 크기도 작고 고정자 및 회전자 권선의 굵기도 얇아 임피던스가 육상의 발전기보다 3~4배가량 높다. 따라서 고조파에 의해 발생하는 손실이 훨씬 크다. 그리고 높은 주파수의 고조파가 발전기에 유

입되면 동손 및 철손이 증가함으로써 회전자와 고정자에 열이 발생하여 손실을 야기하는 것은 물론, 특정 고조파에 의하여 토크 맥동이 발생한다. 고조파 전류는 항상 정방향 및 역방향 한 쌍으로 나타나는데 이러한 고조파가 기본파와 상호작용을 일으켜 기본파의 몇 배가 되는 토크맥동을 일으켜 기계적으로 큰 스트레스를 가져온다. 발전기는 동일한 전압과 동일한 주파수를 낼 수 있도록 일정한 회전수를 가지도록 설계되어 있는데 고조파에 의한 전압 및 주파수의 왜곡으로 인하여 발전기의 기계적인 회전수 가감이 원활하지 못하게 되어 결과적으로 안정하지 못한 전력을 생산하며, 이렇게 생산된 전력이 다른 전자장비에 공급되는 등의 악순환을 가져올 수가 있다.

3.2.2 전력 케이블

케이블 도체에 대한 고조파 전류의 가장 큰 문제는 과열이다. 주파수가 증가함에 따라 표피효과와 근접효과에 의해 도체가 갖는 저항은 증가한다. 표피효과는 전류를 도체의 바깥쪽 층이나 표면으로 밀어내려는 경향을 말하며 이 결과 도체의 유효 저항은 증가하고 온도가 상승하는 동안 전류는 감소하게 된다. 표피효과에 의해서 전류는 도체 표면에 집중되고 도체는 직류저항보다 큰 고주파저항을 나타내는데, 그 도체에 근접한 다른 도체가 존재해서 양자 사이 공간의 자속밀도를 증가 시킬 때, 고주파 전류는 다른 도체에 가까운 부분에 보다 더 집중되어 흐르게 되는데 이를 근접효과라고 하며, 도체의 고주파저항을 한층 증대시키게 된다. 주파수가 높을 수록, 그리고 도체가 가깝게 배치될수록 뚜렷하다. 결국 케이블에 대한 등가 교류저항도체의 저항은 더욱 커져 손실도 커지게 되는 것이다. 저항은 도체 단면적의 함수로써 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R_{ac} = \rho \frac{L}{A_{EFF}} \quad (3.1)$$

여기서, P : 물질의 저항률(구리, 알루미늄 등)

L : 도체의 길이

A_{EFF} : 유효면적

3.2.3 변압기

변압기는 고조파에 의한 과열과 과전압에 대해서 취약하다. 변압기에 영향을 주는 고조파 전압과 고조파 전류는 일반적으로 높은 주파수를 가지고 있기 때문에 동손과 와류손을 증가시키는 원인이 된다. 따라서 동손과 와류손에 의해서 변압기의 운전 온도는 증가된다. 고조파로 인한 동손과 와류손은 아래 식과 같다.

$$P_{EC} = P_{EF} \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2 \quad (3.2)$$

여기서 P_{EC} : 와류손의 총합

P_{EF} : 전부하 시 기본파에 대한 와류손

$$P_{CU} = I_s^2 R \quad (3.3)$$

여기서 P_{CU} : 동손

I_s : 총 실효전류

R : 권선저항

3.2.4 커패시터와의 공진

역률 조정용 커패시터는 전력계통에서 효율을 증대시키기 위해 역률을 높이는데 사용된다. 그러나 전력계통에 커패시터를 사용함으로써 공진 문제가 발생할 수 있다.

(1) 고조파 전류의 일반적인 흐름

고조파 전류는 비선형부하로부터 발전기 측으로 흐르게 된다. 일반적으로 발전기 측의 임피던스는 부하들이 이루는 병렬회로의 임피던스보다 적다. 그러나 %임피던스에 의해서 고조파 전류는 발전기와 커패시터로 나누어져 흐르게 되는데 공진이 발생하게 되면 커패시터로 유입된 고조파 전류는 증폭되어 변압기, 발전기, 전동기 등의 소손 원인을 제공하게 된다.

(2) 병렬공진

병렬공진은 계통의 유도성 리액턴스와 용량성 리액턴스가 동일 주파수에서 같을 경우 발생하게 된다. 커패시터와 리액터가 병렬로 연결된 부근에 고조파 발생원이 존재하게 되면 고조파 전류는 증폭되어 커패시터와 리액터 사이에서 진동하게 된다. 이러한 진동전류는 전압왜곡의 원인이 되고 전체 시스템에 장애를 주게 된다. 병렬공진 주파수는 다음과 같다.

$$F_r = \sqrt{\frac{kVA_{SC}}{kVAR_{PFC}}} \times F_1 \quad (3.4)$$

여기서 F_r : 공진주파수 [Hz]

F_1 : 계통주파수 [Hz]

kVA_{SC} : 단락용량

$kVAR_{PFC}$: 역률조정용 커패시터용량

(3) 직렬공진

직렬공진은 선로 또는 변압기 리액터와 커패시터가 직렬로 연결된 결과 발생하게 된다. 또한 커패시터가 배전간선의 끝부분에 위치할 경우 발생하게 되는데 이 경우 임피던스는 상당히 작게 되어 직렬로 연결된 부근에 고조파 발생원이 존재하게 되면 시스템에 장애를 주게 되고, 커패시터에서 과도한 전압왜곡이 일어나게 된다.

3.2.5 역률의 저하

역률이라 하면 일반적으로 전동기 등의 리액티브 성분만을 고려하여 $PF = \cos\theta$ 라고 하고 있지만 비선형 부하에서는 고조파 전압과 고조파 전류에 의한 왜곡 전력도 무효분으로 적용시켜야 한다. 즉 리액티브 성분에 의한 무효분이 적더라도 왜곡전력이 크면 무효분이 더 크게 되어 역률이 저하하게 된다.

3.2.6 유도전동기

근래 선박에서 사용되는 대부분의 전동기는 유도전동기이다. 유도전동기의 고조파 전류에 의한 영향은 변압기의 동손 및 와류손에 의한 손실의 경우와 유사하며 특히 고차 고조파에 의한 회전자 권선의 과열은 회전축의 변형과 축 베어링의 윤활 불량에 의한 베어링의 변형을 초래하여 심각한 문제를 일으킬 수 있으며 전동기의 수명에 직결된다. 또한 역상 고조파로 인하여 반대방향의 토크가 발생하게 되며, 전동기의 맥동 현상(토크 ripple)을 일으키게 된다. 이러한 맥동 토크가 입력 전력의 5~8[%]를 초과할 시 심각한 손상을 주게 된다. 전동기 내에서 고조파 전류는 많은 잡음을 발생시키며 또한 공극내 자속의 분포를 균일하게 만들어 “Cogging”(시동을 원활하게 하지 못하게 하는 현상) 또는 “Crawling”(매우 큰 슬립을 갖게 하는 현상)을 야기 시키며, 제 5고조파와 7고조파는 발전기 또는 전동기의 부하에 기계적 진동을 발생시킨다.

3.2.7 가변속 구동장치(Variable Speed Drive :VFD)

모든 종류의 가변 속도 구동장치는 전력변환 반도체 소자를 사용하여 입력 측의 교류를 정류하여 직류로 만든다. 그 과정에서 필연적으로 고조파가 발생된다. 그러나 입력 측 교류에 고조파가 함유되어 있다면 구동 장치의 반도체 소자들이 더 큰 손상을 입게 된다.

일반적으로 전동기가 클수록 회전관성으로 인하여 전류에 영향을 덜 받기 때문에 높은 정격을 사용하는 가변 속도 구동장치는 고조파나 line notching에 둔감하다. 전류원 인버터나 고출력에 주로 사용되는 사이클로컨버터(AC to AC converter)는 고조파의 영향을 상대적으로 적게 받는다. line notching은 저속에서 높은 토크를 요구하는 구동장치에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 소형, 단상 및 리액터를 사용하지 않는, 2-펄스 PWM 구동장치의 경우 THD_I 의 상승으로 중성도체에 과전류가 흐를 뿐 아니라 중성점-접지전압을 증가시켜 DC버스 측 평활 커패시터의 과열을 초래할 수 있다.

또한 전류(轉流)용 리액터나 격리용 변압기(isolation transformer)를 사용하지 않는 2-펄스 또는 소형 6-펄스 SCR DC 구동장치의 경우, 높은 고조파 전류나 line notching에 의해 SCR의 Turn on, Turn off 동작이 원활하게 일어나지 않을 수 있다. 보통소형 6-펄스 PWM 구동장치는 AC line 리액터나 DC bus 리액터가 설치되지 않는다. 전원에 line notching이 첨가되면 무부하나 경부하시 DC bus 전압을 상승시켜 과전압 차단장치가 동작할 수도 있다. AC line 리액터나 DC bus 리액터가 설치되는 대형 PWM 구동장치는 외부 환경변화나 고조파에 비교적 강인한 특성을 나타낸다. 가장 일반적으로 사용되는 표준 6-펄스 AC PWM 장치는 고조파 왜형률 THD_V 가 5[%]이하라면 정상적으로 동작한다. 7.5[kW]이상의 6-펄스 SCR DC 구동장치는 보통 전류(轉流)용 리액터나 격리용 변압기가 구동장치와 전원사이에 설치되어 line notching이 전원 측에 미치는 영향을 완화시킨다. 이것은 또한 고조파나 line notching이 구동장치에 가하는 효과도 감소시킨다. 그러나 인가되는 고조파나 line notching의 크기가 증가할 경우 SCR의 Turn on, Turn off 동작에 오류가 발생하여 퓨즈를 소손시키거나 회로차단기를 동작시킬 수 있다. 상변환 변압기를 사용하여 펄스수를 12, 18, 및 24 등으로 증가시키면 고조파나 line notching의 영향을 감소시킬 수 있다.

3.2.8 조명 장치

고조파가 조명장치에 미치는 영향은 연속적으로 빛의 강도가 변동하는 “깜박거림(flicker)”현상이다. 선박의 입출항 시 대전력을 사용하는 전동기의 초기 구동시 순간적인 전압과 전류의 Drop에 의해 조명 장치의 빛이 순간적으로 어두워 지는 현상에서 볼 수 있듯, 조명장치는 실효전압 변화에 아주 민감하다. 0.25[%]정도의 전

압변동도 인간의 눈으로 감지할 수 있는 조명등도 있다.

"flicker"현상의 정도에 영향을 주는 요소는 다음과 같다.

- 1) 조명등의 종류 (백열등, 형광등 등)
- 2) 전압변동의 크기
- 3) 주파수변동의 크기
- 4) 조명등의 이득계수 (gain factor ; 실효전압 변동에 대한 조명등 밝기 변동비)

고조파가 조명장치에 미치는 영향이 안전에 큰 위험을 주지는 않겠지만, 조명 장치의 내구성과 수명에 영향을 주게 된다.

3.2.9 UPS System

앞에 언급한 바와 같이 선박이나 해양플랜트에 컴퓨터, 항해 및 무선 통신장비 등 전력품질에 민감한 장비들이 증가함으로 말미암아 안정적인 전력을 공급하기 위하여 UPS가 널리 사용되고 있고 그 출력범위도 100[VA]로부터 수[MVA]까지에 이른다. UPS는 교류를 직류로 변환하여 배터리를 충전시키기 때문에 그 구조가 가변속도 구동장치와 비슷하다.

UPS 시스템내로 고조파가 유입되면 가변속 구동장치와 같이 평활용 커패시터, 인덕터 등 전력소자를 과열시킬 수 있다. 또한 고조파로 인해 배터리의 온도도 상승할 수 있다. 전압 왜형률이 크거나 notching이 심할 경우 SCR의 오동작을 유발시키거나 퓨즈를 파괴할 수도 있다.

