



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](#)

공학전문석사 학위 연구보고서

**MMC 기술기반 능동필터를 활용한
전력품질 개선에 관한 연구**

**A Study on Electrical Power Quality
Improvement by Active Filter Based on
MMC Technology**

2019년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

정영식

MMC 기술기반 능동필터를 활용한 전력품질 개선에 관한 연구

A Study on Electrical Power Quality Improvement by Active Filter Based on MMC Technology

지도교수 정 현 교

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2019년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
정 영 식

정영식의 공학전문석사 연구보고서를 인준함
2019년 2월

위 원 장 _____ 정 현 교 (인)

부위원장 _____ 윤 용 태 (인)

위 원 _____ 추 진 부 (인)

국문초록

최근 전력 전자 소자의 발전과 대용량 전력변환 장치 사용 증대로 인한 비선형 부하의 증가로 국내 발전 플랜트(석탄 및 복합 화력)의 소내 전력 계통에 고조파가 포함되는 현상이 늘고 있다. 특히 발전소에서 필수적으로 사용하는 대용량 인버터 모터 및 사이리스터(Thyristor)를 사용한 여자시스템과 대표적인 환경설비인 전기집진기(Electrostatic Precipitator) 그리고 해수전해염소주입 설비(Seawater Electro-Hypochlorination System)의 사용은 다수의 저차수 고조파를 발생시켜 전압과 전류의 여러 가지 왜곡을 일으키고 있으며, 이러한 고조파는 전력 손실의 증가와 전력품질 및 효율을 저하시키고, 여러 주요 부하 설비의 수명을 단축시키며 전자 제어장치 및 보호계전기 등의 비 동작 또는 오동작을 유발시키는 주요 원인으로 부각되고 있다.

일반적으로 고조파를 제거하는 방식으로는 부하의 운전 방식 및 환경에 따라 커패시터와 리액터를 직렬 연결하여 지정된 주파수의 공진현상을 이용하여 특정 차수의 고조파를 흡수하는 수동형 고조파 필터(Passive Power Filter)와 50차수 이하의 여러 차수의 고조파전류를 실시간으로 분석, 전압형 컨버터를 적용하여 반대

방향의 파형을 발생시켜 고조파전류를 상쇄시켜주는 능동형 고조파 필터(Active Power Filter)가 있다.

그러나 일반 형태의 전압형 컨버터를 적용한 고조파 필터를 활용하여 발전소 내의 전력품질을 향상시키기에는 실시간 제어기의 안정적인 운용 및 소자의 사용전압 한계성 극복이라는 어려움이 있으며, 고속 스위칭으로 인한 과다손실 및 능동필터가 고조파 발생원으로써 계통에 악영향을 미치는 부작용이 따르기도 한다.

이에 본 연구에서는 기존의 일반형 능동필터 방식의 단점들을 보완한 고조파 저감(Harmonic Mitigation) 및 역률 개선 기능을 갖춘 모듈러 다중레벨(5레벨) 컨버터(Modular Multi-Level Converter) 기반의 능동형 고조파 필터를 설계, 제작하여 발전소 주요 고조파 발생원 중의 하나인 전기집진기 및 해수전해염소주입설비에 병렬로 연결하고, 발생하는 고조파 제거 및 기타 전력품질 개선을 위한 실증 시험을 통하여 MMC형 능동필터의 성능을 확인하였다.

주요어 : 발전소 전력품질개선, 고조파저감, 모듈러 다중레벨 컨버터

학 번 : 2016-22257

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경 및 목적	1
제 2 절 논문의 개요 및 구성	5
제 2 장 발전소 전력품질 진단 및 분석과 MMC형 능동필터 기술 사양 선정	6
제 1 절 발전소내부하 전력품질 진단 및 분석	6
제 2 절 전압 및 전류 고조파의 제한 및 기준	11
제 3 절 MMC형 능동필터 기술 사양	12
제 3 장 MMC형 능동필터 개발	15
제 1 절 MMC형 능동필터의 구성 및 서브모듈 개발 ..	15
제 2 절 제어 알고리즘 개발 및 제어기 회로 설계	22
제 3 절 신뢰성 검증 시뮬레이션과 연구제품 제작 및 시험	31
제 4 장 사례 연구	47
제 1 절 연구제품 설치 위치 선정 및 설치	47
제 2 절 MMC형 능동필터 성능 시험	49
제 5 장 결 론	53
참고문헌	54
Abstract	57

표 목 차

[표 1] 측정지점의 전력품질 진단표	9
[표 2] 측정지점의 차수별 고조파 함유율	9
[표 3] 측정지점의 상별 전류고조파 데이터	10
[표 4] 전압 왜형률 제한표	11
[표 5] 정격 전압 120V에서 69kV 계통내의 전류 왜형률 제한표	11
[표 6] MMC형 능동필터 개발품 성능 지표	14
[표 7] MMC형 능동필터의 주요 부품 및 사양	16
[표 8] 서브모듈 주요 부품 및 사양	17
[표 9] PS-CAD 시뮬레이션 조건표	33
[표 10] 고조파 제어 전후 비교	43
[표 11] 시험내용 및 결과	44
[표 12] 차수별 고조파 제한치	49
[표 13] 차수별 고조파 측정값	49
[표 13] 능동필터 설치 전·후 차수별 고조파 전류 측정값	51
[표 14] 능동필터 설치 전·후 고조파 전압 및 전류 종합 왜형률 측정 그래프	51
[표 15] 능동필터 설치 전·후 차수별 전류 고조파 스펙트럼	52

그림 목 차

[그림 1] 발전소내부하 전력품질 진단 측정 개소	7
[그림 2] 전력품질 분석기	8
[그림 3] 전력품질 계측 사진[해수전해설비]	8
[그림 4] 전력품질 그래프 [해수전해설비 전류고조파]	10
[그림 5] 2레벨 컨버터와 다중레벨 컨버터의 출력전압 형태와 출력전압 및 기준전압 비교	12
[그림 6] MMC형 능동필터 및 MMC 밸브 구성도	16
[그림 7] 서브모듈 방열해석	17
[그림 8] 서브모듈 내부구성	18
[그림 9] 서브모듈 및 서브모듈 컨트롤러 구성	18
[그림 10] 서브모듈 컨트롤러 보드	19
[그림 11] 서브모듈용 자체 제어전원 회로 구성도	19
[그림 12] 서브모듈용 자체 제어전원 보드	20
[그림 13] 서브모듈 연계시험용 시험회로 및 장치	20
[그림 14] 서브모듈 연계시험 결과	21
[그림 15] 기본 MMC 제어 Topology	22
[그림 16] VCS의 기본 회로	23
[그림 17] Open-Loop Block Diagram	24
[그림 18] PS-SPWM 방식의 Waveform	26
[그림 19] Gopen Block Diagram	27
[그림 20] Gclose Block Diagram	27
[그림 21] 제어를 위한 무효전력 지령치 변환 PS-CAD 모델	28
[그림 22] PR 제어기의 보드 선도 (5차고조파 생성 그래프)	29

[그림 23] PR 제어 Block-Diagram	29
[그림 24] DC 전압 제어 PS-CAD 모델	30
[그림 25] MMC형 능동필터 제어 흐름도	31
[그림 26] Master DSP 제어	32
[그림 27] Slave DSP 제어	32
[그림 28] PS-CAD를 이용한 주회로 설계	34
[그림 29] PS-CAD를 이용한 Arm 회로 설계	34
[그림 30] PS-CAD를 이용한 컨트롤러 DSP 및 FPGA 설계	34
[그림 31] 라인 전류 파형(5차 100A 생성 시)	35
[그림 32] 단일 서브모듈 전압 그래프 (5차 100A 생성 시)	35
[그림 33] 터미널 라인 전압 파형 (5차 100A 생성 시)	35
[그림 34] 선에 흐르는 고조파 전류 파형 (5차 100A 생성 시)	35
[그림 35] 모듈레이션 파형(5차 100A 생성 시)	36
[그림 36] Arm 합성 전압 파형(5차 100A 생성 시)	36
[그림 37] MMC형 능동필터 연구제품 내부 구성도	37
[그림 38] fluid - Temperature Max : 50° C / Min : 23° C	37
[그림 39] Solid - Temperature Max : 60° C / Min : 23° C	37
[그림 40] MMC형 능동필터 컨트롤러 구성도	38
[그림 41] 메인보드	38
[그림 42] Sensing 보드	38
[그림 43] 인터페이스 보드	39

[그림 44] 서브모듈 셀보드	39
[그림 45] HIL test의 Block Diagram	40
[그림 46] RS-CAD 시스템 모델링	41
[그림 47] HIL Test 구성 사진 -1	41
[그림 48] HIL Test 구성 사진 -2	41
[그림 49] HIL Test 구성 사진 -3	41
[그림 50] 고조파 제어 전 전류	42
[그림 51] 5차고조파 제어 후 전류	42
[그림 52] 5,7차고조파 제어 후 전류	42
[그림 53] 5,7,11, 13차 고조파 제어 후 전류	42
[그림 54] 연구제품(컨테이너 구성)	43
[그림 55] 시험회로-1 (1kV/100A 생성)	44
[그림 56] 시험회로-2 (고조파 생성 및 제거 시험)	44
[그림 57] 고조파 제거기 동작 전 전류파형	44
[그림 58] 고조파제거기 동작 후 전류파형	45
[그림 59] 고조파 제거 전, 후 파형	45
[그림 60] 무효전류 발생신호 및 파형	45
[그림 61] 무효전류 발생 파형	45
[그림 62] 주회로 내전압시험	46
[그림 63] 제어회로 내전압 시험	46
[그림 64] IGBT 온도 포화 시험	46
[그림 65] 시스템 발생 전압	46
[그림 66] 연구제품 설치도면	47
[그림 67] MMC형 능동필터 연구제품 안치	48
[그림 68] MMC형 능동필터 연구제품 설치 (파워케이블 및 CT 설치)	48
[그림 69] 전류 고조파 트렌드	50

[그림 70] 차수별 고조파 전류 그래프	50
[그림 71] 차수별 고조파 전류 측정값	50

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 목적

국내 표준 석탄화력 612[MVA]급 발전기의 경우 525[MW] 출력기준의 약 5%를 발전소내부하로 사용하며, 이는 대부분 유도성 부하로 77~78% 저역률로 운전되고 있어 발전효율 저하의 한 원인이 되고 있다. 발전소내 6.9kV 전력계통 저역률 운전으로 인한 주요 문제점은 대용량 전동기 기동 시 순간전압강하로 인한 기동 실패 및 설비 트러블 발생, 무효전력 증가로 인한 변압기 부하손실 증가에 따른 전력손실 증대 등을 들 수 있다[1].

전력 전자 소자의 발전과 대용량 전력변환 장치 사용 증대로 인한 비선형 부하의 증가로 국내 발전 플랜트(석탄 및 복합화력)의 소내 전력계통에 고조파가 포함되는 현상이 빈번해지고 있으며, 이를 야기하는 주요 고조파 원으로는 대용량 인버터 모터 및 사이리스터(Thyristor)를 사용한 위상제어가 필요한 정지형 주파수 변환 장치(Static Frequency Converter)와 발전기 여자기 시스템(Generator Exciter System), 환경설비인 전기집진기(Electrostatic Precipitator) 그리고 해수전해설비(Seawater Electro-Hypochlorination System)가 있다[2].

최근에는 환경 문제가 대두되면서 가스복합발전소의 건축이 활성화되고 있고, 건축비용 절감을 위한 목적으로 발전기 여자기 시스템을 20kV 발전기 전압 모선이 아닌 6.9kV 소내 모선에 직접 연계하여 고조파의 피해를 가중시키고 있다.

석탄화력 발전소의 경우 미분기를 통과하여 연료를 공급, 연소된 후 발생하는 미세 분진이 연돌을 통해 대기로 방출되기 전에 분진을 제거하는 전기집진기의 사용이 반드시 필요하다. 전기집진기 사용 시 직류 고전압의 발생으로 고조파 및 순간 전압강하가 발생하여 전기집진기의 성능에 영향을 미치게 된다. 또한 발전기의 정비를 위해 용접기 등의 전원을 사용하게 되면 전압의 플리커(Flicker) 현상 및 순간 전압강하 등으로 전력상태가 불안정해 질 수 있다[3].

이러한 발전소내 고조파의 발생은 전압과 전류의 여러 가지 왜곡을 일으켜 전력 품질 저하 및 손실 증가를 유발하고 여러 주요 발전 설비의 수명을 단축시키며 전자 제어장치 및 보호계전기 등의 오작동을 유발시키는 등 많은 문제를 야기한다.

또한, 법적인 문제로 전기사업자는 전기사업법 제 18조에 의해 공급 전기의 품질을 유지하여야 하며, 고객은 기본공급약관 제 5장 전기사용에 따른 협력 제39조에 따라 부하에서 현저한 고조파 발생(공급약관 세칙 제26조 기준 종합 고조파 왜형을 5%이내)시 보호 장치를 시설하도록 하고 있다. 따라서 발전소의 안정적인 운영을 위해 전력품질 향상을 위한 설비가 필요한 실정이다[4].

일반적으로 전력 계통에 무효전력을 공급하여 역률 개선 및 전압강하 개선을 위한 설비로는 고압 진공 접촉기(Vaccum Contactor) 또는 저압 전자 접촉기(Magnetic Contactor)를 사용하는 고압 및 저압 삼상 커패시터 뱅크(Three-Phase Capacitor Bank)와 사이리스터 또는 IGBT를 사용하는 정지형 무효전력 보상장치(Static VAR Compensator)와 정지형 무효전력 발생기(Static VAR Genetator)가 있다. 그리고 고조파를 제거하는 방식으로는 부하의 운전 방식 및 환경에 따라 커패시터와 리액터를 직렬 연결하여 지정된 주파수의 공진현상을 이용하여 특정 차수의 고조파를 흡수하는 수동형 고조파 필터(Shunt Passive Power Filter)와 50차수 이하의 여러 차수의 고조파전류를 실시간으로 분석하여 반대 방향의 파형을 발생시켜 고조파전류를 상쇄시켜주는 전압형 컨버터(2레벨)를 적용한 능동형 고조파 필터(Shunt Active Power Filter)가 있다[5] [6] [7].

그러나 일반 형태의 커패시터 뱅크나 정지형 무효전력 보상장치, 또는 전압형 컨버터(2레벨)를 적용한 고조파 필터를 활용하여 발전소 내의 전력품질을 향상시키기에는 실시간 제어기의 안정적인 운용 및 소자의 사용전압 한계성 극복이라는 어려움이 있다. 특히 국내에서 주로 사용되고 있는 저압(480V급) 능동필터에서 채택중인 2레벨 방식은 기본적으로 출력 값이 고조파 성분을 많이 포함 할 수밖에 없는 구조를 가지고 있으며, 이러한 고조파 성분 제거를 위해 내부에 자체 필터를 설치하고 PWM(Pulse width modulation) 제어를 통한 고속 스위칭 방식을 채택하고 있다. 이러한 고속 스위칭 방식은 스위칭 횟수가 늘어나 손실이 증

가하므로 결과적으로 효율이 떨어지는 한계가 있고, 저전압 특성상 동일한 전류 공급 능력을 가지더라도 고전압 대비 작은 무효 전력 공급 용량을 가질 수밖에 없다는 단점이 있다[8].

