미래철도기술개발사업 제5차년도 최종보고서

R&D/03교통핵심-D01

차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발

2008. 5. 31

주관연구기관/한국철도기술연구원
협동연구기관/(주)시엔에이전기
위탁연구기관/성균관대학교

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

Construction & Transportation R&D Report

제 출 문

국토해양부 장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발”의 5차년도 최종보고서로 제출합니다.

2008. 05. 31

주관연구기관 : 한국철도기술연구원
원장 : 최 성 규
협동연구기관 : (주) 시엔에이전기
대표이사 : 인 웅 식
위탁연구기관 : 성균관대학교
산학협력단장 : 이 영 관

■ 총 괄 연 구 책 임 자 /	책임연구원	김용기	과제관리 및 총괄
■ 주관연구기관 참여연구원 /	수석연구원	정상기	시스템설계
	책임연구원	한문섭	시스템설계
	선임연구원	김주락	시스템설계
	선임연구원	김진환	시스템설계
	선임연구원	정호성	시스템설계
	선임연구원	배창한	시스템설계
	선임연구원	장동욱	시스템설계
	연구원	이원섭	시스템설계
■ 협동연구기관 참여연구원 /	연구소장	양영철	협동 총괄
	선임연구원	고중현	시스템설계
	선임연구원	박종필	시스템설계
	선임연구원	신현구	시스템설계
	선임연구원	박문원	시스템설계
	선임연구원	김일배	시스템설계
■ 위탁연구기관 참여연구원/	교수	원충연	위탁 총괄
	연구원	이원철	알고리즘 개발
	연구원	김재형	알고리즘 개발
	연구원	이주혁	알고리즘 개발
	연구원	정두용	알고리즘 개발
	연구원	박상훈	알고리즘 개발
	연구원	김준구	알고리즘 개발

요 약 문

Ⅰ. 제목

차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 중요성

세계적으로 다변화하는 에너지 환경 속에서 경쟁력을 유지해 나가기 위해서는 에너지 소비 구조를 저소비형으로 개선해 나가면서 화석에너지원을 대체할 신재생에너지원의 이용 을 확대하는 것이 필요하다. 더구나 교토의정서의 비준(2005년 2월)의 영향으로 선진국에서는 에너지소비효율과 온실가스 배출량을 새로운 무역장벽으로 이용하려는 움직임을 보이고 있다. 이처럼 변화하는 에너지 환경 속에서 우리 경제가 경쟁력을 유지해 나가기 위해서는 우리 사회의 에너지소비구조를 저소비형으로 개선해 나가면서 화석에너지의 소비를 줄이면서 잉여에너지의 활용과 대체할 신재생에너지원의 이용을 확대하는 것이 필요하다.

UIC에서는 전동차의 운전패턴에 따른 에너지 소비량을 측정하는 계기를 부착하여 운전의 표준모델을 제시하여 에너지 절감을 유도하고 있다. 또한 선진철도의 직류급전 전철시스템에서 전동차의 회생제동에 따른 회생전력 흡수 및 이용방안으로 회생인버터를 적용하고 있는 실정이다.

국내외적으로 에너지 이용 효율향상 및 재이용, 화석연료의 사용으로 인한 온실가스 저감을 위한 에너지 발전 및 전력공급에 대한 기술개발이 선진국에서 급속히 진행되고 있으며, 국가의 수송정책도 도로위주의 중심에서 탈피하여 환경친화적인 철도교통으로 정책이 변화되고 있다. 국내의 전철화 사업은 범국가적인 차원에서 진행되어

2012년에는 약 85.9%가 전철화 예정이며, 전철노선의 복선화 및 신선로의 증가로 인해 전기에너지 사용량이 증대될 것으로 예상된다. 이러한 상황을 고려해 볼 때 향후 에너지 절약은 국가경제 성장의 주요 요소로 작용할 것으로 판단되며, 국가의 에너지원 고갈은 국내외적으로 심각한 문제를 야기할 것으로 전망된다.

따라서 철도산업부문에서의 전철화의 발전으로 전기철도에서 사용되는 에너지의 효율화 및 대량의 전기에너지를 사용하게 된 전철시스템에서의 에너지 절약대책과 에너지 재사용을 위한 온실가스저감 및 운용 효율화 방안 마련이 시급한 실정이다.

세계적으로 전기철도에서는 기존에 주로 사용하던 기계적인 제동방식을 보완하여 차

량 제동시 또는 하구배 운행시 견인전동기를 이용한 전기적 제동을 병용하여 사용하고 있다. 전기제동 시에는 견인전동기를 발전기로 사용하기 때문에 제동 중 에너지가 생성되며 이를 회생에너지라 하고 급전시스템에 공급하게 되면 에너지의 효율을 높일 수 있다. 전철시스템에서 회생 에너지양은 차량을 가속하기 위해 투입되는 에너지의 45~47%정도로서 약 20%정도는 타 전동차에서 소모되며, 에너지의 20~27%는 잉여 전력으로 남게 된다. 특히 직류철도에서는 변전소에서 수전받은 3상교류를 직류로 변환하는데 있어 부산지하철을 제외한 다른 직류전기철도 시스템들은 다이오드 정류기를 사용하고 있기 때문에, 잉여회생전력에 의해 가선 전압은 급작스럽게 상승 또는 하강을 반복한다. 이러한 가선전압의 불안정은 변전소의 정류기 및 차량에 탑재된 전력 변환기의 장애를 일으킬 수 있기 때문에 잉여 회생전력을 강제로 소모시켜 안정된 가선전압을 만드는 장치가 반드시 필요하다. 일반적으로 차량에 저항기를 탑재하여 회생에너지를 소비하는 방법이 주로 사용되었으나 차량중량의 증가, 저항기의 발열로 인한 온도상승, 기계 제동 사용에 따른 제동슈의 마모로 인해 수요가 증가하고 있다.

따라서 잉여에너지 손실을 막기 위해서 잉여전력을 PWM 회생인버터 시스템을 이용하여 회생제동에 발생하는 가선전압의 상승분을 3상 교류 모선으로 보낼 경우, 차량 저항기로 소비했던 회생에너지를 3상 교류측으로 보내어 전기철도 고압배전에서 소비할 수 있어 직류전기철도 에너지 절감을 기대할 수 있다. 차량 견인 시에는 능동전력필터 기능을 수행하여 변전소 내 정류기 및 고압배전에 따른 수전측 전력품질에 대한 보상을 수행하여 기존에 필요했던 고조파필터 등을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 제동 슈의 절약 및 저항기의 온도상승에 따른 지하 환경 개선에 크게 기여할 수 있다.

본 연구에서는 1.5MVA 에너지 회생장치 개발을 통해 직류 1500V 전압을 사용하는 도시철도시스템에서 하강 경사로 주행이나 감속 운행 시 발생되는 잉여분의 회생전력을 대용량 전력변환장치를 사용하여 교류모선으로 회생시켜 직류 가선 전압의 상승을 억제하여 전철시스템의 안정성을 확보하고, 잉여 에너지 재이용을 통해 에너지를 절약하는데 있다. 또한 회생인버터 시스템의 적용으로 가선전압이 안정된 범위에 있을 때에는 능동전력필터의 기능을 수행하여 계통상의 고조파 전류보상, 역률저하, 전압의 왜형이나 불평형 등의 전력품질을 보상하는 기능을 갖는 장치이다. 이렇게 두 가지 동작 모드를 구현하기위한 대용량 전력변환장치의 제어 알고리즘 개발과 현장적용을 통한 신뢰성 확보가 병행되어야 하며, 에너지 회생 및 관련 기술을 선점하기 위해서는 국내 기술에 의한 독자적인 기술 확보 역시 향후 세계적인 추세에 대응하기 위한 바람직한 방안이라 할 수 있다.

Ⅲ. 연구개발 목표 및 범위

직류급전시스템에서 회생전력의 재사용을 위한 에너지 회생 시스템을 개발하고자 1.5MVA 회생인버터 시작품 제작 및 실계통 적용을 완료 하였다.

(1) 최종목표

직류 1500V 도시철도 시스템의 잉여회생전력을 활용하기 위한 능동전력필터 기능을 갖는 1.5MVA 회생인버터 개발

- 적용대상 : 직류전철변전소
- 용량 : 1.5MVA (750kVA × 2EA)
- 기능사양 : - 직류 회생 인버터
  - 무효전력보상 기능
  - 전류고조파 억제기능

(2) 연구개발내용

○ 기초기술 개발 및 전력변환기 기본 모델 개발

○ 축소형 회생인버터 개발

○ 회생인버터 시작품제작 및 주변장치 설계

○ 회생인버터 성능평가

○ 실계통 적용 및 신뢰성평가

Ⅳ. 연구개발결과

본 연구에서는 직류 전원으로 1,500V 전철시스템에서 회생되는 잉여 직류전력을 교류모선으로 회생하면서 무효전력보상 및 전력품질 향상과 고조파를 저감할 수 있는 연계운전 알고리즘을 개발하여 회생인버터 및 능동전력필터 기능을 확인하였다.

1차년도 ; 기초기술 개발 및 전력변환기 기본 모델 개발

국내외 에너지 변환 및 회생장치를 조사하여 회생용 인버터의 회생 및 필터기능과 함께 국내 시스템에 적합한 용량 선정과 같은 개발방향을 설정하고 국내 지하철에 대한 급전시뮬레이션을 통하여 회생장치 설치시 회생율을 파악하여 경제성을 평가하였으며 개발품의 기본설계를 완료하였다.

2차년도 ; 축소형 회생인버터 개발

개발품에 대한 알고리즘을 정립하기 위해 축소형 회생용인버터를 개발하고 변전소와 차량을 모의할 수 있는 장치를 개발하여 회생용 인버터의 알고리즘의 신뢰성을 확보하고 사전에 문제점 파악은 물론 개발품에 대한 사양정립의 기반을 다졌다.

3차년도 ; 회생인버터 시작품제작 및 주변장치 설계

개발품에 대한 시작품 제작과 함께 변압기 및 차단기의 주변장치를 설계 제작하였으며 각각 장치별 시험을 완료하였다.

4차년도 ; 회생인버터 성능평가

3차년도에 개발한 시제품과 주변장치에 대한 성능시험을 하기 위하여 성능시험소를 설계 건설하고 시제품에 대한 성능시험을 완료하고 공인인증시험을 실시하였다.

5차년도 ; 실계통 적용 및 신뢰성평가

실계통 적용시험을 위해 시제품을 추가 제작하고 서울메트로, 서울 도시철도공사 및 부산교통공사와 긴밀한 협력을 통하여 부산교통공사에서 시험을 실시하여 개발품에 대한 현장 적용성을 입증하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

전 세계적으로 에너지의 보전과 재활용의 방안 및 신에너지의 개발을 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 에너지 재활용 방안은 경제적으로나 환경적으로 매우 중요하다. 에너지 재활용의 기술 중 전력변환기의 발전은 에너지 재사용을 가능하게 하는 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구에서 개발한 PWM 회생인버터를 직류전원을 사용하는 시스템에 적용하게 된다면 에너지를 절약할 수 있고 환경보호에도 기여할 수 있을 뿐만 아니라 산업계로의 파급효과가 클 것으로 전망된다. 특히, 전철의 복선화 및 신선로의 건설, 대도시에서 교통난 해소를 위한 전철시스템의 도입 등 전철교통 수요의 증가와 운행상의 시격감소로 인해 에너지 사용이 증가하고 있다. 전철시스템에서 에너지 방안으로 낭비되는 회생에너지의 재활용은 매우 중요한 분야이다. 따라서 에너지 절약을 위해 현재 개발 중인 회생에너지 흡수 설비인 에너지 회생인버터가 실용화 되어 전철변전소 계통에 연계운전되리라 예상된다.

본 연구과제에서 개발 중인 회생인버터는 계통상의 전류고조파를 저감시키고, 무효전력을 보상하는 기능을 갖고 있기 때문에 전기철도시스템의 전력품질을 개선시킬 수 있으며, 고효율을 구현할 수 있다. 지하철시스템에서의 대체에너지의 활발한 기술개발과 대용량 전력변환장치의 경제적 확보에 따라서 우리나라 전기철도시스템에서도 많은 전력변환장치의 도입이 될 것으로 전망된다.

- ○ 능동전력필터기능에 의한 고조파 손실 저감과 고역률 구현으로 소비전력요금을 줄일 수 있음(※기준역률 1% 미만 시에 1% 전력요금을 가산하는 역율 요금제도 시행중)
- ○ DC 전철구간에서의 에너지 절약 활용에 적용
- ○ 전원계통의 무효전력 보상장치 및 고조파 저감장치
- ○ 전원계통의 전원 품질개선장치
- ○ 고압모터드라이브의 회생용 장치
- ○ 회생에너지 전원회생 시스템
- ○ 계통 연계형 태양열 및 풍력발전시스템 적용
- ○ 에너지저장기술 응용 및 에너지 절감을 위한 산업분야 활용가능
- ○ 국제환경규제에 대응한 수송부문 온실가스 저감대책 및 에너지 환경관련 산업분야

SUMMARY

I. TITLE

The Development of Energy Regenerating System for Electric Railway

II. Purpose and importance of research and development

Recently, by advance in power electronics technology, some countries are considering actualization of regenerative inverter to use a regeneration energy on each line. When the electric tractions are stopped or driven through the falling slope way, it is useful to supply surplus energy to the power source by regenerative system in the efficient side of energy.

When the electric tractions are stopped or driven through the falling slope way, the generated energy supplies other traction or a equipment inside traction.

A government can reduce construction of power plants to produce electric energy and reduce energy.

In the research, the purposes are suppressing extra DC-line voltage and regenerating the energy instead of suppressing DC-line to use a resister. Extra DC voltage is regenerated by regenerative inverter to the AC-line.

III. Contents of research and development

First, the suppressing extra DC-line voltage and saving energy generated, while electric traction is driven on the falling slope way or reducing speed for the electric traction system using a 1,500V DC-voltage.

Secondly, the regenerative inverter is to assemble the prototype model[1.5MVA] and realize the two operation mode of regenerative inverter and active power filter.

Thirdly, we make an agreement with Busan Transportation Corporation for the verification of the developed inverter's reliability and operational characteristic.

Finally, the prototype model of regenerative inverter and its incidental equipment is built up in Nopo depot, Busan Transportation Corporation and the test, no load condition test, load condition test, start-up voltage tuning, and continuous operation

test, is performed and verified its result.

IV. Results of research and development

In this research, we suggest inverter control technique, which are possible to regenerate extra DC-power to AC-source-line and to decrease harmonic in electric traction. This study has been performed by classifying into

1) Verification of the application possibility and an usefulness for existing electric supply system by analyzing of circuits and current harmonics
2) When DC-line voltage rise, it is confirmed that an extra power is fed back into AC-line by regeneration inverter. An active power filter is applied at electric supply to decrease the low-frequency current harmonics when electric power is supplied to DC-electric train system.
3) Interconnection technology to electric power system of regenerative inverter are studied.
5) Adapted the optimal controller to the prototype model(3.7kW) and detected the regenerated current.
6) Designed and built-up of 1.5MVA regenerative inverter and testing of regenerative inverter and active power filter modes
7) Adoption of the developed regenerative inverter and its incidental equipment in Nopo depot, Busan Transportation Corporation.
8) The test to tune up the regenerative inverter and to verify its reliability is performed and the test result is investigated.

제목 차례

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구개발의 필요성 ····· 1

제 2 절 연구내용 및 범위 ····· 7

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 11

제 1 절 국내 기술개발 현황 ····· 11

제 2 절 국외 기술개발 현황 ····· 49

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 58

제 1 절 에너지 회생시스템 개요 ····· 58

제 2 절 회생용 인버터 용량선정 ····· 61

제 3 절 에너지 회생시스템 엔지니어링 ····· 117

제 4 절 축소형 회생용 인버터를 이용한 제어알고리즘 개발 ····· 191

제 5 절 회생용 인버터 개발 ····· 301

제 6 절 실계통 적용 ····· 375

제 4 장 연구개발목표 달성도 ····· 413

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 418

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학 기술정보 ····· 421

참고문헌 ····· 425

< CONTENTS >

CHAPTER 1 INTRODUCTION ····· 1
Section 1 Necessity or background of research and development ····· 1
Section 2 Contents and range of research ····· 7

CHAPTER 2 PRESENT STATE OF TECHNICAL DEVELOPMENT AT HOME AND ABROAD ····· 11
Section 1 Present state of technical development of the inside of the country ····· 11
Section 2 Present state of technical development of the abroad ····· 49

CHAPTER 3 EXECUTIVE CONTENTS AND RESULT OF RESEARCH AND DEVELOPMENT ····· 58
Section 1 Introduction of regenerative energy system ····· 58
Section 2 Capacity of regenerative inverter ····· 61
Section 3 Engineering of regenerative system ····· 117
Section 4 United control algorithm embodiment ····· 191
Section 5 Manufacture of the prototype regenerative inverter ····· 301
Section 6 Adoption and field test of regenerative inverter system ····· 375

CHAPTER 4 RATE OF ACHIEVEMENT WITH THE AIM OF THE RESEARCH AND DEVELOPMENT AND RATE OF CONTRIBUTION TO RELATED FIELDS ····· 413

CHAPTER 5 USING PLAN OF RESULT OF RESEARCH AND DEVELOPMENT ····· 418

CHAPTER 6 OVERSEA SCIENCE TECHNICAL INFORMATION COLLECTED FROM PROCESS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT ····· 421

REFERENCES ····· 425

표 차례

제 1 장 서 론

표 1.1 개발 중인 회생인버터의 장점 ····· 5
표 1.2 연구개발 목표 및 범위 ····· 9

제 2 장 국내외 기술개발 현황

표 2.1 국내 전동차의 전기적 특성(I) ····· 19
표 2.2 국내 전동차의 전기적 특성(II) ····· 20
표 2.3Kanjinbashi변전소의 정류기 기본사양 ····· 50
표 2.4 Kanjinbashi변전소의 회생인버터 기본사양 ····· 51
표 2.5 쯔쿠바익스프레스 IGBT 컨버터/인버터 사양 ····· 57

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

표 3.1 회생인버터 개발 목표 ····· 60
표 3.2 운행 차량 데이터에 의한 전력 ····· 70
표 3.3 TPS 시뮬레이션 결과 ····· 77
표 3.4 TPS 시뮬레이션 회생율 ····· 78
표 3.5 차량데이터 ····· 78
표 3.6 운전데이터 ····· 79
표 3.7 시뮬레이션 데이터 ····· 79
표 3.8 차량전력 ····· 79
표 3.9 5호선 변전소별 결과 ····· 80
표 3.10 5호선 결과 ····· 80
표 3.11 6호선 변전소별 결과 ····· 81
표 3.12 6호선 결과 ····· 81
표 3.13 7호선 변전소별 결과 ····· 82
표 3.14 7호선 결과 ····· 82
표 3.15 8호선 변전소별 결과 ····· 83
표 3.16 8호선 결과 ····· 83
표 3.17 호선별 회생율 ····· 83
표 3.18 시뮬레이션 조건(5호선) ····· 88
표 3.19 시뮬레이션 조건(6호선) ····· 92
표 3.20 시뮬레이션 조건(7호선) ····· 96

표 3.21 시뮬레이션 조건(8호선) ····· 100
표 3.22 전력시뮬레이션 결과 ····· 107
표 3.23 차량 주요 제원 ····· 108
표 3.24 5호선 및 7호선 TPS결과 ····· 110
표 3.25 전력시뮬레이션 입력조건 ····· 110
표 3.26 잉여회생전력 대응방법 ····· 118
표 3.27 선릉변전소의 피더별 역행 및 회생전력 최대값 ····· 129
표 3.28 선릉변전소의 피더별 역행 및 회생전력량 (측정시간: 06:50 ~ 24:50) ··· 130
표 3.29 총 회생전력량 근사계산 조건 ····· 131
표 3.30 회생전력량 분석 ····· 132
표 3.31 양동시장 변전소의 피더별 역행 및 회생전력 최대값 ····· 139
표 3.32 양동시장변전소의 피더별 역행 및 회생전력량 (측정시간:06:47~24:08) ··· 140
표 3.33 총 회생전력량 근사계산 조건 ····· 141
표 3.34 회생전력량 분석 ····· 142
표 3.35 IPCC의 탄소배출계수 ····· 143
표 3.36 회생전력량에 따른 이산화탄소 배출 저감량 ····· 144
표 3.37 3상 수전부 전류 측정 결과 ····· 147
표 3.38 3상 수전부 전압 측정 결과 ····· 148
표 3.39 3상 수전부 유효전력 측정 결과 ····· 149
표 3.40 3상 수전부 무효전력 측정 결과 ····· 150
표 3.41 수전부 전류 왜형율 결과 ····· 151
표 3.42 수전부 전압 왜형율 결과 ····· 152
표 3.43 △I 고장선택장치(50F) 특성 비교 ····· 166
표 3.44 인버터 보호장치 ····· 175
표 3.45 유도장애 대책 ····· 176
표 3.46 회생인버터 설비 구성 ····· 179
표 3.47 비정상 전압에 대한 대응 ····· 181
표 3.48 회생전력 활용장치의 장점 ····· 202
표 3.49 조파에 의한 장해현상 ····· 223
표 3.50 병렬형과 직렬형 능동전력필터의 비교 ····· 235
표 3.51 수락산 변전소 전력시스템 파라미터 ····· 264
표 3.52 시뮬레이션 파라미터 ····· 271

표 3.53 회생용 인버터 축소모델 사양 ····· 286
표 3.54 회생 PWM컨버터 제어기의 Input/Output 항목 ····· 304
표 3.55 회생 병렬 PWM컨버터 제어기의 7 Segment표시 ····· 305
표 3.56 허용 가능한 스위칭 동작과 전압 와의 관계 ····· 318
표 3.57 계통 연계용 변압기 회로 구성 비교 ····· 329
표 3.58 정류기반 개폐장치 사양 ····· 347
표 3.59 계통 연계 TR 개폐장치 사양 ····· 347
표 3.60 정류기 사양 및 특성 ····· 349
표 3.61 HV SWGR반 개폐장치 사양 ····· 352
표 3.62 EHV SWGR반 사양 ····· 353
표 3.63 저항기 사양 ····· 354
표 3.64 변압기 사양 ····· 355
표 3.65 변압기 특성 ····· 358
표 3.66 375kW 부하저항기 투입시 측정값 ····· 362
표 3.67 계통연계 효율시험 측정값 ····· 368
표 3.68 무효전력 보상시험 무효전력 보상전후 측정자료 ····· 374
표 3.69 시험계획 ····· 393
표 3.70 컨버터 시험 절차 ····· 396
표 3.71 인버터 시험 절차 ····· 397
표 3.72 무부하 시험 절차 ····· 398
표 3.73 부하 시험 절차 ····· 399
표 3.74 전압변동 시험 절차 ····· 401
표 3.75 연속동작 시험 절차 ····· 402
표 3.76 컨버터 측정 결과 ····· 404
표 3.77 인버터 측정 결과 ····· 405

제4장 연구개발목표 달성도

표 4.1 연구개발목표 달성도 ····· 413

제5장 연구개발결과의 활용계획

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학 기술정보

그림 차례

제 1 장 서 론

그림 1.1 회생 가능 에너지 분포 ····· 2
그림 1.2 기존 직류 지하철 급전 시스템 ····· 2
그림 1.3 제안된 직류구간 전철 급전시스템 ····· 3
그림 1.4 개발 중인 회생인버터 동작모드 ····· 4
그림 1.5 제안된 직류구간 전철 시스템의 블록도 ····· 7
그림 1.6 제안된 직류구간 전철 급전시스템 ····· 8

제 2 장 국내외 기술개발 현황

그림 2.1 정류기의 결선 ····· 14
그림 2.2 심플 카테너리 ····· 16
그림 2.3 직류급전에서의 전차선 전류회로 ····· 17
그림 2.4 운전곡선 ····· 21
그림 2.5 구배율 ····· 22
그림 2.6 직류전철변전소 급전계통도 ····· 23
그림 2.7 직류 급전 계통 ····· 24
그림 2.8 직류구간 전철 시스템의 블록도 ····· 26
그림 2.9 전류 주입형 능동전력필터 구성도 ····· 28
그림 2.10 전류 주입형 능동전력필터의 회로도 ····· 28
그림 2.11 무효전력보상기 개념도 ····· 29
그림 2.12 고속전철용 보조전원 인버터의 시스템 구성도 ····· 30
그림 2.13 V/f 제어의 전압발생 패턴 ····· 31
그림 2.14 PWM에 의한 교류 출력전압파형 VAo와 고조파 분석 ····· 33
그림 2.15 유니폴라 전압 스위칭을 가진 PWM(단상) ····· 34
그림 2.16 3고조파 주입에 의한 출력전압 증대 ····· 35
그림 2.17 3상 전압형 인버터 ····· 36
그림 2.18 인버터의 출력전압 벡터 ····· 36
그림 2.19 인버터의 선현제어 가능한 최대출력전압 ····· 37
그림 2.20 직류전력 회생시스템 ····· 40
그림 2.21 수정 모드방식일 때의 출력 선간전압 ····· 41
그림 2.22 회생용 인버터 시스템의 구성 ····· 41

그림 2.23 상당 등가회로 ····· 42
그림 2.24 등가회로의 벡터도 ····· 42
그림 2.25 전력원선도 ····· 43
그림 2.26 구형 전동차의 전압/전류 측정파형 ····· 48
그림 2.27 신형 전동차의 전압/전류 측정파형 ····· 49
그림 2.28 일본 Mitsubishi사의 SCR 회생인버터 ····· 50
그림 2.29 스위스 Alpigle 변전소의 SCR 회생인버터 ····· 52
그림 2.30 남아프리카공화국의 직류 3,000V IGBT 회생인버터 ····· 53
그림 2.31 변전소의 가선전압/전류특성곡선 ····· 54
그림 2.32 싱가폴의 직류전철시스템 급전방식 ····· 54
그림 2.33 회생용 인버터가 적용되어진 대만 직류 전철 급전시스템 ····· 55
그림 2.34 회생용 전력변환 장치의 제어 패턴도 ····· 55

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

그림 3.1 회생인버터 변전소 설치도 ····· 59
그림 3.2 역행/제동비(주말 : 오전) ····· 61
그림 3.3 가선 전압/전류(주말 : 오전) ····· 62
그림 3.4 역행/제동비(주말 : 오후) ····· 62
그림 3.5 가선 전압/전류(주말 : 오후) ····· 63
그림 3.6 역행/제동비(평일 오전) ····· 63
그림 3.7 가선 전압/전류(평일 오전) ····· 64
그림 3.8 역행/제동비(평일 오후) ····· 64
그림 3.9 가선 전압/전류(평일 오후) ····· 65
그림 3.10 가선 전압, 속도, 역행/제동비(주말 오전) ····· 65
그림 3.11 가선 전압, 속도, 역행/제동비(주말 오후) ····· 66
그림 3.12 가선 전압, 속도, 역행/제동비(평일 오전) ····· 66
그림 3.13 가선 전압, 속도, 역행/제동비(평일 오후) ····· 67
그림 3.14 가선 전압, 속도, 역행/제동비(주말 오전) ····· 67
그림 3.15 가선 전압, 속도, 역행/제동비(주말 오후) ····· 68
그림 3.16 가선 전압, 속도, 역행/제동비(평일 오전) ····· 68
그림 3.17 가선 전압, 속도, 역행/제동비(평일 오후) ····· 69
그림 3.18 가선 전압/전류 (주말, 영등포 시장) ····· 71
그림 3.19 가선 전압/전류(평일, 영등포 시장) ····· 71

그림 3.20 가선 전압/전류 (주말, 을지 4가) ····· 72
그림 3.21 가선 전압/전류(평일, 을지 4가) ····· 72
그림 3.22 가선 전압/전류 (주말, 건대입구) ····· 73
그림 3.23 가선 전압/전류 (평일, 건대입구) ····· 73
그림 3.24 가선 전압/전류 (주말, 상도) ····· 74
그림 3.25 가선 전압/전류 (평일, 상도) ····· 74
그림 3.26 가선 전압/전류 (주말, 단대오거리) ····· 75
그림 3.27 가선 전압/전류 (평일, 단대오거리) ····· 75
그림 3.28 가선 전압/전류 (주말, 복정) ····· 76
그림 3.29 가선 전압/전류 (평일, 복정) ····· 76
그림 3.30 회생인버터 용량계산 순서도 ····· 86
그림 3.31 5호선 구배도 ····· 88
그림 3.32 회생실효율 ····· 89
그림 3.33 회생전력의 제곱평균값 ····· 89
그림 3.34 변전소의 가선전압 및 소비전력 ····· 90
그림 3.35 변전소의 가선전압 및 소비전력 ····· 90
그림 3.36 6호선 구배도 ····· 92
그림 3.37 회생실효율 ····· 93
그림 3.38 변전소 평균전력 ····· 93
그림 3.39 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 미설치) ····· 94
그림 3.40 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 설치) ····· 94
그림 3.41 7호선 구배도 ····· 96
그림 3.42 회생실효율 ····· 97
그림 3.43 변전소별 제곱평균전력 ····· 97
그림 3.44 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 미설치) ····· 98
그림 3.45 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 설치) ····· 98
그림 3.46 8호선 구배도 ····· 100
그림 3.47 회생실효율 ····· 101
그림 3.48 변전소 평균전력 ····· 101
그림 3.49 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 미설치) ····· 102
그림 3.50 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 설치) ····· 102
그림 3.51 부산지하철 고배단 소비전력량(2002년) ····· 103