3.2.10 전력 측정 장치

일반적으로 측정 장치들은 기본적으로 정현파 파형의 값을 감지하도록 설계되어 있다. 이런 장치에 비선형 전압이나 전류가 입력되면 측정치에 오차를 수반하게 된다. 보통 계측기는 실효값을 나타내도록 조정되어 있다. 실효값이란 고정된 저항에 직류전원을 인가했을 경우와 동일한 발열량을 내는 교류에서의 값을 의미한다. 정현파의 경우 실효값은 최고값의 0.707배이고 평균값은 최고값의 0.636배이다. 즉, 실효값은 평균값의 1.11배가 된다. 대부분의 아날로그 계측기나 디지털 계측기는 평균값을 얻은 후 파형률(정현파의 경우 1.11)을 곱하여 실효값을 표시한다. 그러나 고조파로 인해 파형이 왜곡되면 안정적인 정현파가 될 수 없어 평균값, 실효값 및 최대값의 상관관계가 정현파의 경우와 전혀 다르게 되므로 큰 오차를 유발할 수 있다.

3.2.11 전화기

선박이나 해양플랜트에서는 일반적으로 전력선과 내부 전화선이 같이 배열된다. 따라서 전력선에 고조파가 유입되면 전화선에 고조파 전압이 유기되는데 540~1200[Hz]사이의 주파수를 가진 고조파가 문제가 된다. 많은 비선형 단상부하를 가진 4선 배선방식의 경우 중성도체 내에 3의 배수 고조파들이 존재하므로 문제가 될 수 있다. 나선형으로 감긴 도선의 사용, 적절한 차폐장치나 접지장치의 채용, 전력선과 어느 정도 간격 유지 등의 방식을 통해 고조파 영향을 최소화할 필요가 있다.

3.1.12 회로차단기

대부분의 저전압 열-자기(thermal-magnetic)형 회로차단기는 실효 전류값에 따라 작용하는 바이메탈식이다. 비선형부하에서는 같은 출력의 선형부하보다 실효 전류값이 증가하므로 과전류 설정값을 재조정하지 않으면 차단기가 너무 일찍 작동할 수 있다. 최고값에 반응하여 동작하는 전자식 회로차단기도 고조파 전류가 유입되면 선형부하의 경우 보다 먼저 동작할 수 있다. 따라서 고조파로 인하여 회로차단기가 작동하면 구동되는 기기가 갑자기 정지되는 일이 발생할 수 있다.



4. 고조파 저감 대책

대부분의 대출력 3상 비선형장비들은 고조파를 저감하는 장치를 설치하여 고조파를 완화시킴으로써 전압 왜형율을 일정 범위내로 감소시킬 필요가 있다. 고조파 저감장치는 상황에 따라 AC PWM 구동장치의 AC line 리액터와 같이 비선형장비와 일체로 제작되어 공급될 수도 있고 배전반에 연결된 능동필터(active filter)와 같이 별도의 품목으로 설치될 수도 있다. 또한 각 장치별로 별도로 고조파를 저감시킬 수도 있고 일정 그룹의 비선형부하 전체 고조파를 일괄적으로 경감시킬 수도 있다.

4.1 3상 3선 배전시스템

대용량 비선형 단상부하가 존재하든지 소용량 비선형 단상부하가 다수 배전계통에 있다면 고조파 완화장치를 설치함으로써 전력시스템의 전압왜곡을 최소화시켜야 한다.

4.1.1 위상이동(phase shifting)

Fig. 4-1은 두 개의 형광등 분전반에 전력을 공급하는 전형적인 배전 변압기를 보여준다. 하나의 판넬은 위상변동이 없고 다른 하나는 30° 위상을 이동시켰다.

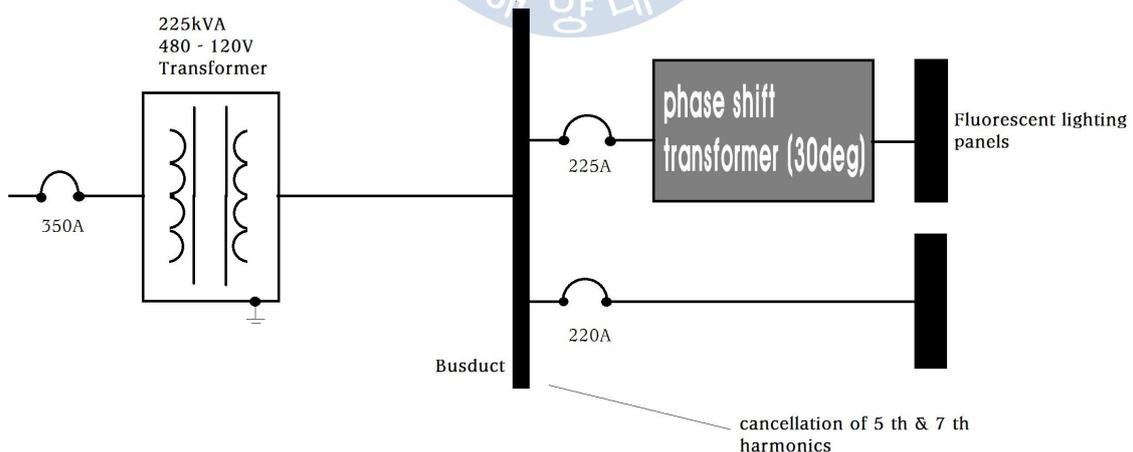


Fig. 4-1 Phase shifting of three-wire nonlinear loads

위상이동용 변압기의 입력 위상을 30° 이동시킴으로써 5차 및 7차 고조파가 다른 판넬에 의해 생성된 5차 및 7차 고조파와 180° 위상차를 가지게 된다. 결과적으로

bus 측에는 해당 고조파가 상쇄될 수 있다. 5차 및 7차 고조파가 가장 영향이 큰 고조파이므로 THD_I 및 THD_V 가 크게 감소된다.

4.2 3상 4선 배전시스템

여객선과 같은 선박은 이른바 객실부하(hotel load)로 인해 접지 또는 절연 중성선을 부가하여 3상 4선식 배전시스템을 구성한다. 많은 단상 비선형부하가 연결되어 있는 4선 시스템의 고조파 전류를 어떻게 저감시킬 수 있는지 고려해 보자. 3상 4선 시스템의 각 상은 각각 3의 배수 고조파를 함유하는데 이 고조파들이 중성선에 누적되어 중성선과 배전 변압기의 과부하를 초래하는 등의 문제를 유발시킬 수 있다. 중성선 과부하 문제를 저감시키기 위해서는 다음 두 가지 방식이 사용된다.

4.2.1 zero sequence 변압기(zig-zag transformer)

위에서 기술했듯이 비선형부하에 의해 3의 배수 고조파(3차, 9차 고조파 등)가 중성도체를 과열시킬 수 있다. 여객선의 경우 이런 부하가 5~8[MW]정도에 이를 수도 있다. 4선 시스템의 중성전류를 감소시키는 효과적인 수단중의 하나는 zero sequence 변압기이다. zero sequence 변압기는 한 철심에 여러 가지 권선을 감은 것이다. 적어도 두 상(phase)이상의 권선을 동일 철심지주(core leg)위에 설치하는데 3의 배수 고조파 전류(zero sequence currents)에 의해 발생하는 자속이 서로 대응함으로써 상쇄될 수 있도록 감는다. 따라서 4선 시스템에 이 변압기를 병렬로 연결하면 임피던스가 감소하여 중성도체 전류는 각 상으로 회귀하므로 중성도체의 부하는 감소하고 상전류는 균형을 이룬다. 실제로 zero sequence 변압기에 의해 3의 배수 고조파전류는 중성도체에서 거의 사라지지만 정,부 방향 고조파 전류(positive, negative sequence currents ; 5차, 7차, 11차, 13차 등)는 위상차이가 120° 를 벗어나므로 상쇄되지 않고 잔존한다. Fig. 4-2는 3상 4선 시스템에 설치된 zero sequence 변압기의 결선도를 보여주고 있다.

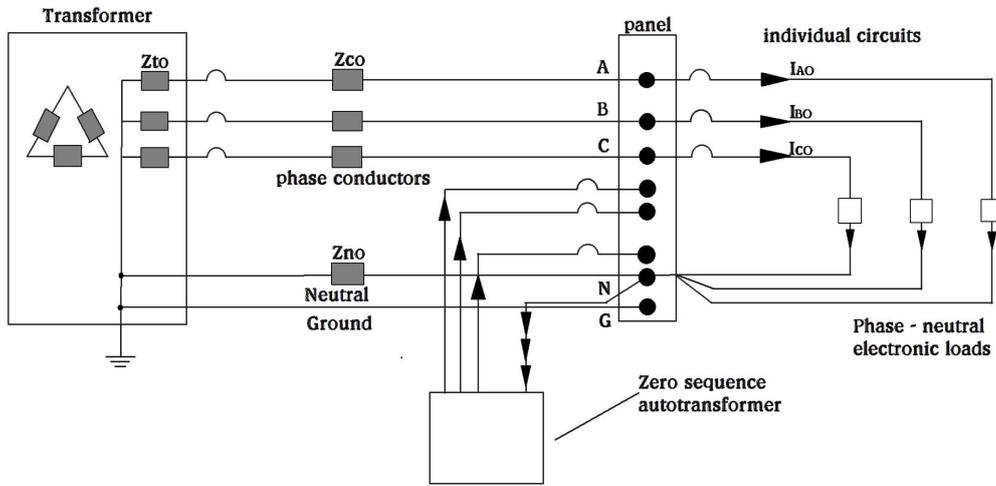


Fig. 4-2 Zero sequence transformer on four-wire system

4.2.2 능동필터(active filter)

3의 배수 고조파 전류를 감소시킬 수 있는 또 하나의 방법은 능동필터이다. Fig. 4-3는 4선 시스템의 능동필터 블록도를 나타내고 있다.

능동필터는 CTs (current transformers)를 사용하여 부하 측의 3상전류를 모니터링한다. CT에 의해 측정된 전압신호를 notch 필터에 통과시켜 기본파 주파수를 제거하면 고조파 성분만 남게 된다. 이 전압신호를 전류신호로 변환한 후 증폭하여 부하 측에 주입하면 고조파 상쇄전류가 된다. 이론상 능동필터가 고조파 상쇄전류를 적절히 발생시켜 부하에 제공한다면 전원측은 정현파인 기본파만 공급하게 될 것이다.

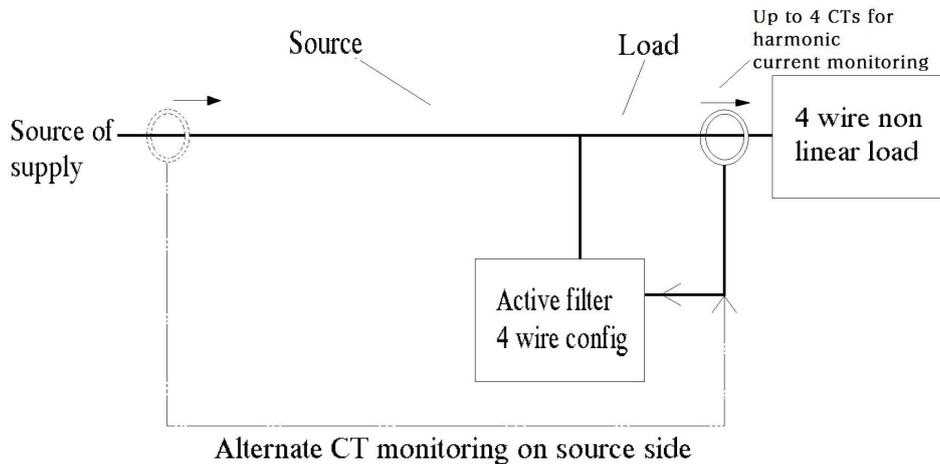


Fig. 4-3 Block diagram of active filter on four-wire application

4.3. 광폭필터(wide spectrum filter)

광폭필터는 Fig. 4-5와 같이 리액터와 커패시터가 함께 설치된 다수의 가치를 가지고 있다.