이에 본 논문에서는 기존의 전력품질 개선 설비의 단점들을 보완한 역률 개선 및 상별 전류 불평형 개선 기능을 갖는 모듈러 다중레벨 컨버터(Modular Multi-Level Converter) 기반의 능동형 고조파 필터를 제안한다. 발전소내 480모선에 적용 가능한 1kV급 100A MMC 기반 능동형 고조파 필터를 설계, 제작, 시뮬레이션 검증 및 계통에서 운전 중인 해수전해설비로부터 발생하는 고조파 전류를 측정하여 필터 설치 및 고조파 저감 시험을 통하여 MMC형 능동필터의 성능을 확인하고 검증하였다.

제 2 절 논문의 개요 및 구성

본 논문에서는 모듈러 다중레벨 컨버터(Modular Multi-Level Converter) 기반의 능동형 고조파 필터를 제안하고, 발전소내 480모선에 적용 가능한 1kV급 100A MMC형 능동필터를 설계, 제작, 시뮬레이션 검증, 설치 및 시험을 통하여 필터의 성능을 확인하였다.

제 1장에서는 본 논문의 연구 배경 및 목적, 그리고 논문의 개요 및 구성에 대하여 살펴보았다.

제 2장에서는 발전소내부하 전력품질 진단을 실시하여 분석하고, 전압 및 전류 고조파의 제한 및 기준에 대한 내용과 이 논문에서 제안하는 MMC형 능동필터의 기술 사양을 정리하였다.

제 3장에서는 MMC 구성 및 서브모듈 개발과 제어 알고리즘 개발 및 제어기 회로 설계 및 제작, 그리고 시뮬레이션 프로그램을 활용한 제어기 신뢰성 검증 및 연구제품 제작, 공인인증 시험 내용 및 결과에 대하여 기술하였다.

제 4장에서는 연구제품의 최적화된 설치 위치 선정과 설치 및 실증 시험을 통하여 연구제품의 성능을 확인, 검증한 연구 결과에 대하여 논하였다.

제 5장에서는 본 연구의 결론과 연구제품의 보완 및 개선사항에 대한 후속 연구에 대하여 기술하였다.

제 2 장 발전소 전력품질 진단 및 분석

발전소내부하 전력품질 진단을 통하여 소내 모선의 역률 및 고조파 발생 현황을 파악하고, 이를 개선하기 위한 MMC 기반 능동필터 연구제품의 기술사양 선정에 대한 내용을 아래 세부 절을 통해 설명한다.

제 1 절 발전소내부하 전력품질 진단 및 분석

발전소에서 전력을 발전하기 위해 사용되는 부하를 발전소내부하 라고 하며, 발전 중에는 발전 전력의 일부(약 5%~10%)를 가져와서 사용한다. 다만 정지시나 기동 시에는 한전으로부터 필요한 부하의 사용에 필요한 전력을 수전 받아 사용하고 있다. 대부분의 발전소내부하는 유도성 부하로써 50~70%대의 저 역률로 운전되고 있으며 발전기에서 생성하는 무효전력의 일부를 발전소내부하에서 소비하고 있다. 전라남도 여수시에 위치한 호남화력발전소 1, 2호기의 발전소내부하 전력품질 진단을 실시하였으며, 저역률 운전 및 고조파를 발생시키는 설비인 전기집진기(Electrostatic Precipitator)와 해수전해염소주입설비(Sea water Electro Hypo-chlorination System)를 포함한 7개소의 부하 모선을 진단하였다.

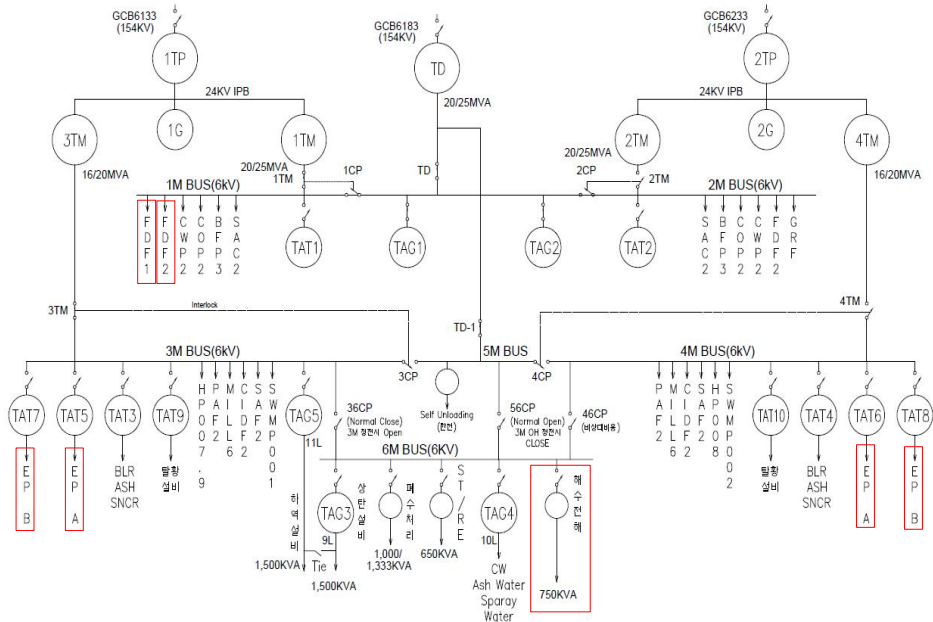


그림 1 발전소내부하 전력품질 진단 측정 개소

측정 기준점은 크게 6.0kV 고압설비와 Load Center 변압기 (6.0kV/0.46kV 1,000KVA)로 변압된 전압을 사용하는 저압설비를 기준으로, 고압의 경우 각 설비별 진공차단기반(Vacuum Circuit Breaker Panel)과 0.46kV 저압설비의 경우 Load Center 변압기 2차 기중차단기반(Air Circuit Breaker Panel)에 전력품질 분석기를 설치하여, 계기용변압기(Potential Transformer)와 계기용변류기(Current Transformer)로부터 3상의 전압, 전류 소스(Source)를 받아 일괄 진단하였으며, 발전기 출력 200MW 운전 기준으로 발전소 운영에 지장이 없도록 무정전 상태에서 측정하였다.

측정 분석한 실험장비는 프랑스의 Chauvin Arnoux사의 C.A.8334 모델로 고조파 및 전압, 전류, 역률, 주파수, 에너지, 상불평형전류 그리고 상차각 등의 전력품질과 관련된 사항들을 실시간으로 또는 일정 기간을 지정하여 예약 측정할 수 있으며, 측정 데이터를 저장하여 다양한 분석을 수행할 수 있는 기능을 내장하고 있다.

 <p>그림 2 전력품질 분석기</p>	<p>진단항목 : TREND, 유효/무효/피상 전력, 역률, 상전압, 선간전압, 전류, 전압/전류 차수별 고조파 등</p> <p>진단방식 : 전압센서, 전류센서</p> <p>적용규격 : IEC 61010-1, 600 V Cat. IV</p> <p>제조회사 : CHAUVIN ARNOUX, FRANCE</p> <p>모델명 : C.A.8334</p>
--	---



그림 3 전력품질 계측 사진[해수전해설비]

그림 1은 발전소내부하 전력품질 진단 측정 개소를 나타낸 것이며, 그림 2와 3은 전력품질 진단분석기 사진 및 측정 모습을 보이고 있다. 그림 4는 해수전해설비의 고조파 측정 그래프를 나타낸 것이다.

표 1. 측정지점의 전력품질 진단표

측정지점	전압[V]	전류[A]	역률[%]	왜형률[%]	
				전압THD	전류THD
F.D.FAN 1	6,270	63	97	0.0	1.5
F.D.FAN 2	6,270	60	97	0.0	1.7
전기집진기 1A	446	318	70	2.7	20.9
전기집진기 1B	443	375	73	3.4	20.4
전기집진기 2A	439	249	72	2.2	20.9
전기집진기 2B	438	336	67	1.3	10.1
해수전해설비	430	234	64	3.2	26.5

표 2. 측정지점의 차수별 고조파 함유율

측정지점	고조파 함유율(기본파 기준)									
	전압[%]					전류[%]				
	5차	7차	11차	13차	17차	5차	7차	11차	13차	17차
F.D.FAN 1	0	0	0	0	0	0.6	0.5	0.6	0.4	0.6
F.D.FAN 2	0	0	0	0	0	0.5	0.6	0.7	0.3	0.6
전기집진기 1A	0.7	0.5	0.4	0.2	0.2	8.6	3.4	1.3	0.7	0.5
전기집진기 1B	0.9	0.5	0.3	0.2	0.0	4.2	3.0	1.0	0.6	0.2
전기집진기 2A	1.1	0.8	0.5	0.4	0.4	13.6	7.7	3.5	2.1	1.6
전기집진기 2B	0.7	0.9	0.6	0.5	0.5	9.2	5.2	1.8	0.8	0.1
해수전해설비	1.5	0.7	1.3	0.8	1.0	24.0	5.5	7.5	3.7	4.2

7개소의 측정 데이터를 취합하여 분석한 결과, 고압 F.D.FAN에서는 1% 미만의 전압 및 전류 고조파 함유율을 보였고, 전기집진기 및 해수전해설비에서는 저 역률[64~73%] 운전과 최대 26%의 전류 고조파 함유율을 보였다.

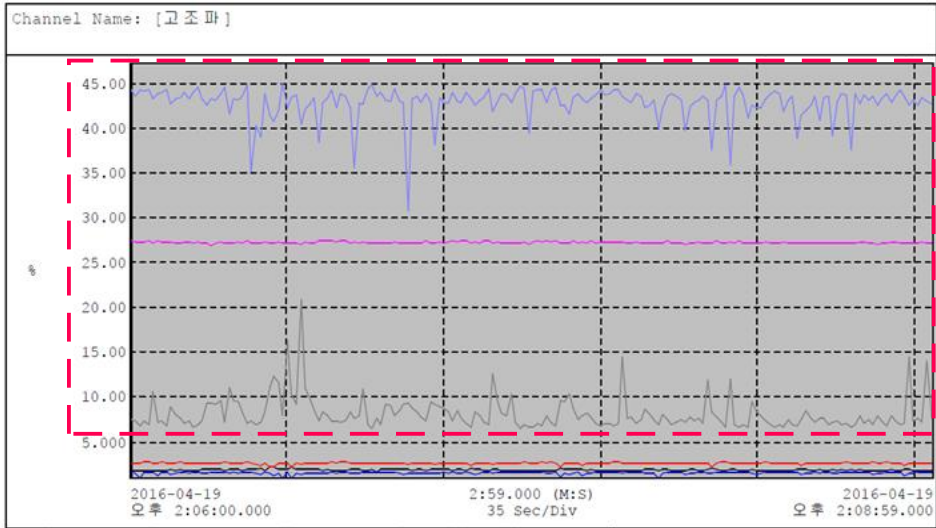


그림 4 전력품질 그래프 [해수전해설비 전류고조파]

표 3. 측정지점의 상별 전류고조파 데이터

구분	R상	S상	T상
Max(%)	20.90	27.50	45.00
Avg(%)	8.161	27.22	42.82
Min(%)	6.500	26.90	30.70

발전소내부하 전력품질 진단 결과 전력변환장치를 사용하는 부하에서 과도한 고조파 전류가 발생하고 있다. 고조파는 해당 계통내의 전력 손실을 증가시키고, 변압기 및 무효 전력 보상 장치의 수명을 단축시킬 수 있으며, 전자·제어장치 등의 오작동을 유발시킬 수 있다.

이에 본 논문에서는 발전소의 안정적인 운영을 위해 발전소내부하의 고조파 함유율을 저감시킬 수 있는 새로운 방식의 MMC형 능동필터를 제안한다.

제 2 절 전압 및 전류 고조파의 제한 및 기준

전압 및 전류 고조파의 제한 기준은 발전소라는 계통의 특수성과 연구제품의 용량을 고려하여 IEC 규격보다 제약이 엄격한 단락비 I_{SC}/I_L $20 < 50$ 기준 IEEE Std-519 규격을 적용하고, 계통의 주요 차수별 고조파(5차, 7차, 11차, 13차 17차) 함유량은 제한 값 이내로 저감한다.[9]

표 4. 전압 왜형률 제한표

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

※ 전압 고조파는 계통전압의 범위에 따라 THD(%)로 제한.

표 5. 정격 전압 120V에서 69kV 계통내의 전류 왜형률 제한표

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics)						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

※ 전류 고조파는 계통전압의 범위에 따라 50차 이내의 차수별 고조파 함유량(%)과 TDD(%)로 제한.

제 3 절 MMC형 능동필터 기술 사양

전압형 컨버터의 사용은 전압고조파를 발생시키며, 이는 컨버터의 특징에 의해 주파수영역 또는 크기가 달라진다. 다수의 스위칭소자를 직렬로 결합한 2레벨 전압형 컨버터를 사용하는 고조파 필터의 경우, 과다 전압 고조파의 발생을 방지하기 위하여 Pulse Width Modulation(PWM)을 이용하여 제어를 하는데, 스위칭 주파수에 관련된 변조주파수의 크기가 커질수록 THD의 크기가 감소하지만 지속적인 고속스위칭을 위한 손실이 따르게 된다. 또한 2레벨의 구조상 하나의 소자 고장 시 전체 시스템의 운전이 불가하며, 소자의 전압 한계성으로 인하여 발전소 운용상 계통 변화에 따른 전압 변동이 큰 환경에서의 사용은 매우 제한적이다.

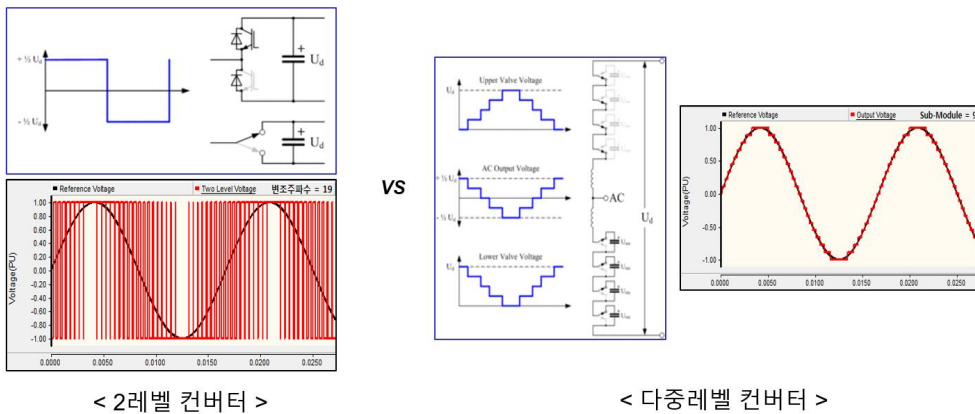


그림 5 2레벨 컨버터와 다중레벨 컨버터의 출력전압 형태와 출력전압 및 기준전압 비교

스위칭 소자를 직렬로 결합하는 방식의 2레벨 전압형 컨버터의 단점을 해결하고자 제안된 방식이 스위칭 소자를 이용하여 Half-Bridge 또

는 Full-Bridge 형태의 서브모듈(Sub-Module)을 구성하여 직렬로 결합한 모듈러 다중레벨 컨버터(Modular Multi-Level Converter)이다. MMC는 기존 전압형 컨버터에 비해 직류전압의 제어가 용이하고 스위칭손실이 상대적으로 낮으며, 개별 서브모듈 고장 시에도 전체적인 시스템 운용이 가능하다[10] [11] [12].