그림 3.52 서울 2호선 고배단 소비전력량(2003년) ····· 104
그림 3.53 서울 2호선 1월 최대소비전력(2003년) ····· 104
그림 3.54 서울 2호선 8월 최대소비전력(2003년) ····· 105
그림 3.55 부산지하철 1,2호선의 회생률 ····· 106
그림 3.56 5호선 TPS결과 ····· 109
그림 3.57 7호선 TPS결과 ····· 109
그림 3.58 5호선 1일 회수전력량(모든 변전소에 회생용 인버터 설치시) ····· 111
그림 3.59 7호선 1일 회수전력량(모든 변전소에 회생용 인버터 설치시) ····· 112
그림 3.60 5호선 변전소 위치에 따른 회수전력량(운전시격:360[s], 1시간) ····· 112
그림 3.61 7호선 변전소 위치에 따른 회수전력량(운전시격:360[s], 1시간) ····· 113
그림 3.62 변전소에 따른 1일 회수전력량(5호선) ····· 113
그림 3.63 변전소에 따른 1일 회수전력량(7호선) ····· 114
그림 3.64 회생용 인버터 용량에 따른 1일 회수전력량(5호선) ····· 114
그림 3.65 회생용 인버터 용량에 따른 1일 회수전력량(7호선) ····· 115
그림 3.66 1,500[kVA]회생용 인버터 설치시 회수 가능한 전력요금 ····· 115
그림 3.67 직류전기철도의 역과 변전소 ····· 118
그림 3.68 변전소 측정 개략도 ····· 120
그림 3.69 측정장비 ····· 120
그림 3.70 기록 화면 ····· 121
그림 3.71 LabView 프로그램 ····· 121
그림 3.72 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 06:50 ~ 08:50) 122
그림 3.73 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 08:50 ~ 10:50) 123
그림 3.74 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 10:50 ~ 12:50) 123
그림 3.75 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 12:50 ~ 14:50) 124
그림 3.76 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 14:50 ~ 16:50) 124
그림 3.77 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 16:50 ~ 18:50) 125
그림 3.78 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 18:50 ~ 20:50) 125
그림 3.79 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 20:50 ~ 22:50) 126
그림 3.80 선릉변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 22:50 ~ 24:50) 126
그림 3.81 선릉변전소의 소비전력 및 가선전압 ····· 127
그림 3.82 선릉변전소의 피더별 소비 및 회생전력 비율 ····· 128
그림 3.83 선릉변전소의 피더별 역행 및 회생전력량 (측정시간 : 06:50~24:50) ···· 130

그림 3.84 선릉변전소 주변개략도 ····· 131
그림 3.85 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 06:47 ~ 08:47) 132
그림 3.86 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 08:47 ~ 10:47) 133
그림 3.87 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 10:47 ~ 12:47) 133
그림 3.88 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 12:47 ~ 14:47) 134
그림 3.89 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 14:47 ~ 16:47) 134
그림 3.90 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 16:47 ~ 18:47) 135
그림 3.91 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측간시간 : 18:47 ~ 20:47) 135
그림 3.92 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 20:47 ~ 22:47) 136
그림 3.93 양동시장변전소 전체전류와 가선전압 특성곡선(측정시간 : 22:47 ~ 24:47) 136
그림 3.94 양동시장 변전소의 소비전력 및 가선전압 파형 ····· 137
그림 3.95 양동시장변전소의 피더별 소비 및 회생전력비율 ····· 138
그림 3.96 양동시장변전소의 피더별 역행 및 회생전력량 ····· 140
그림 3.97 양동시장변전소 주변개략도 ····· 141
그림 3.98 전력품질 측정 개념도 ····· 145
그림 3.99 3상 수전부 전류 측정 결과 ····· 146
그림 3.100 3상 수전부 전압 측정 결과 ····· 148
그림 3.101 3상 수전부 유효전력 측정 결과 ····· 149
그림 3.102 3상 수전부 무효전력 측정 결과 ····· 150
그림 3.103 3상 수전부 전류 왜형율 ····· 151
그림 3.104 3상 수전부 전압 왜형율 결과 ····· 152
그림 3.105 직류 급전부 전압 측정 결과 ····· 153
그림 3.106 직류 급전부 전류 측정 결과 ····· 154
그림 3.107 3상 수전부의 고조파 전류 최대값 (A상) ····· 157
그림 3.108 3상 수전부의 고조파 전류 최대값 (B상) ····· 158
그림 3.109 3상 수전부의 고조파 전류 최대값 (C상) ····· 158
그림 3.110 직류급전시스템 구성 ····· 160
그림 3.111 직류급전시스템 보호계통도 ····· 164
그림 3.112 회생차량에 의한 △I 고장선택장치(50F)의 오동작 사례 ····· 165
그림 3.113 차량보호시스템 ····· 167
그림 3.114 회생인버터 변전소 설치도 ····· 169
그림 3.115 회생인버터 시스템(히타찌) ····· 172

그림 3.116 계통연계시 전압강하 ····· 174
그림 3.117 잡음투입 경로도 ····· 176
그림 3.118 회생인버터 시스템 구성도 ····· 178
그림 3.119 인버터 기본 회로도 ····· 178
그림 3.120 다이오드 정류회로 ····· 191
그림 3.121 3상 다이오드 정류 시 출력전압과 입력전류 파형 ····· 192
그림 3.122 3상 다이오드 정류기 입력전류 FFT 분석 ····· 193
그림 3.123 사이리스터 제어 정류기 ····· 194
그림 3.124 3상 사이리스터 제어 정류기 =30도 일 때 출력파형 ····· 194
그림 3.125 3상 위상제어 정류기 입력전류 FFT 분석 ····· 195
그림 3.126 3상 12펄스 다이오드 정류기 ····· 196
그림 3.127 3상 12펄스 다이오드 정류시 출력전압과 입력전류 파형 ····· 196
그림 3.128 3상 12펄스 다이오드 정류기 입력전류 FFT 분석 ····· 197
그림 3.129 부산 지하철의 사이리스터 12펄스 정류 제어기 ····· 198
그림 3.130 3상 12펄스 위상제어 정류 시 출력전압과 입력전류 파형 ····· 199
그림 3.131 3상 12펄스 위상제어 정류기 입력전류 FFT 분석 ····· 199
그림 3.132 회생 가능 에너지 분포 ····· 200
그림 3.133 기존 직류 지하철 급전 시스템 ····· 201
그림 3.134 에너지 저장 장치(슈퍼 커패시터)가 구성된 직류 급전시스템 ····· 202
그림 3.135 회생인버터가 적용되어진 직류 급전시스템 ····· 203
그림 3.136 능동전력필터가 별도로 구성된 사이리스터 회생장치 ····· 204
그림 3.137 회생 인버터 시스템이 적용된 지하철 급전시스템 ····· 205
그림 3.138 제안된 시스템의 회생인버터 동작 ····· 205
그림 3.139 전압방정식 해석을 위한 회생인버터 간이 회로도 ····· 206
그림 3.140 2상 정지좌표계 변환 벡터도 ····· 207
그림 3.141 회생인버터 모드 시 제어 블록도 ····· 214
그림 3.142 변전소 전압제어 ····· 216
그림 3.143 회생인버터가 적용된 변전소 전압제어 ····· 217
그림 3.144 회생인버터의 전압-전류특성 1 ····· 217
그림 3.145 회생인버터의 전압-전류특성 2 ····· 218
그림 3.146 비선형 부하의 고조파 전류원 등가회로 ····· 220
그림 3.147 능동전력필터의 원리 ····· 227

그림 3.148 각부의 파형 ····· 227
그림 3.149 능동전력필터의 고조파 등가회로 ····· 228
그림 3.150 사이리스터 위상제어 정류기 및 등가회로 ····· 229
그림 3.151 사이리스터 위상제어 정류기 전원전압 및 입력전압 ····· 229
그림 3.152 다이오드 정류기 및 등가회로 ····· 229
그림 3.153 다이오드 정류기 전원전압 및 입력전류 ····· 231
그림 3.154 전류형 능동전력필터 ····· 232
그림 3.155 전압형 능동전력필터 ····· 232
그림 3.156 병렬형 능동전력필터 ····· 233
그림 3.157 직렬형 능동전력필터 ····· 234
그림 3.158 직렬형-병렬형 복합능동전력필터 ····· 236
그림 3.159 능동전력필터의 원리 ····· 238
그림 3.160 각부의 파형 ····· 238
그림 3.161 능동전력필터의 고조파 등가회로 ····· 238
그림 3.162 αβ 좌표계 ····· 239
그림 3.163 제안된 시스템의 능동전력필터 동작 ····· 246
그림 3.164 능동전력필터의 제어 블록도 ····· 247
그림 3.165 UPS 시스템 블록도 ····· 250
그림 3.166 SPS 시스템 블록도 ····· 251
그림 3.167 전압강하 보상 시 전력흐름도 ····· 252
그림 3.168 전압원 PWM 컨버터 전력회로도 ····· 253
그림 3.169 DC링크 전압과 전류와의 관계도 ····· 253
그림 3.170 전원전압, 컨버터 전압, 리액터 전압과 전류의 phasor도 ····· 254
그림 3.171 PWM 컨버터 한상의 등가회로 ····· 255
그림 3.172 평형 3상 좌표축 ····· 257
그림 3.173 정지(dq), 동기($d'q'$) 좌표계의 공간벡터 ····· 258
그림 3.174 전압제어기 블록선도 ····· 262
그림 3.175 전압강하 보상 제어 블록도 ····· 263
그림 3.176 기존 다이오드 정류기 급전 시스템 ····· 264
그림 3.177 기존 다이오드 정류기 급전 시스템 ····· 265
그림 3.178 기존 전력시스템 다이오드 정류기 입력전류 FFT 분석 ····· 265
그림 3.179 부산지하철 변전소 급전시스템 ····· 266

그림 3.180 제어부가 포함된 부산 지하철 급전시스템 ····· 267
그림 3.181 정류 시 계통상전압과 전류 파형 ····· 268
그림 3.182 정류 동작시 FFT출력 ····· 269
그림 3.183 회생 시 계통상전압과 전류 파형 ····· 269
그림 3.184 회생 동작시 상전압과 전류 FFT출력 ····· 270
그림 3.185 회생인버터 회로도 ····· 272
그림 3.186 계통 측 전압 ····· 272
그림 3.187 계통 상 전압(V_{sa}) 및 추정 위상각(V_{Theta}) ····· 273
그림 3.188 PWM 인버터 출력변압기 1, 2차 측 전류(ia)파형 ····· 273
그림 3.189 추정 위상각(VTheta) 및 이동된 위상각(VTheta_sh) ····· 274
그림 3.190 PWM 인버터 출력전류 , 의 단위응답특성 ····· 274
그림 3.191 DC 가선전압과 3상 회생전류 ····· 275
그림 3.192 a상 전압과 a상 회생전류 ····· 275
그림 3.193 능동전력필터 회로도 ····· 276
그림 3.194 3상 전압과 2상 정지좌표계 변환 ····· 277
그림 3.195 3상 전류와 2상 정지 좌표계 변환 ····· 277
그림 3.196 순시유효전력()와 순시무효전력() ····· 278
그림 3.197 순시유효전력의 두 가지 성분과 순시무효전력 ····· 278
그림 3.198 추정 위상각(VTheta) 및 이동된 위상각(VTheta_sh) ····· 279
그림 3.199 2상 정지좌표계로 표현된 보상파형 ····· 279
그림 3.200 보상전류와 DC가선전압 ····· 280
그림 3.201 보상전류와 계통 측 전류, 부하측 전류 ····· 280
그림 3.202 능동전력필터 기능이 추가된 회생인버터 회로도 ····· 281
그림 3.203 인버터 출력전류와 계통 전압 ····· 281
그림 3.204 인버터 출력전류, 부하 측 전류, 계통 측 전류 ····· 282
그림 3.205 능동전력필터와 회생인버터 동작에서의 ····· 282
그림 3.206 전압강하 보상모드 시 각 부 파형 ····· 283
그림 3.207 전압강하 보상모드 시 각 부 파형 ····· 284
그림 3.208 전압강하 보상모드 시 각 부 파형 ····· 285
그림 3.209 전압강하 보상모드 시 각 부 파형 ····· 285
그림 3.210 실험에 사용된 3kVA PWM 인버터 ····· 287
그림 3.211 실험에 사용된 제어부 블록도 ····· 288

그림 3.212 3KVA PWM 인버터 제어부 세트 및 구성도 ····· 289
그림 3.213 3kVA PWM 인버터 제어부 주변 결선 ····· 290
그림 3.214 실험에 사용한 3KVA PWM 인버터 입출력 변압기 ····· 291
그림 3.215 D/A를 통한 3상 전압(5V/div , 5ms/div) ····· 292
그림 3.216 D/A를 통한 2상 정지좌표계 변환(0.5V/div , 5ms/div) ····· 292
그림 3.217 2상 동기 좌표계 변환 (0.5V/div , 5ms/div) ····· 293
그림 3.218 위상각 추정 (200mV/div , 2V/div , 5ms/div) ····· 293
그림 3.219 추정된 위상각과 이동된 위상각 ····· 294
그림 3.220 a 상 계통전압과 a상 회생전류 ····· 294
그림 3.221 Vdc 및 a상 회생전류 ····· 295
그림 3.222 D/A를 통한 계통 측 전류파형 ····· 295
그림 3.223 2상 정지좌표계로 변환된 전류파형 ····· 296
그림 3.224 순시유효전력의 기본파와 고조파 ····· 296
그림 3.225 순시유효전력의 고조파와 순시무효전력 ····· 297
그림 3.226 2상 정지좌표계로 표현된 보상전류 지령치 ····· 297
그림 3.227 3상의 보상전류 지령치 ····· 298
그림 3.228 D/A를 통한 보상전류 및 부하 측 전류, 계통전류 ····· 298
그림 3.229 스위치 Off시 DC측 전압, 전류 ····· 299
그림 3.230 가선전압 파형 (50V/div,5s/div) ····· 300
그림 3.231 제어기 구성도 ····· 303
그림 3.232 제어기 사진 ····· 303
그림 3.233 TMS320VC33 회로도 ····· 307
그림 3.234 DSP보드 사진 ····· 308
그림 3.235 C167의 회로도 ····· 311
그림 3.236 Control 보드(C-167) 전면 사진 ····· 313
그림 3.237 Control 보드(C-167) 후면 사진 ····· 313
그림 3.238 디지털 입출력 회로 ····· 314
그림 3.239 RS 232 통신회로 ····· 315
그림 3.240 CAN 통신회로 ····· 316
그림 3.241 아날로그 회로부 ····· 317
그림 3.242 PWM 제어의 구조 ····· 318
그림 3.243 파워회로 구성도 ····· 319

그림 3.244 병렬 PWM 컨버터 실물 사진 ····· 321
그림 3.245 IGBT 및 Capacitor 사진 ····· 321
그림 3.246 조립된 IGBT모듈 및 Capacitor모듈 사진 ····· 321
그림 3.247 파워 및 PWM 인터페이스 보드 회로도 ····· 322
그림 3.248 파워 및 PWM 인터페이스 보드(전면) ····· 323
그림 3.249 파워 및 PWM 인터페이스 보드(후면) ····· 323
그림 3.250 수냉식 열교환 과정 ····· 324
그림 3.251 펌프와 실외기 사진 ····· 324
그림 3.252 LCL 필터 회로도 ····· 326
그림 3.253 LCL 필터 사진 ····· 327
그림 3.254 계통 연계용 변압기 회로 구성 ····· 327
그림 3.255 2차년도 계통 연계용 변압기 회로 구성 ····· 328
그림 3.256 DC 공급 장치의 구성 ····· 329
그림 3.257 부하 설비의 구성 ····· 330
그림 3.258 부하 시험회로 구성 ····· 331
그림 3.259 회생인버터 부하시험 측정 결과 ····· 333
그림 3.260 계통 연계 시험회로 구성 ····· 334
그림 3.261 회생 인버터 계통 연계 시험 측정 결과 ····· 336
그림 3.262 회생 인버터 계통 연계시 전류 측정 결과 ····· 337
그림 3.263 고조파 제거 시험회로 구성 ····· 338
그림 3.264 회생 인버터의 고조파 제거 시험 측정 결과 ····· 340
그림 3.265 무효전력 보상 시험회로 구성 ····· 341
그림 3.266 회생 인버터의 무효전력 보상 시험 측정 결과 ····· 343
그림 3.267 회생 인버터의 무효전력 보상 시험 측정 결과 ····· 344
그림 3.268 회생인버터 시험설비 구성도 ····· 345
그림 3.269 정류기반 설치 사진 ····· 346
그림 3.270 계통 연계 TR 개폐장치 설치 사진 ····· 348
그림 3.271 정류기반 설치 사진 ····· 348
그림 3.272 DC SWGR 설치 사진. ····· 350
그림 3.273 HV SWGR 반 설치 사진 ····· 351
그림 3.274 HV SWGR반 개폐장치 사진 ····· 351
그림 3.275 EHV SWGR 사진. ····· 353

그림 3.276 저항기와 냉각 FAN 사진 ····· 354
그림 3.277 저항기반 설치 사진 ····· 355
그림 3.278 TR1 설치 사진 ····· 356
그림 3.279 TR2 설치 사진 ····· 356
그림 3.280 TR3 설치 사진 ····· 357
그림 3.281 TR4 설치 사진 ····· 357
그림 3.282 회생인버터 시험설비 구성도 ····· 359
그림 3.283 부하시험회생인버터 출력전압 ····· 360
그림 3.284 부하시험 회생인버터 출력전류 ····· 360
그림 3.285 부하시험 회생인버터 유효전력 ····· 361
그림 3.286 부하시험 회생인버터 전력 ····· 361
그림 3.287 계통연계 효율시험 발전기 출력전압 ····· 363
그림 3.288 계통연계 효율시험 발전기 출력전류 ····· 364
그림 3.289 계통연계 효율시험 발전기 전력 ····· 364
그림 3.290 계통연계 효율시험 LV1 출력전압 ····· 364
그림 3.291 계통연계 효율시험 LV1 출력전류 ····· 365
그림 3.292 계통연계 효율시험 LV1 전력 ····· 365
그림 3.293 계통연계 효율시험 LV1 회생인버터 출력전압 ····· 365
그림 3.294 계통연계 효율시험 LV1 회생인버터 출력전류 ····· 366
그림 3.295 계통연계 효율시험 LV1 회생인버터 전력 ····· 366
그림 3.296 계통연계 효율시험 LV2 출력전압 ····· 366
그림 3.297 계통연계 효율시험 LV2 출력전류 ····· 367
그림 3.298 계통연계 효율시험 LV2 전력 ····· 367
그림 3.299 고조파 저감시험 고조파저감설비 동작 전 ····· 370
그림 3.300 고조파 저감시험 고조파저감설비 동작 후 ····· 370
그림 3.301 LV1(부하측) 무효전력 ····· 372
그림 3.302 LV2(회생인버터 출력) 무효전력 ····· 372
그림 3.303 발전기(전원) 무효전력 ····· 373
그림 3.304 인증시험성적서 (1/2) ····· 386
그림 3.305 인증시험성적서 (2/2) ····· 387
그림 3.306 회생용 인버터의 실계통 적용 단선도 ····· 389
그림 3.307 회생용 인버터 설비 배치도 ····· 390

그림 3.308 주 설비실 장치배치도 ····· 390
그림 3.309 제어실 장치배치도 ····· 391
그림 3.310 주설비 배전반 전후면도 ····· 391
그림 3.311 부하설비 전후면도 ····· 392
그림 3.312 노포차량기지 급전도 ····· 394
그림 3.313 측정단선도 (컨버터 시험) ····· 395
그림 3.314 측정단선도 (인버터 시험) ····· 396
그림 3.315 측정단선도 (무부하 시험) ····· 397
그림 3.316 측정단선도 (부하시험) ····· 399
그림 3.317 컨버터 전압 전류 특성 ····· 403
그림 3.318 컨버터 출력 특성 ····· 403
그림 3.319 인버터 전압 전류 특성 ····· 404
그림 3.320 컨버터 출력 특성 ····· 405
그림 3.321 부하시험 결과 (30km/h) ····· 407
그림 3.322 부하시험 결과 (40km/h) ····· 408
그림 3.323 부하시험 결과 (50km/h) ····· 408
그림 3.324 발전기/인버터 출력 비교 ····· 408
그림 3.325 인버터 출력(동작개시 전압 1,590V) ····· 409
그림 3.326 인버터 출력(동작개시 전압 1,640V) ····· 410
그림 3.327 연속동작 시험 결과 ····· 411
그림 3.328 연속동작 시험 결과 일부분 ····· 411

제4장 연구개발목표 달성도

제5장 연구개발결과의 활용계획

그림 5.1 전기자동차용 회생에너지 사용 예 ····· 419
그림 5.2 대체에너지 발전용 인버터 시스템 ····· 419
그림 5.3 고조파 및 무효전력 저감용 능동전력필터 ····· 420

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학 기술정보

그림 6.1 수동 필터(1차, 2차, 3차 필터) ····· 421
그림 6.2 3상 능동전력필터로 적용 가능한 전력변환회로 ····· 421
그림 6.3 비선형 부하를 가진 3상 ····· 423
그림 6.4 병렬 3상 PWM 컨버터 시스템 ····· 424

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 연구 기술개발의 사회・경제・기술적 중요성

지구온실가스 저감을 위한 교토의정서(2005년 2월) 비준으로 국내외적으로 화석연료 사용의 억제와 에너지 이용의 효율화 정책 및 재이용에 대한 기술개발이 급속히 발전하고 있다. 국가물류비의 절감 및 교통혼잡 비용의 개선을 위한 국가의 수송정책은 도로위주의 중심에서 탈피하여 환경친화적인 철도교통으로 정책이 변화되고 있다. 국내의 전철화 사업은 범국가적인 차원에서 진행되어 2012년에는 약 85.9%가 전철화가 될 예정이며, 전철노선의 복선화 및 신선로의 증가로 전기에너지 사용량이 증대되고 있다. 한편, 세계 철도는 리오선언과 교토의정서에 의해 UIC를 중심으로 에너지 절약에 대한 대대적인 연구가 진행 중에 있으며, 특히 장기적인 목표를 설정하여 에너지 절약에 대한 프로그램의 도입이 진행되고 있다. 이러한 상황을 고려해 볼 때 향후 에너지 절약은 국가 경제에 중요한 요소로 작용하고 있고, 에너지원 고갈은 국내외적으로 심각한 문제를 야기할 것으로 예측된다. 따라서 전철화의 발전 추세에서 전기철도에서 사용되는 에너지의 효율화 및 대량의 전기에너지를 사용하게 될 전철시스템에서의 에너지 절약대책과 에너지 재사용을 위한 운용 효율화 방안 마련이 시급한 실정이다.

최근 산업설비의 대용량화와 고성능화에 따라 전원품질에 대한 경제・사회적 관심이 대두되고 있으며, 전력전자의 스위칭 소자기술의 진보로 전원품질개선장치는 중요한 역할을 하고 있다. 세계적으로 전기철도에서는 기존에 주로 사용하던 기계적인 제동방식을 보완하여 차량 제동 시 또는 하구배 운행 시 견인전동기를 이용한 전기적 제동을 병용하여 사용하고 있다. 전기제동 시에는 견인전동기를 발전기로 사용하기 때문에 제동 중 에너지가 생성되며 이를 회생에너지라 하고 급전시스템에 공급하게 되면 에너지의 효율을 높일 수 있다. 이러한 회생에너지양은 차량을 가속하기 위해 투입되는 에너지의 45~47%정도로서 약 20%정도는 타 전동차에서

소모되며, 에너지의 20~27%는 잉여 전력으로 남게 된다. 그림 1.1은 직류 전철 급전시스템에서 회생 가능한 에너지 분포를 나타내고 있다.

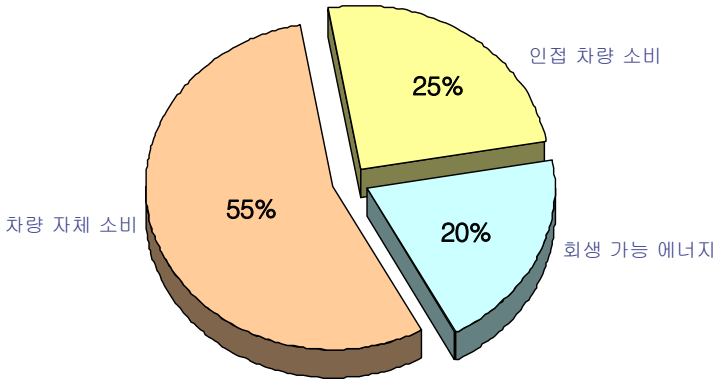


그림 1.1 회생 가능 에너지 분포

특히 직류철도에서는 변전소에서 수전 받은 3상 교류를 직류로 변환하는데 있어 주로 정류기를 사용하고 있으며 잉여전력에 의해 가선 전압을 상승시키므로 변전소의 정류기 및 차량에 탑재된 전력 변환기의 장애를 일으킬 수 있기 때문에 전력을 강제로 소모시키는 장치가 필요하다.

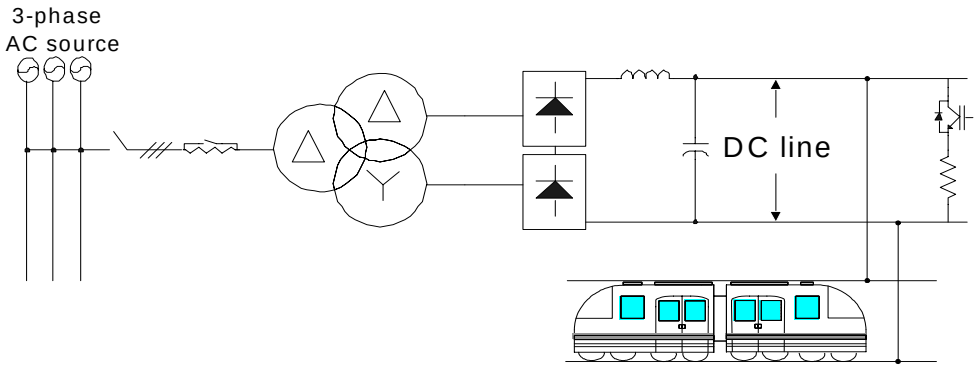


그림 1.2 기존 직류 지하철 급전 시스템

일반적으로 직류전철시스템은 그림 1.2와 같이 전차선로(또는 차량)에 저항기를 탑재하여 회생에너지를 소비하는 방법이 주로 사용되었으나 차량중량의 증가, 저항기 발열로 인한 온도상승, 기계 제동 사용에 따른 브레이크슈의 마모로 인한 소요

비용이 증가된다. 그러므로 잉여에너지 손실을 막기 위해서 잉여전력을 PWM DC/AC 전력 변환장치를 이용하여 회생제동에 발생하는 가선전압의 상승분을 3상 교류 모선으로 보낼 경우, 차량 저항기로 소비했던 회생에너지를 3상 교류 측으로 보내어 철도 고압배전에서 소비할 수 있어 직류전기철도 에너지 절감을 기대할 수 있다. 더불어 차량 견인 시에는 능동전력필터 기능을 수행하여 변전소 내 정류기 및 고압배전에 따른 수전 측 전력품질에 대한 보상을 수행하여 기존에 필요했던 고조파필터 등을 제거할 수 있다.

본 연구에서 개발 중인 회생인버터는 그림 1.3과 같으며 회생인버터가 직류급전 시스템의 3상 다이오드 정류기에 병렬로 설치되며, 회생전력을 흡수 할 수 있을 뿐만 아니라 능동전력필터로도 동작할 수 있는데 그림 1.4에 두 가지의 동작모드를 표시하였다.