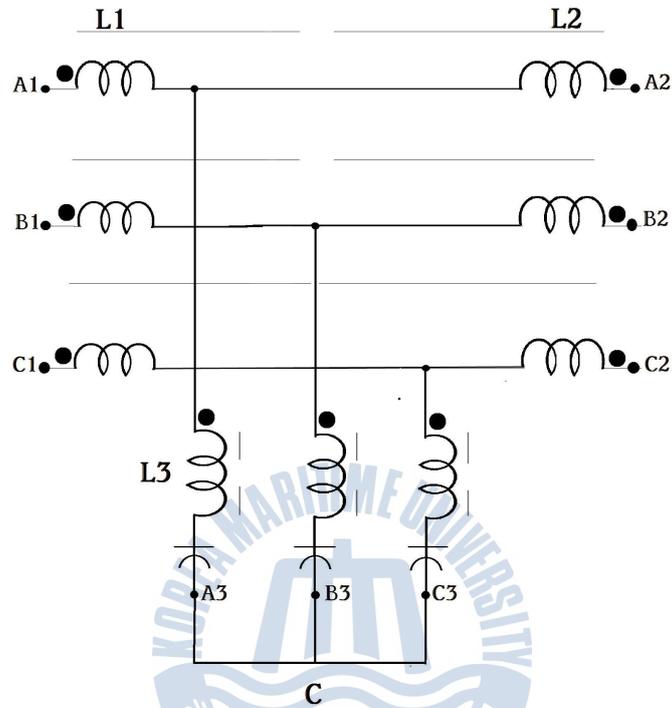


Fig. 4-5 Wide spectrum filter schematic

세 개의 리액터 권선은 동일 철심에 감겨있다. 전원 측에 있는 L1은 고 임피던스 권선으로 고조파가 전원 측으로 유입되는 것을 차단한다. 부하 측의 보상권선 L2는 임피던스 및 전압강하를 감소시킨다. L2는 폭넓은 고조파 성분들이 출력에서 제거 되도록 조정한다. L3는 소형 커패시터 뱅크를 사용하여 무부하시 전압상승과 무효 전력을 감소시킨다. 광폭필터는 전압불균형이나 전압왜형률의 영향을 크게 받지 않고 6-펄스 단일 구동장치나 복수의 구동장치에 모두 사용될 수 있다. 광폭필터를 6-펄스 구동장치의 AC line 리액터 위치에 설치하면 정류기의 통전시간이 보다 연장되고 최대값이 감소하여 출력전압이 사다리꼴 형상을 가진다. 따라서 AC line 리액터나 DC bus 리액터의 유무에 관계없이 THD_I 를 5~8[%]까지 감소시킬 수 있다. 사다리꼴 모양의 출력전압으로 인해 광폭필터는 속도가 일정한 유도전동기나 구동장치가 없는 부하에 연결되어서는 안 된다.

선박이나 해양플랜트용 2.5[MW]이하의 추진기, 트러스트, 케이블선 윈치, 압축기, 팬 및 펌프 구동장치 등에 사용될 수 있다. 또한 기존 설치된 장치에도 별도의 설 계변경 없이 사용될 수 있다.

4.4. 이중리액터(duplex reactors)

이중리액터는 1930년대에 개발되어 1980년대 중반부터 많은 선박에 사용되고 있다. 주로 추진 장치나 축 발전기로부터 유발된 고조파로 인해 선내 전원전압이 왜곡되는 것을 감소시키기 위해 적용되었다. 이중리액터는 Fig. 4-6과 같이 전기적으로는 분리되었지만 자기적으로는 결합된 두 개의 코일로 이루어져 있다. 1차 코일은 표준 리액터와 같이 부하와 직렬로 연결되고 2차 코일은 1차 코일과 역병렬로 연결되어 있다.

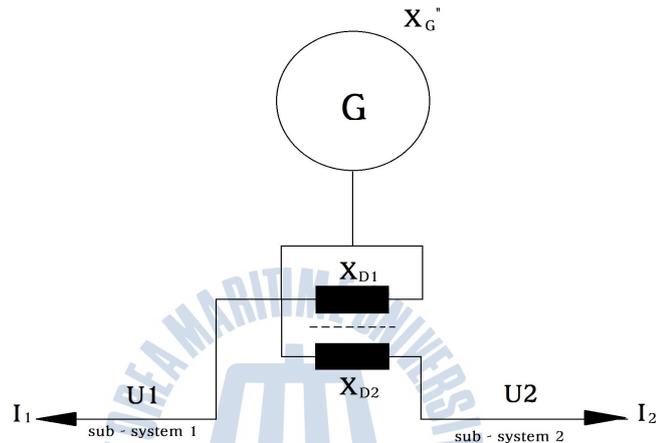
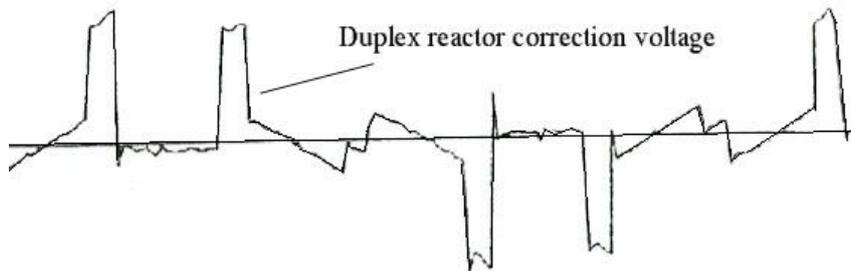
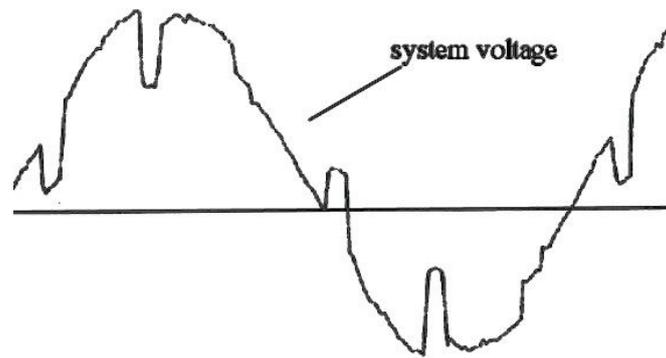


Fig. 4-6 Duplex reactor schematic

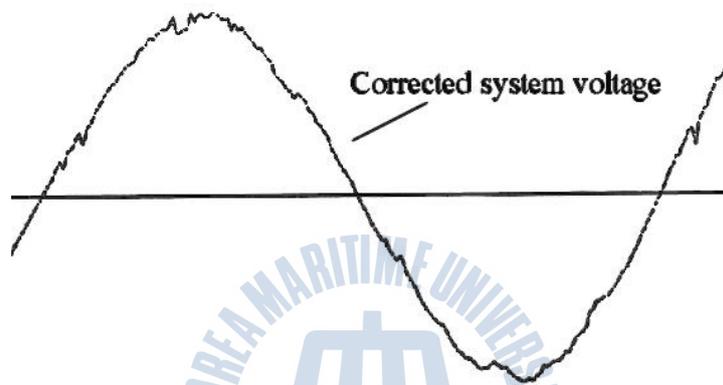
Fig. 4-7과 같이 1차 코일의 왜곡된 전압(a)에 2차 코일에서 유도된 수정전압(b)가 더해져 보상된 전압(c)가 산출된다.



(a) System voltage waveform



(b) Correction voltage



(c) Compensated voltage

Fig. 4-7 Outputs of duplex reactor

4.5 수동 L-C필터(passive L-C filters)

수동 L-C필터는 인덕터와 커패시터로 구성되는데 때로는 저항이 첨가되기도 한다. 작동원리는 인덕터와 커패시터 사이에 주파수 변화로 인해 발생하는 공진현상을 응용한 것이다. 직렬 공진 시 인덕터와 커패시터의 리액턴스가 동일하게 되므로 비교적 작은 값인 저항이 임피던스의 전부가 된다. 인덕터-커패시터 직렬회로로 이루어진 직렬 수동필터를 비선형부하와 병렬로 연결하여 고조파에 대해 낮은 임피던스를 갖도록 조정하면 고조파를 완화시킬 수 있다. 일반적으로 5차와 7차 고조파 저감이 자주 사용되지만 11차와 13차도 적용될 수 있다. Fig. 4-8은 5차, 7차, 11차 및 13차 고조파를 감소시키기 위해 4개의 가치를 가진 필터를 도시하고 있다.

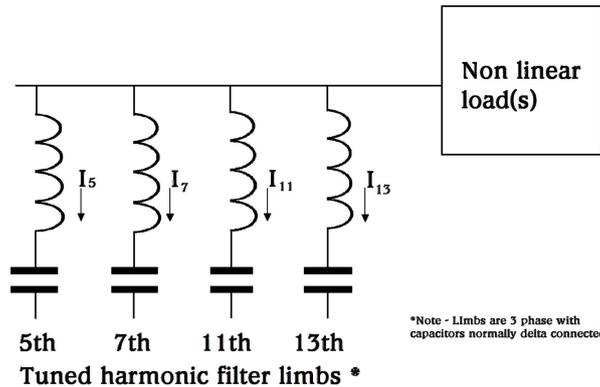


Fig.4-8 Simplified connection of multi-limbed passive filter

설계 시 전원 측의 임피던스도 고려해야한다. 왜냐하면 직렬공진이 발생하는 주파수 이하의 어느 주파수에서 병렬공진이 일어날 수도 있기 때문이다. 병렬공진이 발생하면 전력계통에 정궤환(positive feedback)현상이 일어나서 전력소자의 오작동을 초래할 수 있기 때문이다. 수동필터는 전원 측과 부하 측의 임피던스 변화에 민감하다. 다른 전원으로부터 고조파를 끌어당기기도 한다. 따라서 이러한 점도 설계 시 고려되어야한다. 전력계통과 고조파 대책 입안 시 필터의 유효성과 필터로 인해 전력계통내의 공진가능성을 면밀히 탐색해야한다. 이러한 문제점에 대한 대책으로 Fig. 4-9와 같은 가변속 구동장치용 필터를 사용하기도 한다.

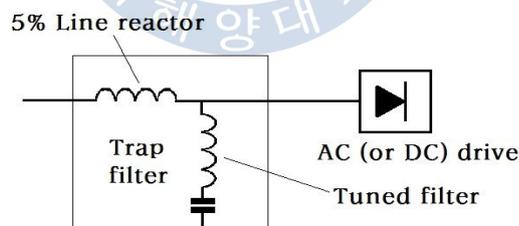


Fig. 4-9 Simplified "drive applied" filter for variable speed drive

이것은 전원과 필터사이에 별도의 리액터(보통 5[%] 리액턴스)를 연결시킨 것이다. 이 리액터는 두 가지 기능을 한다. 첫째는 수동필터를 전원 측으로 부터 격리시킴으로써 전원 측으로 부터의 하향 고조파로 인한 과부하 가능성을 감소시킨다. 둘째는 전원 측 고조파 전류 스펙트럼을 감소시킨다.

4.6 위상이동 변압기(phase shifting transformer)

300[kW]이상의 전동기나 고출력 비선형장비는 보통 “위상이동” 기법을 채용하여 입력 고조파 전류를 감소시킨다. 따라서 다수의 입력단이 설치되고 한쪽 단에서 발생한 고조파가 다른 단에서 생성된 고조파를 상쇄시키도록 연결한다.