이 논문에서는 MMC의 여러 가지 장점을 기반으로 발전소내부하 480V 전압 계통에 설치 가능한 1kV급 100A 5레벨 능동필터를 개발하고, 개발품에 대한 성능 시험 결과를 확인하였다. MMC형 능동필터의 개발품 성능 지표는 표 6과 같다.

표 6. MMC형 능동필터 개발품 성능 지표

주요 성능지표	단 위	기준값	시험규격
1. 전자파 시험	dBuV/m	허용치 이내	제어기만 실시(IEEE Std-519)
2. 고조파 제거 응답 속도	cycle	1 이하	고조파 보상(On) 신호 후 고조파 발생기에 의해 발생하는 고조파 파형의 반대파형을 능동형 필터가 생성하여 고조파 발생기가 발생시키는 고조파 전류량을 초기 대비 5%이하로 만드는 시간
3. 무효전력 보상 응답 속도	cycle	2 이하	매뉴얼 모드로 무효전력 보상(On) 신호 후 Arm 전류값이 0에서 최대 전류값의 90% 까지 도달하는 시간
4. 최대출력전류	A(rms)	100 이상	시스템 최대로 출력 가능한 전류 측정
5. 내전압 시험	kV~	5kV~ 1분 절연유지	주회로: 5kV~ 1분 제어회로: 2kV~ 1분 (IEC60146-1-1)
6. IGBT 운전 온도	℃	100 이내	IGBT 접촉 히트싱크 온도 측정
7. 전류 고조파 보상 능력	%	고조파 관리 기준 이하1)	수요처와 함께 실증 시험을 통해 시스템 동작시 보상지점의 고조파측정
8. 판넬내부온도	K2)	25 이내	실증 시험을 통해 온도 측정
9. 다중레벨의 사용레벨 확인	레벨	5 이상	구조 확인(사용된 서브모듈의 수량) 및 생성 전압 파형에서 레벨 확인
<input type="checkbox"/> 부연 설명			
<p>1) 발전소 계통의 단락비는 ISC/IL 20<50이며, 고조파 관리 기준은 국제기준 IEEE Std-519에 따라 5차, 7차는 7%이하, 11차, 13차는 3.5%이하, 17차는 2.5%이하로 유지되어야 함.</p> <p>2) 주변온도 대비 온도 상승분 (주변온도 25℃에서 측정하여 해당 포인트가 50℃가 되는 경우 25K임)</p>			

제 3 장 MMC형 능동필터 개발

본 장에서는 MMC형 능동필터의 제어 알고리즘 개발 및 서브모듈 설계 그리고 제어기의 구조 및 회로 설계에 대한 내용을 정리하였고, PS-CAD 프로그램을 활용하여 알고리즘을 검증하였다. 검증된 알고리즘을 기반으로 전 장에서 제시한 용량의 연구제품을 제작하여, 실시간 전력 시스템 시뮬레이터(Real Time Digital Power System Simulator)를 활용한 제어기의 신뢰성 검증 HIL(Hardware in-the Loop) Test 환경 구축 및 시험 내용을 정리하였다.

제 1 절 MMC형 능동필터 구성 및 서브모듈 개발

1kV급 100Arms를 발생할 수 있는 MMC형 능동필터는 표 7과 같이 1kV 주회로에 적합한 주차단기, 초기충전용 접촉기, 초기충전용 레지스터, 스무딩 리액터, MMC 밸브 그리고 제어용 컨트롤러 등의 주요 부품으로 이루어져있고, 그림 7과 같이 구성된다. 주요 부품별 사양은 사용전압 및 능동필터 전류용량을 고려하여 결정하였으며, 스무딩 리액터의 사양은 PS-CAD 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 결정하였다.

표 7. MMC형 능동필터의 주요 부품 및 사양

No.	부품명	주요 사양
1	주 차단기	1kV, 100Arms 이상
2	전류검출용 CT	200/5
3	접촉기	1kV, 10Arms 이상
4	초기충전 저항	50Ω x 3EA 구성
5	스무딩 리액터	0.5mH, 100Arms 이상
6	MMC 밸브	5레벨용, 4개의 서브모듈로 구성
7	제어용 컨트롤러	마스터, 슬레이브, 인터페이스, HMI 등

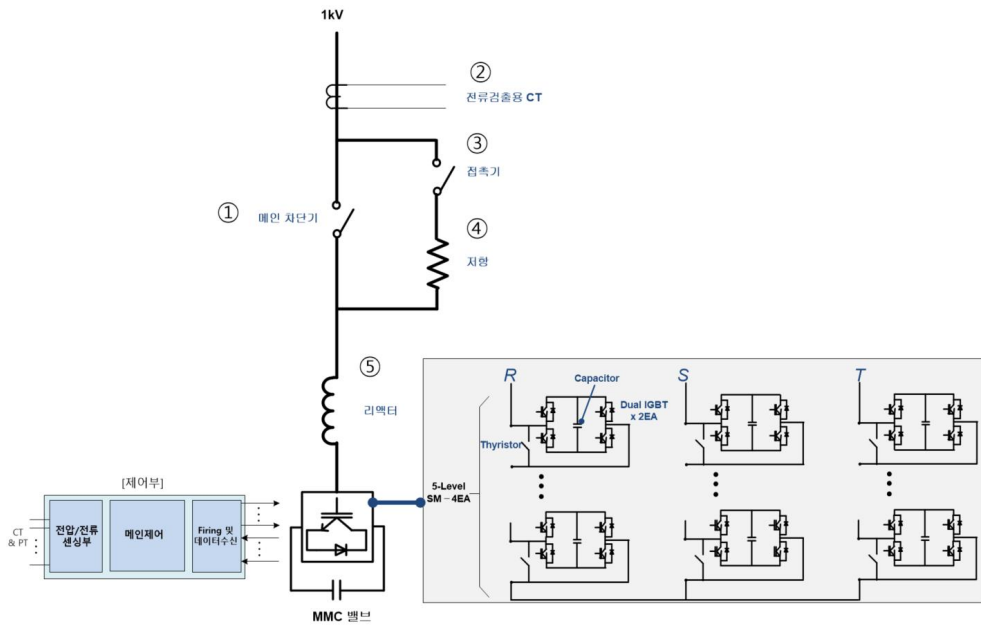


그림 6 MMC형 능동필터 및 MMC 밸브 구성도

특히 MMC 밸브는 사용 전압에 따라 다수의 서브모듈로 구성되고, 제어를 통해 다수 DC전압으로 AC 전압을 생성하는 역할을 수행하며, 각 상의 밸브를 Arm이라 한다.

각 서브모듈은 표 8과 같이 DC 커패시터와 IGBT, 사이리스터로 구성되어 되며, PS-CAD 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 주요 구성품의 정격사양을 결정한다.

표 8. 서브모듈 주요 부품 및 사양

No.	부품명	주요 사양
1	DC 커패시터	300V이상, 5.5mF 이상
2	IGBT	Dual Type, 300V 이상, 200A 이상
3	사이리스터	600V이상, 200A 이상

IGBT 운전시의 IGBT 접촉 히트싱크 온도가 개발품 성능지표 기준값 (100℃ 이내)을 만족할 수 있도록 Solid Works 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 방열해석(최대 87.43℃ 이하로 운전)을 실시한 뒤 사양이 결정 된 주요 부품을 구성하여 서브모듈을 제작하였다.

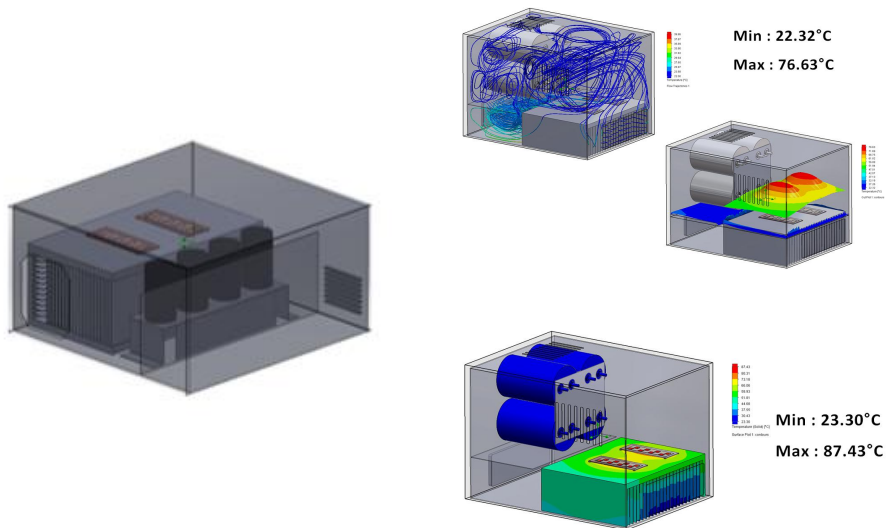


그림 7 서브모듈 방열해석



그림 8 서브모듈 내부구성

방열해석을 마친 뒤에는 Cell Voltage Measurement Board를 제작하여 서브모듈의 전압 및 IGBT 온도 정보를 ARM 제어기에 전송하고, ARM 제어기로부터 받은 IGBT 구동명령을 IGBT Driver로 전송하여 IGBT를 구동할 수 있도록 서브모듈 컨트롤러 보드를 제작 한다.

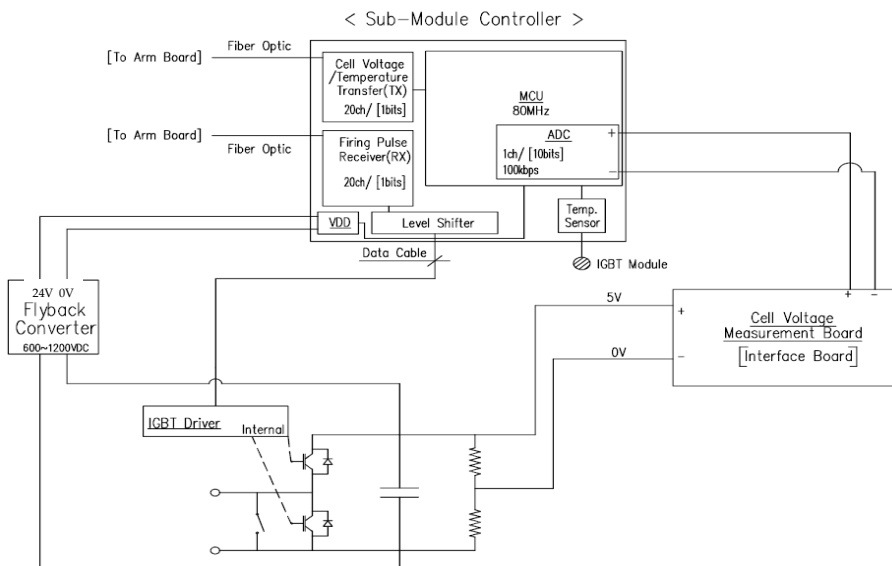


그림 9 서브모듈 및 서브모듈 컨트롤러 구성



그림 10 서브모듈 컨트롤러 보드

또한, 서브모듈의 자체 제어 전원을 안정적으로 공급하기 위하여 Fly-Back Converter를 개발하여 적용하였다.

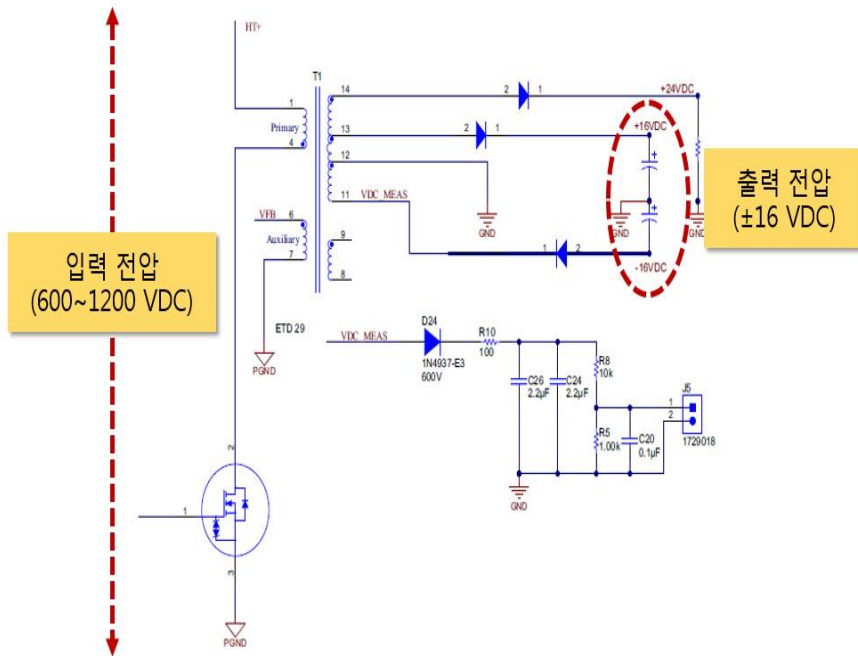


그림 11 서브모듈용 자체 제어전원 회로 구성도

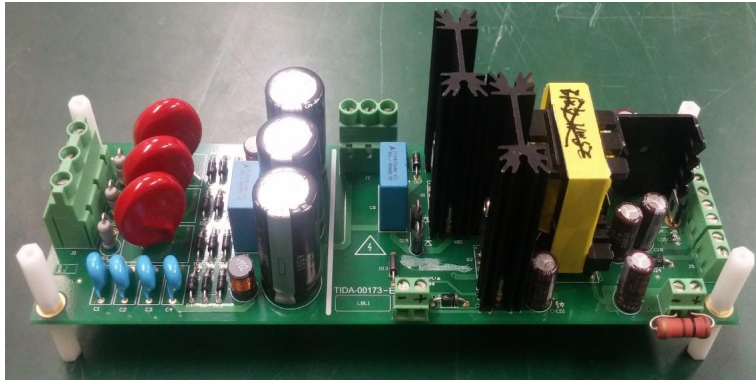


그림 12 서브모듈용 자체 제어전원 보드

서브모듈 4개를 연결하여 5레벨 MMC Arm 밸브 회로를 구성하였고, 그림 16과 같이 서브모듈 연계시험(1kV 100A 단상)용 시험회로 및 장치를 구축하여 시험을 실시하였다.