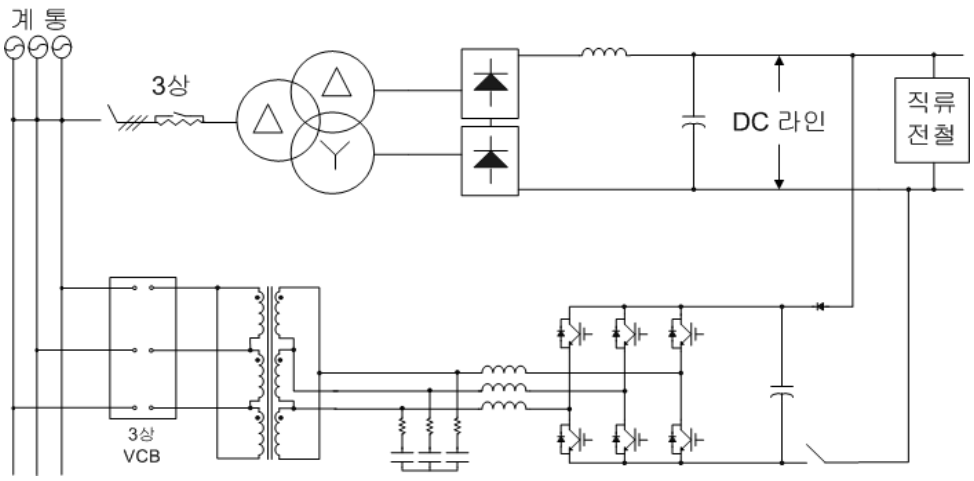
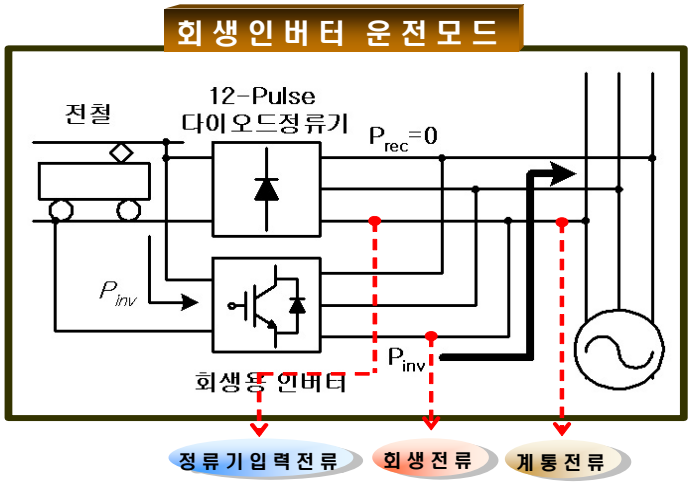


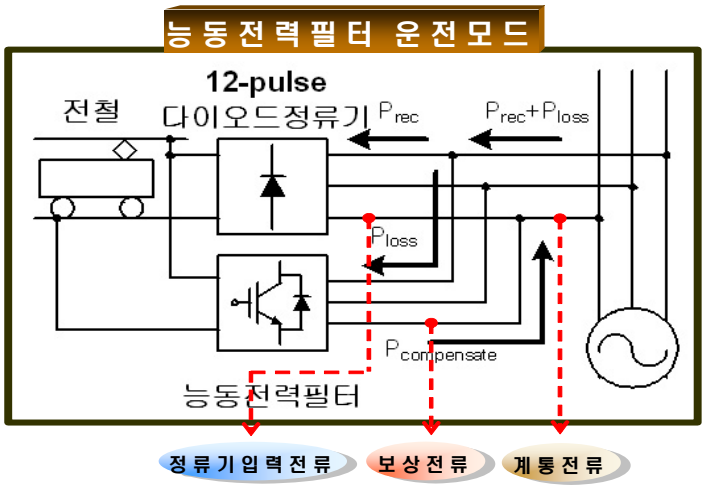
그림 1.3 제안된 직류구간 전철 급전시스템

그림 1.4(a)에서는 회생인버터가 가선전압을 검지하여 잉여회생전력으로 일정 전압이상 상승하면 회생인버터로 동작되어 잉여회생전력을 고압배전 측에서 소비하도록 한다. 그림 1.4(b)모드에서는 잉여회생전력이 없을 경우로서 회생인버터가 능동전력필터로 동작되어 3상 다이오드 정류회로로부터 발생되는 계통상의 전류고조파를 보상하게 된다. 따라서 잉여회생전력을 흡수하여 고압배전 측에서 재사용할 수 있을 뿐만 아니라 직류급전시스템의 계통전류의 고조파 저감시켜 고역율과 고효율을 기대할 수 있다. 표 1.1에는 본 연구에서 개발 중인 회생인버터의 장점들을

작성하여 제시하였다.



(a)회생인버터 모드



(b)능동전력필터 모드

그림 1.4 개발 중인 회생인버터 동작모드

표 1.1 개발 중인 회생인버터의 장점

장 점	내 용
에너지 절약	· 고압배전계통에서 회생전력을 재사용하고 차량에 탑재된 저항기 용량을 줄일 수 있어 차량의 경량화를 도모
회생실효감소	· 차량에 탑재된 저항기에서 소모되는 회생실효전력이 교류 모선으로 전달되어 고압배전 측에서 소모
승객의 안전성	· 회생인버터를 사용함으로써 차량 정차 시에 전기제동이 기계 제동으로 급격히 바뀌는 것을 방지할 수 있어 차량의 정위치정차가 가능해지고 스크린도어의 오동작을 막을 수 있어 승객의 안전을 도모
전력품질개선	· 능동전력필터 기능에 의한 고조파 저감 및 역률개선효과
차량성능개선	· 장거리 구배구간의 안정된 제동력 확보 · 정위치 정차 · 회생전력흡수 저항기 용량 감소
비용절감	· 공기제동사용량이 경감되어 브레이크슈 보수에 필요한 비용이 경감
친환경적	· 회생차량에 탑재된 저항기의 발생 열을 감소시켜 터널내의 온도상승방지에 따른 공조기 용량 감소 및 터널내의 분진 방지

2. 현재의 기술개발 실적

국내의 경우 외국 기업에서 개발/제작한 듀얼 컨버터를 적용하여 실 운전하고 있으며 정류 및 회생기능을 하나의 시스템으로 수행하고 있다. 국내 기업과 대학에서 개발한 회생인버터의 경우 교류 계통의 무효전력 및 고조파를 저감하는 기능은 없다. 경부고속철도의 경우 능동전력필터를 별도로 적용하여 고조파 및 무효전력을 저감하고 있다.

일본의 경우 직류전압을 사용하는 전동차 급전시스템에 위상제어 및 PWM 방식의 전력변환장치를 혼합 구성하여 사용하고 있다. 유럽과 아시아에서는 ABB사 등의 업체에서 개발한 회생에너지 전력변환장치를 실제 전철시스템에 적용하여 사용하고 있다. 또한 무효전력 및 고조파 저감장치인 능동전력필터를 구성하여 사용하고 있다.

국내외적으로 지하철 급전시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 외국의 경우 유럽, 남아공, 싱가포르, 일본 등지에서 회생인버터가 설치/운용되고 있다. 현재 국내에서도 지하철 급전시스템에 회생인버터 적용 관심이 증대되고 있으며 본 과제에서 개발하고 있는 능동전력 필터 기능이 추가된 회생인버터 시스템이 선진기술이 될 것이다.

제 2 절 연구내용 및 범위

1. 연구내용

회생인버터는 가선의 직류전압을 입력으로 받아 3상 교류전압을 출력하는 3상 전압형 인버터와 고조파 저감 필터, 계통연계변압기로 이루어지며, 개략적인 구성도는 그림 1.5와 같다. 다이오드 정류모드로 동작 시에는 능동전력필터 기능을 갖고, 직류 전압이 상승 시에는 회생인버터로 동작하는 철도 급전 시스템을 나타낸다. 3상 인버터 출력 단에서 고품질의 회생전력을 생산하기위해 LCL-필터를 도입하였으며, 회생인버터의 출력교류 단은 계통연계변압기를 사용하여 22.9kV의 계통으로 연계된다.

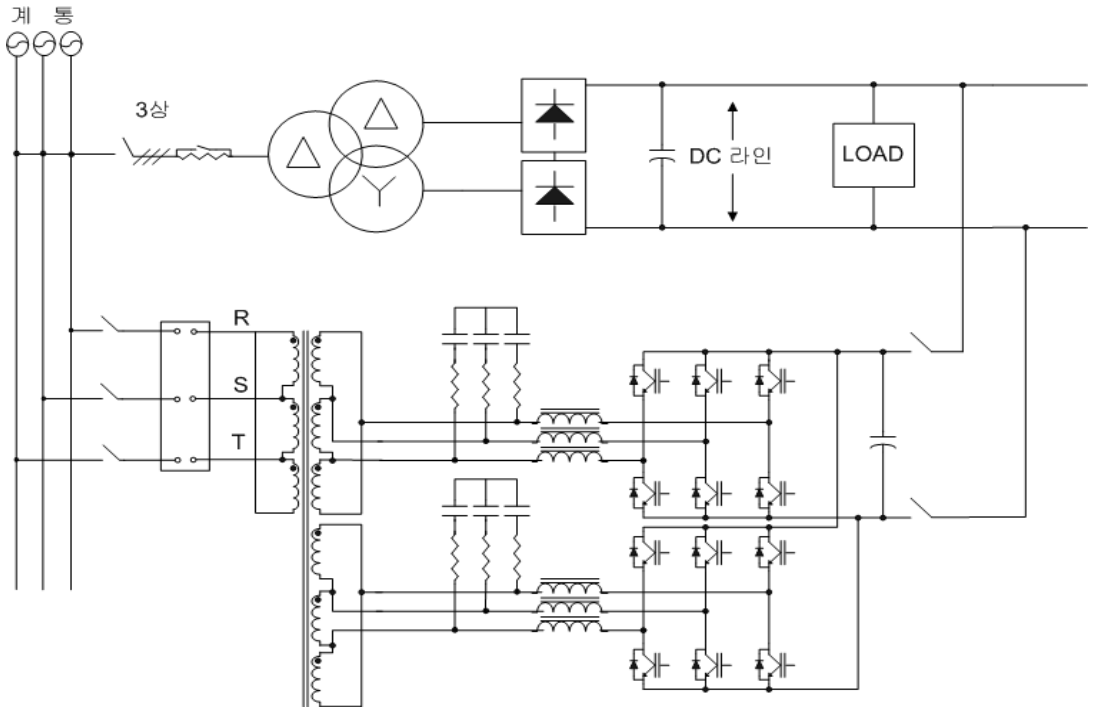


그림 1.5 제안된 직류구간 전철 시스템의 블록도

정상 운전 시에는 교류모선에서 공급된 전력이 다이오드 정류기를 통해 정류된 다음 전동차에 공급된다. 전동차에는 유도전동기가 사용되고 직류모선으로부터 전력을 공급받는다. 전동차가 제동중이거나 하강 경사로 주행 시 발생되는 회생에너지는 같은 직류구간 내의 다른 전동차에서 소모된다. 그러나 동일 구간의 직류 모선 내에 주행 중인 전동차가 없거나 회생된 에너지가 인접된 전동차에서 필요한 전력보다 많으면 직류모선의 전압은 점점 상승하게 된다.

이 전압이 일정 전압을 초과하게 되면 제동저항이 동작하여 과전압으로부터 시스템을 보호하게 되며, 그 결과 전기에너지가 낭비된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 PWM 회생인버터를 사용하여 직류모선의 잉여전력을 교류모선으로 회생할 필요가 있다.

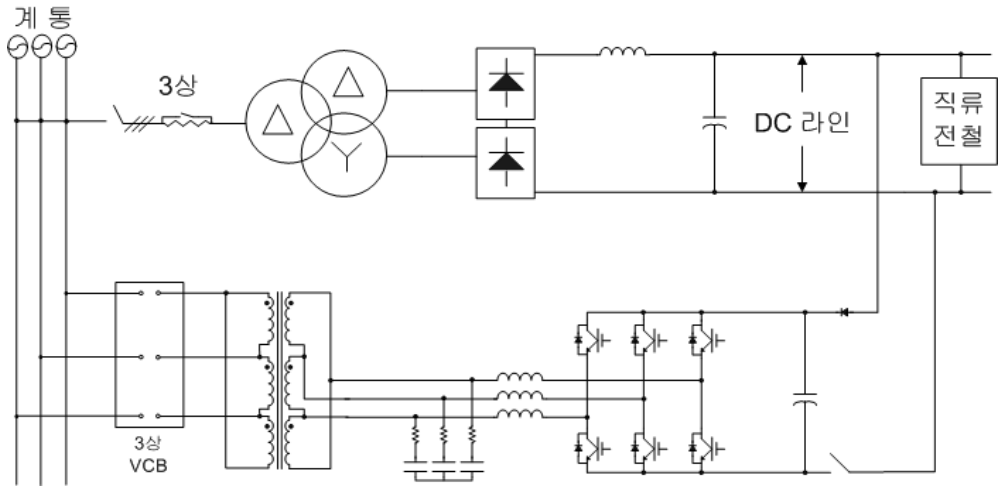


그림 1.6 제안된 직류구간 전철 급전시스템

현재 부산지하철 1호선과 2호선에 사이리스터를 이용한 더블컨버터(Double Converter)가 설치되어 운영 중에 있다. 국외의 경우에는 정류 및 회생을 겸한 시스템을 일부 사용하고 있다. 정류기 및 회생용 인버터로 구성된 더블 컨버터 시스템에 의해 에너지를 회생시킬 수도 있으나 다음과 같은 이유로 회생용 인버터를 별도로 설치하는 것이 유리하다.

교류모선에서 정류기를 통해 직류모선에 공급하는 전력에 비해 직류모선에서 인버터를 통해 교류모선으로 회생되는 전력이 작다. 일반적으로 경사로 구간이 많은 전철 시스템에서는 (인버터 용량)/(정류기 용량)의 비율이 1/3정도이며 평탄한 구간

만 있는 전철 시스템에서는 7～13% 정도면 된다. 따라서 회생용 인버터를 별도로 설치하면 인버터의 용량이 작아도 되고 기존의 정류기 시스템에 부가하여 설치할 수 있으므로 경제성이 높다.

한편, 전동차 시스템에는 전력변환 장치의 사용으로 고조파 전류발생, 역률 저하, 전압의 외형이나 불 평형이 수반된다. 이와 같은 역기능으로 전력기기의 상호교란, 온도상승 등의 문제가 발생된다.

2. 연구개발 목표 및 범위

본 5차년도 연구개발 목표 및 범위는 표 1.2와 같다.

표 1.2 연구개발 목표 및 범위

구분	목표	범위
1차 년도	기초기술 개발 및 전력변환기 기본 모델 개발	○전철급전시스템 분석(Ⅰ) ○전력 회생률 조사·분석(Ⅰ) ○국내외 에너지변환 및 회생장치 제품특성 조사 분석 ○전철시스템 에너지 재사용 연구 - PWM 컨버터 제어방식 고조파 영향분석 - 전력시뮬레이션 능동전력필터 용량산정 ○전력 변환 회로 검토 ○인버터 제어기기 개발 - 회생용 인버터 시스템 개념설계
2차 년도	축소형 회생인버터 개발	○ 전철급전시스템 특성 분석(Ⅱ) ○ 전력 회생률 조사·분석(Ⅱ) ○ 회생전력 시뮬레이션 ○ 직류전력 회생 인터페이스 연구 ○ 직류전력 회생 알고리즘 개발 ○ 회생용 인버터 설계 및 최적화(3.7KW) ○ 인버터 제어기술 개발 ○ 회생용 전력변환 시험 장치 제작
3차 년도	회생인버터 시작품제작 및 주변장치 설계	○에너지회생 시스템엔지니어링 ○회생인버터 인터페이스 설계 ○급전계통연계시스템 설계 ○전력품질 평가 및 향상

		○능동전력필터 제어알고리즘 구현 ○1.5MVA용량 회생인버터 시작품 제작 ○회생인버터 주변장치 설계 - 입·출력 필터 - 계통연계변압기
4차 년도	회생인버터 성능평가	○에너지회생 시스템엔지니어링 ○급전계통 보호장치 설계 ○전력품질 평가 및 향상 ○회생인버터와 능동전력필터 통합제어알고리즘 구현 ○회생인버터 주변장치 제작 ○회생인버터 시작품 성능시험
5차 년도	실계통 적용 및 신뢰성평가	○에너지회생 시스템엔지니어링 ○회생인버터 실계통 부설 ○회생인버터 통합제어기능평가 ○회생전력 품질평가 및 급전전력 품질평가 ○회생인버터 시스템 신뢰성평가 ○회생인버터 표준사양 및 운영안 제시 ○회생인버터 경제적 효과 분석 및 제시

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

1. 국내 1500V 직류 급전시스템

가. 직류 전철변전소

직류 전철변전소는 한국전력의 모선으로부터 수전한 3상 교류전력을 직류로 변환하여 전동차에 전력을 공급한다. 전철 변전소는 한전 변전소의 22.9kV 모선으로부터 수전설비를 통해 전력을 공급받아 변성 설비인 정류기용 변압기로 1,200V로 강압한 다음 정류 설비를 이용해 1,500V 직류를 급전 설비를 통해 전동차에 공급한다.

정류기는 실리콘 전력다이오드(Power diode)를 사용하여 교류전력을 직류전력으로 변환하는 전력변환기이며 정류기 전력소자의 특성상 단방향으로만 도통이 가능하다. 실리콘 다이오드 정류기는 기존의 수은정류기에 비하여 냉각 특성이 우수하고 구조와 취급이 간단하여 보수나 운전이 용이하며 소형경량으로 우수한 전기적 특성으로 가격도 저렴하여 대다수의 직류 전철 변전소에 사용되고 있다.

실리콘 정류소자는 접속용 리드선이 있는 스터드형과 원형 형상의 평판형이 있는데 평판형 소자가 냉각방식 및 직-병렬 구성이 유리하고 전류 용량이 커 표준소자로 사용된다. 실제 실리콘정류기의 소자 구성은 과전압에 대하여 다수 개를 직렬로 구성하고 과전류에 대하여 병렬 구성을 하여 과전압 및 과전류에 대비함과 동시에 전압, 전류 분담을 주도록 구성되어 있다.

국내 전철변전소의 정류기는 3,000kW급에서 4,000kW급까지의 용량으로 운용하고 있다. 이때의 정류기용 변압기의 용량은 다음과 같이 정할 수 있다. 정류기가 3상 브리지 결선이므로 정류기에는 각 상의 권선에서의 교류전류 반파 중 $\frac{2}{3}\pi$동안에만 전류가 흐른다. 직류 전류의 한 주기 평균값을 I_D라 하면 교류 실효치 I는 수식 (2.1)과 같이,

$$I = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{3}} < I_D >^2 d\theta} \tag{2.1}$$

$$= \sqrt{\frac{< I_D >^2 \times \frac{2\pi}{3}}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \bullet < I_D \geqq 0.8165 \bullet < I_D >$$

의 관계가 성립된다. 이때 정류기용 변압기의 용량 P는,

$$P[kVA] = \sqrt{3} \times E \times I \times 10^{-3} = \sqrt{3} \times E \times I_D \times 0.8165 \times 10^{-3} \tag{2.2}$$

가 된다. 그러므로 4,000kW급 정류기의 정류기용 변압기 용량을 계산하여 보면,

$$I_D = \frac{4000}{1500} \times 1000 = 2666.67[A] \tag{2.3}$$

$$P = \sqrt{3} \times 1200 \times 2666.67 \times 0.8165 \times 10^{-3} = 4525[kVA]$$

가 됨을 알 수 있다. 실제 설치되어 운용중인 4000kW급 정류기의 정류기용 변압기 용량은 4,520[kVA]로 식 (2.3)의 결과와 동일함을 알 수 있다. 3000kW급 정류기의 경우,

$$I_D = \frac{3000}{1500} \times 1000 = 2000[A] \tag{2.4}$$

$$P = \sqrt{3} \times 1200 \times 2000 \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times 10^{-3} = 3394[kVA]$$

가 되어 실제 설치된 정류기용 변압기 용량 3,390[kVA]가 됨을 알 수 있다.

실리콘 정류기는 입력을 교류로 받아 출력을 직류로 내보내므로 직류단자 전압은 맥동 전압의 평균치를 나타낸다. 출력전압$< V_{DC} >$는, △-△, △-Y 변압기 각각에 다

음 식을 적용한다.

$$< V_{DC} > = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_m \sin\theta d\theta \tag{2.5}$$

$$= \frac{3}{\pi} V_m$$

$$= 0.9549\, V_m$$

의 관계가 성립한다. 교류전압의 실효치 V는 최대전압 V_m에 대하여 $V_m = \sqrt{2}\, V$의 관계를 가지므로,

$$V_{DC} = 0.9549 \times \sqrt{2}\, V = 1.35\, V \tag{2.6}$$

의 관계가 성립된다.

즉, 3상 전파 정류기의 직류전압은 교류전압의 실효치에 비하여 1.35배가 되므로, 정류기에서 직류전압을 1,500V로 하기 위하여 교류전압은 식 (2.6)의 관계에 의하여 1,111V가 인가되어야 하나, 정류기의 1,500V 출력은 전부하(Full Load)가 걸려 있는 상황에서의 전압임으로 무부하(No Load)시의 전압은 이보다 높아야 한다. 또 선로의 전압강하를 고려하여야 함으로, 정류기의 교류인가 전압은 통산 1,200V를 인가하여 전철변전소의 출력전압은 1,500V 보다 높은,

$$E_D = 1.35 \times 1200 = 1620\, V \tag{2.7}$$

1,620V가 무부하 전압으로 출력되도록 설정되어 있다.

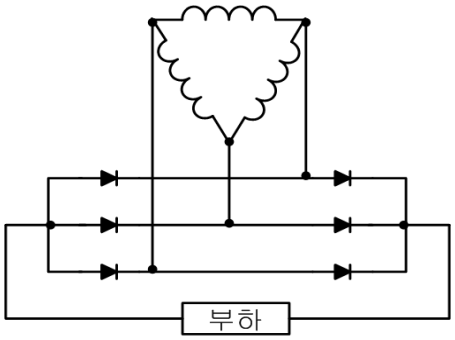
12펄스 직류 전철 변전소는 3상 전파정류기 2개를 30° 의 위상차를 가지도록 정류기용 변압기와 $\triangle - \triangle$, $\triangle - Y$ 결선의 2개 운영과 1개 예비의 3개로 구성되어 있다. 12펄스 정류는 6펄스 정류에 의하여 발생하는 5, 7, 17, 19조파를 상쇄하여 제거하므로 6펄스 방식에 비하여 종합 왜형율에서도 우수하므로 현재 12펄스 정류 방식이 일반적으로 사용된다.

P펄스 출력 정류기장치에서 발생하는 고조파의 차수 n은

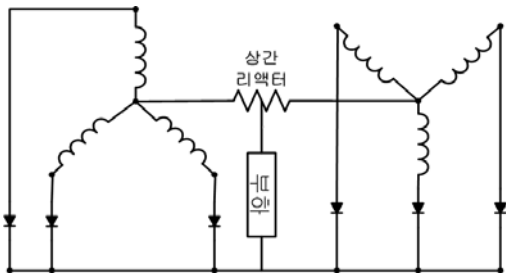
$n = mP \pm 1 (m = 1,2,3,--)$로 표현 할 수 있다. 6펄스 정류기에서 $m = 1$일 때 $P = 6$이므로 5, 7조파가 남게 되고 $m = 2$일 때 17, 19조파 등이 남게 되나 12펄스 정류기에서 $m = 1$일 때 $P = 12$이므로 11, 13조파가 발생하고 $m = 2$일 때 23, 25조파 등이 남게 되어 결과적으로 5, 7, 17, 19차 조파가 상쇄되어 없어지는 효과를 얻어 직류출력에 포함되는 고조파를 상당히 제거하는 효과를 볼 수 있다.

예전 서울시 1과 2호선의 경우에는 3상 전파 결선에 의한 6펄스 정류 방식을 하고 있으나 이후의 직류 전철 변전소에서는 12펄스 정류방식을 표준으로 채택하고 있다.

전기철도에서 정류기의 결선은 일반적으로 3상 브릿지(Bridge)결선과 2중 성형결선(상간 리액터부)의 2가지 방법이 활용된다. 브릿지 결선의 정류기에서는 1상의 정류기 소자 전체에 인가된 상시 역내 전압이 정류기용 변압기 2차 선간 전압의 1/2가 되고, 2중 성형결선의 경우는 변압기의 상전압과 같다. 반면 전류는 2중 성형결선의 경우 상시 2개의 상에 병렬로 전류가 흐르지만 브릿지 결선의 경우는 2개의 상에 직렬로 전류가 흐르므로 1개의 상에 흐르는 전류는 2배가 된다.



(a) 3상 Bridge 결선



(b) 2중성형결선

그림 2.1 정류기의 결선

결선에 따른 정류기 소자에서의 전압 및 전류의 차이로 1,500V 이상 급의 정류기에서는 브리지 결선 방식을 주로 사용하였으며 750V 및 600V급의 정류기에서는 2중 성형 방식을 사용하였다. 근래 대부분의 전철변전소 정류기는 전압에 상관없이 브리지결선 방식을 활용하는 추세이다. 국내의 1,500V 직류 전철 변전소는 브리지 결선방식을 사용한다.

나. 급전선

전차선로는 일반적으로 상/하행선 별로 급전선, 전차선, 조가선, 레일, 가공보호선으로 구성되어 있다. 이들 전차선로는 상/하행선 별로 전차선과 조가선이 수 미터마다 드로퍼로 연결되어 있고 상/하행선 레일, 가공보호선이 서로 연결되어 있다.

전철변전소에서 출력된 직류전력은 급전선을 통하여 전차선에 인가되며 급전 구간에서 운행되는 전동차는 차량의 집전장치를 전차선에 전기 접촉시켜 전력을 공급받게 된다. 이때 조가선과 드로퍼는 전차선을 지지하는 역할을 하며 가공보호선은 지락사고 등의 방지를 위하여 설치된다. 전동차에 공급된 전력은 레일을 통하여 전철 변전소로 회귀한다.

전차선로는 급전시스템에 따라 가선방식이 다르게 되어 있으며 크게 가공식과 궤조식으로 구분한다. 가공식은 전차선로가 지지물에 의하여 가공되어 있으며 전동차의 상부에 장착된 집전장치를 통하여 전력을 공급받는 방식으로 가공단선식, 가공복선식, 강체가선식이 주로 활용된다. 궤조식은 전차선로가 지지물에 의하여 지상에 설치되어 있는 방식으로 전동차는 차량의 하부에 장착된 집전장치를 통하여 전력을 공급받는 방식을 취하고 있다.

궤조식은 레일과 유사한 형태의 전차선을 가지며 레일을 귀선으로 사용할 경우 제3궤조식이라 하며 레일을 사용하지 않고 별도의 구 간선을 가질 경우 제4궤조식이라 한다. 국내에서는 궤조방식을 사용하지 않고 가공식 중 지상구간에는 가공 단선식으로 설치하고 지하구간에는 강체식으로 설치하는 것으로 표준으로 하고 있다.

가공 단선식은 궤도 상부에 1조의 가공 접촉 전선을 설치하고 전철 변전소로부터 전원을 급전하며 전기차는 차량의 상부에 설치된 집전장치에 의하여 집전하고 주행레일을 귀선으로 사용하는 방식이다. 이러한 가공 전차선은 지하구간에 채용하기에는 공간과 안전 및 유지보수 문제가 있으므로 지하구간에는 전차선을 강체에 완전하게 일체화시켜 고정하여 터널 상부에 애자를 체결하거나 교류급전에서와 같이 측면

브래킷을 체결하고 여기에 강체 전차선을 조가 하는 방식을 사용한다.

가공 가선은 카테너리(Catenary)조가식과 강체 조가식을 사용하여 전차선을 설치한다. 카테너리 조가식은 조가선을 전차선 위에 기계적으로 가선하고 일정한 간격으로 행거나 드로퍼를 매달아 전차선이 두 지지점 사이에서 궤도면에 대하여 일정한 높이를 유지하도록 하는 방식이다.

카테너리 조가식에는 심플방식, 콤파운드방식, 사조식으로 구분되며 일반적으로 심플 카테너리 방식을 사용한다. 심플 카테너리 조가 방식은 조가선과 전차선의 2조로 구성되어 있고 조가선에서 행거 또는 드로퍼에 의하여 전차선이 궤도면에 평행하게 조가 된 구조의 가선 방식이다. 카테너리 조가식의 가장 기본이며, 대표적인 것으로 일반적으로 110km/h 정도의 중속도용으로 지상전철 구간의 표준 전차선 조가 방식이다.

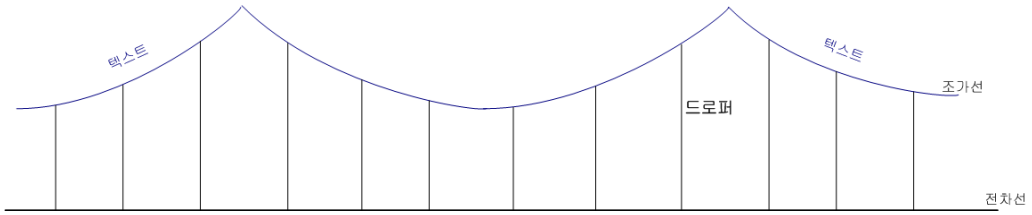


그림 2.2 심플 카테너리

직류급전 계통에서 급전선은 일반적으로 전압강하에 의한 모델로 구현할 수 있다. 교류 급전시스템에 비하여 직류 급전시스템의 직류분에 의한 전차선의 전압강하는 리액턴스 성분이 아주 작아 주로 저항 성분에 의하여 발생하게 되므로 전차선 모델은 간단히 할 수 있다.

전철변전소에서 공급되는 전력이 필터를 통하여 고조파 성분이 경감되어 이상적인 직류분에 가깝다고 가정하면 직류 전차선로는 전차선을 구성하는 각 기기의 저항 성분으로 모의할 수 있다. 직류 전차선로는 급전선, 조가선, 전차선 및 궤도의 4개 기기의 구성으로 되어 있어 각 기기 저항의 합성저항으로 하나의 전차선 모델로 구현할 수 있다.

직류급전 계통에서 전차선은 급전선, 조가선, 트로리선에 의한 전압강하로 구분 할 수 있다. 트로리선은 전동차의 판토그라프의 집전판과 직접접촉을 통하여 전동차에 전력을 공급하는 역할을 하는 전선이다.