한쪽 변환기에서 발생한 고조파가 다른 변환기의 고조파를 상쇄시키는 위상이동 기법을 다중 펄스 구동장치(multi-pulse drives)라 한다. 예를 들어 하나의 순 변환기(input converter)를 갖는 3상 구동장치는 6-펄스 구동장치라 하고 두 개의 입력 정류기를 가지면 12-펄스, 3개를 가지면 18-펄스 구동장치가 된다. 이론적으로 상쇄되는 고조파는 펄스 수에 따라 달라진다. 12-펄스 구동장치의 경우 11, 13, 23, 25, 35 및 37차 등의 고조파가 잔존하게 되고 5, 7, 17 및 19차 고조파는 상쇄되어 나타나지 않는다. 18-펄스장치는 17, 19, 35, 37, 47 및 49차 등이 대표적인 고조파이다. 12-펄스 시스템이 가장 보편적으로 사용되지만 고조파에 대한 규제가 보다 까다로워지고 있어 최근에는 18-펄스 시스템도 많이 등장하고 있다. Fig. 4-10은 2차 권선이 Y결선과 Δ결선으로 이루어진 두 개의 6-펄스 입력브리지를 가진 12-펄스 구동시스템을 나타내고 있다.

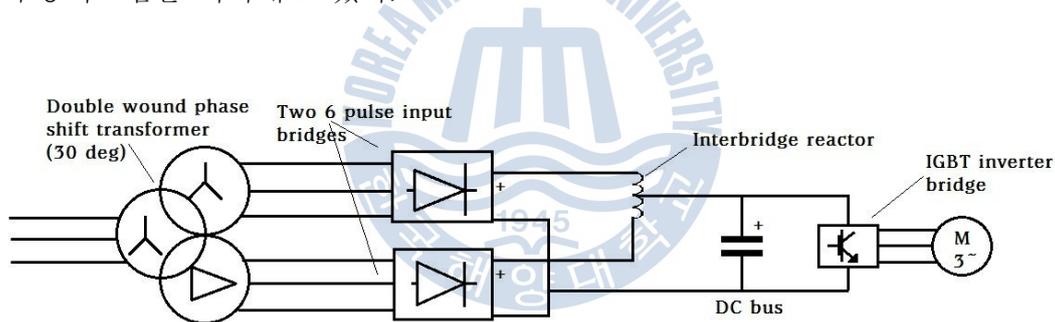


Fig. 4-10 12-pulse AC PWM drive with phase shift transformer

2차 전압은 30°의 위상차를 가지므로 DC inter-bridge 리액터를 사용하여 정류기의 도통 각이 120° 보장되고 회로가 균형을 이룬다면 5차 및 7차 고조파는 상쇄된다. 그러나 만일 각 상전압의 크기나 위상이 달라져서 평형을 상실하면 변압기의 1차 측에 5차 및 7차 고조파가 크게 증가할 수 있다. 이 불균형은 변압기나 정류기 제작과정에서의 허용오차로 인해 발생할 수도 있다. 2차 측의 전압이나 정류기의 불균형 등으로 인한 영향을 감소시키기 위해 변압기의 누설 임피던스를 5[%]정도로 비교적 증가시켜야한다. 전압 왜형율이 높은 선박이나 해양플랜트에서 위상이동 시스템이 효과적으로 동작하도록 하기 위해서는 각 개별 비선형장비에 분리형 고조파 완화 장치를 설치함으로써 전체적인 전압왜곡의 정도를 감소시키는 것이 바람직하다.

4.7 전자필터(electronic filter)

4.7.1 능동필터(active filter)

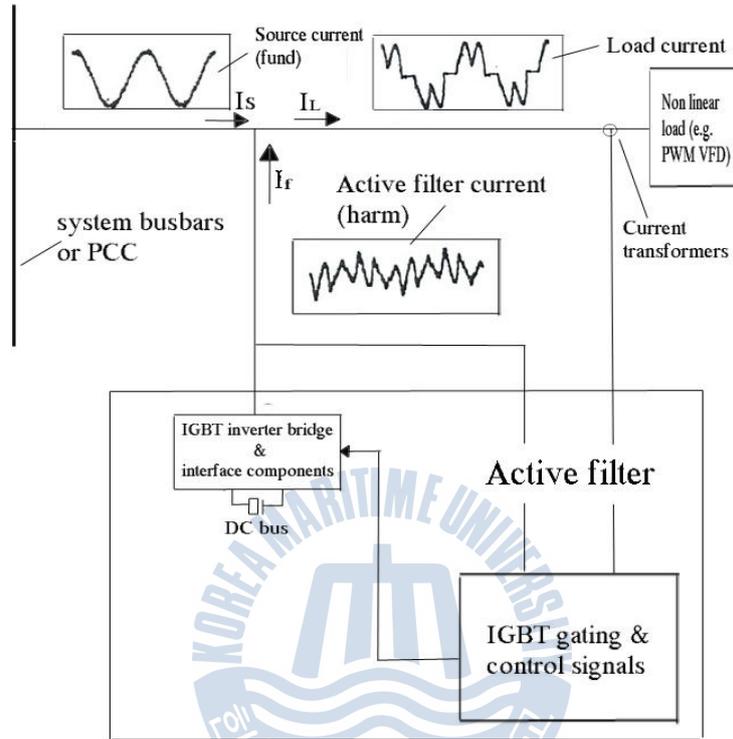


Fig. 4-11 Block diagram of shunt connection active filter

능동필터는 고조파 저감 및 무효전력 보상을 위해 1990년대 이후 산업현장에 널리 사용되고 있다. 수동 L-C필터와는 달리 능동필터는 network에 공진을 발생시킬 우려가 없고 전원 임피던스의 변화에도 영향을 받지 않는다. 능동필터의 일반적인 형태인 병렬 능동필터를 Fig. 4-11에 도시하였다.

Fig. 4-11에서 각 회로전류들의 관계는 식(4.1)과 같다.

$$I_S = I_L - I_F \quad (4.1)$$

단, I_S ; 전원전류(기본파), I_L ; 비선형 부하전류, I_F ; 능동필터 전류(고조파)

능동필터는 CT를 사용하여 비선형 부하전류를 측정한다. CT로부터 검출한 전압 신호를 notch 필터에 가하여 기본파 성분을 제거하면 고조파 전류성분을 얻을 수 있다. 이 신호를 제어시스템에 가하여 IGBT 점호패턴을 발생시켜 고조파 전류를 복제 및 증폭한 후 부하에 주입한다. 이 전류를 고조파 보상전류라 한다. 즉 능동필

터는 비선형부하에 그 장치가 제대로 작동하기위한 고조파전류를 공급하고 반면에 전원은 단지 기본파만 제공한다. 대부분의 능동필터는 공급전압의 왜곡이 심할 경우 필터 입력측의 커패시터 성분이 손상을 입음으로 인해 제대로 작동하지 않는다. 능동필터는 부하측 전류불균형을 보상할 수 있는 기능도 가지고 있고 SCR 구동장치로 인한 line notching을 감소시키기도 한다. 하지만 전원측 전압불균형에는 매우 민감하다.

4.7.2 능동-수동필터(hybrid active-passive filter)

능동-수동필터는 다량의 고조파를 제거해야하는 장치 등에 병렬 능동필터의 대안이 될 수 있다. 수동필터요소는 능동필터의 장점은 그대로 유지하면서 능동필터의 전류부담을 감소시킬 수 있다. 또한 수동필터에 능동필터를 연결함으로써, 전력계통에 병렬공진이 발생할 가능성 및 부하특성과 전원임피던스 변화에 따른 성능변화 등 수동필터의 단점을 제거할 수 있다. Fig. 4-12는 병렬수동-능동필터의 계통도를 보여주고 있다. 능동필터와 5차 및 7차 고조파를 제거하기위한 수동 L-C필터로 구성되어있다.

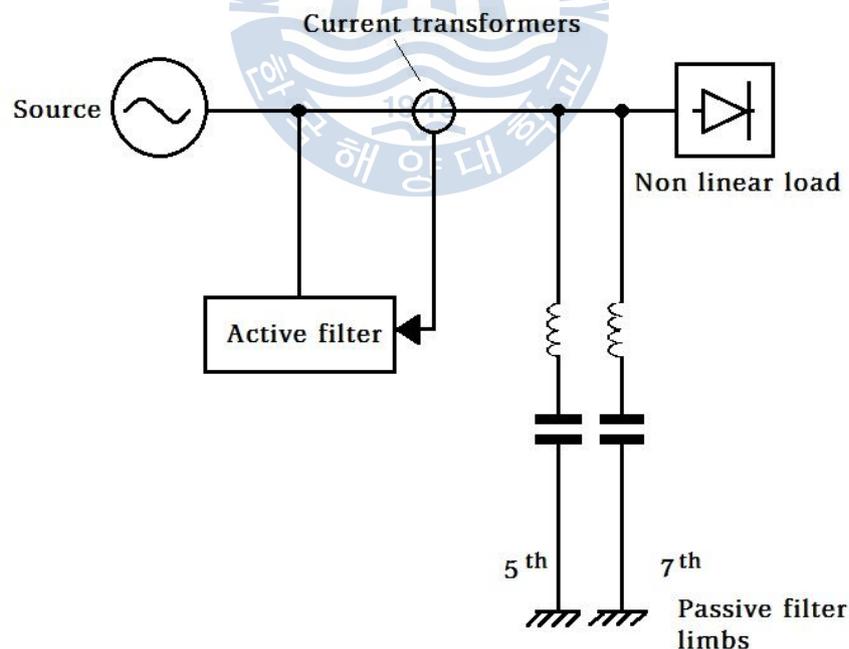


Fig. 4-12 Theoretical shunt passive-active hybrid filter

4.8 3상 AC 및 DC 구동장치용 표준 리액터

인덕터라고 알려진 리액터는 성층철심 주위에 권선이 감긴 코일로서 전력용 변압기와 유사하다. 철심을 성층하는 것은 와류와 소음을 감소시키기 위한 것이다. 리액터는 구조는 단순하지만 비선형부하로 인해 발생하는 고조파를 감소시키는데 효과적인 방법으로 가변속 구동장치에 주로 사용된다.

가변속 구동장치에는 AC와 DC리액터가 사용되는데 주로 다른 고조파 저감장치와 함께 설치된다. AC line 리액터는 AC line 측에, DC bus 리액터는 DC bus에 사용된다.

4.8.1 AC line 리액터

AC line 리액터는 DC bus 리액터에 비해 일반적이고 더 많이 사용된다. AC line 리액터는 고조파를 감소시킬 뿐 아니라 정류단에 유입되는 돌발전압을 억제하는 역할도 한다. 단점은 리액턴스에 비례하는 전압강하를 일으킨다는 점이다. 2~3[%]의 퍼센티지 리액턴스를 갖는 리액터가 가장 일반적으로 사용되고 5[%]가 통상 사용되는 최대치이다.

4.8.2 DC bus 리액터

소수의 AC PWM 구동장치 제작자들은 AC line 리액터로 인한 전압강하를 방지하기 위해 DC bus에 리액터를 삽입하기도 한다. 이런 구동장치는 정류단 입구를 서지전압으로부터 보호할 수 있는 장치 뿐 아니라 DC bus 전압에 영향을 줄 수 있는 돌발 상황을 제한할 수 있는 수단이 별도로 마련되어야 한다.

4.8.3 AC line 리액터 & DC bus 리액터

대형 구동장치에는 AC line 리액터와 DC bus 리액터가 동시에 설치되기도 한다. 일반적으로 이 장치는 구동장치의 kVA 정격에 비해 단락용량이 적거나 전원이 왜란에 대해 민감한 경우에 사용된다. DC bus 리액터의 리액턴스가 작을 경우 AC line 리액터의 리액턴스를 증가시키면 고조파 감소현상이 뚜렷하지만 DC bus가 4[%]이상이면 AC line 리액터의 고조파 저감 효과는 미미하다.