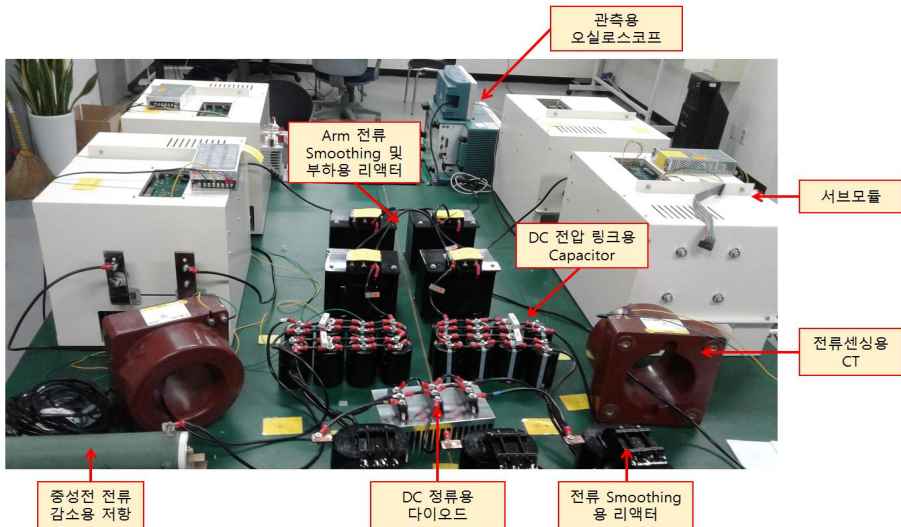


그림 13 서브모듈 연계시험용 시험회로 및 장치

이 시험을 통하여 서브모듈의 DC 충전전압과 서브모듈 간의 전압 편

차, 그리고 Arm 전류 파형을 확인하였다.

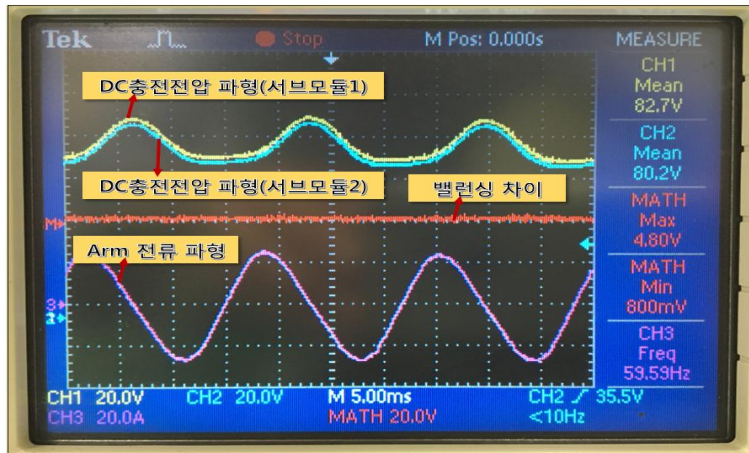


그림 14 서브모듈 연계시험 결과

제 2 절 제어 알고리즘 개발 및 제어기 회로 설계

MMC형 능동필터의 제어기는 그림 16, 그림 17과 같이 크게 Supervisor Control, Central Control, Converter Cubicle 그리고 Interface 4개 파트로 나누어 제어할 수 있도록 알고리즘을 개발하고 설계하였다.

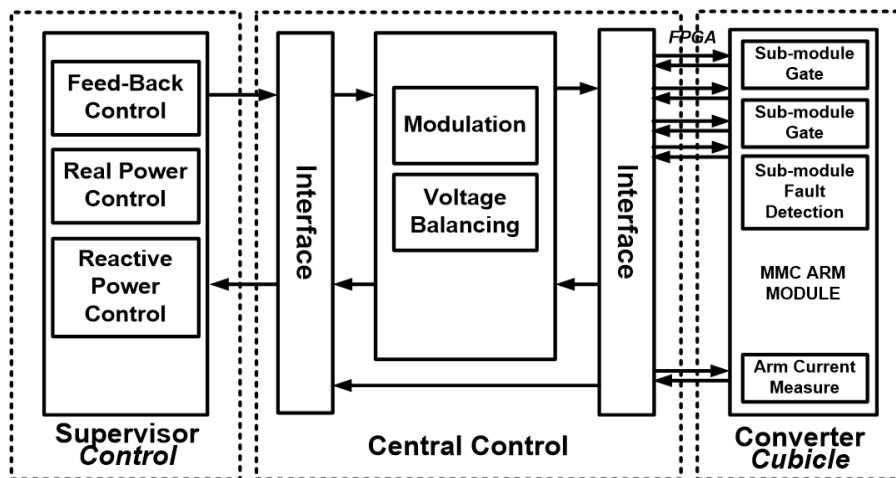


그림 15 기본 MMC 제어 Topology

MMC형 능동필터는 계통으로부터 전력에 대한 레퍼런스를 입력 받아, 고조파저감 및 역률개선을 위해 필요한 만큼의 전류를 발생시켜 실시간으로 제어하는 기능을 한다. 역률 개선을 위해 유효전력과 무효전력을 제어하는 PQ(Active and Reactive Power Control)제어와 고조파저감을 위한 PR(Proportional-Resonance)제어, 그리고 Feed-back 전류를 제어하기 위한 PI(Proportional-Integral)제어 등 여러 가지 제

어기법을 사용하여 제어기를 설계하고 구현하였으며, 내부제어기와 외부 제어기로 구분할 수 있다.

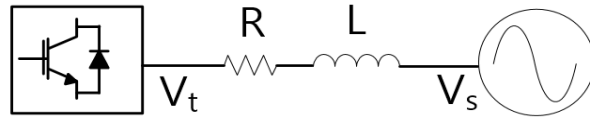


그림 16 VCS의 기본 회로

전압형 컨버터의 기본 회로는 그림 17과 같고, 컨버터 단말 전압을 V_t , 계통 전압을 V_s 라고 했을 때 AC 전압 및 전류의 관계식은 (1)같이 표현되며, 선형 방정식으로 표현하기 위해 Laplace 변환 (2) 후 컨버터 전압과 전류의 전달함수는 (3)과 같다[13].

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_t - V_s \quad (1)$$

$$LsI(s) + RI(s) = V_t(s) - V_s(s) \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{Ls + R} LsI(s) + RI(s) = V_t(s) - V_s(s) \quad (3)$$

내부 제어기는 IGBT의 Feedback 전류 제어를 위한 PI 제어기를 의미하고, 전류의 지령치(Reference)와 실제 값을 비교하여 차이만큼을 보상해 주는 역할을 하며, PI 제어기의 보상 속도 및 특성을 결정하게 되는 변수인 K_p (Proportional gain)와 K_i (Integral gain)를 변화시키며 제어를 한다.

$$k_p + k_i \frac{1}{s} L \frac{di}{dt} + Ri = V_t - V_s \quad (4)$$

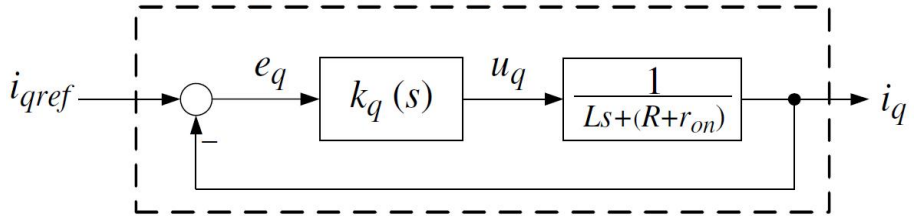


그림 17 Open-Loop Block Diagram

그림 8은 System Open-loop Block Diagram이며, 이는 AC dynamics 와 PI 제어기를 포함한 Feed-back 제어를 표현한 것이며 Open-Loop 전달함수는 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$G_{open} = \frac{k_p \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right)}{sL \left(s + \frac{R}{L} \right)} \quad (5)$$

$G_{open}(s)$ 의 Original Pole($-R/L$)은 S-Domain에서 좌평면도 (Left Half Plane)에 있어서 안정적이거나, L이 R에 비해 커서 원점에 가깝기 때문에 느린 자연응답을 보이게 되며, PI Zero를 통해서 Pole Cancellation 할 수 있게 된다. PI zero ($\frac{k_i}{k_p}$) = Original Pole($-R/L$)로 결정하고, Open-Loop 전달함수와 (6)의 식을 정리하면 (7)

이 되며, 전체 Feed-back Closed-Loop 전달함수는 (8)로 정리되기 때문에 1차 지연 함수의 특성을 따르게 된다.

$$\frac{k_p^*}{L} = \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

$$G_{open} = \frac{1}{\tau s} \quad (7)$$

$$G_{closed} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (8)$$

이때 τ 는 시간상수로 단위계단응답(Unit Step Response)의 약 60% 까지 상승하는데 걸리는 시간을 의미하며, 이 값이 작으면 빠른 제어 가능하지만 Bandwidth($\frac{1}{\tau}$)가 컨버터 스위칭 주파수의 1/10 이하로 설정되어야 하는 제한이 존재하게 된다.

$$0.1 f_{sw} < \tau \quad (9)$$

보통 time constant는 0.5 - 5ms 정도로 선택된다고 하며, 외부 제어기와 스위칭 주파수의 관계를 고려해야 한다.

전압형 컨버터의 출력전압 형성을 위한 변조방식은 PD-PWM(Phase Disposition Pulse-Witch Modulation), SVM(Space Vector Modulation), SHE(Selective Harmonic Elimination), NLC(Nearest

Level Control) 등 여러 가지가 있는데, 그 중에서 현재까지 가장 연구가 활발히 이루어져왔고, MMC에 적합한 PS-SPWM(Phase-Shifted Sinusoidal Pulse Width Modulation) 방식을 채택하였다[14].

$$\tau = \frac{1}{2(n-1)f_c} \frac{k_p}{L} = \frac{1}{\tau} \quad (10)$$

PS-SPWM 방식은 N-level에서 ‘N-1’ 개의 시간차를 가지는 반송파(Carrier Signal)를 사용하여 생성되며, 반송파간의 시간차는 (10)이 된다.

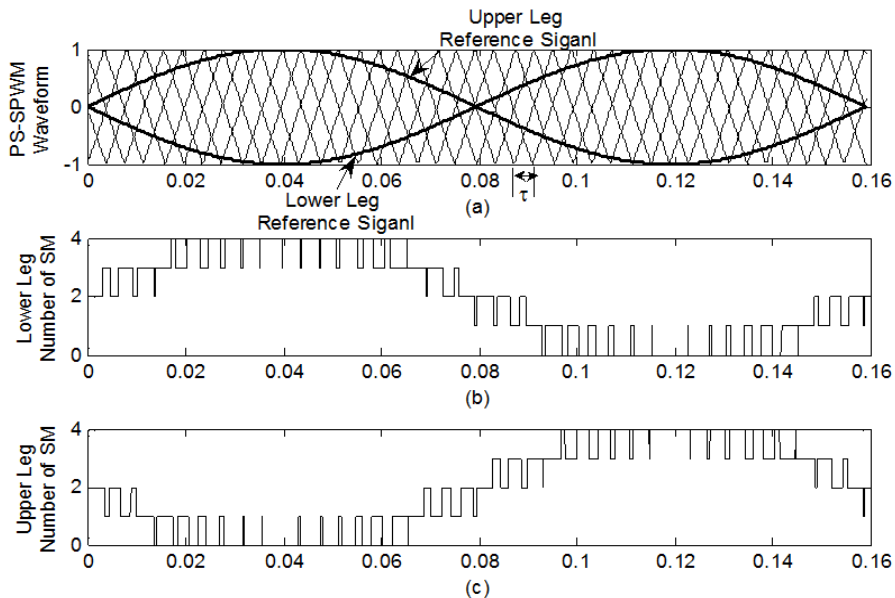


그림 18 PS-SPWM 방식의 Waveform

외부제어기는 내부제어기의 PI제어기를 포함하여 재구성함으로써 PQ 제어를 통하여 유효전력(Direct active power P)과 무효전력(reactive power Q)을 제어하며, PR제어 방식으로 고조파를 저감할 수 있도록 설계 한다.

PQ제어는 순시 유효전력 p와 무효전력 q는 전압 v와 전류 i에 대하여 (11), (12)와 같은 관계식을 가지게 되며, 이를 통해 제어기내의 전류 지령치(Reference)를 계산하게 된다.

$$p(t) = \frac{3}{2}[v_d(t)i_d(t) + v_q(t)i_q(t)] \quad (11)$$

$$q(t) = \frac{3}{2}[-v_d(t)i_q(t) + v_q(t)i_d(t)] \quad (12)$$

여기서 PLL(Phase Locked Loop)를 통해 전압의 무효성분을 제거 ($v_q = 0$)하므로 무효전력 값을 통한 전류의 무효성분은 (13)처럼 계산하여 구할 수 있다.

$$i_{q,ref} = -\frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{v_d} \quad (13)$$

그림 20은 내부 제어기를 포함한 전체 제어 block diagram을 나타낸다.

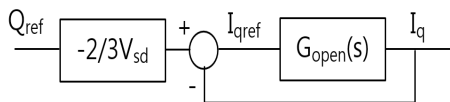


그림 19 Gopen Block Diagram

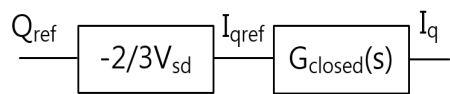


그림 20 Gclose Block Diagram

전류제어기는 그림 21과 같이 Feed-back을 포함한 $G_{closed}(s)$ 로 치환하며, 그림 21은 무효전력 지령치를 통하여 전류의 무효성분 지령치를 계산하게 되고 이를 통해 무효전력을 제어하는 제어기를 PS-CAD로 모델링한 것이다.

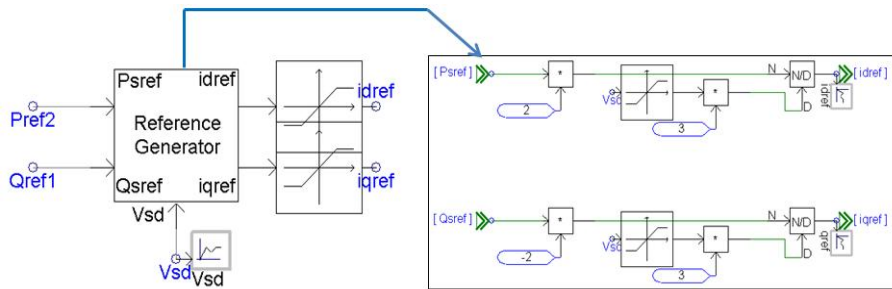


그림 21 제어를 위한 무효전력 지령치 변환 PS-CAD 모델

고조파 저감을 위한 전류 I_F 를 만들기 위하여 PR제어기를 사용하며, 이는 어떠한 특정 주파수에서의 이득(Gain)을 이론적으로 무한대로 만들어 전류가 지령치를 추종하여, 그 주파수 성분에 대해 정상 상태 오차를 0이 되도록 하는 역할을 하며, 전달함수는 (14)와 같다.

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r w_{prc} s}{s^2 + 2w_{prc} s + w_k^2} \quad (14)$$

K_p : Proportional Gain (비례 이득)

K_r : Resonant Gain (비례공진 제어기의 이득)

w_{prc} : Bandwidth at -3dB (Cut-off 주파수)

w_k : Selected Frequency (고조파 차수 \times 기본주파수)

그림 23은 PR 제어기의 보드 선도(5차고조파 생성 그래프)를 나타낸다.