전류는 급전선 -> 트로리선 -> 조가선 -> 트로리선의 순환전류가 발생하는 형태로 흐르게 된다. 조가선에 전류가 흐름으로 인하여 다소의 전류손실이 있으나 병렬형태로 전차선의 저항을 낮게 하여 전압손실을 줄인다. 순환전류는 조가선과 트로리선 사이의 행거와 드로퍼, 지지금구를 통하여 흐르게 된다. 직류에서 전차선로의 전류회로는 다음과 같다.

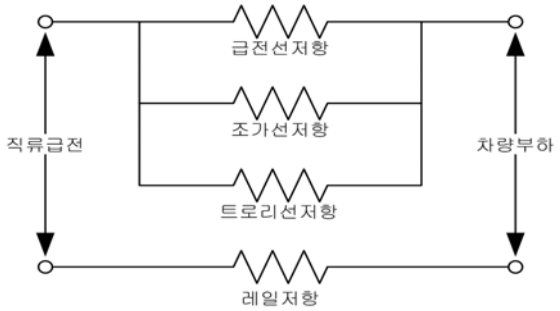


그림 2.3 직류급전에서의 전차선 전류회로

그러므로 전차선로는 직류전철변전소와 차량부하 사이의 합성저항으로 나타낼 수 있다. 급전선 저항을 R_F, 조가선 저항을 R_M, 트로리선 저항을 R_T, 레일 저항을 R_R라 하면 전차선 합성저항은,

$$R_L = \frac{1}{\frac{1}{R_F}+\frac{1}{R_M}+\frac{1}{R_T}} + R_R \tag{2.8}$$

$$= \frac{R_F R_M R_T}{R_F R_M + R_M R_T + R_T R_F} + R_R$$

과 같이 단일 저항 R_L로 등가화 할 수 있다. 계산에 필요한 도체저항은 20° 에서의 온도 및 레일의 누설전류가 30%일 때를 표준으로 하고 있다.

다. 전동차

전동차는 승객 부하나 운행 목적에 따라 종류별 차량을 연결하여 하나의 완제 편성으로 운행을 한다. 이때 각각의 차량을 량이라고 하며 이 량이 다수 모여 편성을

이룬다. 각 량은 기능에 따라 전동차(Motor car)와 객실차(Driving Trailer car)로 구분하여 필요에 따라 조합하여 1개 편성으로 운영하는 것이 일반적이다.

각 량은 편성 이전에 1개 유닛(Unit)으로 조합되어 단독 운행이 가능한 조합을 갖추며 2개 유닛이 조합되어 1개 편성을 이루어 좌우 대칭 구조가 된다. 이는 전동차가 고정된 라인을 상행 및 하행으로 운행하므로 이에 대한 편리성과 운행방향의 선두 유닛의 고장이 발생한 경우에도 후두의 유닛으로 차량을 안전한 지역으로의 운행이 가능하도록 하기 위함이다. 편성은 통상 4량1편성, 6량1편성, 8량1편성 및 10량1편성으로 하며 경우에 따라 추가 조합하여 운행한다.

전동차는 변전소로부터 전력을 받아 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) 제어를 수행하는 인버터 및 유도전동기를 이용하여 동력을 발생 시킨다. 전동차는 급전시스템 전압 종류에 따라 교류전동차와 직류전동차로 구분한다.

교류전동차도 교류 전철 변전소로부터 받은 전력을 VVVF제어를 수행하는 전동차의 입력으로서 컨버터를 통해 직류로 전환하기 때문에 입력단의 변환부를 제외하고는 직류전동차와 거의 유사하다.

전동차는 속도제어 방식에 따라 저항제어, 초퍼제어, VVVF제어 차량으로 구분할 수 있으나 현재에 생산되는 차량은 VVVF제어가 표준으로 사용된다. 전동차의 전력분배는 주전원과 보조전원부로 구분하며 주전원은 VVVF인버터 및 유도전동기의 전력원으로서 활용되며 보조전원부는 인버터 380V교류 및 110V교류 또는 직류 등의 차량에어컨 및 각종 제어유닛 등에서 필요한 전력으로 변환하여 송출한다.

표 2.1 및 표 2.2는 국내 전동차의 노선 별 특성을 보여준다.

표 2.1 국내 전동차의 전기적 특성(I)

노 선 / 구 분		1기 (지하철공사)				
		1호선		2호선	3호선	4호선
편성		10량(6M4T)	10량(5M5T)	4량 6량 10량	10량	10량
속도제어방식		저항제어	VVVF제어	Chopper제어	Chopper제어	VVVF제어
전기방식		직류 1,500V 교류 25,000V	직류 1,500V 교류 25,000V	직류 1,500V	직류 1,500V	직류 1,500V 교류 25,000V
운행 성능	최고 속도	110km/h		100km/h		
	가속도	2.5km/h/s	3.0km/h/s	3.0km/h/s	3.0km/h/s	3.0km/h/s
	감속도	상용:3.0km/h/s 비상:4.0km/h/s	상용:3.0km/h/s 비상:4.0km/h/s	상용:3.0km/h/s 비상:4.0km/h/s	상용:3.0km/h/s 비상:4.0km/h/s	상용:3.0km/h/s 비상:4.0km/h/s
	저크 (JERK)	$0.8m/s^3$이하		$0.8m/s^3$이하	$0.8m/s^3$이하	$0.8m/s^3$이하
제동	방식	발전제동병용 전자직통 공기제동	회생제동병용 전자직통 공기제동	회생제동병용 전자직통 공기제동	회생제동병용 전자직통 공기제동	회생제동병용 전자직통 공기제동
	주차 제동	수용제동	스프링작용 공기환해	수용제동	수용제동	스프링작용 공기환해
	보안 제동	-	공기작용식	공기작용식	공기작용식	공기작용식
견인 전동기 (1시간 정격)	형식	직류직권 전동기	3상 농형유도전동기	직류직권 전동기	직류직권 전동기	3상 농형유도전동기
	정격 출력	120kw	200(230)kw	150kw	162kw	200kw
	정격 전압	DC 375V	AC 3ψ 1,100V	DC 375V	DC 375V	AC 3ψ 1,100V
	정격 전류	360A	130(150)A	440A	480A	130A
	회전수 (rpm)	1,650	1,945(1,940)	1,980	1,900	1,945

표 2.2 국내 전동차의 전기적 특성(II)

구분 \ 노선		2기 (지하철공사)			
		1호선	2호선	3호선	4호선
편성		8량(3M4T)	8량(4M4T)	8량(4M4T)	6량(3M3T)
속도제어방식		VVVF제어	VVVF제어	VVVF제어	VVVF제어
전기방식		직류 1,500V	직류 1,500V	직류 1,500V	직류 1,500V
운행성능	최고속도	100km/h	100km/h	100km/h	100km/h
	가속도	3.0km/h/s	3.0km/h/s	3.0km/h/s	3.0km/h/s
	감속도	상용:3.5km/h/s 비상:4.5km/h/s	상용:3.5km/h/s 비상:4.5km/h/s	상용:3.5km/h/s 비상:4.5km/h/s	상용:3.5km/h/s 비상:4.5km/h/s
	저크(JERK)	$0.8m/s^3$이하	$0.8m/s^3$이하	$0.8m/s^3$이하	$0.8m/s^3$이하
제동	방식	회생제동병용 전자직통 공기제동	회생제동병용 전자직통 공기제동	회생제동병용 전자직통 공기제동	회생제동병용 전자직통 공기제동
	주차제동	스프링작용공기환해	스프링작용공기환해	스프링작용공기환해	스프링작용공기환해
	보안제동	공기작용식	공기작용식	공기작용식	공기작용식
견인전동기(1시간정격)	형식	3상 농형유도전동기	3상 농형유도전동기	3상 농형유도전동기	3상 농형유도전동기
	정격출력	200kw	210kw	210kw	210kw
	정격전압	AC 3ψ 1,100V	AC 3ψ 1,100V	AC 3ψ 1,100V	AC 3ψ 1,100V
	정격전류	132A	135A	155A	135A
	회전수(rpm)	2,200	2,200	2,200	2,200

전체 급전시스템을 모의하는데 있어서 차량 모델은 하나의 소자로서 고려할 수가 있다. 따라서 실 계통에서 측정한 데이터 또는 TPS(Train Performance Simulation) 결과를 차량의 출력 데이터로 사용하여 모델을 구성 할 수 있다.

TPS는 도시철도의 선로, 운전, 차량, 지상설비 등의 입력 조건에 의해서 모델을 구성하므로 측정을 위한 시간과 노력을 줄일 수 있는 장점이 있으나 ATC(Auto Train Control) - ATO(Auto Train Operation)운용이 없는 노선에서는 운전자의 운전특성에 의하여 출력 특성이 다르게 나타나는 경우가 있다.

전동차는 역과 역간에 기동-타행-제동-정지의 패턴으로 노선별 지정된 속도에 따라 기동하도록 그림 2.4와 같이 표준운전곡선이 정해져 있다.

전동차는 속도에 따라 역행/회생전류를 발생하며 이 동작에 따라 가속도 또는 감속도를 얻어 전동차의 운전 상태와 속도를 결정한다. 따라서 전동차는 매시간별 각각의 운전모드중 하나의 운행상태를 가지게 된다.

즉, 전동차는 속도에 따라 매시간별 위치가 결정되고 속도/위치가 결정되면, 표준운전곡선에 따라 운전모드가 정해져 해당 운전모드에서의 전압, 전류 특성이 결정된다.

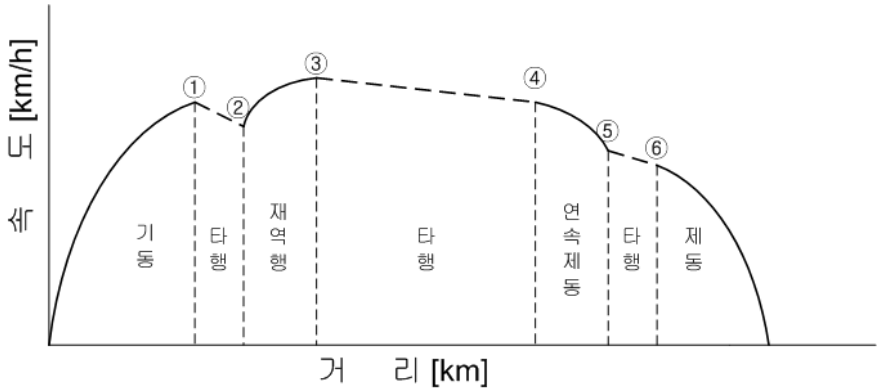


그림 2.4 운전곡선

그림 2.4의 운전곡선은 일반적인 경우의 운전곡선으로 각 노선별 상태나 전동차의 운행량에 따라 약간씩 다른 속도 기준치를 가지고 결정된다. 그러나 일반적인 운행형태는 유사하다. 최초 기동으로 전동차는 역에서 출발하여 역행동작으로 ①의 속도까지 도달한다.

표준운전곡선은 해당 노선의 구간별 목표속도를 지정하므로 이 속도에 도달하면

역행 동작에서 타행 동작으로 이행한다. ②의 목표속도에 도달하게 되면 다시 역행 동작으로 변경하여 ③의 목표속도에 도달한다. 이후 타행으로 ④의 목표속도에 도달하여 회생제동과 공기제동으로 ⑤와 ⑥의 목표속도를 거쳐 도착역에 정차하게 된다.

전동차의 운행곡선을 결정하는 것에는 목표속도라는 것이 중요하다. 각 구간에서는 전동차가 안전하게 운행이 되도록 목표속도를 정해 두고 있으며, 전동차는 각각의 목표속도로 운행이 되도록 가속 또는 감속을 수행한다. 그러므로 운행곡선의 거리별 속도는 전동차가 구간 내에 정해진 목표속도에 맞추어 운행하는 전동차의 동작특성으로 볼 수 있다.

이때 영향을 전동차의 성능과 함께 영향을 주는 부분이 선로의 구배 및 곡선 상태이다. 선로에는 직선 구간과 곡선 구간이 있으며 곡선은 그 크기를 반경으로 표시한다. 곡선반경이 크면 클수록 좋지만 선로의 지형에 따라 제약을 받으므로 열차의 속도, 운전의 안전성, 경제성 등의 면에서 최소한도로 지정하고 있다.

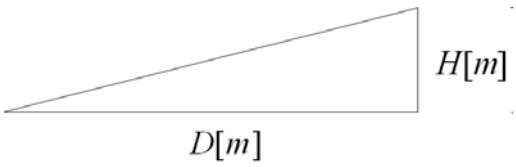


그림 2.5 구배율

각 구간은 지형 여건에 따라 구배가 다르며 이 구배에 의하여 목표 속도를 맞추기 위한 전동차의 운행특성이 달라지며 이에 따라 운행곡선 또한 각 구간별로 특징을 가지게 된다. 그러므로 제동구간의 영속성 또는 횟수가 각 구간별로 다르게 되며 차량의 운전곡선 변화에 따라 회생전력이 해당 구간에서 많이 발생하기도 하며 반대로 적게 발생하게 된다.

회생전력이 많이 발생하는 구간에서는 회생전력을 활용하는 장치를 설치하여 회생전력을 유효하게 활용하는 것이 좋으나 회생전력이 적게 발생하는 구간에는 전동차의 회생유효율이 회생전력에 의한 전압상승에 상대적으로 적게 영향을 받는다. 회생전력 활용장치까지의 에너지 전달과정에서의 손실을 고려할 때 경제성이 떨어질 수 있으므로 설치에 대한 고려를 신중히 해야 할 것이다.

관찰 구배 구간에서 연속 구배 구간과 최대 표고차가 큰 곳이 구배가 없는 곳에 비

하여 같은 조건이라면 소모되는 전력량의 크기 뿐 아니라 회생되는 전력량 등 전력량의 변화가 클 것이다.

라. 병렬 급전 계통의 구성

국내의 표준 직류 급전시스템은 특별 고압 22.9kV의 일반 계통으로부터 수전한 교류전력을 전철 변전소 변압기에서 통상 1,200V로 강압한 후 12펄스 정류기에서 직류 1,500V로 변환하여 전차 선로를 통해 전동차로 직류 전력을 공급하는 방식이다.

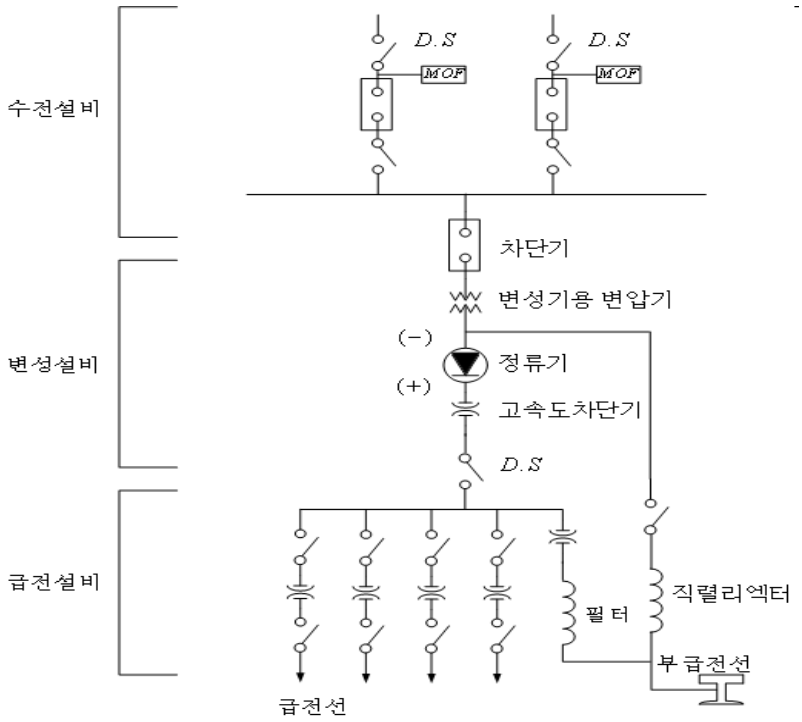


그림 2.6 직류전철변전소 급전계통도

급전전압은 계통이 형성되는 거리나 지리적인 조건 또는 변전소의 전기적 특성에 따라 각 600V, 750V, 1,500V, 3,000V 등으로 구분되어 있으나 우리나라에서는 1,500V 직류전압을 표준으로 사용하고 있다. 전철 변전소 간격은 전압 강하 등을 고려하여 대략 3~5km 단위로 정하여 급전 구간으로 구분하고 있다.

직류 급전 구간은 전철 변전소(SS : Sub Station)와 급전 구분소(SP : Sectioning Post)간을 1구간으로 하여 방면별로 상/하선을 담당하여 급전하는 것을 표준으로 하고 있다.

직류급전 계통을 구성하는 방법은 여러 방법이 있으나 국내에서는 그림 2.7과 같이 병렬 급전방식을 표준으로 채택하고 있다. 각 전철 변전소가 정상 급전을 할 때에는 전압 강하의 경감, 절체 구간에서의 아크 방지를 위하여 급전선과 전철 변전소 및 급전 구분소(SP : Sectioning Post) 모선을 전기적으로 연결하여 인접 전철 변전소와 병렬 형태로 급전하고 있다.

각 회선은 이상 현상이나 고장 발생 시 급전 구분소의 고속도 차단기에 의하여 인접한 전철변전소의 계통과 분리되도록 되어있다. 이 방식은 변전소간의 중간점에 상하의 급전선을 직류 모선으로 연결하고, 급전 회로의 저항을 낮게 하여 전압 강하를 경감시키는 방식으로 복선 구간의 시간대에 따라 상/하선의 부하가 크게 다른 구간에 유효한 방식이다.

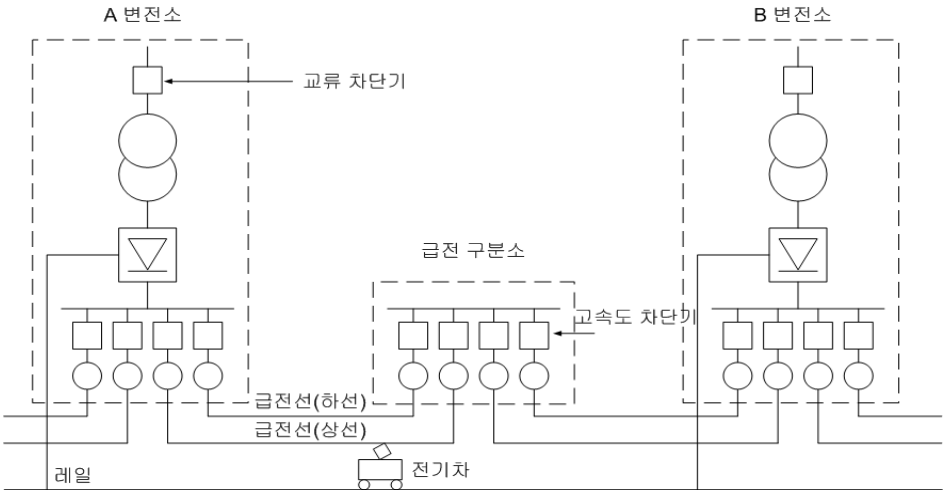


그림 2.7 직류 급전 계통

일반적으로 전철변전소 A와 B는 약 4~5km 급전구간을 담당하며 구간이 종료되는 마지막 구간에서는 끝단에 전철변전소가 없으므로 해당 전철변전소가 약 2km의 구간을 추가로 담당한다. 급전 구분소에는 연락급전과 사고의 확장을 방지하기 위한 시스템을 갖추어 설치되는 것이 일반적이다.

두 전철변전소간의 거리가 지형적인 여건이나 기타 요인에 의하여 확장될 경우 전압강하에 의한 전동차의 운행에 차질이 발생하지 않도록 정류시스템을 갖춘 정류포스터(RP : Rectifying Post)를 설치하여 운용하는 경우도 있다.

2. 능동전력필터 국내도입

우리나라의 직류 1,500V 전철시스템에서는 잉여회생전력에 의해 가선전압이 증가한 경우 차량에 설치된 과전압저항기를 사용하여 회생전력을 소모시키도록 하고 있다. 즉 잉여회생전력으로 인한 가선전압 상승이 발생할 때 과전압저항기에서 차량의 필터커패시터에 저장된 회생전력을 열로서 소모시키도록 하며, 이후에도 가선이 회생전력을 수용하지 못할 경우에는 마찰제동으로 전환하여 운행하고 있다.

국내에서는 잉여회생전력을 흡수하여 재사용하는 전철시스템은 부산 지하철 1과 2호선이 있지만, 이 경우에는 회생인버터를 사용하지 않고 사이리스터 위상제어정류기를 역 병렬로 구성한 더블컨버터를 사용해 잉여회생전력을 계통 단으로 전달한다. 이것은 정류기와 인버터가 같은 용량으로 설계되기 때문에 회생용 저항기 및 회생용 인버터와 같은 회생전력흡수장치들에 비해 대용량이므로 경제성이 크게 떨어지고, 기존 노선의 변전소에 설치하기에는 설비의 설치면적 및 낮은 전력품질로 어려움이 따른다.

한편 국내에서도 IGBT 스위칭 소자를 이용한 회생전력 흡수장치 개발이 일부 이루어져 왔으나 제품개발로 끝났으며, 실제 계통에 연계 후 현장시험이 이루어지지 않았다. 이들의 경우 회생전력으로 인한 가선전압 상승 시에 회생인버터가 구동되고 회생전력을 흡수하여 가선전압을 낮추는 기능은 본 연구과제에서 개발하고 있는 회생인버터와 동일한 기능이지만 직류전철 급전시스템의 고조파저감 및 고효율화를 위한 능동전력필터 기능을 수행하지는 못한다. 따라서 추가로 계통 단에 수동필터반을 설치하여 전류의 저차 고조파를 저감하고 있으며 회생전력 미발생시에는 운전정지상태가 된다. 본 연구에서 수행중인 차세대 회생인버터는 스위칭고조파 저감을 위해서 최근 활발한 연구가 수행중인 LCL 필터를 채용하여 고품질을 회생전력을 발생시킬 뿐만 아니라, 회생전력 흡수기능 외에 능동전력필터 기능을 수행할 수 있어 부가적인 수동전력필터가 필요하지 않고 설치 공간을 크게 줄일 수 있다.

현재 우리나라의 전기철도시스템에 도입된 능동전력필터 설비사례는 다음과 같다.

가. 능동전력필터가 적용된 경부고속철도

그림 2.8은 능동전력필터가 적용된 경부고속철도의 급전시스템을 나타내고 있다. 고속철도의 차량부하가 연계된 계통모선에 변압기를 통하여 능동전력필터가 투입되고 있음을 알 수 있다. 경부고속철도 고조파 저감설비인 능동형 필터의 하드웨어는 크게 8개 부분으로 구성되어 있다. 능동전력필터를 구성하고 있는 8개 부분은 다음과 같다.

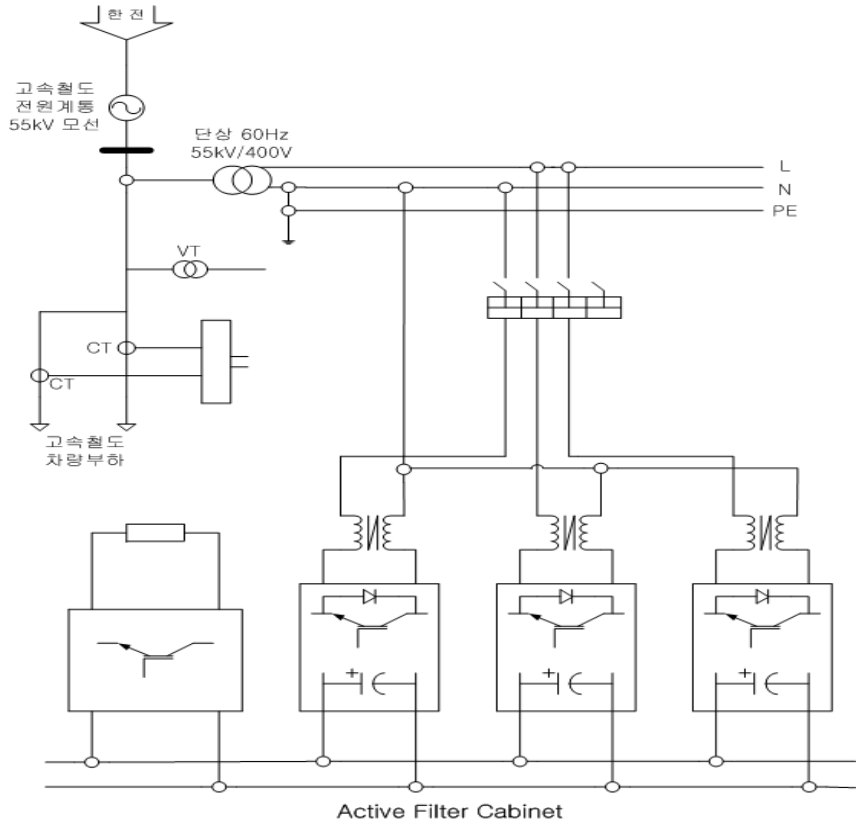


그림 2.8 직류구간 전철 시스템의 블록도

- 능동형 필터
- 능동형 필터용 변압기
- Precharge DC-link
- IGBT pulse filter
- 리액터 설비
- 전원측 과전압 보호장치
- 검측부 (변성기 회로 : CT, PT)

- 기타 부대설비 (냉각장치, 제어전원 등)

경부고속철도에 투입된 능동전력필터 전력변환부에는 IGBT로 구성된 VSI(Voltage Source Inverter), 커패시터 Bank, DC Bus, 초퍼, 저항기기 등이 내장되어 있다. VSI의 경우 PWM 제어에 의해 IGBT로 구성되었으며 3개의 VSI Unit를 병렬 접속하였다. 최대 고조파 저감 조파는 21조파이며 각 인버터 내에는 전류를 제한하는 장치가 있다. PWM 스위칭 주파수는 8kHz이며, 초퍼의 경우 DC Bus 전압이 기준전압 이상 시 저항기를 통하여 에너지를 방출하여 전압을 낮추어 줌으로서 DC Bus 전압을 안정시켜 주는 역할을 한다. 전원 계통간의 전압을 맞춰주기 위한 변압기, 고조파 전류와 전압을 검출하기 위한 CT/PT가 있다. 능동형 필터를 기동하기 위해서 우선 DC 커패시터에 초기 충전을 위한 회로를 구성해야 한다. 이를 위한 장치가 저항기를 포함한 Precharge DC-link 이다.

나. 전류 주입 방식 능동전력필터

능동전력필터는 산업설비에 산재한 전력변환장치에 의해 발생하는 고조파를 가장 효율적으로 제거하는 장치이다. 현재 국내의 능동전력필터 시장은 연간 200억원 이상 정도로 추정되며 전력변환설비의 급증에 따라 능동전력필터 시장규모도 점진적으로 증가하고 있다. 외국의 ABB와 Siemens 등이 선점하고 있던 국내시장에도 국내기술에 의해 개발되어진 능동전력필터가 산업현장에 적용됨에 따라 향후 국내시장을 점유할 수 있을 것이다. 고조파 저감을 위한 능동전력필터를 사용하면서 얻을 수 있는 장점을 요약하면 다음과 같다.

- 고조파에 의한 변압기의 용량 손실 보호
- 고조파로 인한 선로 손실 및 변압기, 케이블, 차단기의 열화로 인한 소손 방지
- 고조파 투입에 의한 리액터 및 커패시터 화재 방지
- 커패시터 과전류 억제와 역률 개선
- 통신 유도 장해 방지와 전기기기의 수명 연장
- 계통의 안전 운전 확보 및 운전비용 감소

그림 2.9는 전류주입 방식을 채용한 능동전력필터의 기본 구성도를 나타내고 있다. 주요 하드웨어 구성은 제어부와 전력회로로 이루어져 있다.

제어부는 부하전류에서 기본파 성분과 고조파 성분을 분리, 능동전력필터가 계통에 주입해야 할 보상 기준전류를 검출해 내는 기능을 하는 보상전류 검출부와 검출된 전류의 파형을 PWM 컨버터를 통해 근사적으로 구현하기 위한 전류제어부로 나뉘어 진다.

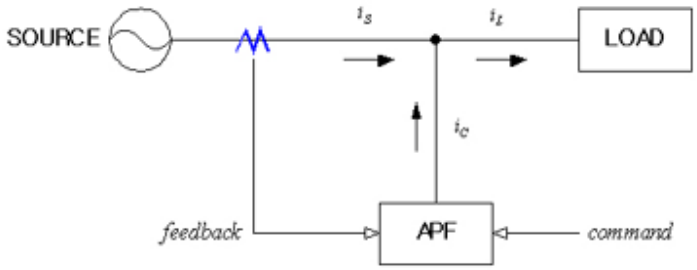


그림 2.9 전류 주입형 능동전력필터 구성도

그림 2.10은 전류 주입형 능동전력필터의 회로도를 나타내고 있다. 전력회로의 기본구성은 6개의 IGBT의 커패시터 뱅크로 이루어진 스택과 계통연계용 리액터이다. 이 밖에 전압/전류 검출장치, 퓨즈, 전원 공급부, 냉각장치 등으로 구성된다.