4.8.4 3상 AC 및 DC 구동장치용 특수 리액터

표준 리액터는 어느 정도 고조파를 완화하는 효과는 있지만 고조파에 대한 기준을 만족할 수 있을 정도로 충분한 성능을 가지고 있지는 않다. 보다 나은 성능을 가진 세련된 리액터가 필요하다.



5. 리액터를 이용한 고조파 저감

5.1 리액터의 효과

리액터의 효과에 대해 이해하기 위해서 리액터가 가지는 특성에 대해 고찰해 볼 필요가 있다. 인덕터라고도 하는 리액터는 성층철심 주위에 권선이 감긴 코일로서 전력용 변압기와 유사하다. 철심을 성층하는 것은 와류와 소음을 감소시키기 위한 것이다. 리액터는 구조는 단순하지만 비선형부하로 인해 발생하는 고조파를 감소시키는데 효과적인 방법으로 가변속 구동장치에 주로 사용된다. 리액터를 통과하는 전류가 변화하면 식(5.1)과 같은 전압이 유기된다.

$$E = L \frac{di}{dt} \quad (5.1)$$

여기서 E : 유도기전력

L : 인덕턴스[H]

$\frac{di}{dt}$: 순간전류변화율

식(5.1)에 의하면 만일 순간 전류 변화율이 일정하다면 리액터에 유기되는 전압도 일정할 것이다. 회로의 전류 공급 상태변화로 인해 전압의 변화를 일으키게 되면 리액터는 순간전압 변화율을 제한하는 역할을 할 것이고, 전류의 순간 변화율 또한 제한될 것이다. 이러한 효과는 가변 주파수 구동장치나 다른 비선형 부하에 있어 고조파 전류를 감소시켜 주는데 유용하게 이용된다.

전압의 계단형 상승으로 인하여 회로전류가 급증하려고 할 때, 리액터는 전압상승을 제한함으로써 전류의 증가율을 감소시키는데 이러한 특성이 가변속 구동장치나 다른 비선형부하에 의해 발생하는 고조파를 완화시킨다. 또한 AC line 리액터는 리액터 입력 측 전압 왜형률 THD_V 를 감소시킨다. Fig. 5-1은 리액터를 사용한 VFD 시스템의 블록도이다.

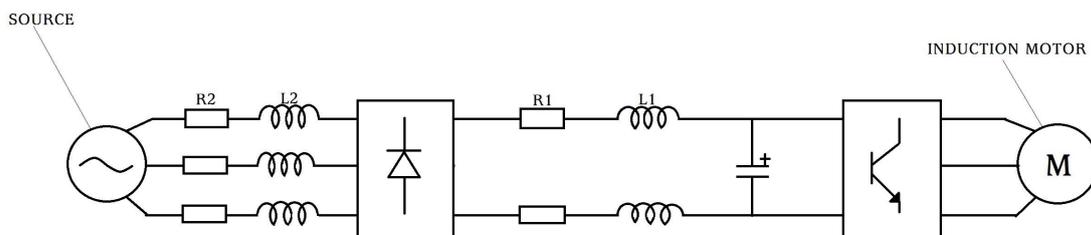


Fig. 5-1 Block diagram of 6-Pulse AC PWM drive using reactors

위 그림에서, R1은 DC bus 리액터의 저항
R2는 AC line 리액터의 저항
L1은 DC bus 리액터의 인덕턴스
L2는 AC line 리액터의 인덕턴스

5.2 AC line 리액터와 DC link 리액터

AC line 리액터나 DC link 리액터를 설치함으로써 고조파전류를 감소시키는 방식은 폭넓게 적용되고 있지만, 그 효과가 정량적으로 분석되거나 발표된 자료는 거의 없다. 또한 부하나 리액터의 리액턴스의 크기가 어떤 영향을 끼칠 수 있는지 여부도 구체적으로 규명된 바가 없다.

본 논문에서는 각 리액터들의 영향 및 효과를 시뮬레이션을 통하여 고찰해 보고자 한다.

먼저 가장 넓게 사용되고 있는 6-펄스 전압원 인버터를 이용한 유도전동기 가변속 구동장치를 선정하였다. Fig. 5-2는 AC line 리액터가 부착된 가변주파수 구동장치를 나타낸다.

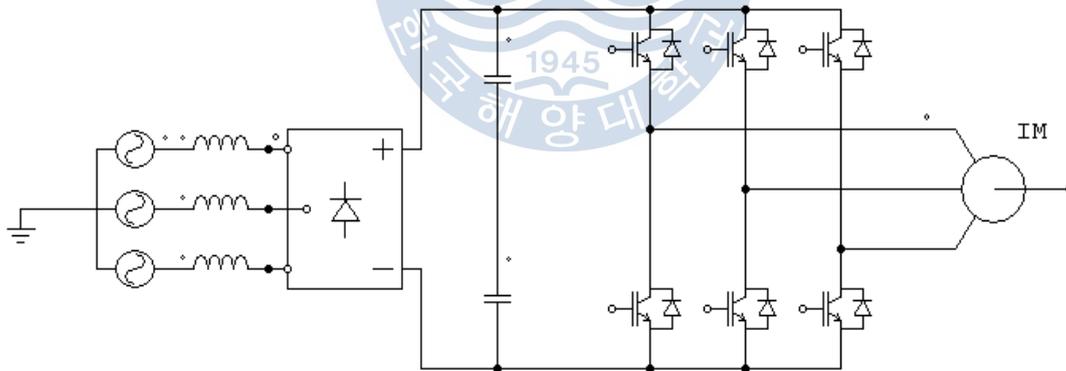


Fig. 5-2 VFD using AC line reactor

위 구동장치는 6-펄스 정류기 및 PWM 인버터로 구성되어 있다. 전원 측에는 전원 임피던스와 저항이 있고, DC 컨버터로 들어가기 전 AC line 리액터를 설치하여 입력 고조파전류를 감소시킬 수 있고 반도체소자들을 돌발전압으로부터 보호할 수 있다. DC 컨버터에 의해 교류전압 및 전류를 직류로 바꾼 후 6개의 IGBT의 On-off로 펄스폭을 변조하여 원하는 전압 및 주파수의 3상 교류전력을 출력한다.

Fig. 5-3은 DC link 리액터가 설치된 가변주파수 구동장치이다. DC 컨버터 출구 측과 평활 커패시터 사이에 DC link 리액터를 설치하여 입력 고조파전류 저감, 소

자 보호 및 안정된 직류전압의 확보가 가능하다.

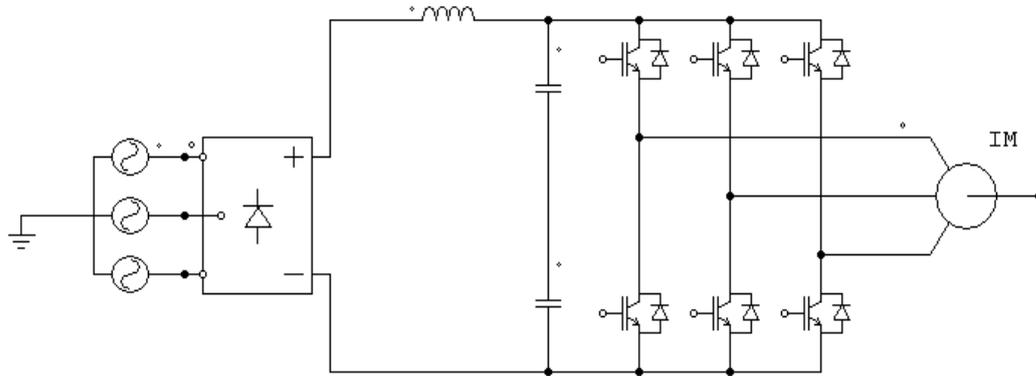


Fig. 5-3 VFD using DC link reactor

리액턴스의 크기를 정의하는 %리액턴스는 식(5.2)와 같다.

$$\%X = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I_{AC} \cdot 100}{\frac{V_{AC}}{\sqrt{3}}} \quad (5.2)$$

여기서 f : 주파수
 I_{AC} : 전류
 V_{AC} : 전압
 $\%X$: 리액턴스
 L : 인덕턴스[H]

식(5.2)는 인덕턴스를 구하기 위하여 식(5.3)과 같이 변환 될 수 있다.

$$L = \frac{\%X \cdot \frac{V_{AC}}{\sqrt{3}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_{AC} \cdot 100} \quad (5.3)$$

6. 시뮬레이션 및 검토

6.1 시뮬레이션 프로그램

본 시뮬레이션에서 사용한 전원 측의 임피던스는 6[%]이며, 6-펄스 정류단의 정격은 235[kVA], 480[V]이다. 따라서 전원 측 인덕턴스는 0.0033 [mH], 저항은 0.01[Ω]로 가정하였다. 부하토크를 정격의 25[%], 33[%], 50[%], 75[%] 및 100[%]로 변화시키면서 입력전류의 고조파를 측정하였다. Fig. 6-1은 AC line에 리액터를 설치한 경우의 VFD를 소프트웨어 PSIM을 사용하여 작성한 프로그램이다.

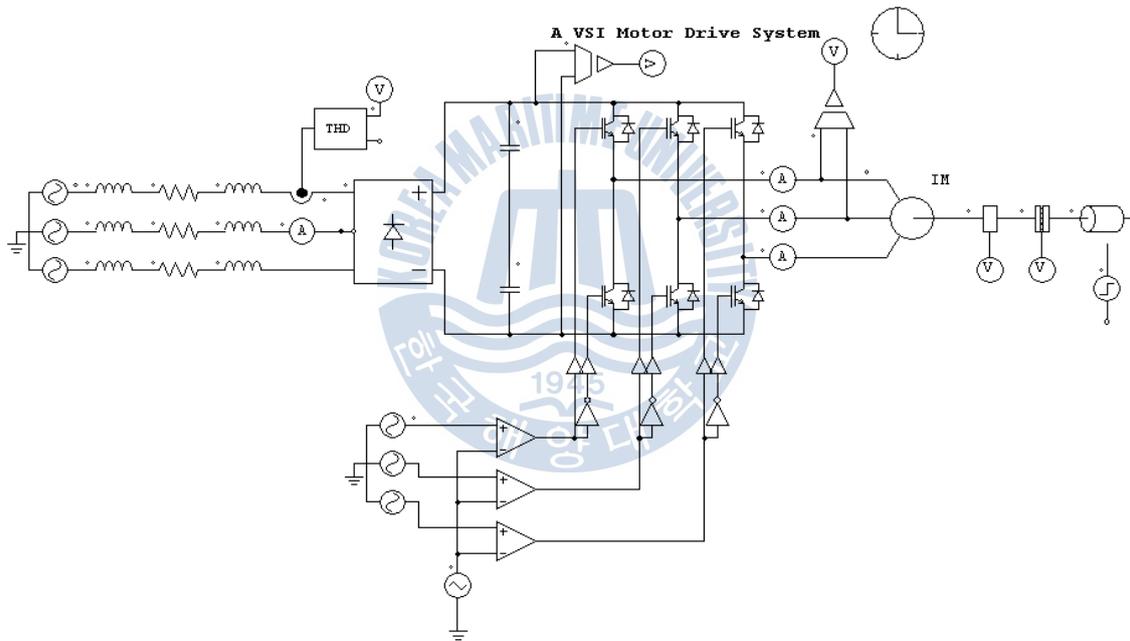


Fig. 6-1 PSIM simulation program of VFD using AC line reactor

Fig. 6-2는 Fig. 6-1과 동일한 조건에서 DC link단에 리액터를 삽입한 경우의 VFD를 소프트웨어 PSIM을 사용하여 작성한 프로그램이다.