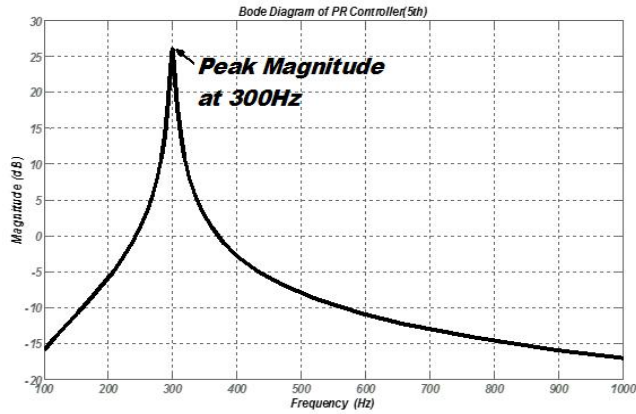


그림 22 PR 제어기의 보드 선도(5차고조파 생성)

PR 제어기의 알고리즘은 그림 23과 같이 나타낼 수 있으며, 삼상 전류를 $\alpha-\beta$ 변환하여 원하는 고조파 차수에 해당하는 PR 제어기에 통과시키고, 나온 결과들을 모두 더해서 하나의 레퍼런스 신호로 만든 후, 해당 레퍼런스 신호를 가지고 컨버터 전류 제어를 이용해 고조파를 제거한다.

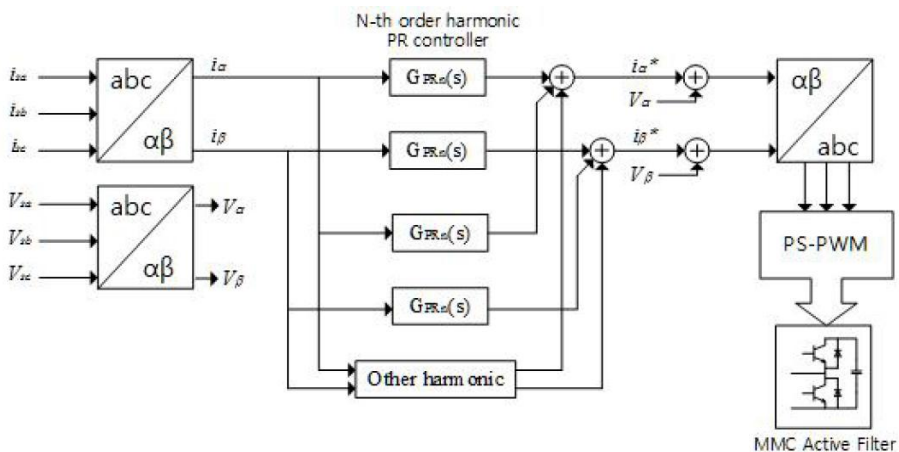


그림 23 PR 제어 Block-Diagram

개별 서브모듈이 On 상태일 경우 출력터미널에는 커패시터의 전압이 형성되며, 이때 모든 서브모듈의 커패시터 전압이 일정값(DC-Link 전압/n)을 유지하지 못할 경우, MMC의 출력 전압 파형은 정현파에 가까운 파형으로 형성되지 못하며, THD가 상승하게 된다[15]. 또한 서브모듈의 IGBT에 불균등한 전압 스트레스를 주게 됨으로써 악영향을 미친다. 결론적으로, MMC의 모든 서브모듈 커패시터의 전압은 동일한 값을 유지해야하며, 이를 위해 선간 전압 전체 DC 전압 제어용 PI Control 제어가 설계가 필요하다.

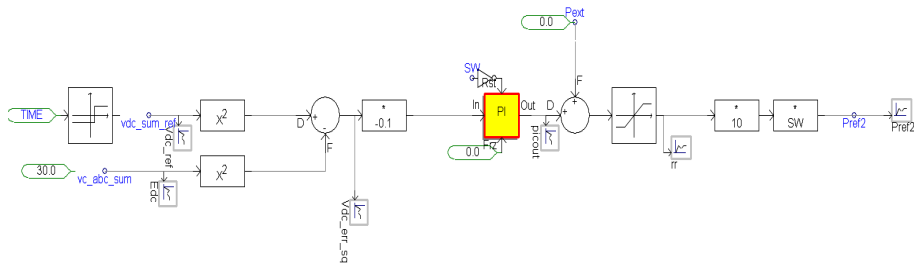


그림 24 DC 전압 제어 PS-CAD 모델

제 3 절 신뢰성 검증 시뮬레이션과 연구제품 제작 및 시험

해당 절에서는 제 2절에서 개발한 여러 가지 제어기법을 수용한 컨트롤러의 S/W 신뢰성 검증 시뮬레이션을 실시하고, 연구제품 제작에 대한 내용을 설명하였다.

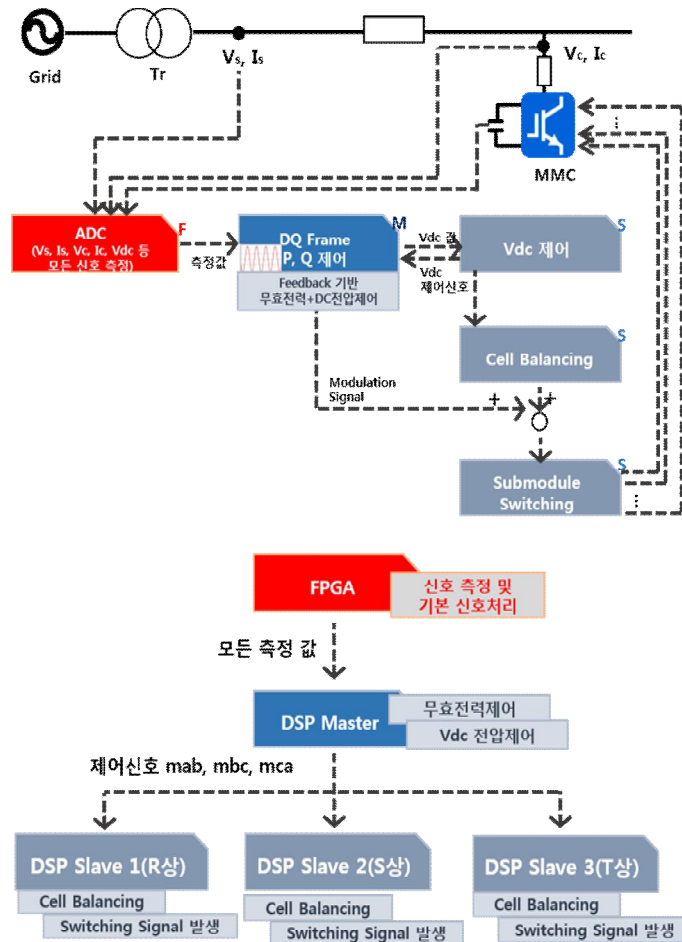


그림 25 MMC형 능동필터 제어 흐름도

그림 25는 MMC형 능동필터의 전체적인 제어 흐름도이다. 주회로의 모션으로부터 실시간 전압 및 전류 데이터(V_s 와 I_s)를 입력받아 ADC(Analog Digital Converter)를 거쳐 D-Q프레임으로 변환하여 무효전력을 제어하고, 계통 전류 FFT 연산 및 고조파 전류 Inverse FFT 연산을 통해 고조파를 저감하는 방식으로 그림 26과 그림 27은 Master DSP와 Slave DSP의 제어 순서도를 나타낸다.

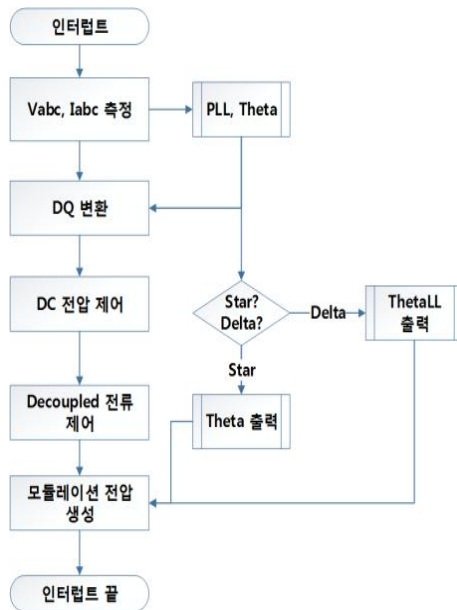


그림 26 Master DSP 제어

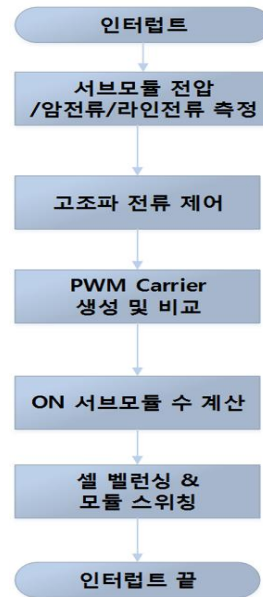


그림 27 Slave DSP 제어

컨트롤러는 MMC형 능동필터의 하드웨어 실험을 위해 구성된 제어 환경을 반영하여 설계하였으며, 1개의 FPGA와 4개의 DSP(1 Master, 3 Slave)로 구성되어 있다.

FPGA는 선간전압, 상전압, 상전류, 3상 전압의 위상값, Arm전류, 각 서브모듈 커패시터의 전압 등 여러 가지 실시간 데이터를 측정하고 수집하는 역할을 수행하며, DSP Master는 FPGA를 통해 측정 데이터를 받은 후 DC전압 제어와 무효전력 출력 등의 제어를 담당한다. 마지막으로 DSP Slave(1, 2, 3)는 FPGA를 통해 측정 데이터 및 DSP Master로부터의 제어신호를 받아 서브모듈의 Arm별 셀(Cell) 전압 제어를 수행하고, 해당 Arm의 서브모듈 IGBT 스위칭 동작을 위한 Firing Signal을 생성한다.

컨트롤러의 세부 기능들은 C프로그래밍 코드 기반으로 함수화시켰으며, 모든 변수들 또한 구조체(Structure) 기반으로 구성되어 있다.

컨트롤러의 신뢰성 검증을 위한 시뮬레이션은 표 9와 같은 조건 하에서 수행하였고, 시뮬레이션을 위해 주회로와 Arm회로 그리고 컨트롤러 내부의 DSP 및 FPGA 설계를 그림 28, 그림 29, 그림 30과 같이 수행하였다.

표 9. PS-CAD 시뮬레이션 조건표

No.	조건	내용
1	사용 전압	1kV
2	서브모듈 결선	Star
3	MMC 레벨	5레벨
4	Q_ref	100A
5	Arm Reactor 용량	2.5mH
6	Master DSP 제어주기 응답속도	15us
7	Slave DSP 제어주기 응답속도	15us

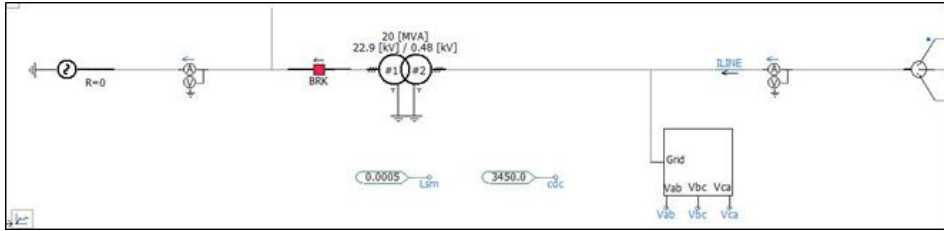


그림 28 PS-CAD를 이용한 주회로 설계

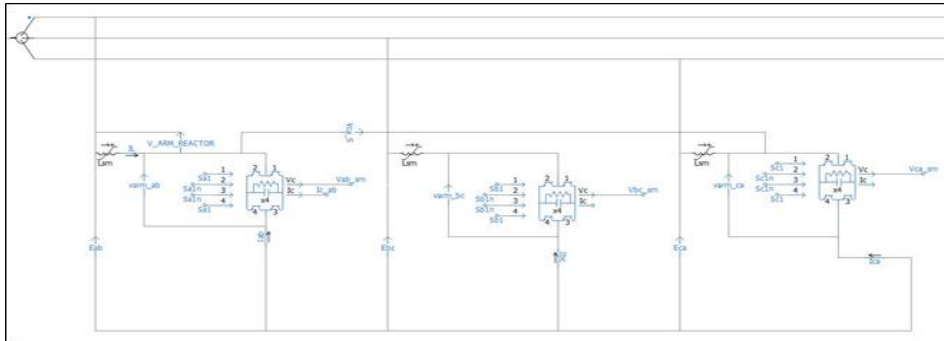


그림 29 PS-CAD를 이용한 Arm 회로 설계

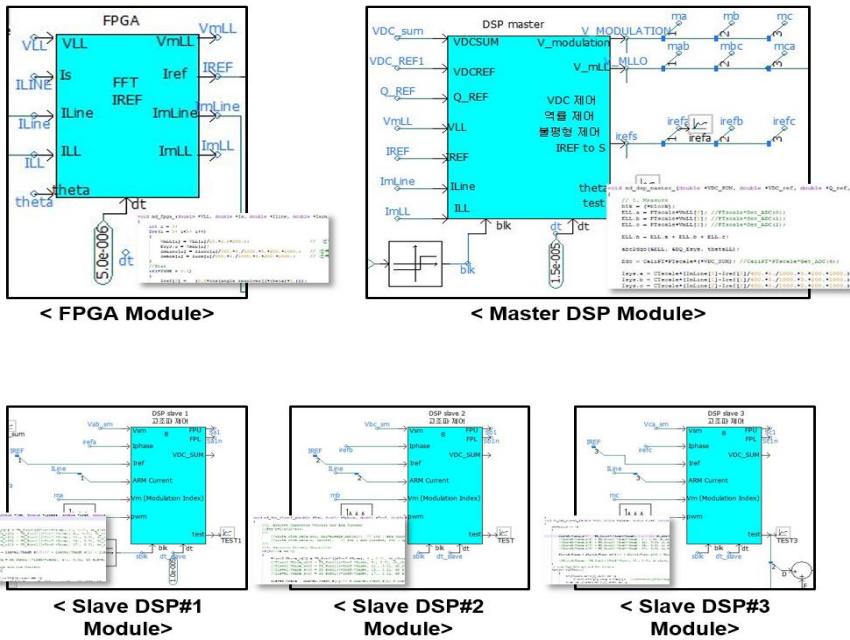


그림 30 PS-CAD를 이용한 컨트롤러 DSP 및 FPGA 설계

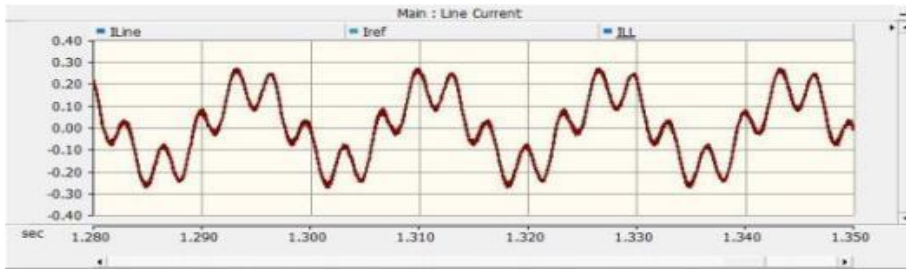


그림 31 라인 전류 파형 (5차 100A 생성 시)