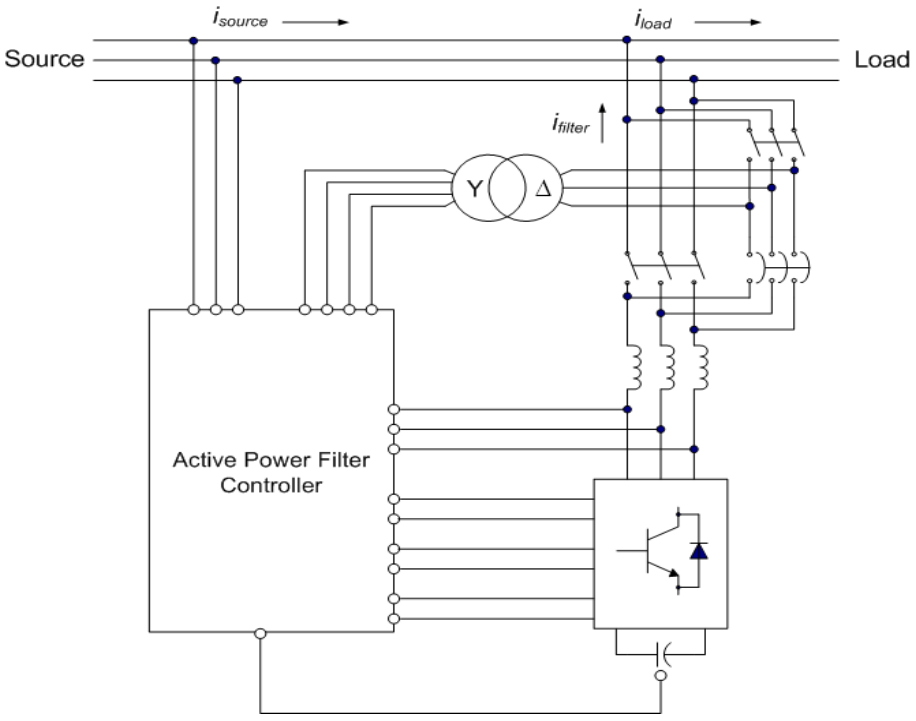


그림 2.10 전류 주입형 능동전력필터의 회로도

다. 무효전력보상기

무효전력보상기는 용접기, 크레인, 불특정 다수의 부하로부터 불규칙적인 무효전력을 발생시키는 계통에서의 전력품질을 개선시킬 목적으로 개발되었다. 크게 SCR 타입과 IGBT 타입 등 2가지 소자에 의해 구성할 수 있다. 무효전력보상기를 적용할 수 있는 부하로는 용접기, 아크로, 크레인 등 불규칙적인 무효전력을 발생시키는 부하 등이 있다. 일반적인 능동전력필터와 동일하게 제철소, 화학공장, 금속공장, 항만, 공장 등에 적용시킬 수 있다. 순시 무효전력보상으로 전압 강하와 플리커를 방지 할 수 있고 전력 스위칭 소자를 사용하여 과도현상 없는 무효전력을 투입할 수 있다. 또한 주변의 민감한 전자 설비를 보호 할 수 있고 현장의 에너지를 절감할 수 있게 해준다. SCR 방식은 영 전압 제어방식으로 운전 시의 과도현상을 최소화 할 수 있으며, 응답속도가 좋아 용접기, 아크로 등의 단시간 부하에 적용 할 수 있지만 고조파 필터 기능을 하는 커패시터에 대한 유지/보수가 필요하다는 단점을 가진다. IGBT 타입의 무효전력 보상기의 특징은 아래와 같으며 그림 2.11은 그 개념도를 보여주고 있다.

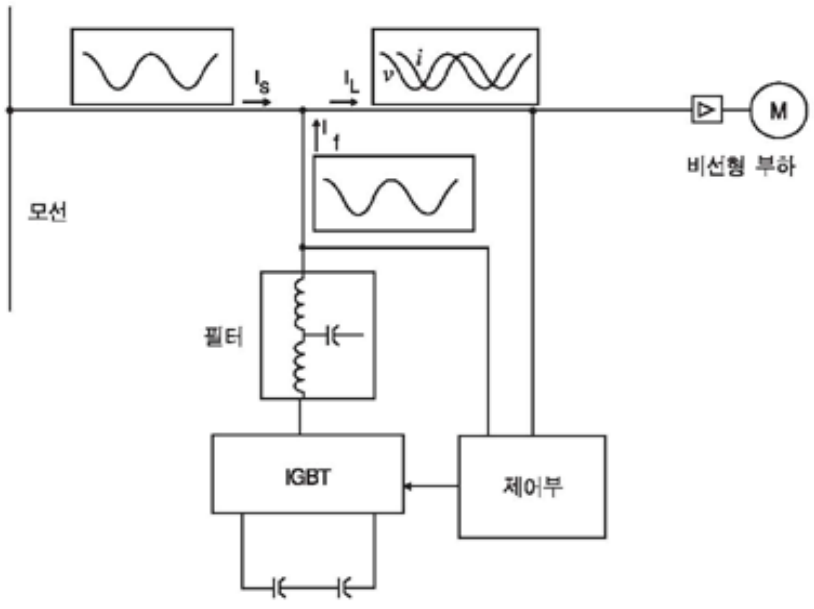


그림 2.11 무효전력보상기 개념도

- IGBT 소자를 적용하고 PWM 제어를 함으로서 순시보상이 가능
- 완벽한 무효전력보상을 구현
- 전압 변동 및 무효전력을 가장 빨리 보상

- 추후 용량 증설 시 계통에 문제 발생 없음
- AC 커패시터가 없으므로 유지/보수 가 용이

본 절에서는 직류구간 급전시스템에 적용할 수 있는 회생인버터 시스템의 전력 제어 및 고조파 저감 방법에 대해 국내 개발 현황 사례를 기술하고자 한다. 또한 직류구간 변전소를 구성하고 있는 급전시스템에 대해 설명한다.

3. VVVF 인버터의 고조파 저감 기법

PWM(Pulse Width Modulation) 인버터는 마이크로프로세서와 전력용 반도체 소자의 발달에 따라 UPS 및 AC 구동 시스템에 많이 응용되고 있으며 연구되고 있다. 그러나 PWM 인버터를 사용하여 유도전동기를 가변속 운전하는 경우 전동기 입력전압은 펄스형태이므로 기본파 이외의 많은 고조파를 발생시켜 전철 변전소의 전력 품질을 저해하고, 전동기의 손실을 증가시키고 토크리플 및 소음과 같은 문제점을 야기한다.

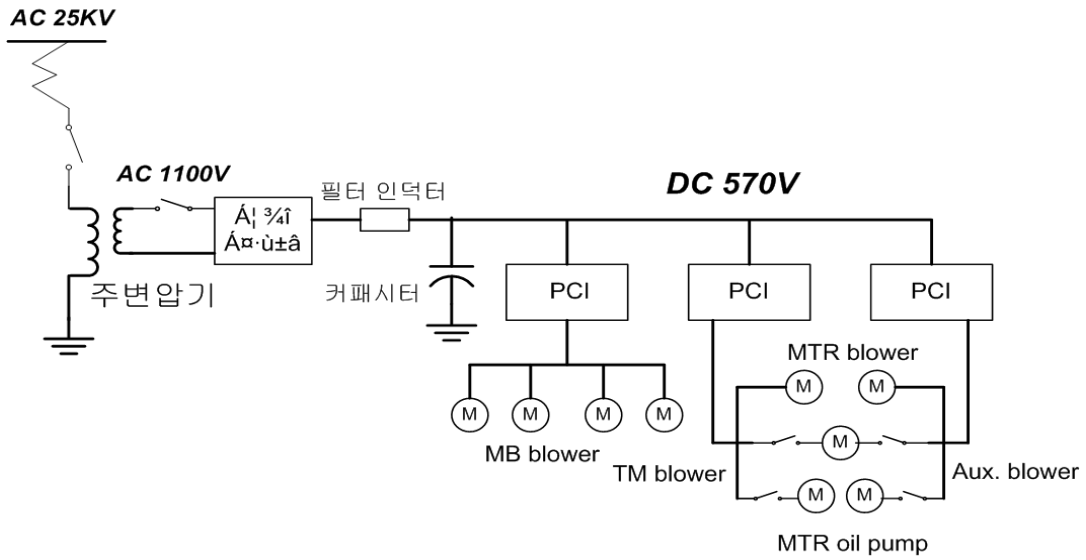


그림 2.12 고속전철용 보조전원 인버터의 시스템 구성도

이러한 고조파의 영향을 저감시키기 위한 방안으로 한 주기내의 펄스폭을 각각 다르게 변조시켜 전동기에 입력되는 고조파의 영향을 감소시키는 펄스폭 변조 방식들

이 연구되어 왔다. 고속전철용 보조전원 장치에 사용되는 인버터는 제어 조건에 따라 전동기 철심의 자기포화 현상을 피하기 위하여 전압과 주파수를 동시에 제어하는 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) 제어방식으로 출력전압과 주파수의 비를 일정하게 유지시켜야 한다.

고속전철용 보조전원 인버터 중 PCI(Power Car Inverter)는 펌프나 송풍기용 전동기를 구동하는데 이런 저감토크 부하에서는 회전속도가 저감됨에 따라 부하토크가 회전속도의 제곱에 비례하여 감소한다.

일정토크 부하용의 *V/f* 패턴보다 전압을 낮춤으로써 저감 토크 부하시의 전동기 입력전류를 감소시켜 전동기 효율과 인버터 효율을 개선하며, 고조파 저감을 위해 SPWM방식, 3고조파주입 PWM방식과 공간전압벡터 PWM방식의 고조파 특성을 비교・검토하였다.

가. 유도전동기의 인버터 제어

유도전동기를 가변속 구동하는 경우 전동기의 특성에 대응해서 인가하는 전압・전류・주파수 등을 적절하게 제어할 필요가 있다. 특히, PCI는 모터블록과 보조블록을 통풍시키는 팬, 견인전동기와 주변압기를 통풍시키는 팬, 그리고 주변압기 오일펌프용 전동기와 같은 저감토크 부하특성에 따른 모터구동을 위해 적절한 전압과 주파수 패턴이 결정되어야 한다. PCI의 시스템 구성도는 그림 2.12와 같다.

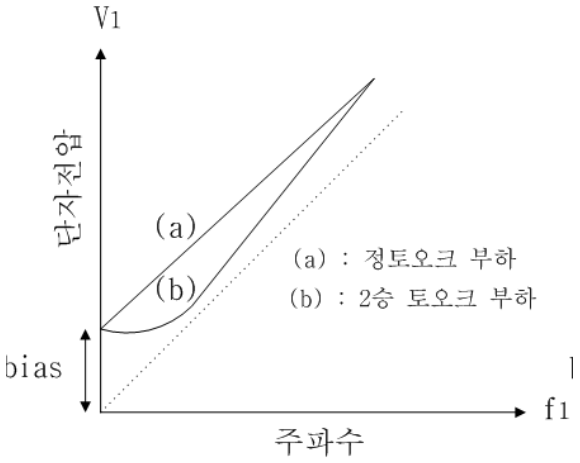


그림 2.13 V/f 제어의 전압발생 패턴

유도전동기의 회전속도는 전원주파수를 변환시키면 전동기의 가변속 운전이 가능하게 되지만 주파수의 변화에 따른 전동기 내부 임피던스도 변화하기 때문에 단지 주파수만 가변 하는 것만으로는 약계자에 의한 토오크 부족이나 과여자에 의한 자기포화 등을 발생하여 전철 구동용 전동기의 역률 및 효율의 현저한 저하를 일으킨다.

그러므로 주파수를 변화시킬 때 인버터 출력전압을 동시에 제어하는 V/f일정 제어방식을 사용하여 유도전동기 자속을 일정하게 유지하고 광범위한 가변속 운전에 대해서 전동기의 효율 및 역률을 저하시키지 않도록 해야 한다. 이 방식은 송풍기, 펌프용 전동기에 많이 이용되고 있다.

전압패턴은 그림 2.13과 같다. 정토오크 부하용에서는 (a)에 표시한 전압패턴으로 제어하고, 부하 토오크가 속도의 제곱으로 증가하는 경우 보상전압이 주파수의 증가에 따라 증가하는 (b)패턴으로 제어한다.

나. 고조파 저감을 위한 PWM방식

(1) 정현파 PWM방식

그림 2.14는 정현파 PWM제어방식으로 기준파 v_r과 반송파 v_c를 비교하여 스위칭 순간을 결정하는 방식이다. 기준파는 진폭 m_a, 주파수 $f(1=2\pi/w_c)$인 삼각파이다. 여기서, m_a는 진폭변조지수라고 하며 다음과 같이 정의된다.

$$m_a = \frac{\text{기준파의 진폭}}{\text{반송파의 진폭}} \tag{2.9}$$

또, 주파수 변조지수 m_f는 다음과 같이 정의된다.

$$m_f = \frac{\text{반송파의 진폭}}{\text{기준파의 진폭}} = \frac{f_c}{f} \tag{2.10}$$

m_a가 1이상인 과변조 상태가 되면 출력선간전압의 크기는 선간전압 $V_{LL(1)max}$이상으로 증가한다.

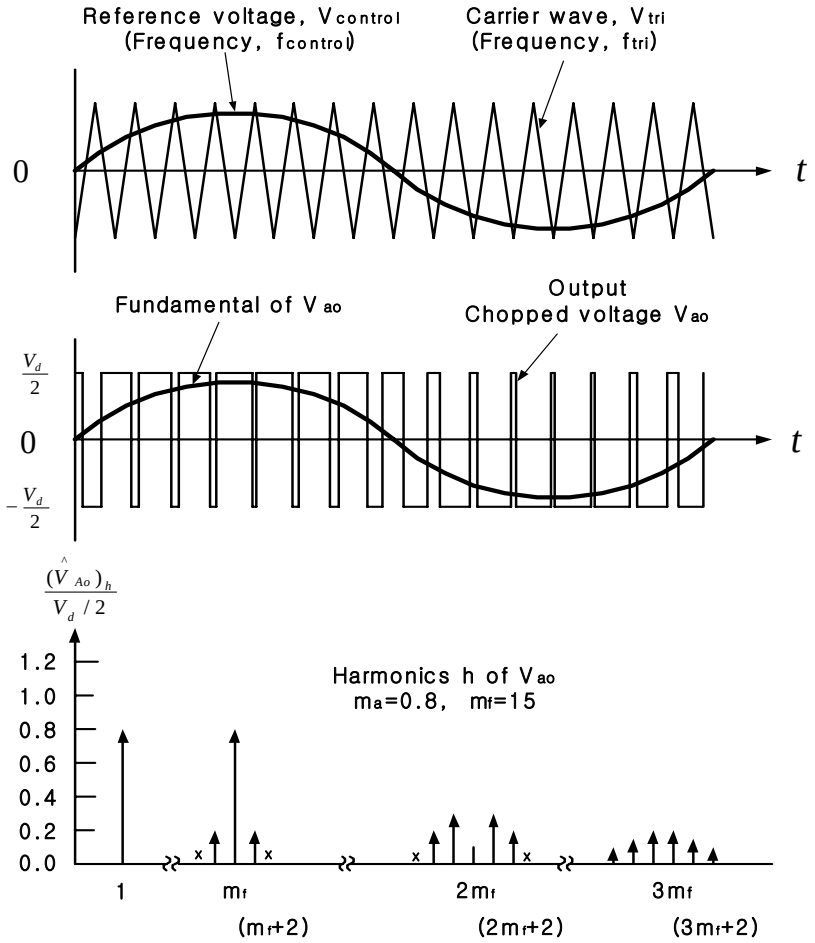


그림 2.14 PWM에 의한 교류 출력전압파형 V_{Ao}와 고조파 분석

과변조 영역에서 m_a가 일정값 이상이 되면 인버터의 출력 파형은 6-step 제어하는 경우와 같게 되어 $V_{LL(1)}$의 크기는 더 이상 증가하지 않는다.

3상 인버터가 과변조 영역에서 동작하면 선형 변조할 때 보다 더 큰 출력전압을 얻을 수 있지만, m_a의 증감에 대하여 출력전압이 비선형적인 제어특성을 갖게 되고 선형 변조 시에는 나타나지 않던 고조파 성분이 포함된다.

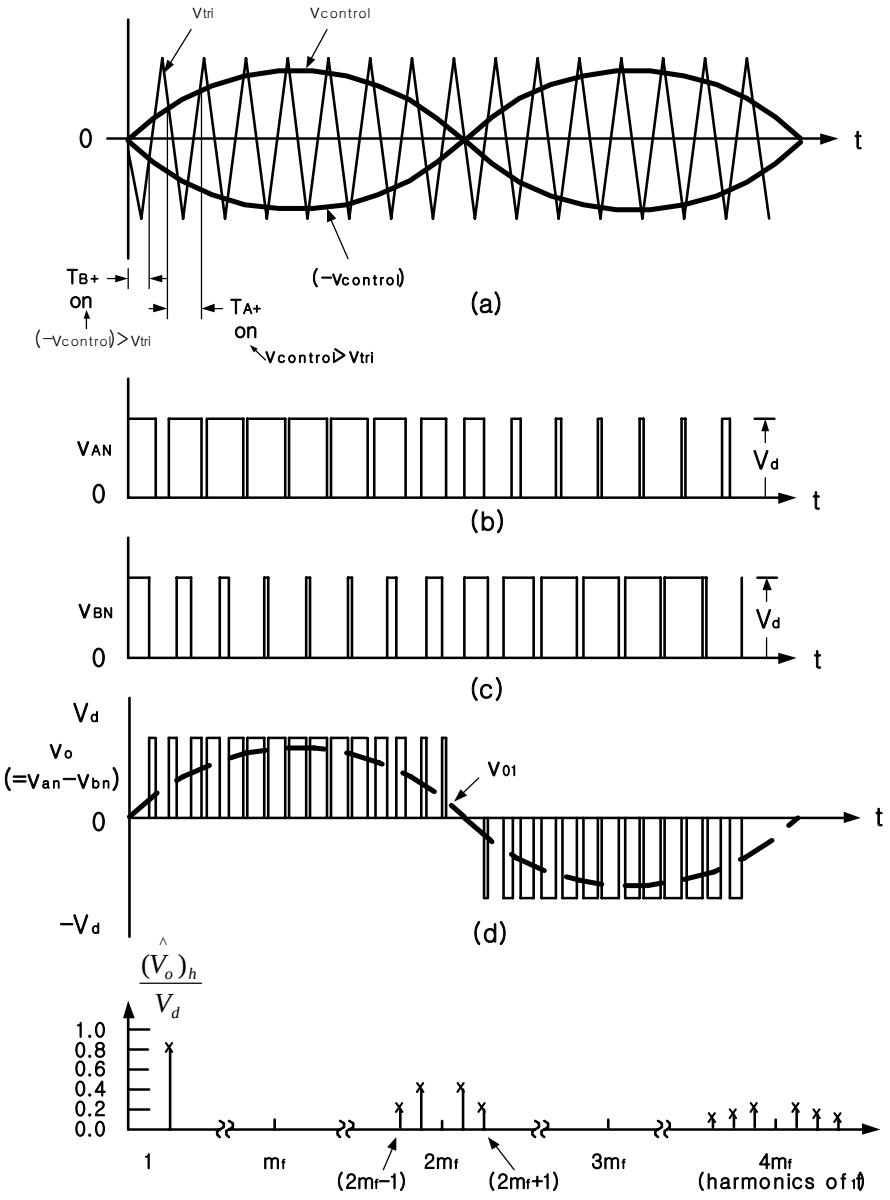


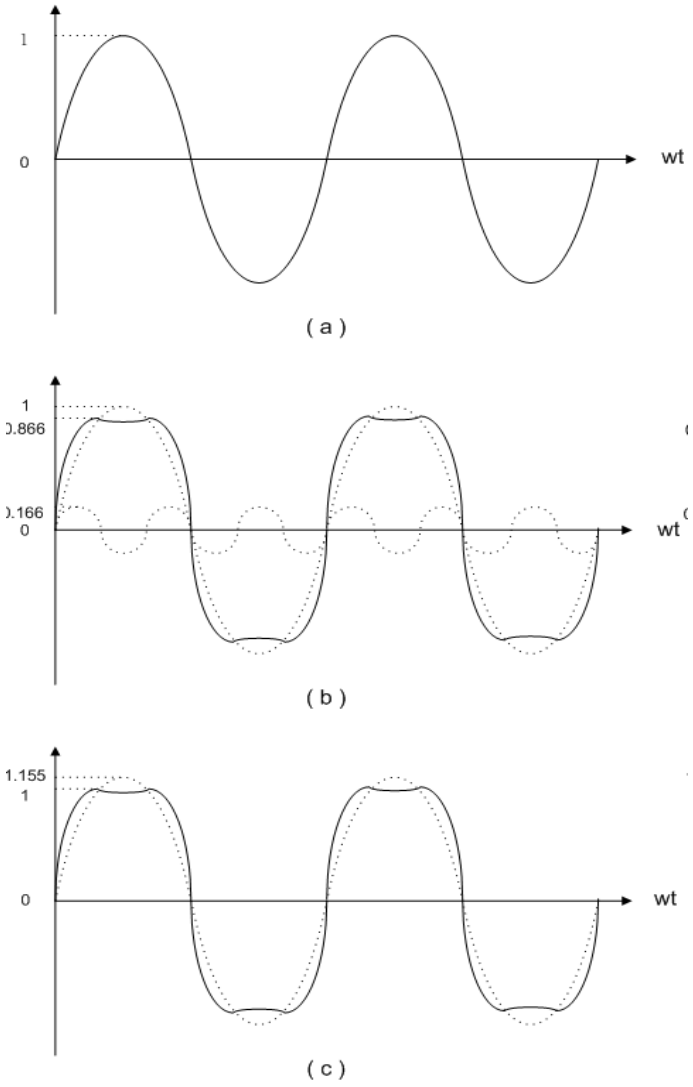
그림 2.15 유니폴라 전압 스위칭을 가진 PWM(단상)

(2) 고조파 주입 PWM

정현파 PWM방식에 비해 고조파에 관해서는 상당힌 개선이 이루어졌지만 직류 링크전압 이용률이 낮으며 변조지수가 증가하면 pulse dropping 현상에 의해 급격한 전압의 변화를 일으키며, 과변조 영역에 들어가면 파형에 영향을 주어 고조파가 증가하게 된다.

이와 같이 과변조 영역에서의 비선형 특성을 개선하고, 공급전력의 이용률을 높이

기 위하여 정현파 변조신호에 크기 1/6인 3고조파를 주입하여 PWM 파형을 발생시키는 3고조파 주입 정현파 PWM방식을 사용함으로써 출력전압의 선형제어 범위를 15% 증가시킬 수 있다.



(a) 변조신호의 기본파 (크기=1)

(b) 3고조파가 주입된 변조신호 (기본파 크기=1, 변조신호 최대값=0.866)

(c) 3고조파가 주입된 변조신호 (기본파 크기=1.155, 변조신호치=1)

그림 2.16 3고조파 주입에 의한 출력전압 증대

(3) 공간전압벡터 변조 PWM방식

공간전압벡터 PWM방식은 제어 알고리즘이 복잡하여 많은 연산을 필요로 하며, 시스템 구현이 복잡하다는 단점이 있지만 응답특성, 스위칭 주파수, 출력전류의 고조파 함유율 및 제어의 선형성 등의 측면에서 정현파 PWM방식보다 우수한 특성을 갖는다. 그림 2.17과 같은 3상 전압형 인버터에서 각 상의 스위치를 *Sa, Sb, Sc*라 하고 이들 스위치의 스위칭 상태에 따라 6가지의 유효전압벡터를 출력할 수 있다. 여기서, 스위치가 1로 표시된 것은 각상의 상단 스위치가 턴온 된 것을 의미하고, 0으로 표시된 것은 하단스위치가 턴온 된 것을 의미한다.

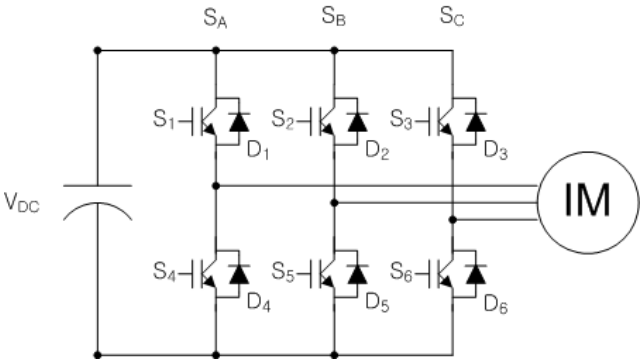


그림 2.17 3상 전압형 인버터

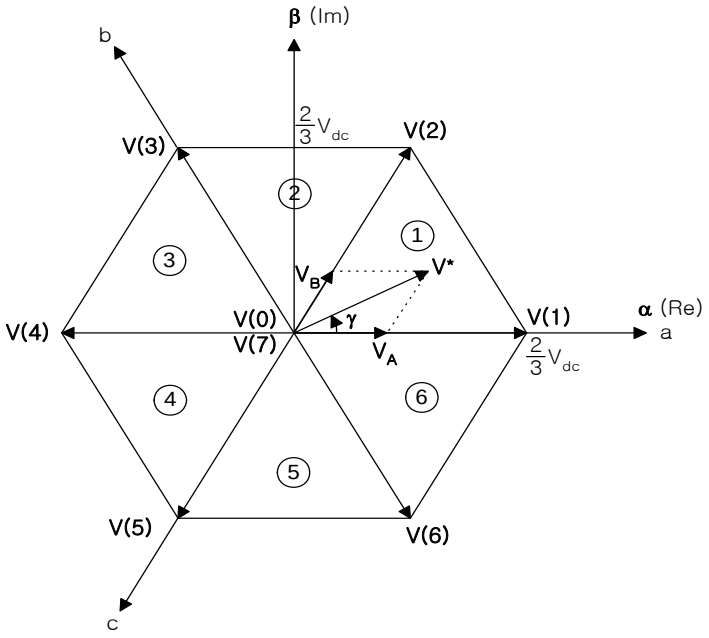


그림 2.18 인버터의 출력전압 벡터

그러나 각 상의 스위치가 모두 1이거나 모두 0이면 출력은 영전압이 되어 무효벡터가 된다. 인버터의 8가지 동작모드에서 출력전압을 벡터도로 표시하면 그림 2.18과 같이 6각형을 형성하고, 이 6각형의 꼭지점을 형성하는 내부의 임의 섹터에 존재할 때 출력전압 벡터는 이것이 위치한 삼각형의 두 변에 해당되는 유효벡터와 영벡터를 이용하여 시간적으로 벡터 합성 구할 수 있다.

그림 2.18과 같이 지령전압 V^*가 영역 ①(0° ~ 60°)의 부분에 존재할 경우 유효벡터와 영벡터의 인가시간은 다음과 같다.

$$T_1 = T_s \frac{|V^*|}{\frac{2}{3}V_{dc}} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right)}{\sin\frac{\pi}{3}} = \sqrt{3}\,T_s \sin\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right)$$

$$T_2 = T_s \frac{|V^*|}{\frac{2}{3}V_{dc}} \frac{\sin\gamma}{\sin\frac{\pi}{3}} = \sqrt{3}\,T_s \frac{|V^*|}{V_{dc}} \sin\gamma \qquad (2.11)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2)$$

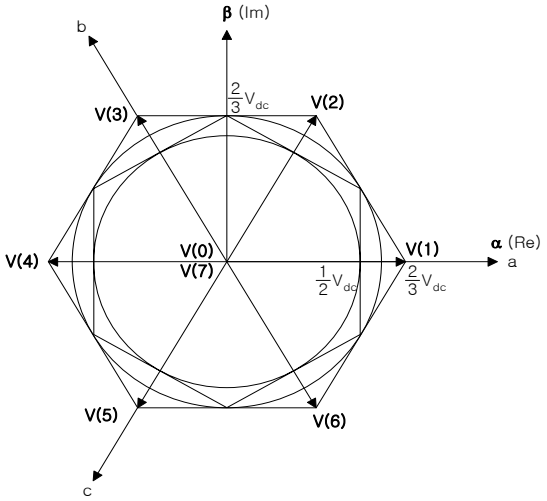


그림 2.19 인버터의 선형제어 가능한
최대출력전압

그림 2.19는 인버터의 선형적인 제어가 가능한 최대 출력전압을 나타낸다. 안쪽 원

은 삼각파 비교방식의 경우로서 직류링크전압 V_{dc}에 대해 상전압의 기본파 최대치가 $Vdc/2$까지 제한되지만 공간전압벡터 PWM의 경우

$$\frac{\frac{2}{3}V_{dc}\cos\frac{\pi}{6}}{\frac{1}{2}V_{dc}}=1.155 \tag{2.12}$$

이므로, 삼각파 비교방식의 경우보다 선형제어 영역이 약 15.5% 증가되는 것을 알 수 있다.

(4) 인버터의 고조파 성능지수

부하 상전압의 n차 고조파 Vn(실효값)에 의한 선전류의 n차 고조파 성분 I_n(실효값)은 근사적으로

$$I_n=\frac{V_n}{2\pi nfL_e} \tag{2.13}$$

이다. 여기서 f는 인버터의 출력 주파수, L_e는 전동기의 각 상의 누설인덕턴스이다. 따라서 전체 고조파 전류의 실효값 I_H는

$$I_H=\sqrt{\sum_{n=3}^{\infty}I^{2_n}}=\frac{2}{2\pi nfL_e}\sqrt{\sum_{n=3}^{\infty}(\frac{V_n}{n})^2} \tag{2.14}$$

이 된다. 그리고, 일반적으로 널리 사용되는 V/f의 경우,

$$\frac{V_1}{f}=k=\text{일정} \tag{2.15}$$

이 됨으로 다음 관계가 성립한다.

$$I_H = \frac{k}{2\pi L_e} \cdot HLF \tag{2.16}$$

$$HLF = \frac{1}{V_1} = \sqrt{\sum_{n=3}^{\infty} (\frac{V_n}{n})^2} = \sqrt{\sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{n^2} (\frac{V_n}{V_1})^2} \tag{2.17}$$

전체 고조파 전류의 실효값은 HLF에 비례하게 된다.