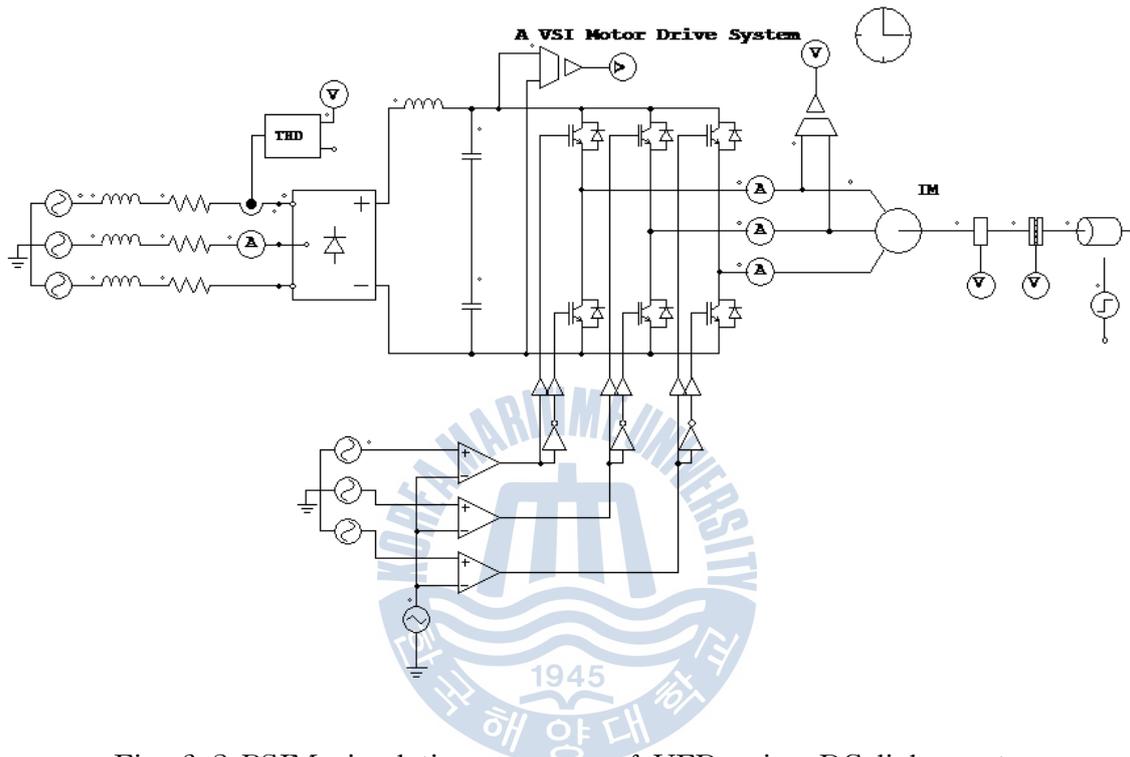


Fig. 6-2 PSIM simulation program of VFD using DC link reactor

6.2 시뮬레이션 결과

Fig. 6-3은 부하토크의 크기 및 AC line 리액터의 리액턴스 크기에 따른 입력 전류의 고조파 총 왜형률 변화를 도시하고 있다. 리액터가 없는 경우 25[%]의 부하에서 VFD 입력 측의 THD_I 가 110[%]에 달하지만 100[%]의 부하에서는 77[%]까지 감소한다. 즉, 부하의 크기가 VFD 입력 측 총 고조파 왜형률에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 여기에 3[%]의 AC line 리액터를 설치할 경우 25[%]의 부하에서 THD_I 는 83[%], 100[%] 부하에서는 41[%]로 줄어든다.

Fig. 6-4 ~ Fig. 6-7은 위의 각 경우에 대한 입력 전류 파형이다.

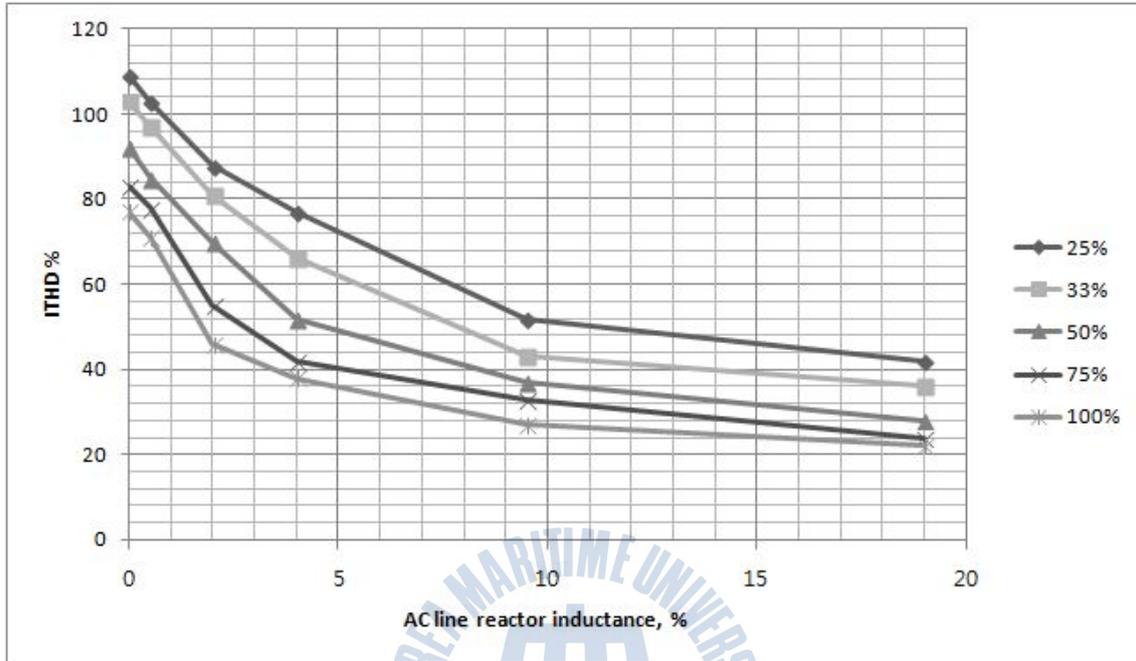


Fig. 6-3 Simulated THD_I (ITHD%) at the VFD input versus the inductance of AC line reactors for various drive loading (from 25[%] to 100[%])

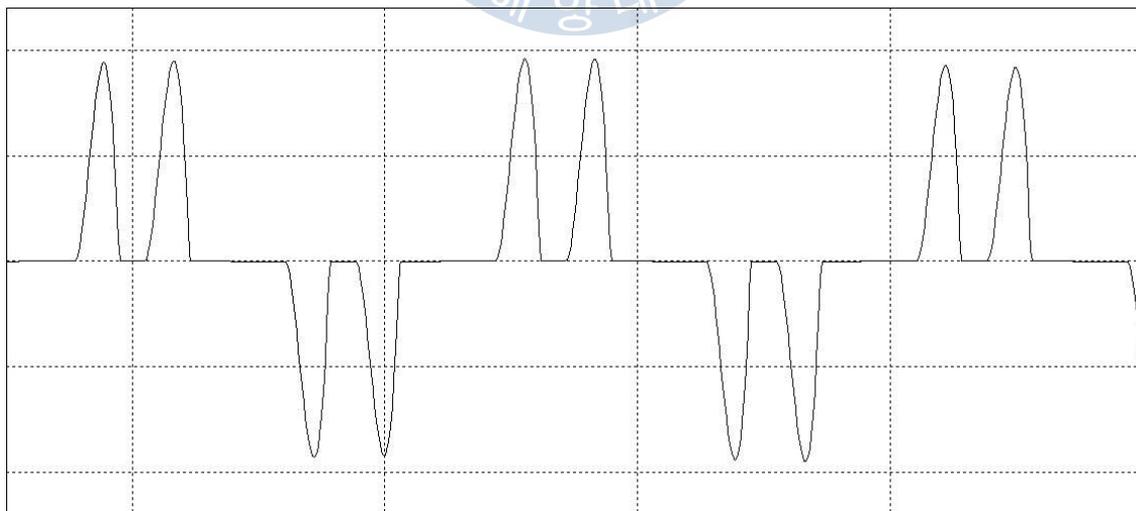


Fig. 6-4 Simulated input currents at the VFD without reactor under 25[%] loading (THD_I 110[%])

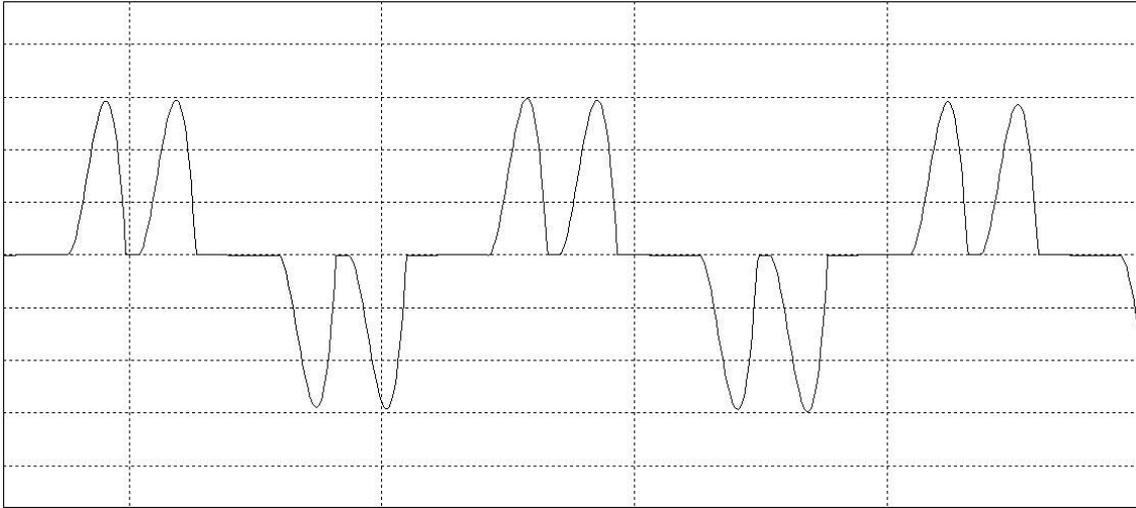


Fig. 6-5 Simulated input currents at the VFD with 3[%]AC line reactor under 25[%] loading (THD_I 83[%])

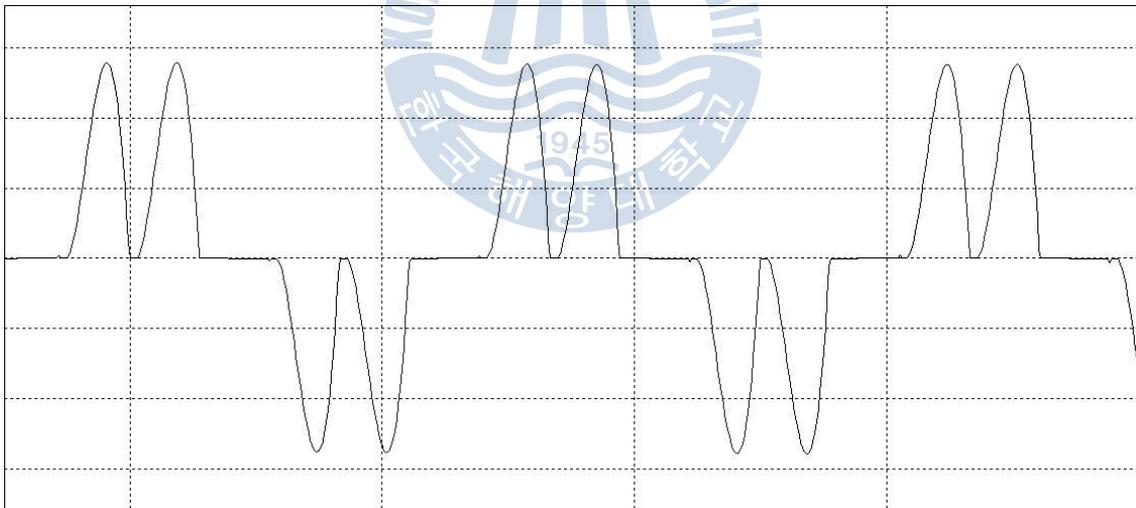


Fig. 6-6 Simulated input currents at the VFD without reactor under 100[%] loading (THD_I 77[%])