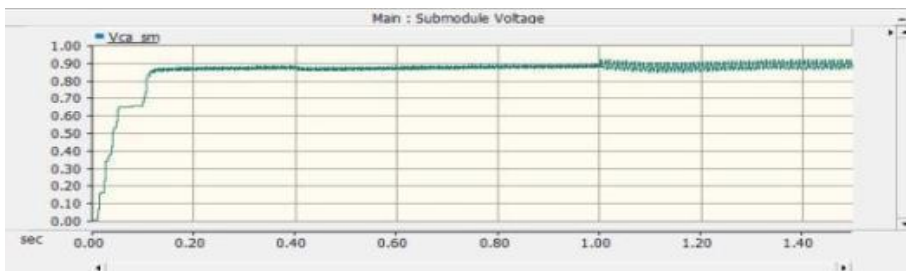


그림 32 단일 서브모듈 전압 그래프 (5차 100A 생성 시)

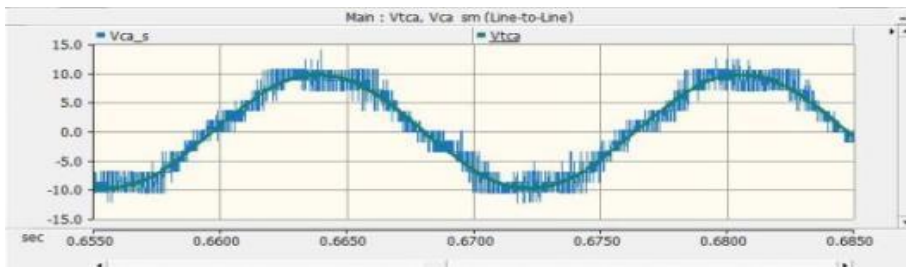


그림 33 터미널 라인 전압 파형 (5차 100A 생성 시)



그림 34 선에 흐르는 고조파 전류 파형 (5차 100A 생성 시)

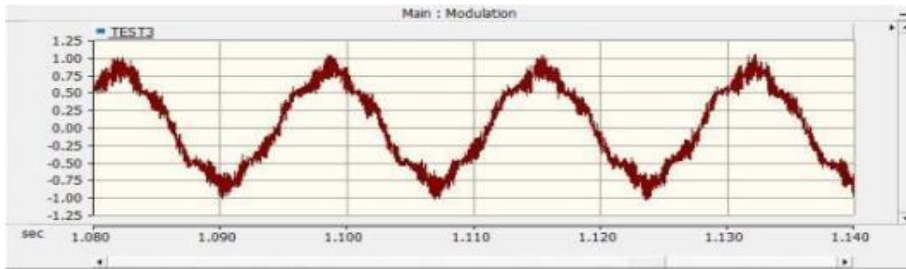


그림 35 모듈레이션 파형(5차 100A 생성 시)

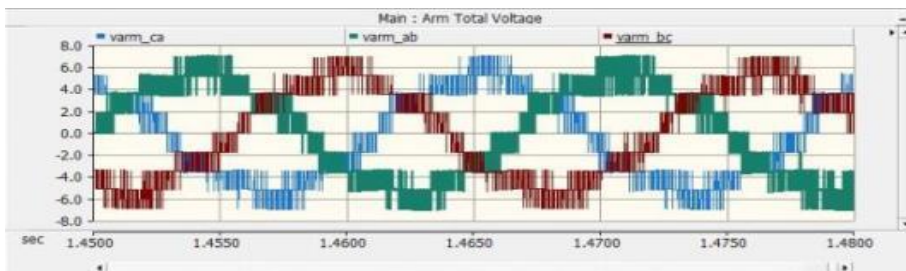


그림 36 Arm 합성 전압 파형(5차 100A 생성 시)

그림 31에서 그림 36은 5차 고조파 전류(100A) 생성 시 라인전류 및 서브모듈전압, 터미널 라인전압, 선에 흐르는 고조파 전류파형, 모듈레이션 파형 및 Arm 합성전압 파형 등 시뮬레이션 결과 그래프이다.

연구제품은 2.5m x 3m의 컨테이너 내부에 주회로기기(주차단기, 초기충전용 접촉기, 전류 검출용 CT, 초기충전용 레지스터)와 3상 스무딩 리액터, 다수의 서브모듈로 조합된 MMC 밸브와 DC 전원부, 메인 보드, 인터페이스 보드, 셀 보드로 이루어진 컨트롤러를 조합하여 최대한 컴팩트하게 제작하였다.

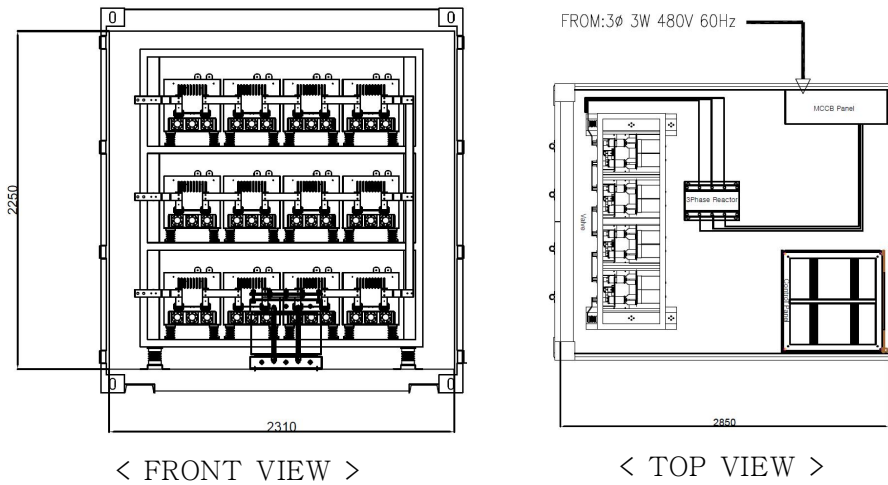


그림 37 MMC형 능동필터 연구제품 내부 구성도

또한, Solid Works 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 컨테이너 내부 온도를 최대 60°C 이하로 유지할 수 있도록 방열 해석을 수행하였다.

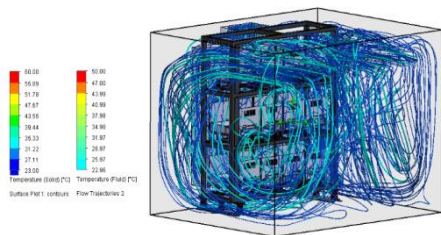


그림 38 fluid - Temperature
Max : 50° C / Min : 23° C

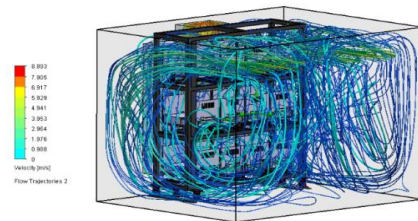


그림 39 Solid - Temperature
Max : 60° C / Min : 23° C

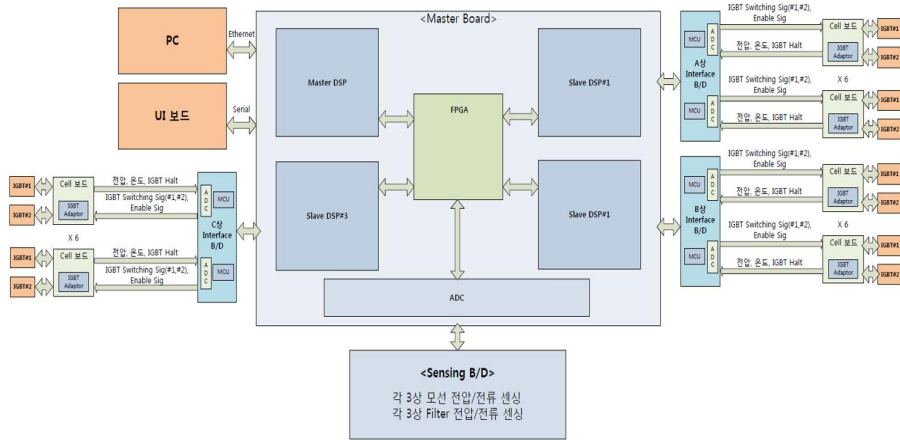


그림 40 MMC형 능동필터 컨트롤러 구성도

메인 보드는 계통의 전압과 전류 값을 측정하는 Sensing 보드를 포함하고 있으며, Sensing 보드에 의해 측정된 값을 FPGA를 통해 분석하여 보상하고자 하는 전류 Reference를 생성한다. 그 Reference를 Master DSP로 보내고, 이 값을 각 상의 스위칭용 Slave DSP에 전달하여 IGBT 제어 신호를 만들어 인터페이스 보드로 전달하게 된다.



그림 41 메인보드



그림 42 Sensing 보드

인터페이스 보드는 메인 보드로부터 받은 제어신호를 각 서브모듈 내의 셀 보드로 전달하기도 하고, 셀 보드에서 측정된 각 정보를 분석 후 메인 보드로 전달하는 기능을 수행한다.



그림 43 인터페이스 보드

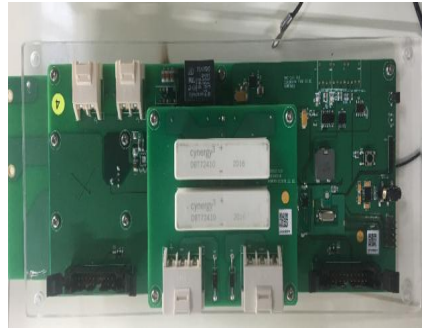


그림 44 서브모듈 셀보드

셀 보드는 인터페이스 보드로부터 수신한 제어 신호를 IGBT 사양에 맞는 전압값으로 변경된 스위칭 파형을 만들어 IGBT를 스위칭 할 수 있게 해주며, 서브모듈의 DC 전압, IGBT 온도 및 상태 등을 측정하여 인터페이스 보드로 송신해 주는 역할을 수행한다.

제작된 컨트롤러는 보호계전기 및 제어기 등의 시스템 검증에 활용되는 실시간 시뮬레이터인 RTDS(Real-Time Digital Simulator)를 사용하여 HIL(Hardware-In-the-Loop) Test를 실시하였다.

HIL test는 시뮬레이터를 사용해, 실제와 유사한 환경을 시뮬레이션으로 구성하여 외부 제어기를 시뮬레이션의 하드웨어와 연결하여 제어기 신뢰성을 검증하는 실험이다. 다시 말해 하드웨어의 디지털 및 아날로그

입력, 출력 카드 혹은 Port를 통해 외부장치와 연계하여, 소프트웨어에서 시뮬레이션의 전압 및 전류 값을 외부장치로 송신하고, 입력 전압과 전류 값을 분석하여 제어기에서 명령 신호를 다시 시뮬레이션으로 송신하여 계통의 과도해석 및 전력품질 분석을 가능하게 하는 시험을 말한다.

그림 45는 MMC형 능동필터의 컨트롤러 HIL Test의 기본적인 블록 다이어그램 이다. 컨트롤러는 DSP와 ADC 그리고 FPGA로 구성되어 있고, DSP는 Texas Instrument사의 TMS320C28345 모델을 사용했다. RTDS와 컨트롤러를 연결하기 위해서 GTIO 카드와 GTAO 카드를 사용했으며, 컨트롤러는 다이오드 정류기에서 주로 나오는 고조파인 5차, 7차, 11차, 13차를 제거하도록 설계되었다.

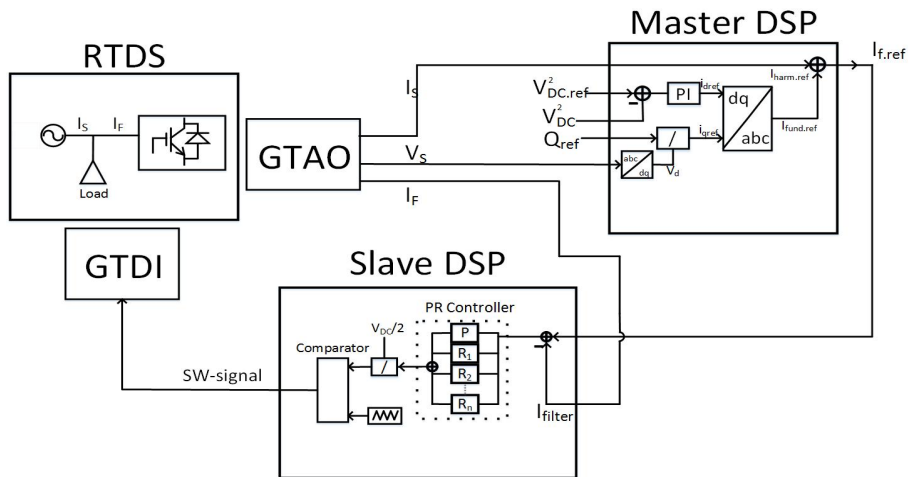


그림 45 HIL test의 Block Diagram

먼저, RTDS에서는 GTA0 카드를 거쳐 제어기 역할을 하는 DSP로 전압, 전류 등 계통 정보를 보내고, DSP에서는 그 정보들을 포함하여 스위칭 신호들을 만들어 GTDI를 통해 RTDS로 다시 보내는데, 이때의 스위칭 신호는 고조파 제어를 위함이다.

그림 46과 같이 5-Level Half-Bridge Type MMC형 능동필터의 시뮬레이션 모델링을 수행하여 그림 47~49과 같이 실제 HIL Test를 수행하였다.

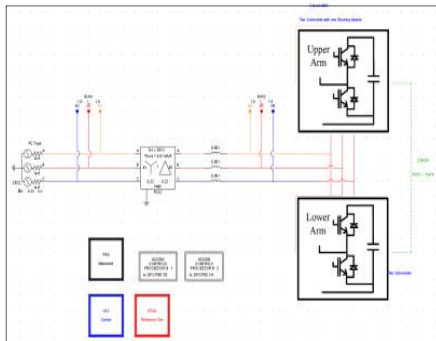


그림 46 RS-CAD 시스템 모델링



그림 47 HIL Test 구성 사진 -1



그림 48 HIL Test 구성 사진 -2

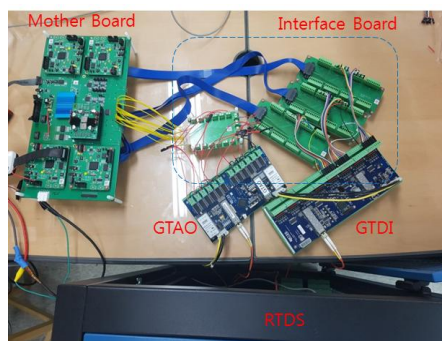


그림 49 HIL Test 구성 사진 -3

MMC형 능동필터의 HIL Test 결과를 확인하기 위해 GTA0를 거쳐 나오는 계통 전류를 오실로스코프로 확인을 하였다. 능동필터 운전하기 전의 계통 전류 데이터를 기준하여, 순차적으로 5차, 7차, 11차, 13차의 고조파를 제거해 나갈 때의 계통 전류를 살펴보았으며, 보다 구분이 쉽고 명확한 비교를 위해 기본주파수의 크기를 1로 설정하였을 때의 고조파의 크기를 측정하였다.