인버터의 출력단과 부하사이에 부하측 고조파의 저감을 위하여 LC필터를 사용하는 경우 필터링 후의 출력전압에 대한 고조파 성분을 나타내는 성능지수로 DF_2(2차 왜곡률)가 있으며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$DF_2 = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=3}^{\infty} (\frac{V_n}{n^2})^2} \tag{2.18}$$

4. 회생전력 제어용 인버터 시스템 구현

직류모선으로부터 전력을 공급받는 전철시스템에서 제동 시나 하강 경사로 주행 시에 직류모선으로 회생되는 에너지를 급전시스템으로 회생하는 연구는 에너지의 효율적인 이용측면에서 매우 중요하다.

잉여분의 직류전력을 교류모선으로 회생시키는데 있어서의 문제점은 전력이 회생됨에 따라 교류모선의 전력품질이 저하되는 것 외에도 전력 회생 시 무효전력이 발생하여 단위 역률을 달성하기 어렵다는 것이다. 따라서 원하는 양만큼의 유효전력을 회생시키면서도 무효전력을 제어하여 역률을 개선할 수 있는 제어기법이 필요하다.

가. 회생시스템의 구성과 출력전압

전동차가 제동중이거나 하강 경사로 주행 시에 직류모선으로 전력이 회생되면 직류모선의 전압이 상승한다. 이때 직류모선으로 회생된 에너지는 같은 직류구간내의 다른 전동차에서 소모된다.

그러나 동일 구간의 직류모선 내에 주행 중인 전동차가 없거나 회생된 에너지가 인접한 전동차에서 필요한 전력보다 많으면 직류모선의 전압은 점점 더 상승하게 된

다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터를 사용하여 직류모선의 잉여전력을 교류모선으로 회생할 수 있다. 이 인버터가 회생용 인버터이며, 인버터에 의해 회생된 에너지는 보조설비나 다른 구간의 전동차에 재공급된다.

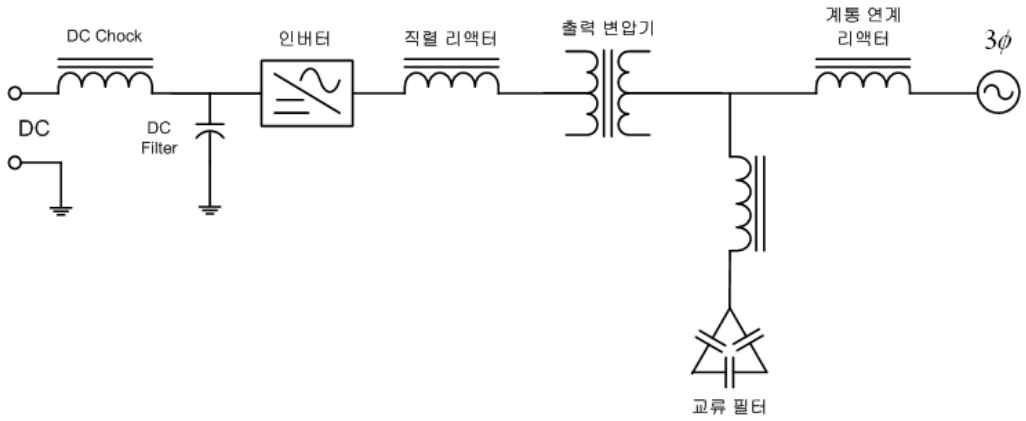


그림 2.20 직류전력 회생시스템

그림 2.20은 직류전력을 회생하기 위한 시스템 개념도이다. 직류전력 회생시스템에서 교류모선으로 에너지가 회생됨에 따라 직류모선의 전압이 감소한다. 그러나 회생시스템의 출력전압은 교류모선의 전압에 따라 알맞은 크기로 제어되어야 한다. 이를 위하여 α도통모드를 사용하여 직류전력 회생용 인버터의 출력전압을 제어하는 기법이 제안되었다.

α도통모드는 구형파 인버터에서 출력전압을 제어할 수 있는 효과적인 방법이기는 하지만 유도성 부하일 경우에는 게이트 신호뿐만 아니라 부하의 특성에 따라 인버터의 출력전압이 변동되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수정 α도통모드 제어방식이 제안되었다.

수정 α도통모드로 그림 2.22의 INV #1과 같은 3상 구형파 인버터를 제어할 때 인버터의 선간전압 파형은 그림 2.21과 같으며, β=(π-α)/2의 관계식을 이용하여 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$v_{UV} = \sum_{n}^{odd} V_{n\alpha} \sin n(wt + \frac{\pi}{6}) \tag{2.19}$$

단, $V_{n\alpha} = \frac{4V_d}{n\pi} cos\frac{n\pi}{6} 2\cos n(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}) - 1$

회생인버터 출력전압의 고조파를 저감시키기 위해 그림 2.21과 같이 두 대의 구형파 인버터를 π/6의 위상차로 2중화하고 특수 결선된 지그재그 출력변압기를 사용한다. 그리고 교류필터를 사용하여 고조파를 저감시킨다.

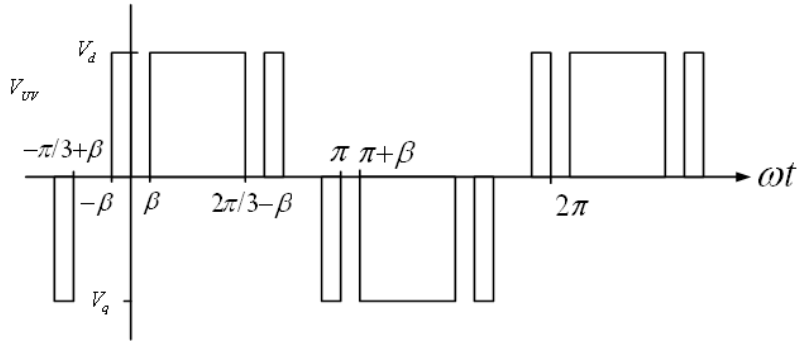


그림 2.21 수정 α 모드방식일 때의 출력 선간전압

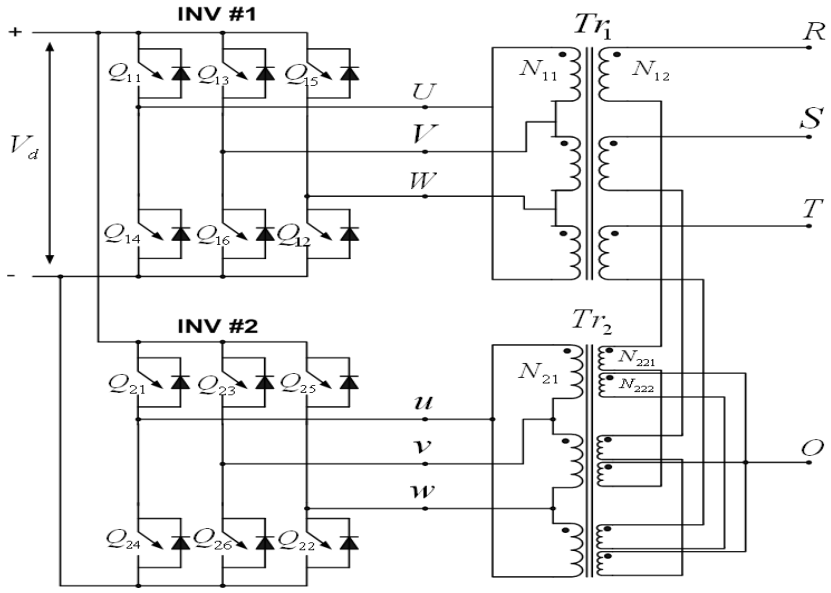


그림 2.22 회생용 인버터 시스템의 구성

그림 2.22에서 변압기 Tr_1의 권선비 N_1과 변압기 Tr_2의 상단 권수비 N_2 및 하단 권

수비 N_3 사이에 $N_1 = \sqrt{3}N_2 = \sqrt{3}N_3$의 관계가 성립하면 $(12m \pm 1)$차의 고조파만 남게 되며, 이때의 선간 출력전압 v_{RS}는 다음과 같다.

$$v_{RS} = \sum_{n}^{odd} V_{n\alpha} N_1 (\sqrt{3} + 2\cos\frac{n\pi}{6}) \sin n(wt + \frac{\pi}{3}) \tag{2.20}$$

나. 역률제어 알고리즘

직류전력 회생시스템의 역률을 개선하기 위하여 무효전력을 0으로 제어한다. 이 인버터 시스템은 3상 대칭이므로 한 상에 대해서 해석한 후에 각 값을 3상으로 치환하면 된다. 인버터 시스템의 출력전압에서 기본파 성분만을 고려할 경우, 시스템의 상당 등가회로는 그림 2.23과 같으며 등가회로의 벡터도는 그림 2.24와 같다.

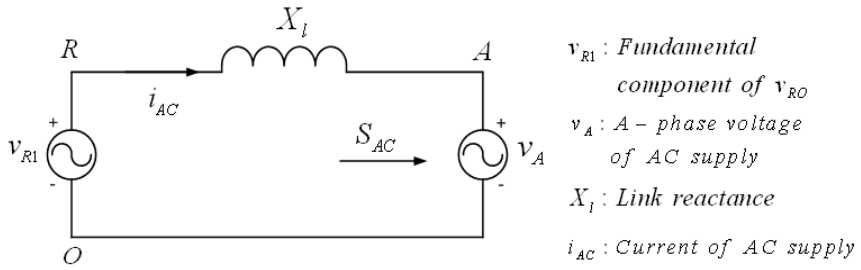


그림 2.23 상당 등가회로

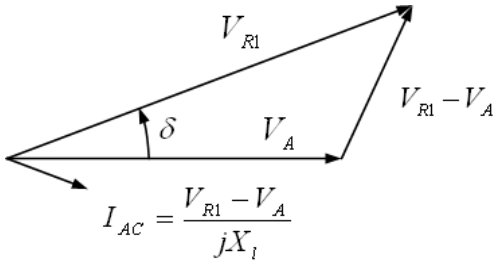


그림 2.24 등가회로의 벡터도

등가회로에서 두 전원 사이에 연계 리액터만 존재하므로 전력원선도는 그림 2.25와 같다. 교류모선으로 전달되는 복소전력은 $S_{AC} = P_{AC} + jQ_{AC}$이며, 이때의 유효전력과 무효전력은 다음과 같다.

$$P_{AC} = \frac{|V_{R1}||V_A|}{X_l} sin\delta \tag{2.21}$$

$$Q_{AC} = \frac{|V_A|}{X_l}(|V_{R1}|\cos\delta - |V_A|) \tag{2.22}$$

역률을 개선하기 위해서는 무효전력 Q_{AC}가 0이 되어야 하며, 식 2.22에서 다음을 만족하여야 한다.

$$|V_{R1}| = \frac{|V_A|}{\cos\delta} \tag{2.23}$$

이때 교류모선으로 전달되는 유효전력은 다음과 같다.

$$P_{AC} = \frac{|V_A|}{X_l} tan\delta \tag{2.24}$$

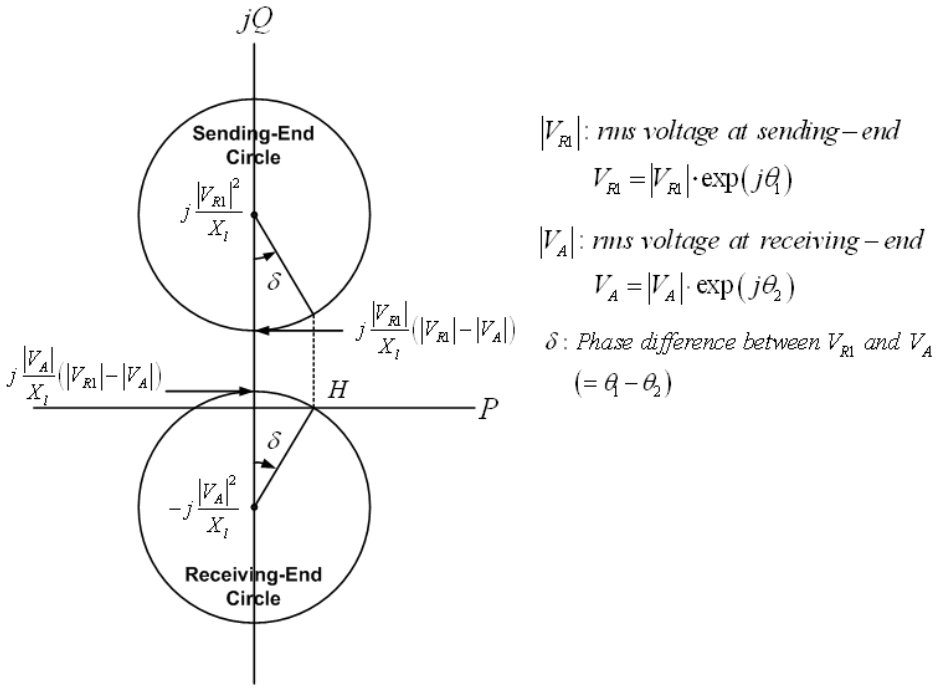


그림 2.25 전력원선도

따라서 교류모선으로 회생시키고자 하는 유효전력의 양을 먼저 결정하면 식 (2.24)에서 $|V_A|$와 X_l의 값이 일정하므로 V_{R1}과 V_A 사이의 위상차 δ값이 결정된다. 이때 무효전력을 0으로 제어하려면 식 (2.23)의 관계가 만족되어야 하며, $|V_A|$와 δ의 값으로 $|V_{R1}|$을 구하면 이에 해당하는 α값을 산출할 수 있다.

다. 역률 개선

이상에서 알 수 있듯이 유효전력과 무효전력을 제어하려면 인버터의 출력전압과 위상차 δ를 제어하여야 한다. 이와 같이 유효전력과 무효전력이 모두 인버터 출력전압의 크기와 위상차 δ에 대해 서로 커플링 되어 있으므로 원활한 제어를 위해서는 디커플링이 필요하다.

디커플링 방법으로는 연계리액터에 흐르는 전류를 유효성분과 무효성분으로 나누어 각각을 독립적으로 제어하는 방법과 구간별로 변수에 대한 감도를 구해 감도가 상대적으로 낮은 변수의 영향을 무시하는 방법 등이 있다.

전류 성분별로 디커플링 하는 방법은 빠른 응답을 얻을 수 있지만 인버터의 출력전류를 실시간으로 제어해야 하기 때문에 스위칭 주파수의 제약이 심한 대용량 시스템에는 적용하기가 곤란하다. 구간별로 감도를 구해 디커플링 하는 방법은 간단하고 스위칭 주파수가 낮아도 디커플링 효과를 얻을 수 있으므로 대용량 인버터에 적당하다.

구간별로 제어변수에 대한 감도를 구해 상대적으로 감도가 큰 변수만을 고려하는 방법을 이용하며, 인버터 출력전압의 고조파에 의해 발생하는 무효전력을 보상하기 위하여 그림 2.23의 등가회로 모델을 이용한 보상기를 설계한다.

직류전력 회생시스템에서는 위상차 δ의 구간이 10° 이하이고 인버터의 출력전압의 변화가 15%이내이기 때문에 유효전력은 인버터의 출력전압보다 δ의 변하에 더 민감하며, 무효전력은 위상차 δ보다 인버터의 출력전압에 더 민감하다.

그러므로 유효전력은 위상차 δ의 함수로 볼 수 있다. 인버터 출력전압의 크기는 도통각 α의 함수이므로 무효전력은 결국 도통각 α의 함수로 볼 수 있다. 유효전력을 제어하기 위해 출력이 δ_k인 PI제어기를 구성하고, 위상차가 δ_k일 때 무효전력이 0인 조건에서의 도통각 $\alpha_{k,ref}$를 식 (2.25)와 같이 구할 수 있다.

$$|V_{R1}| = \frac{1}{2}\frac{4V_d}{\pi}cos\frac{\pi}{6}\left\{2\cos\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\alpha_{k,ref}}{2}\right)-1\right\} \cdot N_2\left(\sqrt{3}+2\cos\frac{\pi}{6}\right)$$
$$= \frac{6\sqrt{2}\,V_d}{\pi}\left(2\sin\frac{\alpha_{k,ref}}{2}-1\right)N_2 = \frac{|V_A|}{\cos\delta_k}$$

따라서,

$$\alpha_{k,ref} = 2\sin^{-1}\left(\frac{\pi|V_A|}{12\sqrt{2}\,N_2 V_d\cos\delta_k}+\frac{1}{2}\right) \tag{2.25}$$

교류모선으로 전달되는 전력을 구하기 위해 교류모선 앞단에서 선간전압과 선전류를 검출한다. 선간전압을 검출하기 때문에 전압의 크기와 위상을 상전압 기준으로 바꾸기 위해 식 (2.26)과 같이 d-q 변환하고 선전류는 식 (2.27)과 같이 d-q 변환한다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3\sqrt{3}}\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{CA} \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

d-q 변환된 전압과 전류를 이용하여 교류모선으로 전달되는 순시 유효전력과 순시 무효전력을 계산한 다음에 저역통과필터를 거쳐서 주기당 평균 유효전력과 평균 무효전력을 구한다.

실제 인버터 출력전압은 완전히 정현적이지 않기 때문에 고조파에 의해서도 무효전력이 발생한다. 그러나 인버터 시스템 출력전압의 기본파 성분만을 대상으로 하여 무효전력을 제어하기 때문에, 고조파에 의해 추가로 발생하는 무효전력을 보상하기 위해 보상기를 구성한다.

직류전력 회생시스템에서 교류모선측 선간전압과 전류를 검출하여 d-q 좌표계로

변환한 후 평균값 유효전력과 무효전력을 계산한다. 계산된 유효전력은 유효전력 명령값 P_{AC}^{*}와 비교하고 PI제어기를 사용하여 위상차 δ_k를 얻는다.

위상차가 δ_k일 때 무효전력을 영이 되게 하는 도통각 $\alpha_{k,ref}$를 계산한다. 고조파에 의해 발생하는 무효전력을 제거하기 위해 보상기를 사용하여 $\Delta\alpha$를 구한 다음에 이 $\Delta\alpha$로 $\alpha_{k,ref}$를 보상하여 α_k를 얻는다. 검출된 교류모선 선간전압에서 PLL을 사용하여 위상정보 Θ와 주파수 f를 얻고 계산된 α_k , δ_k를 이용하여 인버터의 게이트 신호를 발생시킨다.

5. 전기철도의 고조파 발생원인 및 저감대책에 관한 연구

전동차의 고조파 발생원으로는 급전계통의 변압기, 정류기, 차량에서의 전력변환장치인 인버터 등의 모든 전기기기로 볼 수 있다. 부하가 반도체 전력변환장치일 경우 일정한 고조파 특성을 갖는 반면에 반도체 전력변환장치가 아닐 경우 고조파와 기본파의 부조화, 교류 시스템에서의 불평형 및 비동기 적인 지연 등의 현상이 발생한다. 하지만 통상적으로 고조파 문제가 주로 야기되는 것은 정류기 또는 사이리스터 등을 사용하는 반도체 전력변환장치에 의해 제어되는 부하이다.

전동차와 급전시스템은 주변압기, 정류기, 견인장치 및 보조전원장치로 구성되는데 일련의 주변압기, 정류기 및 견인장치는 다른 장치에 비해 소모하는 전력이 상당히 크므로 고조파의 주 발생원으로 볼 수 있다.

가. 저항제어 전동차

수도권에서 운행하는 전동차의 경우 직류전동기의 약계자 제어를 수행하여 견인력을 변화시키면서 저항제어에 의해 운행 속도를 변화시킨다. 저항제어는 직류전동기의 기동 및 속도제어 방식으로 오래 전부터 널리 사용되고 있다.

저항제어에 의해 직류전동기를 기동시킬 때 가선전압에 대해 과대한 전류가 발생되지 않기 위해 직류전동기에 직렬로 저항기를 접속하여 기동하며 회전수가 점차로 상승하여 여기전력이 증가함에 따라 순차적으로 단락해 가는 방식이다. 이 방식에서 고조파 전류 함유율은 저차조파에서 크게 나타나며 조파가 증가하면서 거의 비례적으로 감소한다.

나. 사이리스터 위상제어 전동차

산업선에서 운행하는 전동차는 전차선으로 인가된 교류전압을 세미브릿지형으로 사이리스터와 다이오드가 복합된 정류기를 이용하여 사이리스터의 위상을 제어하여 속도를 변화시키면서 약계자 제어에 의해 직류 견인전동기의 견인력을 변화시킨다.

사이리스터 위상제어방식을 사용하면 정류기 방식에 비해 가선 측의 역률이 저하하며 고조파도 증가한다는 단점이 있다. 이와 같은 방식은 위상각이 클수록 파형의 일그러짐이 커지므로 고조파 전류함유율이 커지고 잦은 조파 영역에서 주로 고조파가 발생한다.

다. VVVF 전동차

일반적인 전동차에서 운행하는 방식으로 VVVF 전동차는 VVVF 인버터에서 가변전압/가변주파수 제어방식에 의해 3상으로 변환하여 유도전동기의 속도제어를 수행한다. VVVF 전동차의 고조파 전류 함유율 분포는 앞서 설명한 저항제어 전동차가 사이리스터 위상제어를 수행하는 전동차와 달리 주파수가 높은 영역에서 PWM 반송파 주파수에 기인하는 고조파 성분이 발생한다.

라. 고조파 영향

고조파는 주로 전력계통에서 직렬과 병렬공진에 의한 고조파 성분의 증폭, 전력의 생성, 전송 및 소비하는데 있어서의 효율저하, 전기적인 설비부품의 절연을 저하시키거나 수명을 단축시키고 설비의 오동작을 유발한다. 다음과 같이 전동차에서 고조파에 의한 장해가 발생될 수 있다.

- 통신유도장해
- 신호회로 오동작
- 보호계전기 오동작
- 병렬 커패시터의 과전류
- 고조파 공진현상 발생
- 안정기 및 과전류 계전기 소손

전기철도에서 고조파 장해의 발생 원인을 살펴보면 고조파 장해는 고조파 전류와

전압의 크기도 관련이 있지만 전력 기기의 설계와 회로 구성에 기인하는 경우가 많다. 전력 기기를 설계할 대 고조파를 고려하지 않고 기본파만을 고려하여 설계할 경우도 고조파 장해 발생의 원인이 된다.

1970년대 초 산업선 구간을 전철화하면서 도입된 구형 전동차는 중아선, 태백선 및 영동선 등 산업선 전철화 구간에서 운행되고 있다. 그림 2.26은 운행 중 전동차의 입력전압과 입력전류 파형을 나타낸 것이다. 그림에서의 전류 파형은 사리리스터 위상제어방식의 전형적인 부하전류를 나태고 있으며 PFC가 off된 경우의 KTX 차량도 같은 패턴의 전압/전류 파형을 갖는다.

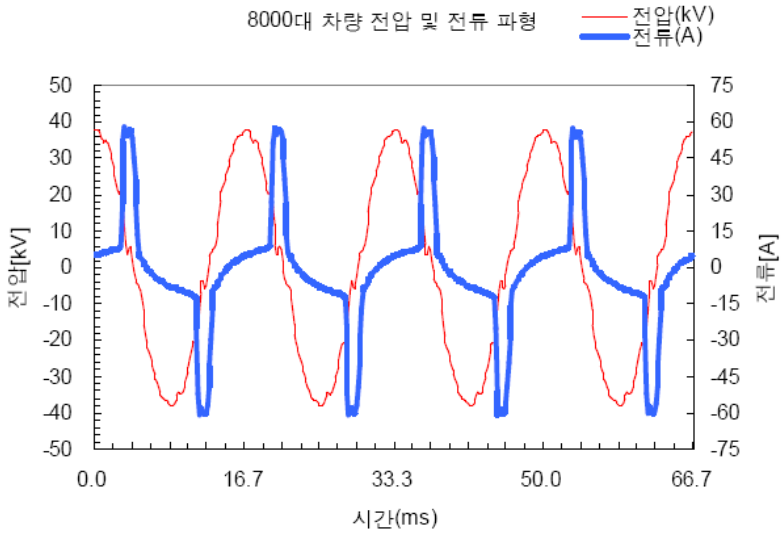


그림 2.26 구형 전동차의 전압/전류 측정파형

구형 전동차의 내구수명이 다해감에 따라 이를 대체하기 위하여 새롭게 도입된 전동차는 VVVF 인버터 제어방식을 사용하고 있으며 그림 2.27은 신형 전동차의 전압/전류 측정파형을 나타낸다.

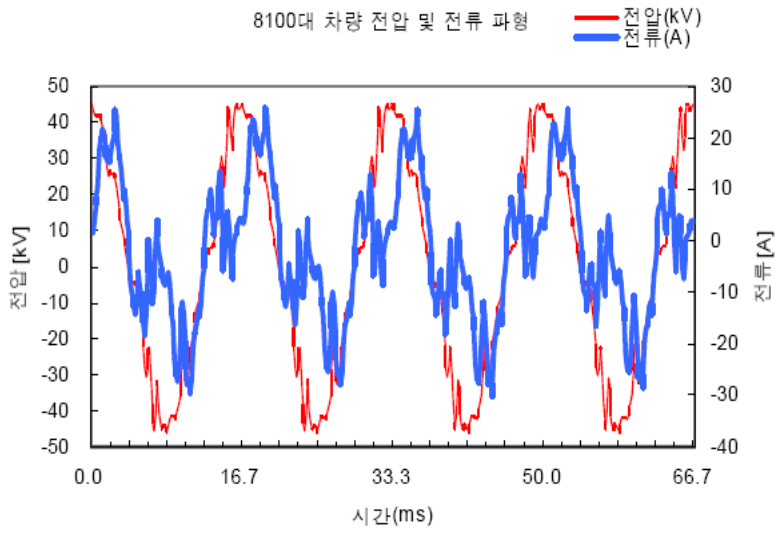


그림 2.27 신형 전동차의 전압/전류 측정파형

제 2 절 국외 기술개발현황

국외의 대용량 전력변환 장치 기술을 보유한 다수 기업들을 주축으로 직류전기철도시스템에 적용될 회생인버터를 개발하고 설치된 상황이다. 우리나라는 현재까지 회생인버터가 설치된 지하철 변전소가 한 곳도 없을 정도로 많은 수요창출이 예상되기 때문에 일본을 비롯한 여러 국제 기업들이 국내시장으로 영역을 넓히기 위해 많은 노력을 진행 중에 있다. 현재 국외에서 개발되어 현장에 적용중인 회생전력 흡수 장치들은 다음과 같다.

1. 일본 Mitsubishi사의 SCR 회생인버터

그림 2.28은 일본 Mitsubishi사에서 개발한 사이리스터 인버터와 능동전력필터, 변압기 등을 적용한 전철 급전시스템을 나타내고 있다. 그러나 회생용 인버터에 사이리스터 소자를 사용하였기 때문에 위상제어에 따른 고조파 함유율이 높고, 회생용 인버터와 능동전력필터를 별도로 구성하였기 때문에 전체적인 급전시스템이 커지는 문제점이 있다.

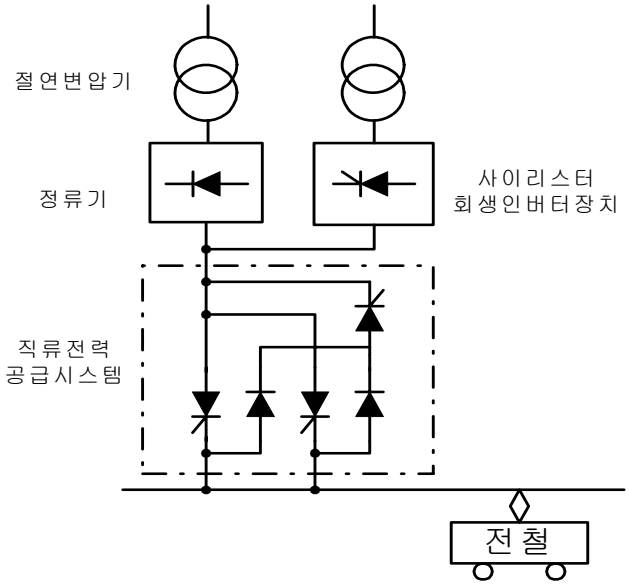


그림 2.28 일본 Mitsubishi사의 SCR 회생인버터

일본의 교토에서 운용되는 Karasuma선은 1981년 5월에 Kitaoji역과 Kyoto역 사이의 운행을 시작하였고 같은 해에 Kyoto역에서 Takeda역까지 확장되었다. 현재 Karasuma선에는 13개의 역과 3개의 전철변전소(Kitaoji, Anekoji, kanjinbashi)로 이루어져 있는데 Anekoji변전소와 Kanjinbashi 변전소에 회생용 인버터가 설치되어 있다. 회생전력 흡수 시스템은 사이리스터 인버터를 사용하여 고배단에서 소비하도록 하였고 5차 7차 고조파 성분을 저감하기 위해 2대의 3상 인버터를 병렬 구동하여 12펄스화 하였으며, 11차, 13차 및 고차 고조파성분을 저감하기 위해 추가로 300kVA용량의 능동 전력필터를 설치하였다 Karasuma선의 Kanjinbashi 변전소에 설치된 정류기와 회생인버터의 기본사양을 표 2.3과 표 2.4에 나타내었다.