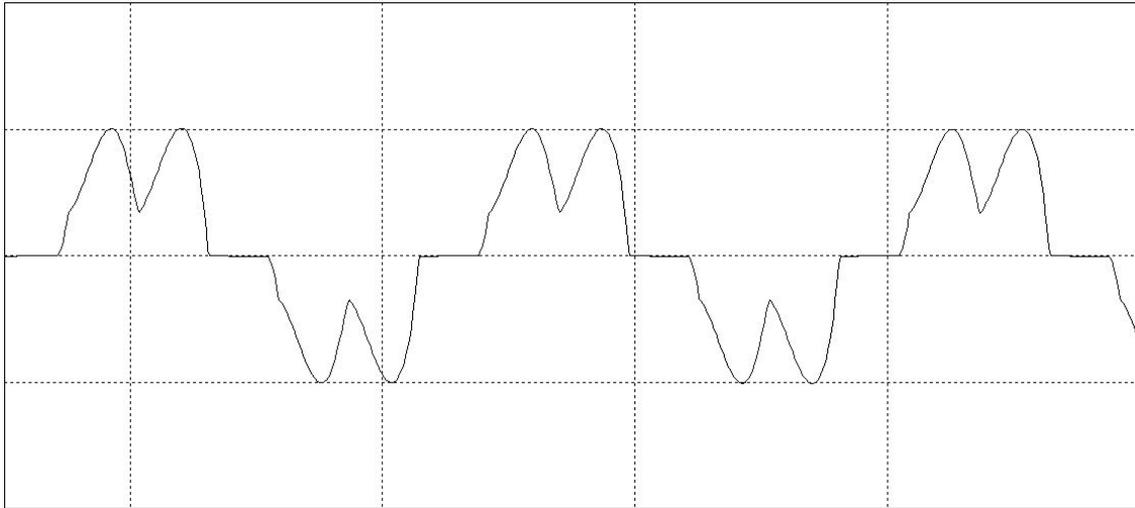


Fig. 6-7 Simulated input currents at the VFD with 3[%]AC line reactor under 100[%] loading (THD_I 41[%])

Fig. 6-8는 위와 동일한 조건에서 부하토크의 크기 및 DC link 리액터의 리액턴스 크기에 따른 입력 전류의 고조파 총 왜형률 변화를 나타내고 있다. 3[%]의 DC link 리액터를 삽입한 경우 부하토크의 크기가 25[%]라면 THD_I 는 92[%], 100[%]라면 48[%]정도이다.

Fig. 6-9 ~ Fig. 6-10은 위의 각 경우에 대한 입력 전류 파형이다.

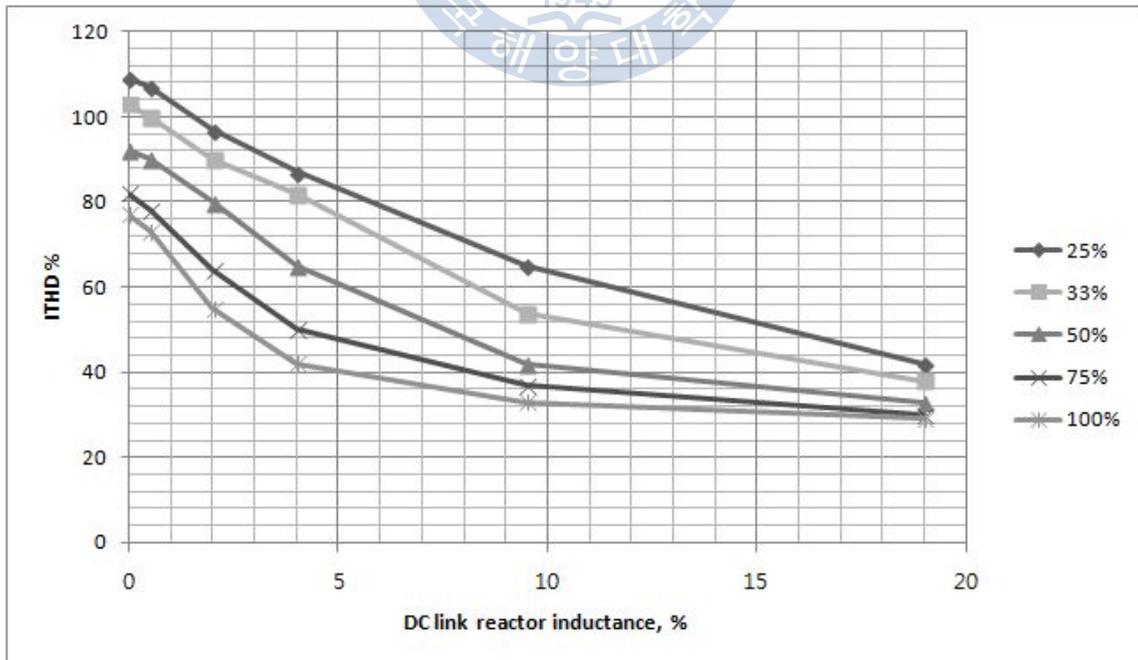


Fig. 6-8 Simulated THD_I (ITHD%) at the VFD input versus the inductance of DC link reactors for various drive loading (from 25[%] to 100[%])

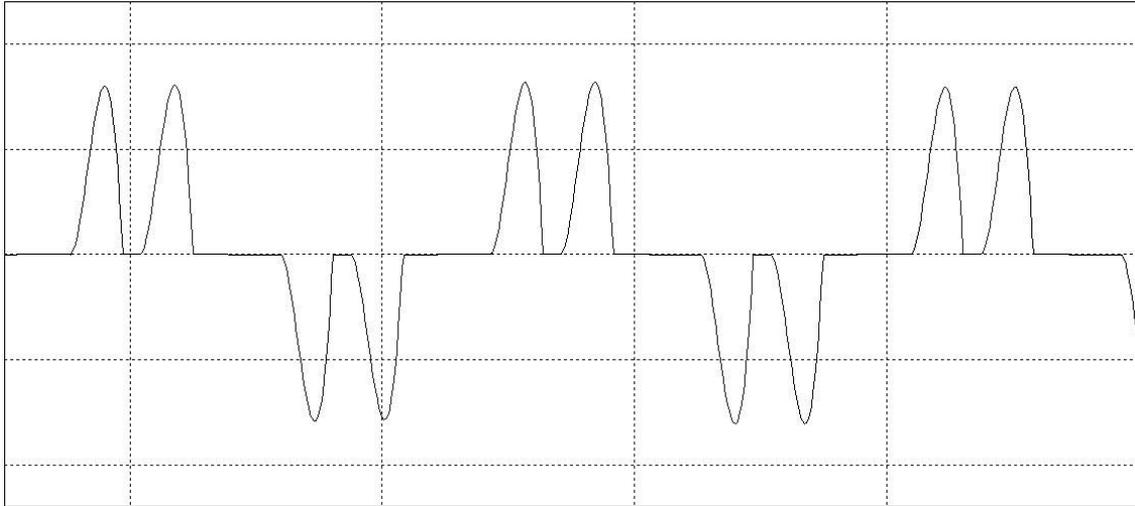


Fig. 6-9 Simulated input currents at the VFD with 3[%] DC link reactor under 25[%] loading (THD_I 92[%])

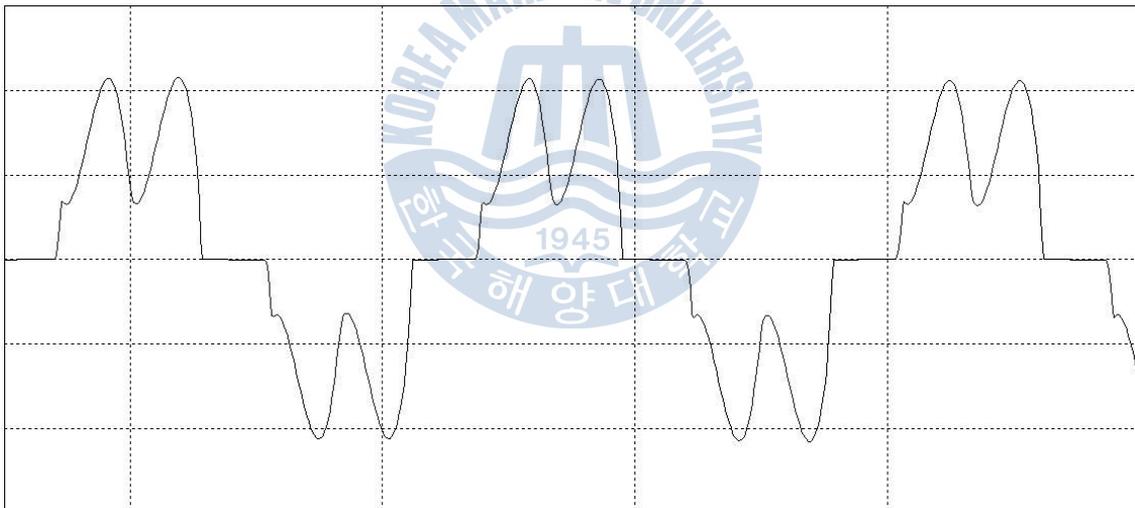


Fig. 6-10 Simulated input currents at the VFD with 3[%] DC link reactor under 100[%] loading (THD_I 48[%])

AC line 리액터와 DC link 리액터 모두 효과적이지만, 동일한 용량의 인덕턴스를 사용하면 DC link 리액터로 사용할 경우 THD_I 가 AC line 리액터로 사용했을 때보다 더 높아 덜 효과적이라 할 수 있다. 또한 동일 부하에서 리액터의 용량이 클수록 THD_I 가 감소되고 있다. 하지만 용량이 커질수록 THD_I 가 감소되는 기울기는 완만해지고 있다. 특히 약 10[%]이상의 인덕턴스가 부과되면 THD_I 의 감소는 거의 없어짐을 알 수 있다.

일정 부하상태에서 THD_I 감소율(ITHD reduction rate)을 식(6.1)과 같이 산출할 수 있다.

$$ITHD \text{ reduction rate} = \frac{ITHD_{without \text{ reactors}} - ITHD_{with \text{ AC or DC reactors}}}{ITHD_{without \text{ reactors}}} \quad (6.1)$$

Fig. 6-11는 3[%] 인덕턴스를 가진 리액터를 AC line과 DC link에 사용할 때 THD_I 감소율이 부하에 따라 어떻게 변화하는지를 도시하고 있다. 부하가 증가할수록 THD_I 감소율이 상승한다는 것을 알 수 있다. 즉, 리액터는 경부하 시보다는 중부하 시 훨씬 효과적이다. 또한 동일 부하에서 같은 용량을 설치할 때 THD_I 감소율은 AC line 리액터가 DC link 리액터보다 높다. 하지만 그 차이는 부하가 달라지더라도 비슷하다.