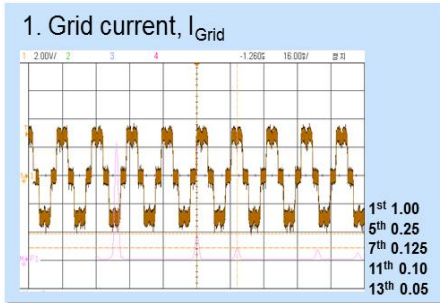


그림 50 고조파 제어 전 전류

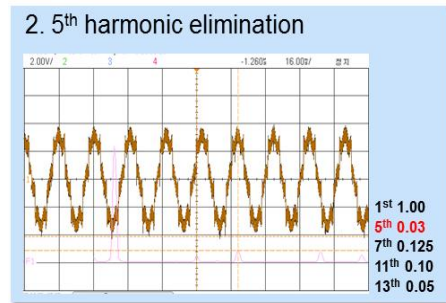


그림 51 5차고조파 제어 후 전류

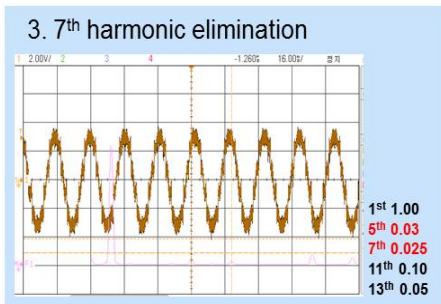


그림 52 5,7차고조파 제어 후 전류

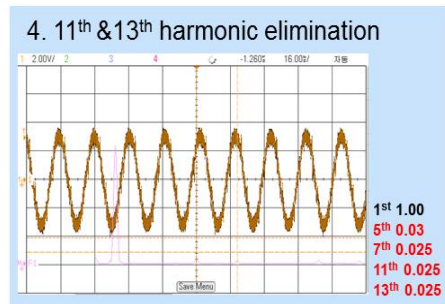


그림 53 5,7,11,13차 고조파 제어 후 전류

시험의 결과는 표 10과 같이 요약할 수 있다. 고조파의 차수가 높아 질수록 감소하는 비율이 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 차수가 높은 고

조파의 크기 또한 작으므로 고조파 제어가 잘된 것으로 생각할 수 있다. 또한 그림 50과 그림 53을 비교해보면 계통 전류가 정현파에 가까워진 것을 확인할 수 있다.

표 10. 고조파 제어 전후 비교

구분	제어 전	제어 후	비율
1차	1.00	1.00	100%
5차	0.25	0.03	88%
5,7차	0.125	0.025	80%
5,7,11차	0.1	0.025	75%
5,7,11,13차	0.05	0.025	50%

그림 54와 같이 컨테이너 형태의 연구제품을 제작하여 표6에 제시한 MMC형 능동필터 개발품 성능 지표를 만족하기 위한 공인 인증 시험을 수행하였으며, 그 결과를 표 10에 정리하였다.



그림 54 연구제품(컨테이너 구성)

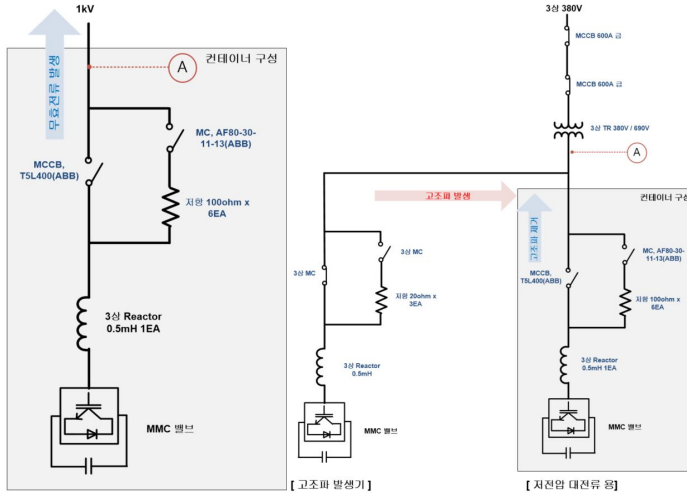


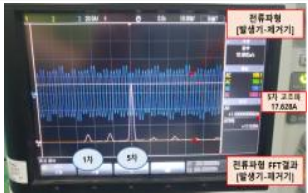
그림 55 시험회로-1

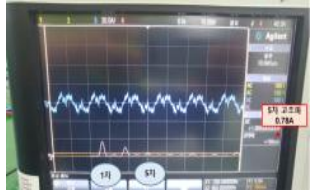



그림 56 시험회로-2



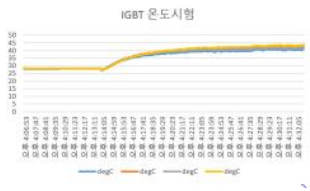

(1kV/100A 생성)

(고조파 생성 및 제거 시험)

표 11. 시험내용 및 결과

시험 번호	시험 항목	시험내용 및 결과	관련사진 및 규격
1	전자파 방해시험	전도성 방해 측정 : 적합 불연속 방해 측정 : 적합 방사성 방해 측정 : 적합 정전기 방전 내성시험 :적합 전기적 빠른과도현상 시험:적합 서지 내성 시험 : 적합 전압강하 및 순시정전 내성시험:적합 방사 무선주파수 전기자기장 내성시험 : 적합 전원 주파수 자체 내성시험 : 적합	IEC61000-6-4:2011 IEC61000-6-4:2011 IEC61000-6-4:2011 IEC61000-4-2:2008 IEC61000-4-4:2012 IEC61000-4-5:2014 IEC61000-4-11:2004 KN 24 : 2011 KN 24 : 2011
2	고조파제거 응답속도	별도로 구성된 고조파 발생기에서 발생한 고조파를 피시험품에 고조파 제거 신호 발생 후 5% 이하로 만드는 속도 확인(1 Cycle 이하)	 <p>그림 57 고조파 제거기 동작 전 전류파형</p>

시험 번호	시험 항목	시험내용 및 결과	관련사진
2	고조파제거응답속도	<p>시험결과 : 발생기가 5차 고조파 17.628A를 발생한 상태에서 제거기 동작 시 0.78A로 4.4% 까지 감쇄</p> <p>☞ 이상 없음</p> <p>참고사항 : 공인인증 기관인 KTL 성적서에는 동작시간이 들어가 있으며, 신호 발생 전 1cycle, 신호 발생 후 1cycle로 별도 분석하여 비교</p>	 <p>그림 58 고조파제거기 동작 후 전류파형</p>  <p>그림 59 고조파 제거 전, 후 파형</p>
3	무효전력 보상응답속도	<p>피 시험품에서 무효전류 100A 발생신호 발생 후 최대 전류값의 90%까지 도달하는 시간 (2 Cycle 이하)</p> <p>시험결과 : 발생 신호 2 cycle인 33.3ms 이내에 Peak 값 기준 90%인 127A 도달</p> <p>☞ 이상 없음</p>	 <p>그림 60 무효전류 발생신호 및 파형</p>
4	최대출력 전류	<p>피 시험품에서 최대로 출력 가능한 전류 측정(100A 이상)</p> <p>시험결과 : RMS 기준 100A 이상</p> <p>☞ 이상 없음</p>	 <p>그림 61 무효전류 발생 파형</p>

시험 번호	시험 항목	시험내용 및 결과	관련사진
5	내전압 시험	<p>1) 주회로-접지 간 상용주파 내전압 5kV 인가하여 1분 이상이 없을 것 ☞ 이상 없음</p> <p>2) 제어회로 내전압시험 2kV AC 인가하여 1분 동안 이상이 없을 것 ☞ 이상 없음</p>	 <p>그림 62 주회로 내전압시험</p>  <p>그림 63 제어회로 내전압 시험</p>
6	IGBT 운전 온도	<p>피 시험품에서 전류 100A 공급 시 IGBT 접촉 히트싱크 온도 측정 (125℃ 이하) 시험 결과 : 최대 44℃ ☞ 이상 없음</p>	 <p>그림 64 IGBT 온도 포화 시험</p>
7	고조파보상능력	실증 시험시 확인	-
8	판넬내부 온도	실증 시험시 확인	-
9	다중레벨의 사용레벨 확인	<p>- 사용된 서브모듈의 수량 확인(4EA) 및 생성 전압 파형에서 5-Level 확인 시험결과: 선간전압 기준 10-Level, 상전압 기준 5-Level ☞ 이상 없음</p>	 <p>그림 65 시스템 발생 전압</p>

제 4 장 사례 연구

본 장에서는 앞선 장에서 제작한 연구제품을 발전소내부하 모선에 병렬 연결하여 MMC형 능동필터의 성능을 확인하였다.

제 1 절 연구제품 설치 위치 선정 및 설치

발전소 부하는 상시 발전중인 중요 부하이기 때문에, 성능 검증에 최적화된 설치 위치를 숙고하여 선정했으며, 설치 및 실증 시험이 용이한 여유 공간이 있는 장소로 해수전해설비를 선정하였다.

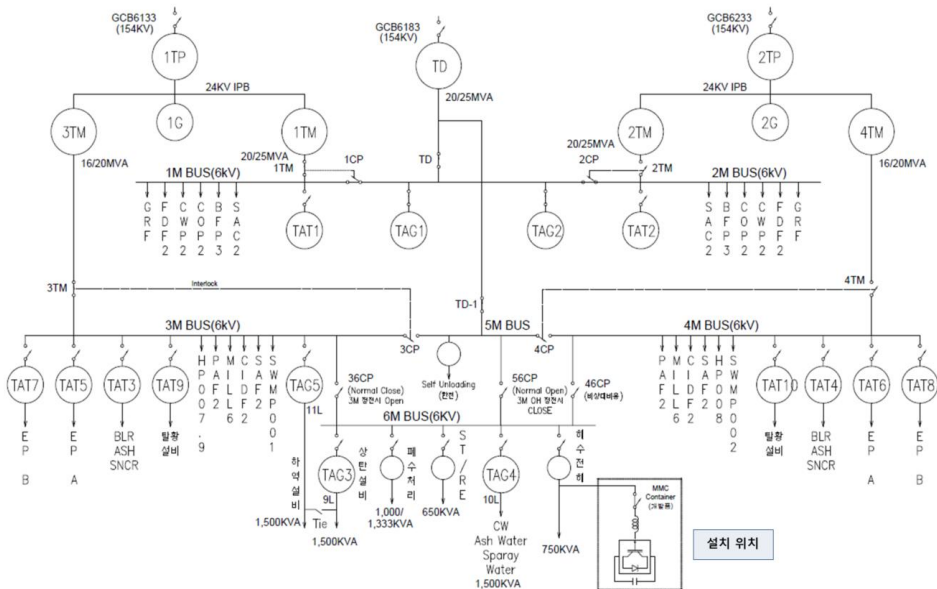


그림 66 연구제품 설치도면



그림 67 MMC형 능동필터 연구제품 안치



그림 68 MMC형 능동필터 연구제품 설치(파워케이블 및 CT 설치)

제 2 절 MMC형 능동필터 성능 시험

이 절에서는 연구제품 성능시험 결과에 대해 설명하였다. 시험을 위한 MMC형 능동필터는 발전소내 해수전해설비 부하에 설치했으며, 능동필터 100A 용량에 맞는 전원 케이블 및 접지 케이블, CT 및 통신 케이블을 설치하여 해수전해설비의 전압 및 전류 데이터를 받아 능동필터의 컨트롤러에서 실시간으로 전력 품질을 확인할 수 있게 되었으며, 설치한 능동필터를 운전하여 고조파를 저감하였다.

표 12. 차수별 고조파 제한치

차수별 고조파 전류 제한치 (%)	3≤h<11		11≤h<17		17≤h<23
	7.0		3.5		2.5
	5차	7차	11차	13차	17차
	7.0	7.0	3.5	3.5	2.5

표 13. 차수별 고조파 측정값

측정지점	전압[V]	전류[A]	역률[%]	왜형률(%)						
				전압THD	전류THD					
해수전해설비	430	234	64	3.2	26.5					
	고조파 함유율(기본과 기준)									
	전압[%]			전류[%]						
	5차	7차	11차	13차	17차	5차	7차	11차	13차	17차
	1.5	0.7	1.3	0.8	1.0	24.0	5.5	7.5	3.7	4.2

※ 해수전해설비의 5차, 11차, 13차, 17차 전류 고조파 함유량이 차수별 고조파 제한치 값을 초과함.

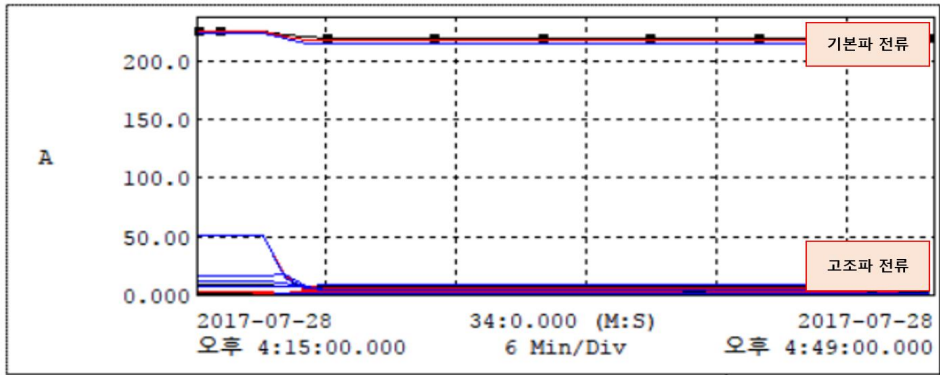


그림 69 전류 고조파 트렌드

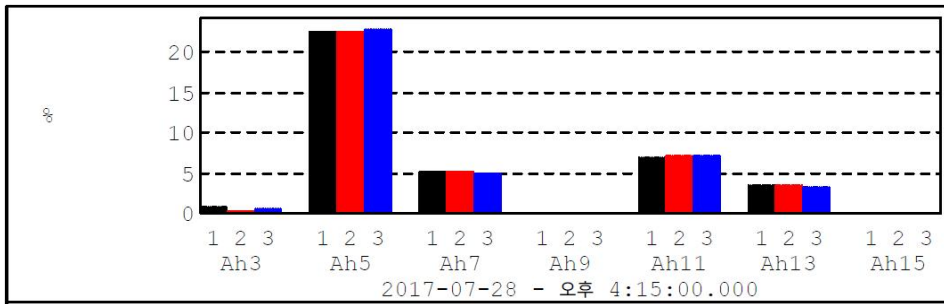


그림 70 차수별 고조파 전류 그래프

Name	Avg	Min	Max	Units
(A)Ah1 Line1	220.8	219.8	225.1	A
(A)Ah1 Line2	219.1	217.8	226.1	A
(A)Ah1 Line3	216.0	214.4	224.0	A
(A)Ah2 Line1	2.973	1.335	3.518	A
(A)Ah2 Line2	4.125	2.207	4.576	A
(A)Ah2 Line3	1.941	1.315	2.145	A
(A)Ah3 Line1	2.560	2.002	2.857	A
(A)Ah3 Line2	1.649	0.904	1.961	A
(A)Ah3 Line3	1.499	1.292	1.716	A
(A)Ah4 Line1	1.990	0.900	2.433	A
(A)Ah4 Line2	1.903	0.678	2.396	A
(A)Ah4 Line3	1.765	0.672	2.154	A
(A)Ah5 Line1	11.10	3.737	51.10	A
(A)Ah5 Line2	11.17	3.703	51.78	A
(A)Ah5 Line3	11.44	3.861	51.74	A