표 2.3Kanjinbashi변전소의 정류기 기본사양

	정류기 변압기	실리콘 정류기
형식	Nitrogen gas sealed, oil immersed,self-cooled type	Freon boiled cooling type
절연등급	D-class	D-class
정격용량	3340kVA	3000kW
주파수	3상 60Hz	1500V
결선방식	Δ/Δ	

표 2.4 Kanjinbashi변전소의 회생인버터 기본사양

	정류기 변압기	실리콘 정류기
형식	Nitrogen gas sealed, oil immersed, self-cooled type	Heat pipe cooling method
절연등급	D-class	D-class
정격용량	3340kVA	1000kW
주파수	3상 60Hz	300% 1분
정격전압	6.6kV/765V*2	1650V
결선방식	Δ/Δ/Y	

2. 스위스의 SCR 회생인버터

스위스 철도회사의 철도수송 전력공급 시스템의 한 부분인 Alpiglen 변전소는 ABB에서 개발한 SCR 회생인버터를 적용하여 운전에 들어갔다. Alpiglen 변전소에는 두 개의 다이오드 정류기가 설치되어 있으며, 가선시스템에 직류 1500V 전원을 직접 공급한다. 회생인버터는 16.5KV 계통단에 연계되어 있으며, 회생전력이 발생되면 인버터는 언제든지 회생전력 흡수상태로 동작된다. 직류단 전압이 무부하시보다 높아지면 에너지 회생이 시작되며, 가선시스템에 회생하는 전류는 인버터 특성곡선으로 프로그래밍 되어져 있다. 이 시스템은 공랭식으로 되어져 있으며, 3상 변압기는 16.5KV 전력공급 시스템에서 인버터와 함께 사용된다. 안정적인 연속 제어가 요구되어지며, 신뢰할 수 있는 인버터 작동은 제어시스템에 의해서 이루어진다. 온/오프 신호에 의해 AC 및 DC 차단기가 구동/제어된다. 폐루프 제어기는 특성곡선에 따라 전압의 비율에 일치하는 전류로써 인버터의 도통각을 조정한다. 보호기능은 내부보호와 AC와 DC 양쪽의 부족전압과 과전압을 위한 모니터링이 포함되며, 여기에는 변압기의 온도도 포함되어 있다.

- 변압기 : 16.5kV/1600kVA/50Hz
- 회생인버터 : 1.676Vac/ 523Aac , 1.800Vdc/850Adc
- DC reactor : 5mH/640Adc

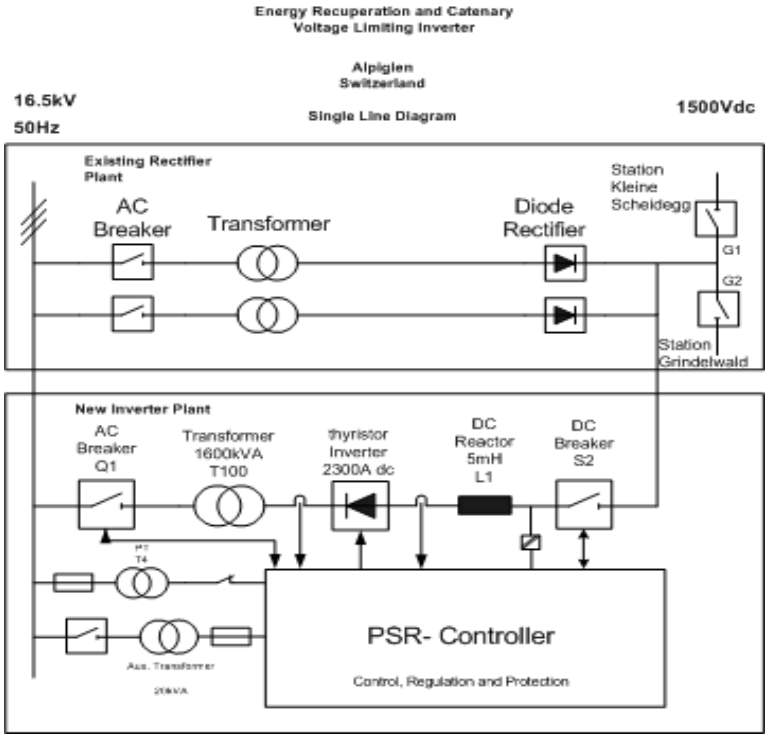


그림 2.29 스위스 Alpigle 변전소의 SCR 회생인버터

3. 남아프리카공화국의 직류 3,000V IGBT 회생인버터

남아프리카 공화국의 Stellenbosh 대학의 연구과제로 개발하여 필트시험을 마친 회생인버터 개발품에 대해 조사하였다. 남아공이 개발한 3000V 직류전기철도용 회생인버터는 본 연구과제에서 개발하고자하는 회생전력 흡수기능과 능동전력필터기능을 구현할 수 있다는 점에서 개발하고자하는 회생인버터와 아주 유사하다. 하지만 3,000V의 높은 직류 링크단 전압을 사용하므로 멀티레벨인버터 기술을 활용한 점과 계통연계변압기를 추가로 설치하지 않고 다이오드 정류용 변압기 2차측과 연계한 점이 본 연구과제 개발품과 다르다. 그림2-28은 1.5MW용량의 직렬 적재된 컨버터는 DC전압을 공급하는 변전소에 설치된다.

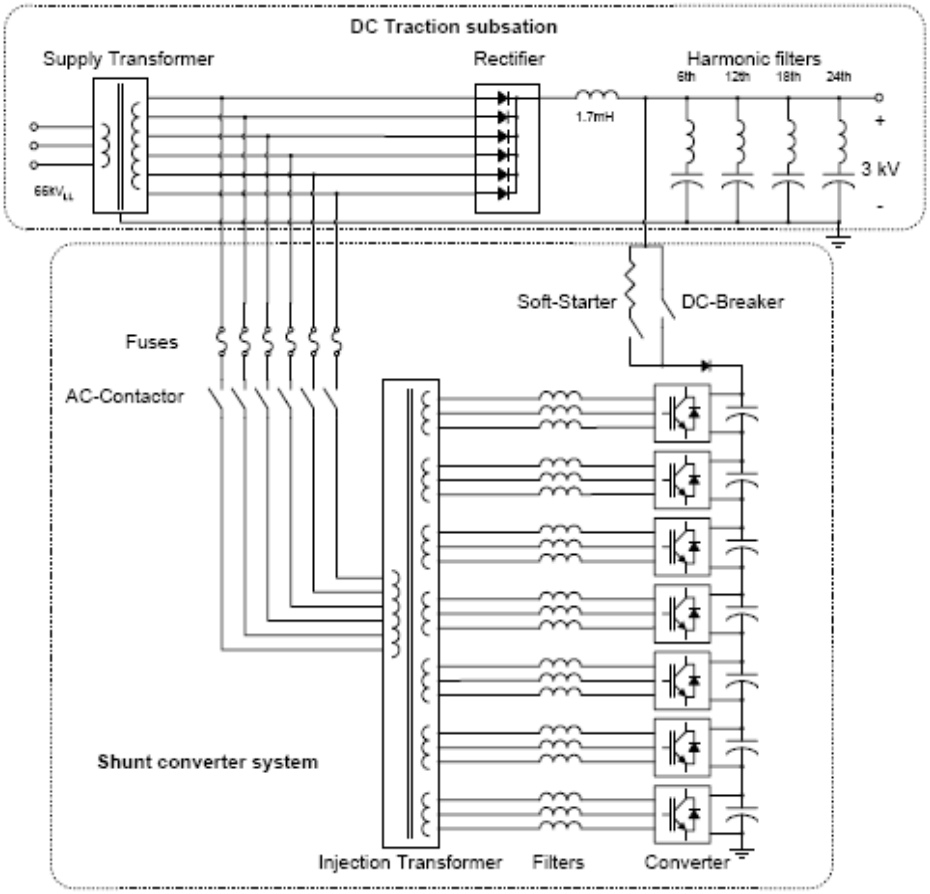


그림 2.30 남아프리카공화국의 직류 3,000V IGBT 회생인버터

4. 싱가폴의 SCR 회생인버터

싱가폴의 NEL 철도시스템은 한 역의 길이가 20km이며, 16개의 역으로 구성되고, 22kV 계통단에 다이오드 정류기를 사용하여 DC 1500V가 공급된다. 전동차가 회생제동 시 생성된 직류 잉여전력을 변환하기 위해 몇 개의 보조역에 인버터가 설치되며, 전력선의 회생전력 흡수력을 향상시킨다. 그림 2.29는 싱가폴 전철 시스템에 적용되어진 회생 시스템의 운전 특성 그래프를 나타내고 있다. 그림 2.30은 실제 인버터가 적용되어진 변전소 구성도를 나타내고 있다. 본 과제에서 제안하고 있는 시스템과 같이 기존의 정류기에 인버터를 직접 접속한 방식이다. 회생인버터가 설치된 변전소 대표설비의 용량은 아래와 같다.

- 정류기 용량 : 3MW(정격), 150% 2분/300% 1분/450% 15초(과부하)
- 회생인버터 용량 : 1MW(정격), 600% 1분(과부하)

- 정류기용 HSCB 정격전류 : 6,000A
- 회생인버터용 HSCB 정격용량 4,000A

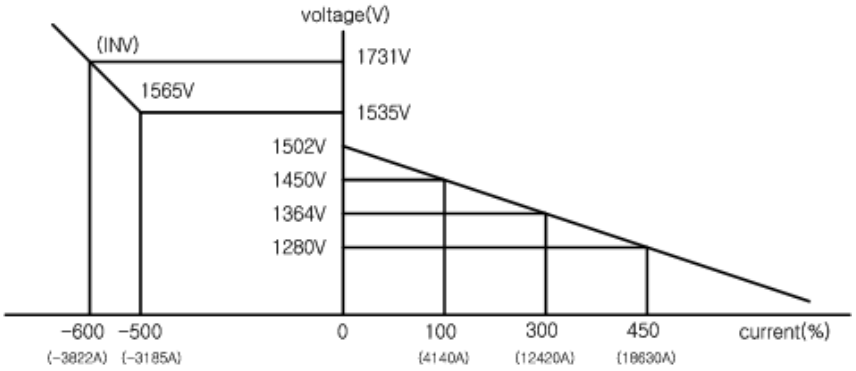


그림 2.31 변전소의 가선전압/전류특성곡선

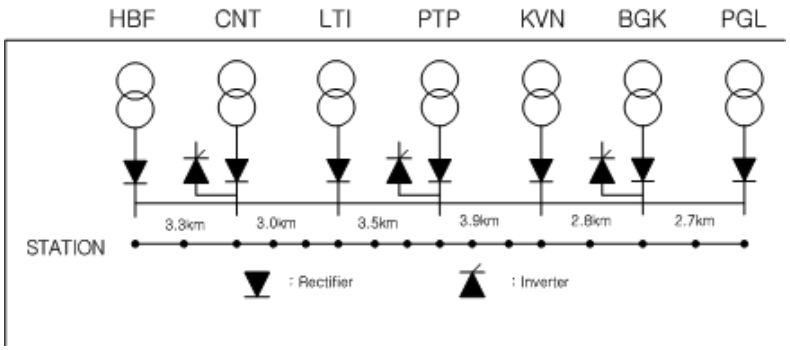


그림 2.32 싱가폴의 직류전철시스템 급전방식

5. 대만에 설치된 회생 인버터

그림 2.33은 대만의 직류 전철 급전시스템에 적용되어진 회생인버터를 나타내고 있다. 직류 전철 급전시스템 분야에서 회생인버터의 적용은 가선 전압의 변동을 제한하고 잉여 회생전력을 교류 전원 시스템으로 역송전하는 가장 효과적인 방법이다. 전압과 전류가 4상한 동작이 가능한 지하철 구동용 듀얼컨버터와 다르게 회생용 전력변환 장치는 실리콘 다이오드 정류기와 역 병렬로 연결이 되고 그림과 같이 정류기와 회생용인버터는 각각의 변압기에 의해 구성된다.

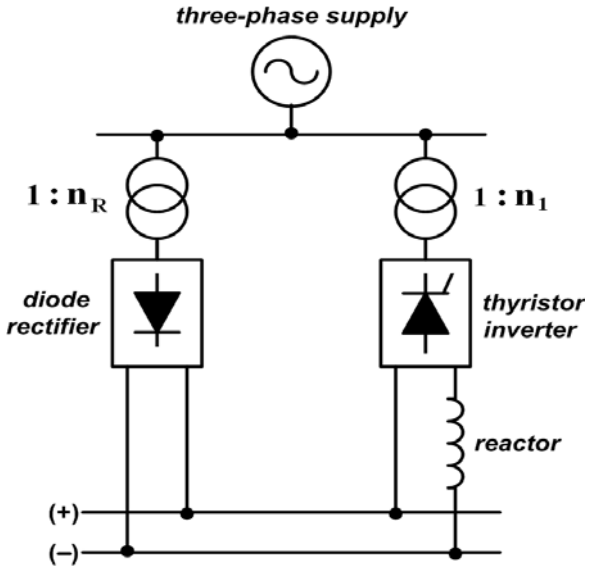


그림 2.33 회생용 인버터가 적용되어진
대만 직류 전철 급전시스템

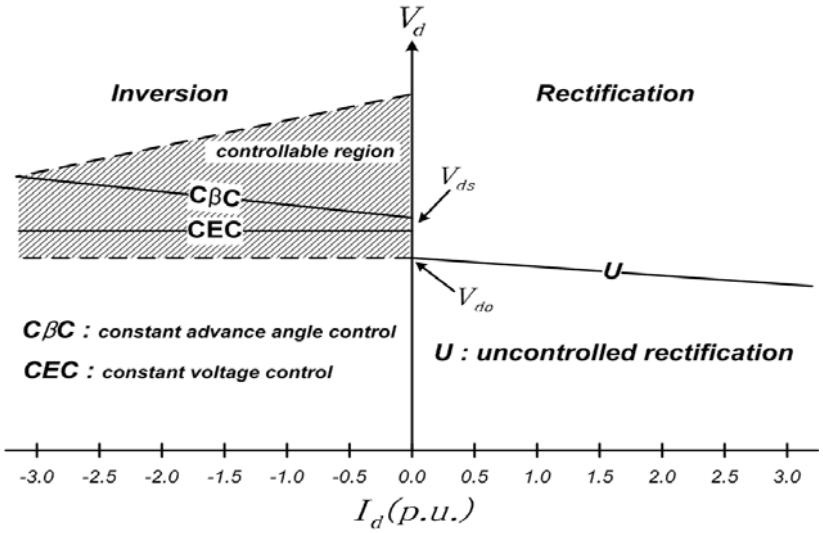


그림 2.34 회생용 전력변환 장치의 제어 패턴도

회생인버터와 직류 가선의 전압 차이를 제거하고 경부하 시 순환전류의 흐름을 제한하기 위해 회생용 인버터와 직류 가선 사이에 리액터를 설치하고 회생인버터의 동작 전압은 정류기의 무 부하 전압보다 높게 한다. 회생용 전력변환 장치가 구성된 급전 변전소에서는 정류기에서 회생용 인버터로 속응성 있는 전류를 공급하기 위해 순환전류가 흐르도록 제어한다. 두 전력변환기의 순시 출력 전압의 차이로부터 기인하

는 순환전류는 전력변환장치 또는 급전시스템 사이에서도 흐른다.

그림 2.34는 회생용 인버터가 적용되어진 급전 시스템의 동작 특성을 보여준다. 정류기는 제어되지 않으므로 가선전압 Vd에 의해 회생인버터의 동작 특성이 결정된다. 위 시스템의 동작 조건은 다음과 같다.

- 정류 모드 ($V_d < V_{d0}$ and $I_d > 0$) : 직류 가선 전압은 정류기의 무 부하 전압보다 낮으며, 직류 전류는 정류기의 출력으로 흐른다.
- 대기 모드 ($V_{d0} < V_d < V_{ds}$ and $I_d=0$) : 직류 가선 전압은 정류기의 무 부하 전압보다 높다. 그러나 회생인버터의 동작 전압 보다 낮으며, 정류기와 회생인버터 모두 동작하지 않는다.
- 회생 모드 ($V_d \geq V_{ds}$ and $I_d < 0$) : 직류 가선 전압은 회생인버터 동작 전압보다 높거나 같다. 그리고 직류 전류는 회생인버터로 흐른다.

6. 일본 쯔쿠바 익스프레스의 IGBT 컨버터/인버터

쯔쿠바 익스프레스는 아키하바라와 쯔구바간을 운행하는 급행열차로서 동경 지하철중 신예설비에 속하며, 직류 1500V의 전력을 전동차에 공급하고 있으며, PWM 인버터를 사용하여 교류전력을 직류전원으로 변환하고 있다. 쯔쿠바 익스프레스의 PWM 컨버터 설치이유는 선로 인근 지자기 연구소에 대한 누설전류 저감을 위해 이루어졌다.

인버터의 사용으로 회생전력의 사용이 용이하여 PWM인버터의 사용으로 회수하는 회생전력이 일반 전력회사로 넘어가는 비율은 전력 : 100%, 회생전력 : 20%, 전력사로 귀환 :4%, 차량소비 :16%이다.

쯔쿠바익스프레스 IGBT 컨버터/인버터 사양은 표 2.5와 같다.

표 2.5 쯔쿠바익스프레스 IGBT 컨버터/인버터 사양

기기사양	형 식	3상 브릿지방식	
	다중화방식	직렬 6다중방식 또는 병렬 6다중방식	
	사용소자	IGBT (정격 : 3,300V 1,200V)	
	캐리어주파수	450Hz	
	냉각방식	강제풍냉방식	
	직류컨덴서	용량	40mF
		타입	건식 몰드
기기정격	정격입력전압	직류 1500V 상당	
	정격직류전압	1500V	
	정격출력전류	역행 3,000A (100%)	회생 2,100A(100%)
	정격출력용량	역행 4,500V(100%)	회생 3,150kW(100%)
	정격의 종류	클래스 S 100%연속, 200%2시간, 300%1분간	
	효율	96% 이상	
	내전압	직류단자간	직류 3,000V (1분간)
		주회로단자일괄~대지간	교류 5,500V(1분간)
		보기전원회로~대지간	교류 1,500V(1분간)

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 에너지 회생시스템 개요

점차 VVVF 인버터 차량이 증가하게 되면서 회생전력 발생량이 많아지기 때문으로 직류전기철도 가선전압이 크게 흔들린다. 이러한 가선전압의 불안정한 전위를 줄여주기 위해서는 VVVF 인버터 차량의 직류링크단 전압 변동 상황과 회생제동시의 전류충전량을 파악하여 차량운행에 따른 가선전압의 흔들림까지도 회생인버터의 운전조건에 반드시 고려되어야 한다. 현재 우리나라 지하철의 직류구간을 운행하는 VVVF 인버터 차량에는 직류링크단 전압이 일정치 이상으로 상승하면 과전압스위치가 동작하여 저항에서 열로 소비시켜 직류링크단 전압을 안정화시키는 장치가 설치되어있다. 하지만 짧은 역간거리와 낮은 시격으로 인해 전동차들간의 동시 역행 및 제동시기가 빈번히 발생하고 있다. 비록 VVVF 인버터 차량에서 저항기에 의한 가선전압 안정화 동작을 수행하여도 전체 가선의 직류전압 변동을 안정화시키지 못하고 있는 상황이다. 현재는 전동차의 과전압계전기 동작전압을 크게 높여놓은 상태이다. 이러한 특수한 지하철 운행조건에서는 차량에서 발생된 회생전력을 변전소에서 빠른 시간내에 흡수하여 가선전압을 안정화시키는 방식이 반드시 필요하다. 전동차에 장착된 소용량의 저항기만으로는 가선전압의 변동률 감소에는 큰 역할을 기대할 수 없다.

회생인버터는 직류전기철도에서 전동차의 회생전력으로부터 발생된 회생전력을 교류측으로 반환함에 따라 차량의 회생 비효율 방지와 전력절감을 가능하게 하는 장치이다. 일반적으로 지하철에서는 항시 부대용 소비전력 부하를 갖고 있기 때문에 일반 전철에 비해 효과적인 전력 반환이 가능하다. 직류 1500V 구간을 운행하는 전동차가 가속시에는 다이오드 정류기로부터 전력을 공급받으며, 차량이 회생제동을 시작하면 차량 자신이 발전기가 되고 추진장치 직류단이 상승하고, 가선을 통해 직류전압이 높은 곳으로부터 낮은 쪽으로 전력을 이동하도록 한다. 다이오드 정류기의 경우는 근처의 차량에서 역행시 소모되지 않는 회생전력을 계통으로 보내지 못하므로 가선전압은 계속해서 상승한다. 따라서 이 잉여 회생전력을 정류기와

는 역 병렬로 전력변환장치를 설치하고, 전원측의 위상과 동기시켜 직류잉여전력을 교류 3상 전력으로 변환해 계통으로 보낸다. 단, 회생인버터에서는 직류측의 전압 발생원이 차량의 회생에 의한 것인지 정류기 출력자체 인지를 구별하기 곤란하다. 그 때문에 회생인버터 동작개시 전압을 정류기 무부하 전압보다 수 10V 높일 필요가 있다. 회생인버터에서 만들어진 교류는 상용전력에서 수전하는 교류보다도 고조파를 많이 함유하고 있으므로, 배전설비 측에 액티브 필터 등을 설치해서 고조파를 보상하는 경우도 있다. 회생인버터는 변전소의 송출전압이 무부하 전압보다 50V정도 높아지면 동작을 개시하여 직류측의 에너지를 흡수한다.

본 과제에서 개발하고자 하는 회생인버터는 직류잉여 회생전력을 흡수하여 고압배전단에서 소모되도록 하며, 회생전력이 발생되지 않을 때에는 능동전력필터로 구동되어 계통단의 11 및 13차 전류고조파를 줄일 수 있는 차세대 회생인버터이다. 그림 3.1은 지하철 변전소에 회생인버터가 설치된 것을 보여주며, 표 3.1에 회생인버터 개발 사양을 나타낸다.

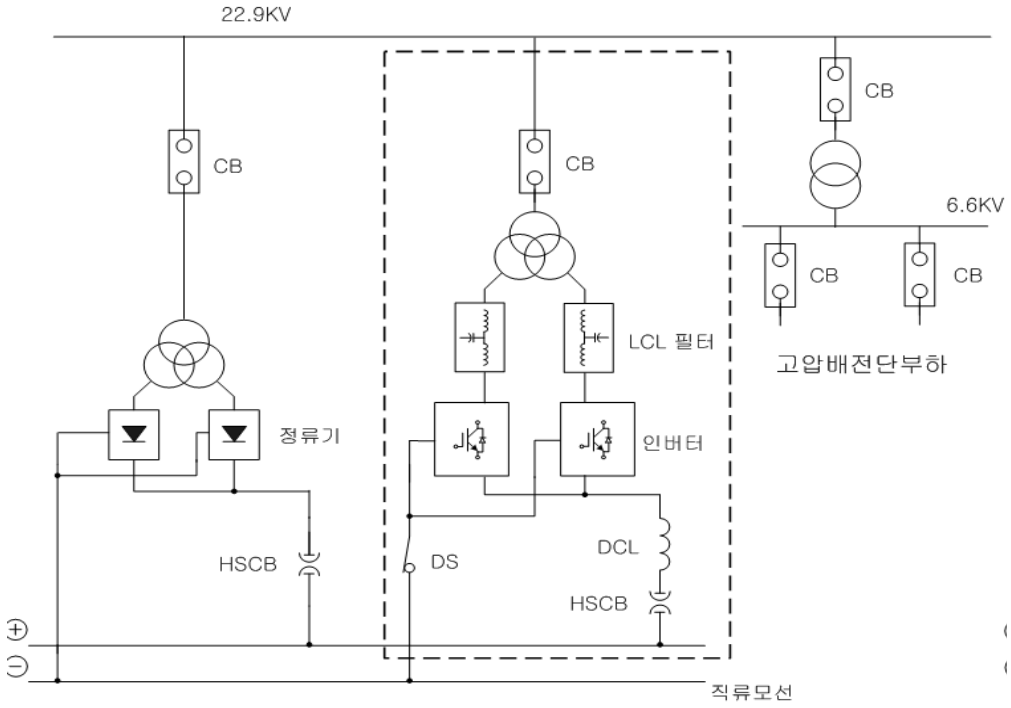


그림 3.1 회생인버터 변전소 설치도

표 3.1 회생인버터 개발 목표

연구 개발 목표	회생전력 흡수 및 고조파 저감기능을 갖는 PWM 인버터 개발	
적용 대상	직류전철변전소	
개발 품목	PWM 회생 인버터	
기능 사양	-직류 전압제어로 회생전력흡수 -전류 고조파 억제 기능 -무효전력 보상 기능 -전압 고조파 억제 기능 -전압, 전류 제어 기능	
개발 품목 사양		
회생인버터	정격용량	750kW × 2EA
	AC 정격전류	500A (250A × 2EA)
	AC 단시간 전류	800A(60초)
	스위칭 소자	IGBT(3300V, 1200A)
	제어기	DSP TMS320C33
	출력전압	3상 1000V
	동작방식	IGBT PWM 방식
	회생전력흡수 전압범위	1650 ~ 1850V
	냉각방식	수냉식
	크기	W 1,600mm × H 2,200mm × D 600mm
계통연계변압기	정격용량	2000kVA
	정격전압	22.9kV/1000V
	결선방식	$\Delta/\Delta\Delta$

제 2 절 회생용 인버터 용량선정

1. 전력시뮬레이션에 의한 회생량 분석

운행차량 및 전철 변전소에서의 실제 측정한 데이터(가선전압/전류등)를 이용하여 회생전력의 발생 가능성을 주말(오전, 오후), 평일(오전, 오후)로 구분하여 분석하였다.

가. 운행차량 데이터

(1) 가선전압・전류, 속도, 역행/제동비

각 호선(5~8)별 도시철도공사 차량사업소에서 차량운행 시 데이터를 이용하여 가선전압 및 전류, 차량 속도, 역행/제동비의 데이터를 나타낸다.

(가) 6호선

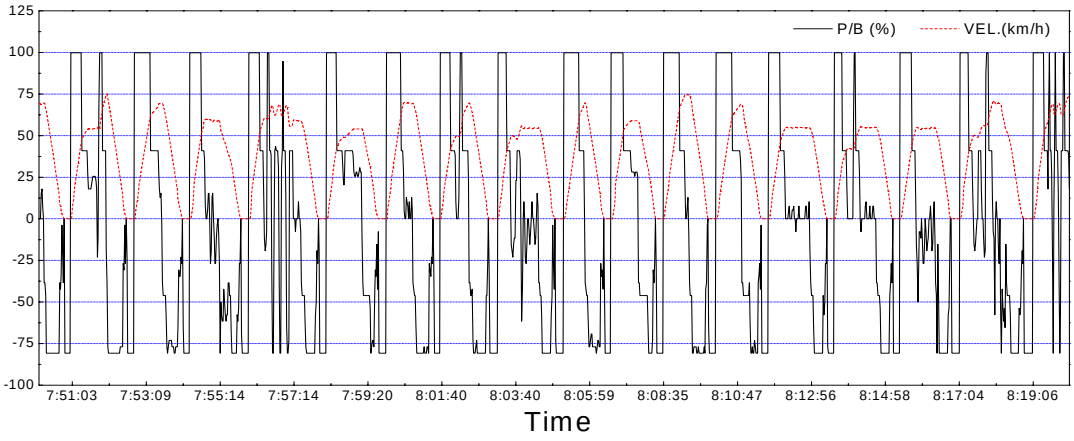


그림 3.2 역행/제동비(주말 : 오전)

동절기 1월중 평일과 주말 오전/오후의 차량데이터 중 역행/제동/가선전압/가선전류의 데이터를 관찰하였다. 그림 3.2~3.9는 6호선 차량의 역행/제동비(%), 차량이 운

행하면서 시간에 따른 차량의 속도를 나타낸 것이다.