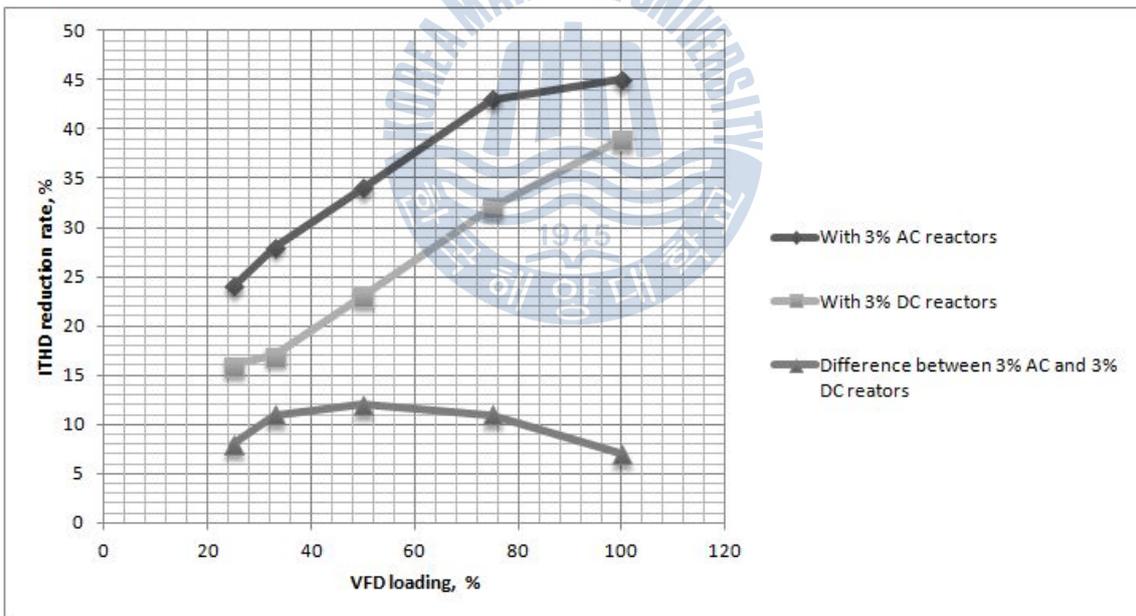


Fig. 6-11 ITHD reduction rate at the drive input versus VFD loading using a 3[%] AC line reactor and a 3[%] DC link reactor

Fig. 6-8에 의하면 25[%] 부하에서 5[%] DC link 리액터를 사용했을 경우 THD_I 는 84[%]이고, 이것은 3[%]의 AC line 리액터를 사용했을 경우와 비슷한 수치이다. 시뮬레이션 한 부하에 대해, 3[%] 및 5[%]의 AC line 리액터와 DC link 리액터의 THD_I 값을 요약하면 Table 6-1과 같다.

Table 6-1 simulated THD_I versus drive loading using 3[%] and 5[%] AC line and DC link reactors

VFD loading	THD_I at the VFD input, [%]			
	3[%] AC line reactor	3[%] DC link reactor	5[%] AC line reactor	5[%] DC link reactor
25%	83	92	72	84
33%	74	85	63	76
50%	60	72	51	61
75%	48	56	40	47
100%	41	48	36	40

Fig. 6-12는 25[%] 및 100[%] 두 부하에서 AC line 리액터와 DC link 리액터 사용 시 THD_I 의 변화를 나타낸 것이다.

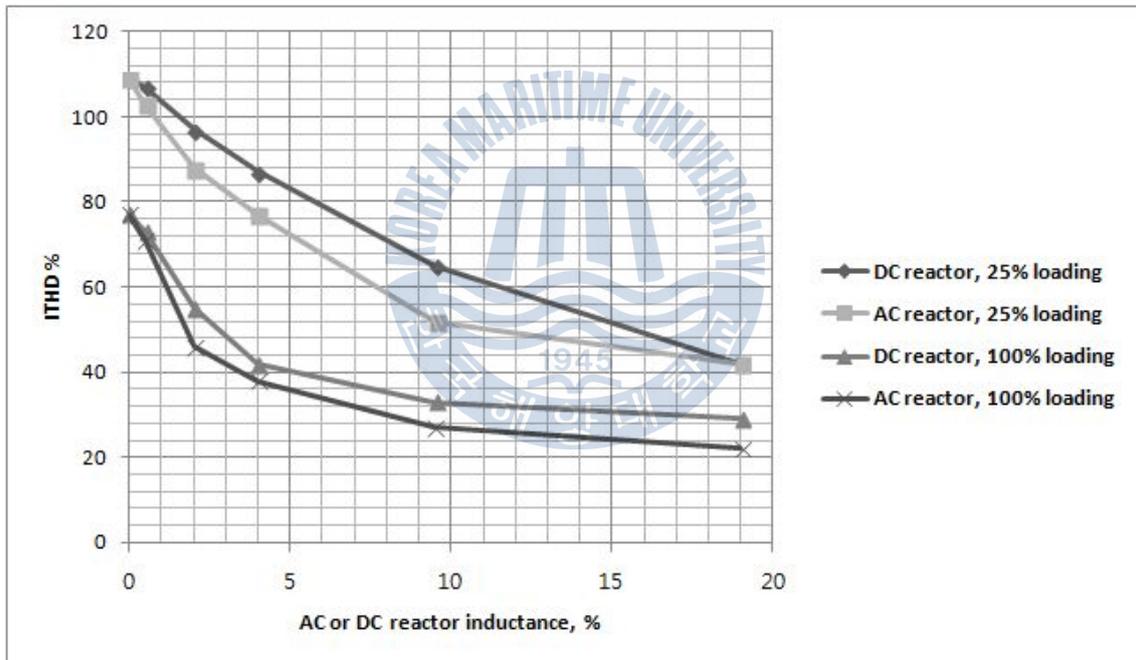


Fig. 6-12 Comparison of THD_I (ITHD%) at the VFD input using AC line or DC link reactors for 25[%] and 100[%] drive loading

Fig. 6-12에서 알 수 있듯이 VFD의 각 부하에서 3[%]의 AC line 리액터와 5[%] DC link 리액터는 비슷한 고조파 저감 효과가 있다. 예를 들어, 2[%]의 AC line 리액터는 3.4[%] DC link 리액터에 해당하는 고조파 저감효과를 지닌다. 따라서 DC link 리액터의 인덕턴스가 VFD 입력에서 비슷한 고조파 저감 효과를 얻기 위해서는 AC line 리액터의 1.7배의 인덕턴스를 가져야한다는 결론을 낼 수 있다.

7. 결 론

AC line 리액터나 DC link 리액터를 설치함으로써 입력전류의 고조파 왜형률을 감소시키는 방식은 폭넓게 적용되고 있지만, 그 효과가 정량적으로 분석되거나 발표된 자료는 거의 없다. 또한 부하나 리액터의 리액턴스의 크기가 어떤 영향을 끼칠 수 있는지 여부도 구체적으로 규명된 바가 없다.

본 논문에서는 부하의 크기에 따라 각 리액터들의 영향 및 효과를 시뮬레이션을 통하여 고찰해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) AC line 리액터와 DC link 리액터는 6-펄스 가변주파수 구동장치 입력전류의 고조파를 크게 저감시키는 역할을 한다.
- 2) 입력전류 총 고조파 왜형률은 VFD의 입력전원 측 임피던스와 부하의 크기에 상당한 영향을 받는다.
- 3) AC line 리액터와 DC link 리액터 모두 탁월한 고조파 저감 성능을 가지고 있지만, 동일한 효과를 얻기 위해서는 DC link 리액터의 인덕턴스는 AC line 리액터의 약 1.7배가 되어야한다.
- 4) 10[%]이상의 인덕턴스를 가지는 리액터는 추가적인 고조파 저감 효과를 크게 가져오지 않는다. 특히 리액터로 인해 가장 큰 개선 효과를 얻을 수 있는 범위는 0~5[%] 정도의 인덕턴스 값이다.

실제 실험을 통하여 VFD의 정격 및 부하와 리액터의 크기에 따른 고조파 저감 효과를 검증함으로써 리액터 선정을 위한 표준을 확립하는 것을 향후 과제로 남겨 둔다.

참고문헌

- [1] Xiaodong Liang, Obinna Ilochonwu, and Jeffrey Lim " Influence of Reactors on Input Harmonics of Variable Frequency Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, pp. 2195-2203, 1972.
- [2] Miguel E. Villablanca and Jorge I. Nadal, " An Efficient Current Distortion Suppression Method for Six-Pulse Bridge Rectifiers", IEEE Transactions on Industry Electronics , Vol. 54, pp. 2532-2538, 2007.
- [3] Hirofumi Akagi and Ryota Kondo, " A Transformerless Hybrid Active Filter Using a Three-Level Pulse Width Modulation (PWM) Converters for Medium-Voltage Motor Drive", IEEE Transactions on Power Electrtonics , Vol. 25, pp. 1365-1374, 2010.
- [4] R. Mathew, D. Houghton, W. Oghanna, " Vector Control Techniques for Induction Motors", IEEE Int. Conf. on Power Elec. and Drives, Vol. 2, pp.813-818, 1995.
- [5] P. C. Krause, *Analysis of Electrical Machinery*, McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [6] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. and Stephen D. Umans, *Electric Machinery*, McGraw-Hill Book Company, 2002.
- [7] B. K. Bose, *Power Electronics and AC Drives*, Prentice-Hall, 1987.
- [8] Bin Wu, *High-Power Converts and AC Drives*, Wiley Inter-Science, 2006.
- [9] American Bureau of Shipping , *Guidance notes on Control of harmonics in electrical power systems*, ABS Plaza Houston, 2006.
- [10] Peter Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, New York, Oxford Science Pub., 1998.

감사의 글

2년간의 대학원 과정을 마치며 너무나 많은 분들께 도움과 조언을 받아서 이렇게 짧은 글로 마음을 전한다는 것을 정말 죄송스럽게 생각합니다. 우선 늘 부족한 저에게 학문뿐만 아니라 여러 가지로 도움을 주시고 아껴주신 김성환 지도교수님께 정말로 큰 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에 논문심사를 맡아 많은 가르침을 주신 이성근 교수님, 논문을 마무리 지을 수 있도록 도움을 주셨던 김종수 교수님, 실습선 향해 중 옆에서 늘 도움을 주셨던 오세진 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

같이 수업을 듣고 공부했던 이회복 대리님, 안재홍 검사관님. 그리고 윤경국 선배님, 정범동 선배님, 윤두오 검사관님, 김승렬 3기사님을 비롯한 연구실의 여러 선후배님들에게도 감사의 말씀을 드립니다.

실습선 한바다호 근무시절, 힘들 때마다 저에게 큰 의지가 될 수 있었던 정균식 1기사님, 배대해 1항사님, 김종필 1기사님, 조장원 1항사님, 이원주 1기사님, 장우람 2항사님, 윤익순 2항사님, 강무경 3기사님에게 큰 감사를 드립니다. 그리고 바쁜 업무에도 저를 늘 배려해 주시고 아껴주신 이윤석 교수님, 이상득 교수님을 비롯한 한바다호 교수님들께도 감사를 드리고 싶습니다. 또한 1년 반 가까이 옆에서 동고동락 하셨던 기관부 선생님들께도 감사함을 전달하고 싶습니다.

열심히 일할 수 있도록 늘 믿고 지원해주시는 오동수 부장님께 큰 감사를 드립니다. 첫 프로젝트를 맡으며 옆에서 늘 많이 챙겨주시는 커맨더 임윤택 차장님께도 감사 인사를 드립니다. 입사 후 사수로서 지금까지 저를 이끌어 주시고 도와주신 이상민 대리님, 같이 고생하며 일을 하고 있는 김현규 기사님, 모르는 것이 있을 때 늘 도움을 주시는 이번하 기사님을 비롯한 현대중공업 시운전부 동료 및 선후배님들에게도 깊은 감사를 드립니다.

많이 부족한 논문이지만 도움주신 많은 분들의 성함을 모두 올리지 못한 점을 정말 죄송스럽게 생각하며, 넓은 아량으로 이해하여 주셨으면 합니다.

항상 가족을 위해 희생하시고 저를 보살펴주시는 아버지, 어머니께 이 논문을 바칩니다. 그리고 같이 기뻐하실 장인어른, 장모님, 처남, 그리고 멀리 계시는 형님, 형수님, 민성이 에게 깊은 감사를 드립니다.

마지막으로 기쁠 때나 슬플 때나 곁에서 저에게 큰 힘이 되어준 사랑하는 아내 지영이에게 깊은 감사를 전하고, 세상에 하나뿐인 소중한 내 딸 소은이 에게 고마움을 전합니다.