Name	Avg	Min	Max	Units
(A)Ah6 Line1	0.975	0.000	1.548	A
(A)Ah6 Line2	0.935	0.000	1.097	A
(A)Ah6 Line3	44.12E-3	0.000	0.224	A
(A)Ah7 Line1	8.024	6.636	12.16	A
(A)Ah7 Line2	6.750	5.445	12.21	A
(A)Ah7 Line3	7.281	6.218	11.42	A
(A)Ah8 Line1	1.411	0.890	1.541	A
(A)Ah8 Line2	1.618	0.883	1.961	A
(A)Ah8 Line3	1.348	0.657	1.502	A
(A)Ah9 Line1	1.133	0.450	1.327	A
(A)Ah9 Line2	0.631	0.441	0.871	A
(A)Ah9 Line3	0.788	0.438	0.866	A
(A)Ah10 Line1	0.669	0.445	0.885	A
(A)Ah10 Line2	0.200	0.000	0.436	A
(A)Ah10 Line3	0.863	0.657	1.082	A

Name	Avg	Min	Max	Units
(A)Ah11 Line1	10.33	6.957	17.80	A
(A)Ah11 Line2	10.57	7.187	18.10	A
(A)Ah11 Line3	10.80	7.539	17.97	A
(A)Ah12 Line1	1.107	0.000	1.327	A
(A)Ah12 Line2	6.266E-3	0.000	0.219	A
(A)Ah12 Line3	0.964	0.000	1.288	A
(A)Ah13 Line1	6.019	5.275	8.329	A
(A)Ah13 Line2	6.151	5.663	8.166	A
(A)Ah13 Line3	5.474	4.931	8.107	A
(A)Ah14 Line1	1.587	0.667	1.761	A
(A)Ah14 Line2	1.013	0.441	1.090	A
(A)Ah14 Line3	0.807	0.438	0.866	A
(A)Ah15 Line1	31.83E-3	0.000	0.225	A
(A)Ah15 Line2	0.251	0.218	0.452	A
(A)Ah15 Line3	0.599	0.429	0.672	A

Name	Avg	Min	Max	Units
(A)Ah17 Line1	4.097	3.077	8.779	A
(A)Ah17 Line2	4.293	3.267	9.044	A
(A)Ah17 Line3	3.926	2.787	9.184	A
(A)Ah18 Line1	0.799	0.000	1.327	A
(A)Ah18 Line2	0.548	0.000	0.654	A
(A)Ah18 Line3	0.160	0.000	0.224	A
(A)Ah19 Line1	7.481	4.005	8.627	A
(A)Ah19 Line2	6.809	3.752	7.895	A
(A)Ah19 Line3	6.868	3.725	8.007	A
(A)Ah20 Line1	0.832	0.223	0.900	A
(A)Ah20 Line2	0.925	0.441	1.090	A
(A)Ah20 Line3	1.145	0.657	1.288	A
(A)Ah21 Line1	0.127	0.000	0.225	A
(A)Ah21 Line2	0.132	0.000	0.226	A
(A)Ah21 Line3	0.482	0.429	0.672	A

그림 71 차수별 고조파 전류 측정값

표 13. 능동필터 설치 전·후 차수별 고조파 전류 측정값

구분		종합왜형률		5차	7차	11차	13차	17차
		전압	전류					
능동필터 설치 전 고조파(%)	R상	3.2	1.9	22.7	5.6	7.2	3.7	3.9
	S상	3.2	1.9	23.1	5.5	7.3	3.7	4.2
	T상	3.2	1.9	22.9	5.1	7.3	3.5	4.1
능동필터 설치 후 고조파(%)	R상	25.6	8.1	1.9	3.3	1.8	1.9	1.5
	S상	25.9	8.0	1.7	2.6	2.0	2.2	1.4
	T상	26.0	8.2	1.7	3.0	2.1	1.9	1.4

표 14. 능동필터 설치 전·후 고조파 전압 및 전류 종합 왜형률 측정 그래프

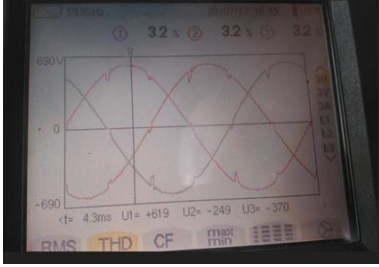
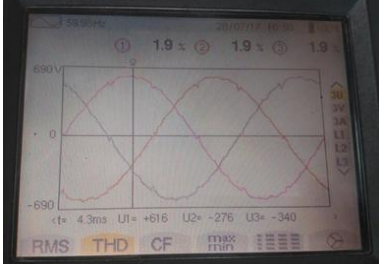

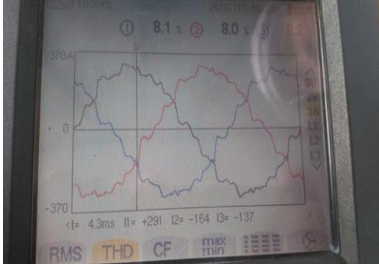
구분	설치 전 측정 그래프	설치 후 측정 그래프
고조파 전압 종합 왜형률 (%)		
고조파 전류 종합 왜형률 (%)		

표 15. 능동필터 설치 전·후 차수별 전류 고조파 스펙트럼

구분	설치 전 측정 그래프	설치 후 측정 그래프
5차	<p>Ah05 22.7% 51.1A 52.8A 51.2A +148° -107° +160°</p>	<p>Ah05 1.9% 1.7% 1.7% 4.2A 3.7A 3.6A +174° +173° +163°</p>
7차	<p>Ah07 5.5% 5.5% 6.1% 12.6A 12.4A 11.4A +148° -107° +160°</p>	<p>Ah07 3.3% 2.6% 3.0% 7.3A 5.7A 6.4A -174° -165° -105°</p>
11차	<p>Ah11 7.2% 7.3% 7.3% 16.2A 16.5A 15.4A -65° -65° -67°</p>	<p>Ah11 1.8% 2.0% 2.1% 4.0A 4.4A 4.5A -134° -116° -126°</p>
13차	<p>Ah13 9.7% 9.7% 9.3% 9.3A 9.4A 7.9A -67° -66° -66°</p>	<p>Ah13 1.9% 2.2% 1.9% 4.2A 4.8A 3.9A -114° -117°</p>
17차	<p>Ah17 3.9% 4.2% 4.1% 5.8A 5.5A 5.2A +107° -160° -160°</p>	<p>Ah17 1.5% 1.4% 1.4% 3.3A 3.0A 3.0A +107° +104° +102°</p>

제 5 장 결 론

본 논문에서는 기존의 일반형 능동필터 방식의 단점들을 보완한 고조파 저감(Harmonic Mitigation) 및 역률 개선 기능을 갖춘 모듈러 다중레벨(5레벨) 컨버터(Modular Multi-Level Converter) 기반의 능동형 고조파 필터를 설계, 제작하여 발전소 주요 고조파 발생원 중의 하나인 해수전해설비에 병렬로 연결하여, 발생하는 고조파 제거 및 기타 전력품질 개선을 위한 실증 시험을 통하여 MMC형 능동필터의 성능을 확인하였다.

MMC형 능동필터를 설치한 결과, 비선형 부하에서 발생하고 있는 주요 전류 차수별 고조파 함유량이 제한된 값 이내로 저감되었음을 확인하였다. 또한, 기존의 2레벨 전압형 컨버터 방식의 고조파 필터와 비교하여 낮은 손실로 운전 되는 것을 확인하였으며, 낮은 손실로 능동필터 자체의 발열이 현저히 줄어들었음을 확인하였다.

보다 많은 서브모듈을 사용하여 고압 및 특고압 이상의 배전 선로 및 송전 선로에 적용 가능한 모듈러 다중레벨 컨버터 기술을 축적해나간다면, 기하급수적으로 늘어나고 있는 분산전원의 전력 품질 문제 해결에 큰 역할을 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 윤광희, 정영식, 문영현. (2016). 발전소내전력 전력품질 개선으로 안정성 및 발전효율 향상에 관한 연구. 대한전기학회 학술대회 논문집, 141-142.
- [2] 박신현, 김장목, 임익현, 류호선. (2003). 정지형 주파수 변환 장치를 활용한 대용량 동기 발전 전동기 운전에 관한 연구. 전력전자학회 논문지, 8(6), 496-503.
- [3] Yun, Gwang-Hee, Lee, Hee-Jin, “A Study on Development of SVC to improve Harmonics and Power factor of Power plant” , The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 11/01/2011, Vol.60(11), pp.2109-2118
- [4] 한국전력공사, 전기공급약관 기본공급약관시행세칙 제5장 전기사용에 따른 협력 제 26조(2018)
- [5] Moreira, Alexandre C., Paredes Helmo K. M., de Souza Wesley A., Marafao, Fernando P., Da Silva, Luiz C. P., “Intelligent Expert System for Power Quality Improvement Under Distorted and Unbalanced Conditions in Three-Phase AC Microgrids” , IEEE Transactions on Smart Grid, Nov. 2018, Vol.9(6), pp.6951-6960
- [6] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani,(2010). 『Voltage-Sourced

Converters in Power Systems : Modeling, Control, and Applications』

- [7] Yun-Mo Kang, Kyung-Chul Kim, “A Study of the Current Harmonics Mitigations using a Modular Multilevel Converter Based Shunt Active Power Filter” , 조명·전기설비학회논문지 32(2), 2018.2, 104-109 (6 pages)
- [8] Rohner, S., Bernet, S., Hiller, M., and Sommer, R., “Modulation, Losses and Semiconductor Requirements of Modular Multilevel Converter” , IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 8, pp. 2633-2642, 2010.
- [9] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std 519™-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)
- [10] 유승환, 신은석, 최종윤, 한병문. “축소모형을 이용한 MMC의 Redundancy Module 동작분석” , The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.63, No.8, pp. 1046-1054, 2014.
- [11] 김원경, 심재웅, 허건. (2013). 2레벨 컨버터와 모듈형 다중레벨 컨버터의 고조파 비교 대조분석. 대한전기학회 학술대회 논문집, 1058-1059.
- [12] Wang Can, Ooi Boon-Teck, Hao Quanrui, “Reduction of low-frequency harmonics in modular multilevel converters (MMCs) by harmonic function analysis” , IET Generation,

Transmission & Distribution (Volume: 8, Issue: 2, February 2014)

- [13] Rodriguez, J., Bernet, S., Bin, W., Pontt, J.O., and Kouro, S.,
“Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives,” Industrial Electronics, IEEE Transactions, Vol. 54, No. 6, pp. 2930-2945, 2007.
- [14] Kabalci E., Colak I., Bayindir R., Pavlitov C.,
“Modelling a 7-Level Asymmetrical H-Bridge Multilevel Inverter with PS-SPWM Control” International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference, Sept. 2011, pp.578-583
- [15] 홍정원, 한병문. (2014). “동작 분석을 위한 10kVA Modular Multi-level Converter System 구축”

Abstract

A Study on Electrical Power Quality Improvement by Active Filter Based on MMC Technology

Young Sik Jeong

Graduate School of Engineering Practice

Seoul National University

Approximately 5% of the total generated power is used for residential load in the standard coal-fired power plant which is capable for 612[MVA], 525[MW] generation in Korea. Most of the residential loads are inductive operating at a low power factor of 77 ~ 78%. In general, several problems are caused by the low power factor operation of the 6.9kV power system of the power plant. The starting failure problem occurs due to the

instantaneous voltage drop when large capacity motors start. Consequently, the load loss of the auxiliary transformer increases due to the enlarged reactive power. Therefore, the power generation efficiency can be poor.

Recently, the technology of the power electronics has been rapidly developed, and the large capacity power converters are applied to power plants diversely. However, all the medium-voltage and low-voltage devices incorporating power converters are nonlinear loads and they produce large harmonics on the electric power network. For instance, static frequency converter, which adjusts motor speed with thyristor valves and generator exciter system that regulates the voltage and reactive power of the generator, is a typical medium-voltage nonlinear load. Electrostatic Precipitator and Seawater Electro-Hypochlorination System are typical low-voltage nonlinear loads. As the number of equipment generating harmonics exceeding a limit of total harmonic distortion (THD) in a power plant increases, the electric power quality gets worse. Particularly, the harmonics cause malfunction of electronic control units and protection relays. This leads to a frequent breakdown of main power generation facilities and, shortens a lifespan of the equipment.

In order to avoid the aforementioned problems, the proper

functional equipment is necessary. Generally, there are three types of equipment supplying reactive power to the system for improvement of low power factor and prevention of voltage drop. One of them is the capacitor banks including capacitors connecting with series reactors. Another is static var compensator(SVC) controlled by thyristor valves and the other is static var generator(SVG) which consists of insulated gate bipolar transistor(IGBT) components. Regarding equipment for harmonic elimination, there are two types. One is the shunt passive power filter(SPPF) that absorbs harmonic current of a certain order. Another is the shunt active power filter(SAPF) that eliminates harmonic currents of orders up to 50th in real time. A 2 level voltage-type converter is applied to the SAPF in order to analyze the harmonics from nonlinear loads in real time. SAPF generates currents in the opposite direction waveform in order to give an offset to the harmonic currents from the nonlinear loads.

However, various unintended matters shall happen in applying the typical type of power factor correction devices or active filter to the power plants. Utilization of power factor correction equipment in the power plant is dangerous, especially when an excessive harmonic current flows into the grid. It may cause a

very severe trouble due to the resonance phenomenon.

Using 2 level converter type active filters in power plant can lead to abnormal voltage problems which influence generating facilities and increase the loss due to ultra fast and frequent switching of IGBT.

Therefore, this paper, proposes an active filter based on the modular multi-level converter(MMC) which overcomes the flaws of typical power factor correction devices and harmonic filters. The prototype of the MMC active filter(1kV 100A) is proposed with the control algorithms and techniques. In addition, the result of the reliability verification test through PS-CAD and RTDS and HIL(Hardware in-the Loop) is described.

Finally, the prototype of MMC active filter is installed at the Seawater Electro-Hypochlorination System load in the power plant, and the harmonic elimination test is properly carried on according to the instruction suggested. As a result, all of the MMC active filter tests satisfy the performance index of the active filter, and 5th, 7th, 11th, 13th, and 17th harmonic currents generated from the nonlinear load are reduced to below the current distortion limits of individual harmonic order according to IEEE 519 standard.

It is also possible to develop a ultra high voltage MMC active filter which is applicable to high voltage direct current(HVDC) transmission line by developing the MMC technology with connecting more and more sub-modules in series in order to increase the operating voltage.

Furthermore, it is an excellent solution to solve the power quality problems caused by the rapidly growing of the distributed power system.

Keywords : Power quality improvement, Harmonic elimination, Modular multi-level converter.

Student number : 2016-22257