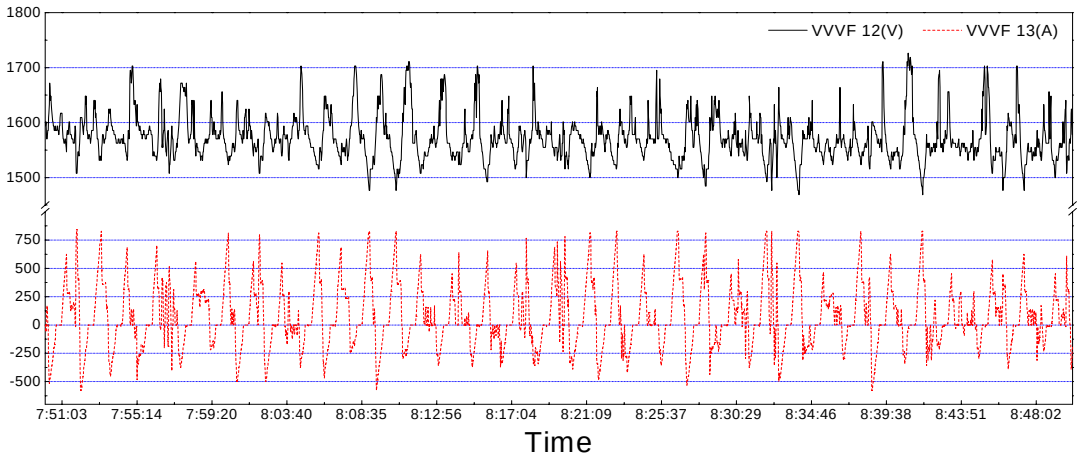


그림 3.3 가선 전압/전류(주말 : 오전)

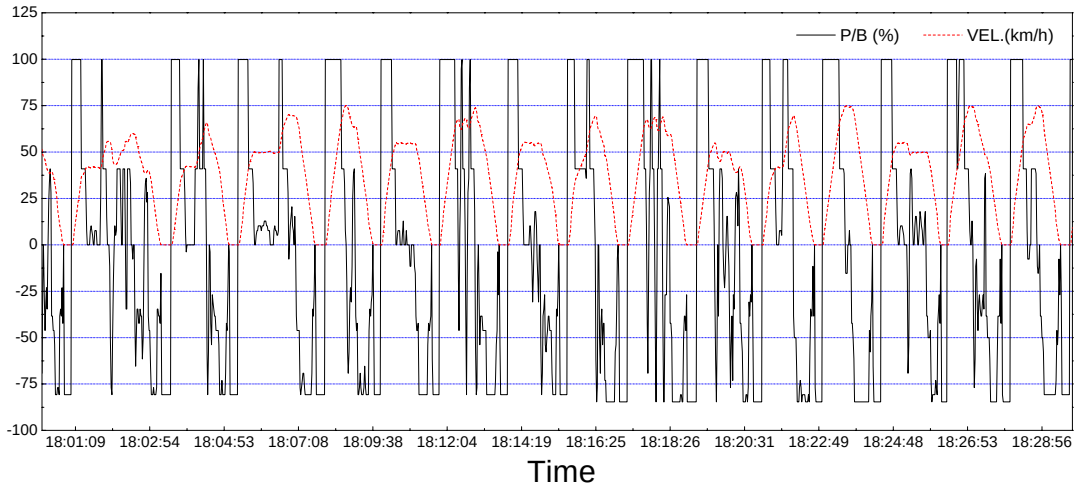


그림 3.4 역행/제동비(주말 : 오후)

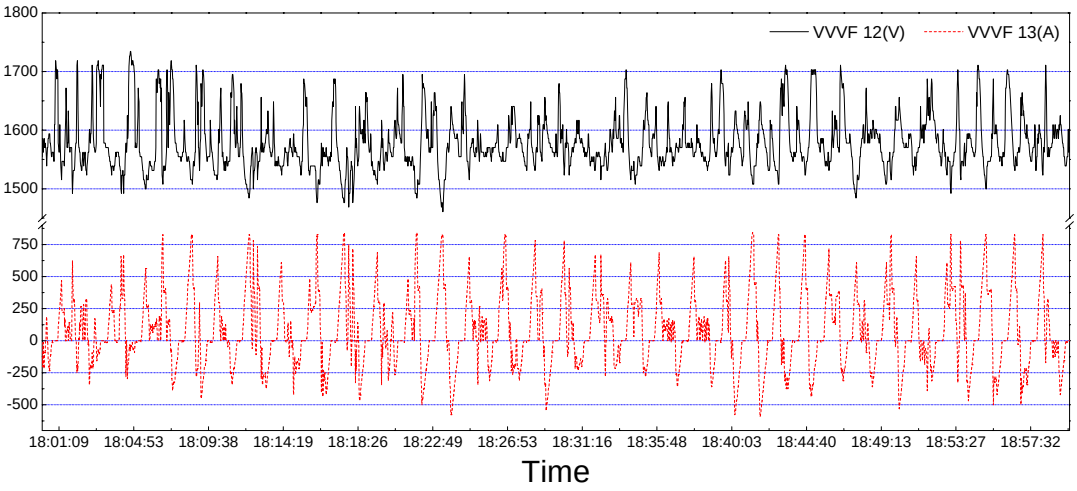


그림 3.5 가선 전압/전류(주말 : 오후)

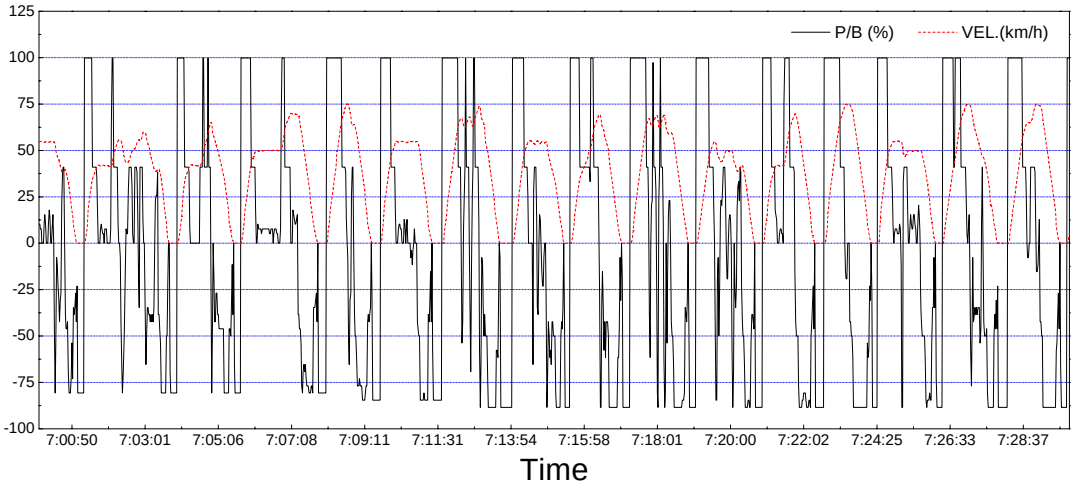


그림 3.6 역행/제동비(평일 오전)

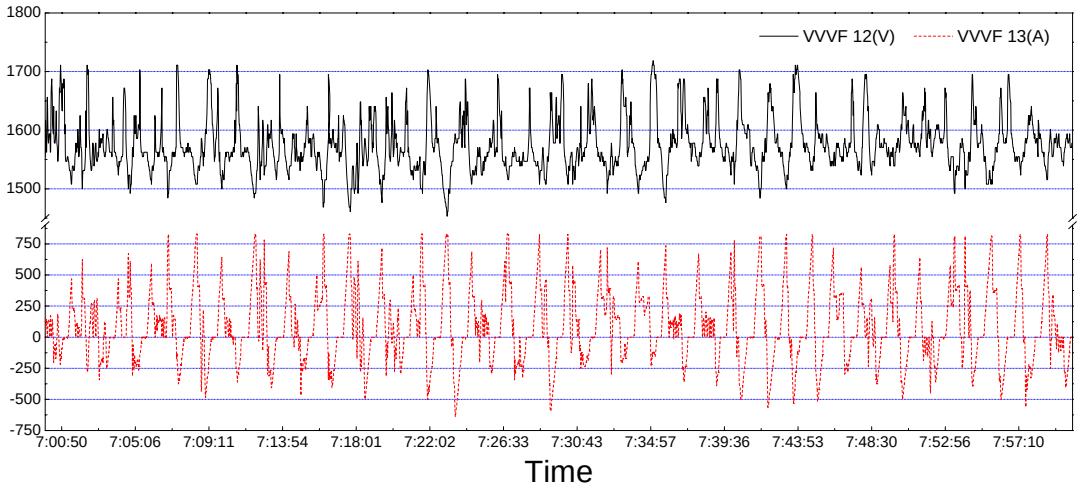


그림 3.7 가선 전압/전류(평일 오전)

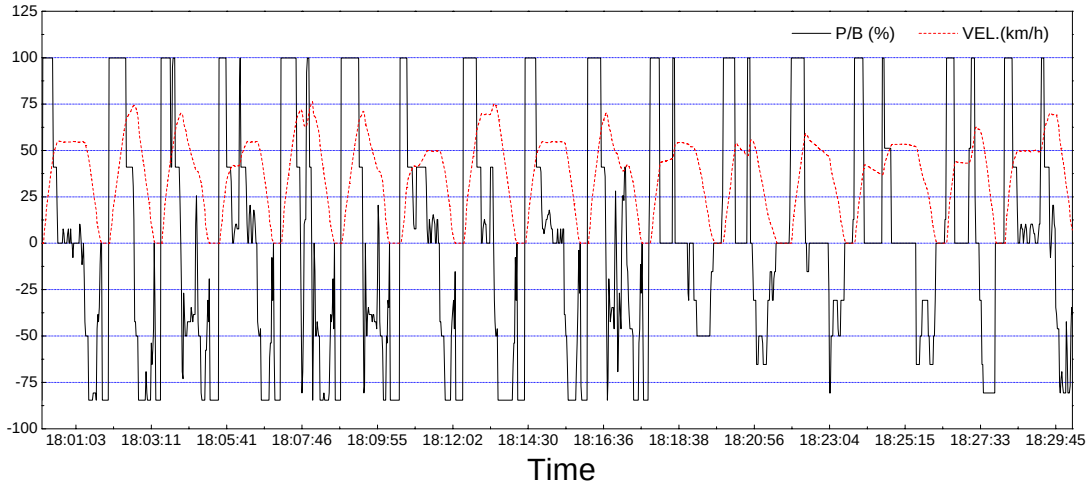


그림 3.8 역행/제동비(평일 오후)

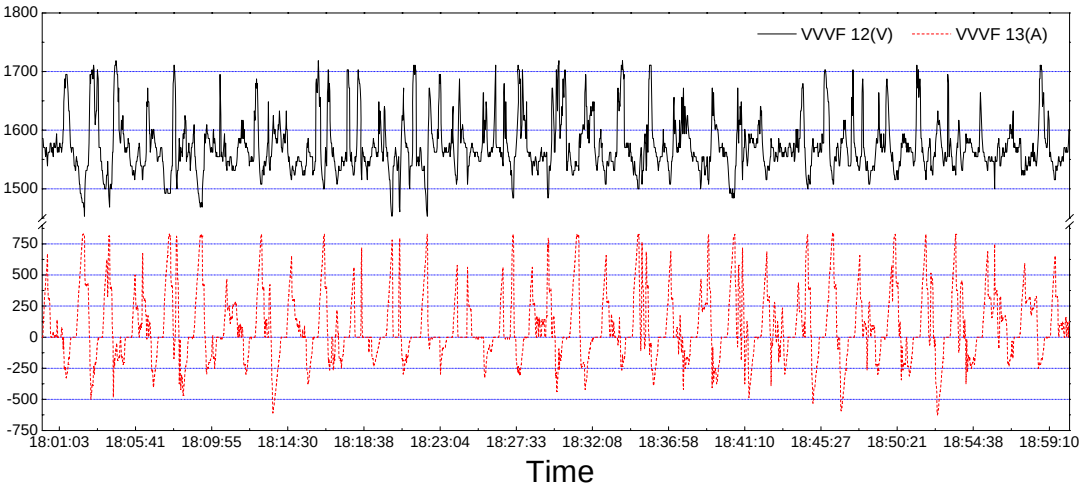


그림 3.9 가선 전압/전류(평일 오후)

(나) 7호선

동절기 1월중 평일과 주말 오전/오후의 차량데이터 중 역행/제동/가선전압의 데이터를 분석하였다. 그림 3.10~3.13은 7호선의 시간에 따른 차량의 속도, 가선전압, 역행/제동비(%)를 나타낸 것이다.

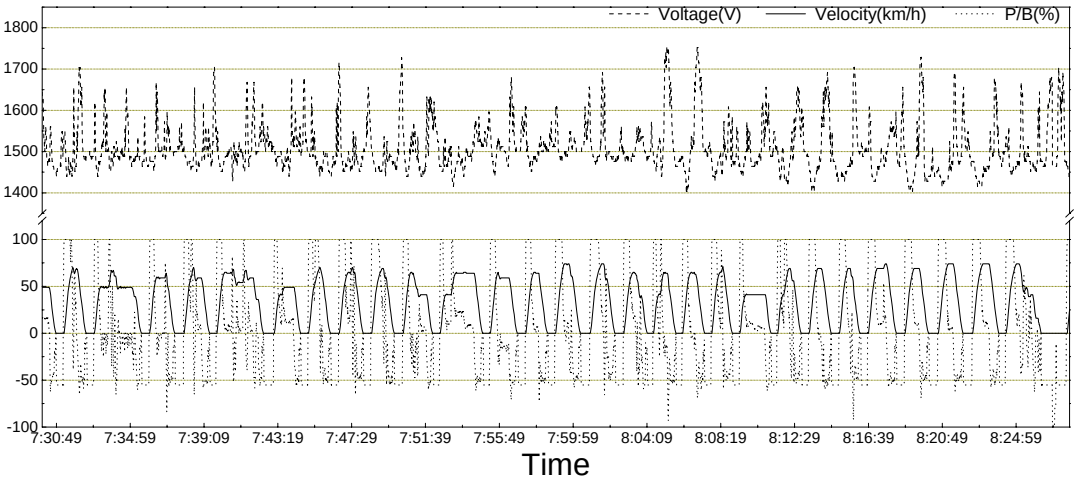


그림 3.10 가선 전압, 속도, 역행/제동비(주말 오전)

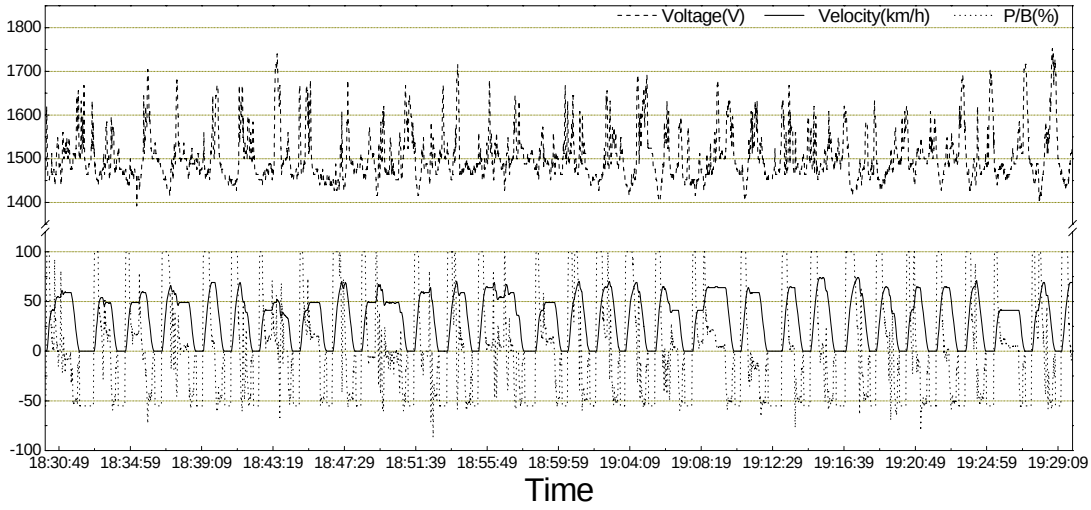


그림 3.11 가선 전압, 속도, 역행/제동비(주말 오후)

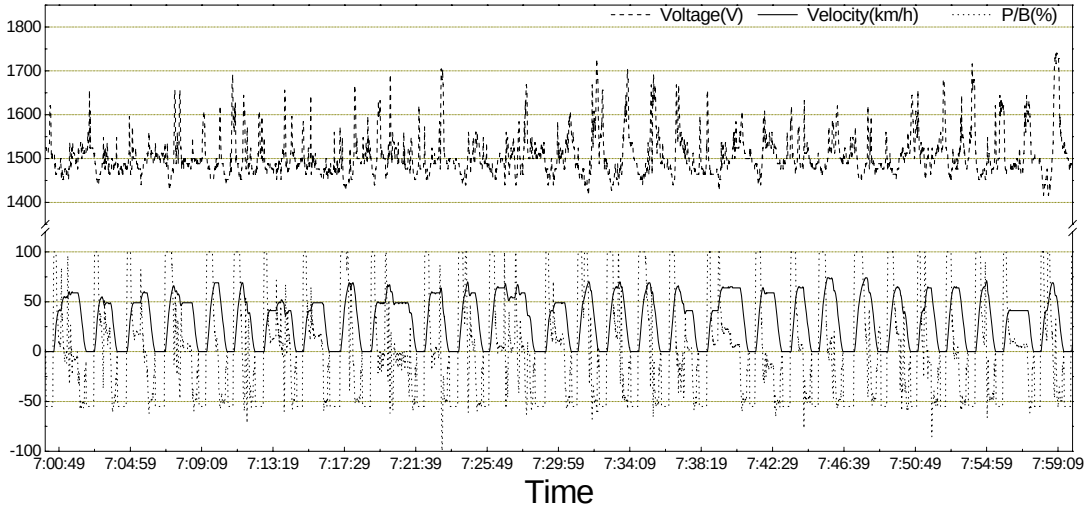


그림 3.12 가선 전압, 속도, 역행/제동비(평일 오전)

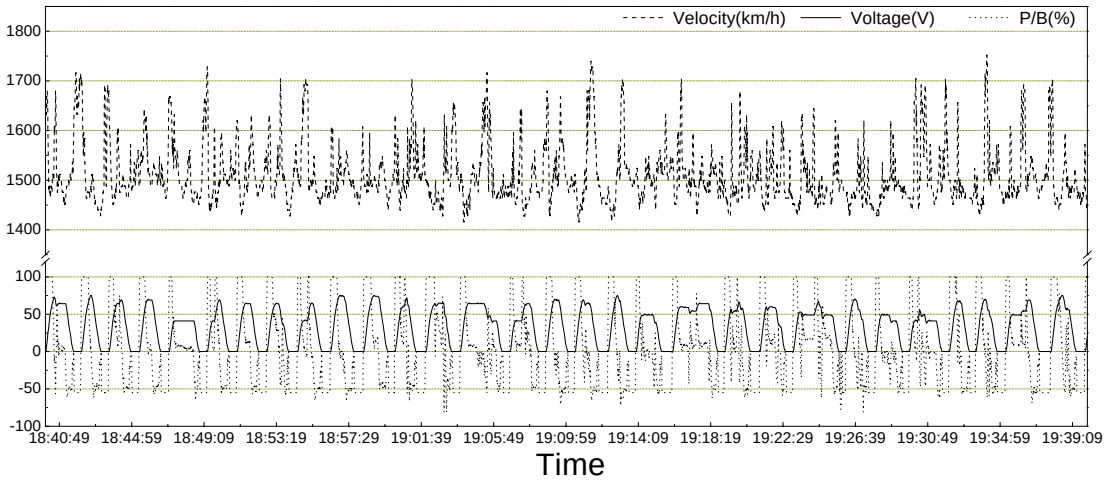


그림 3.13 가선 전압, 속도, 역행/제동비(평일 오후)

(다) 8호선

동절기 1월중 평일과 주말 오전/오후의 차량데이터 중 역행/제동/가선전압의 데이터를 분석하였다. 그림 3.14~3.17은 8호선의 시간에 따른 차량의 속도, 가선전압을, 역행/제동비(%)를 나타낸 것 이다.

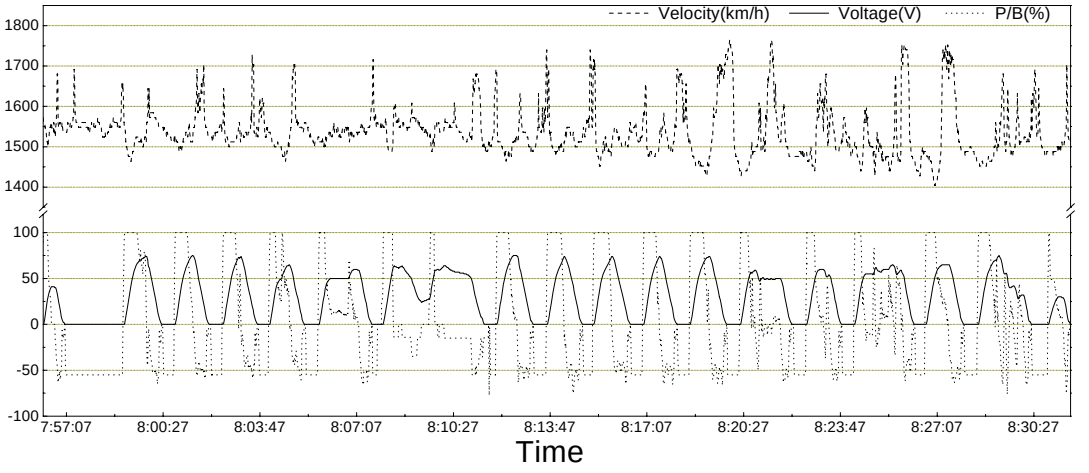


그림 3.14 가선 전압, 속도, 역행/제동비(주말 오전)

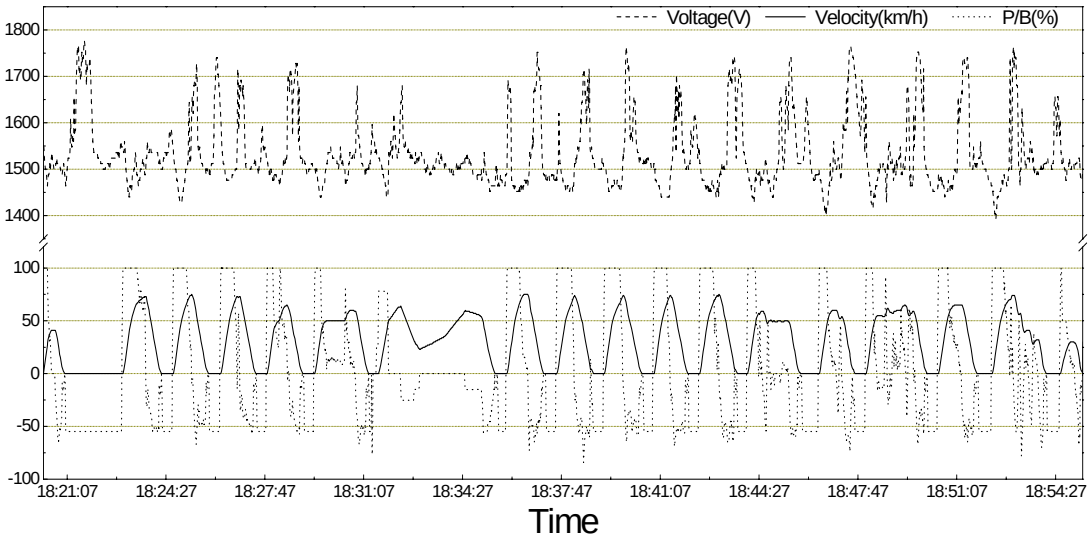


그림 3.15 가선 전압, 속도, 역행/제동비(주말 오후)

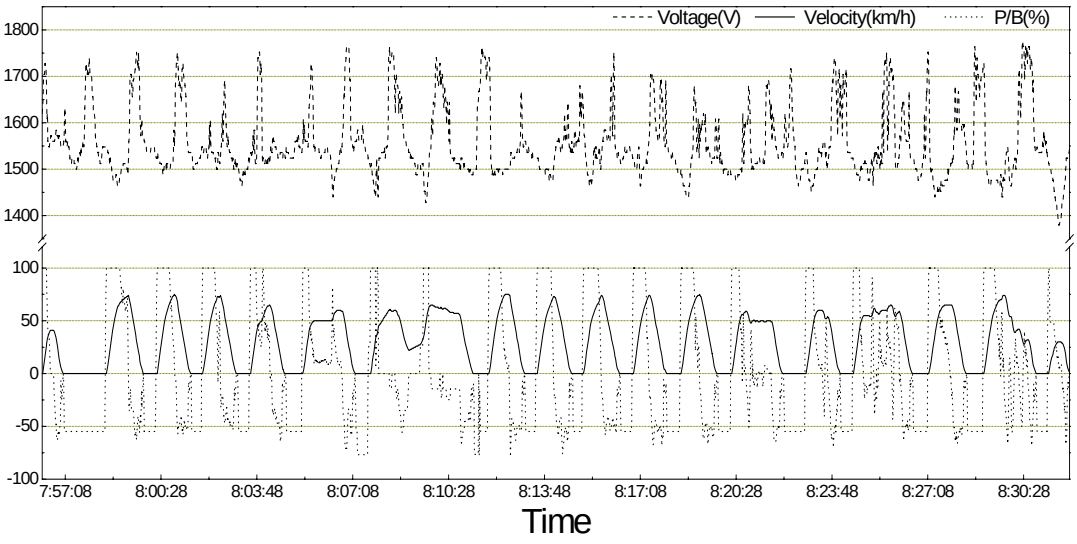


그림 3.16 가선 전압, 속도, 역행/제동비(평일 오전)

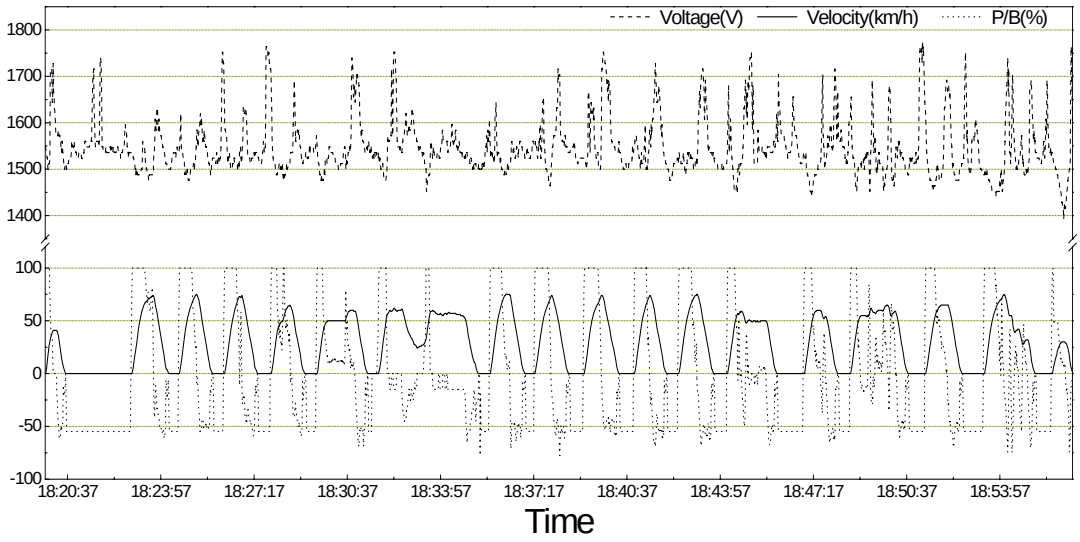


그림 3.17 가선 전압, 속도, 역행/제동비(평일 오후)

그림 3.2~3.17은 차량운행시 가선전압 및 전류, 속도 그리고 역행/제동비의 특성을 나타낸 것이다. 그림을 관찰하면 전압의 경우는 모든 호선에서 평일과 주말의 오전 및 오후의 변동이 비슷하게 나타남을 알 수 있고 이는 주변 상황(운행차량 등) 및 차량의 제어시스템 등에 의해 전압의 크기가 일정한 수준에서 변동 된다고 할 수 있고, 속도와 역행/제동비의 상황을 보면 역행의 힘을 내었을 때는 차량의 속도가 증가하고 제동의 힘을 내었을 때는 차량의 속도가 감소함을 알 수 있다. 이는 차량이 역에서 출발할 때와 도착할 때 그리고 상구배나 하구배구간을 짐작 할 수 있게 한다. 일반적으로 차량이 역행을 할 경우에는 가선전압의 크기가 작아지고, 제동할 시에는 커짐을 알 수 있다. 이와 반대인 경우에는 측정 차량의 주변에 운행하는 차량 등이나 기타 사항에 의하여 일어난 현상으로 볼 수 있다.

(2) 전력량 데이터

표 3.2는 운행 차량데이터의 누적된 전력량에 의한 회생율을 나타낸 것이다. 대체적으로 평일의 전력회생율이 주말 보다 높게 나타났으며, 7호선의 경우가 가장 큰 회생율을 보였다.

표 3.2 운행 차량 데이터에 의한 전력

구 분 / 노 선		소비전력량(kw)	회생전력량(kw)	회생율(%)	비고
5호선	주말	21880	4930	22.53	1~2일 전력량
	평일	65810	11120	16.90	
6호선	주말	1120	435	38.84	약 4시간 (오후)
	평일	1235	483	39.11	
7호선	주말	7669	2936	38.28	약12시간
	평일	7634	3058	40.06	
8호선	주말	205	75	36.59	구간주행 (오전)
	평일	202	79	39.11	

나. 변전소 데이터

(1) 수집 데이터

각 호선(5~8)별 도시철도공사 종합사령실에서 선정 변전소의 가선전압 및 전류 데이터를 수집 및 정리, 분석하였다. 변전소 선정은 구배 정도에 의해 각 5호선(영등포시장, 을지4가), 7호선(건대입구, 상도), 8호선(단대오거리, 복정)을 선정하였다.

(가) 5호선

그림 3.18~3.21은 5호선의 동절기 1월중 주말 및 평일 1일(1분단위) 변전소 가선전압 및 전류의 데이터를 정리한 것이다.

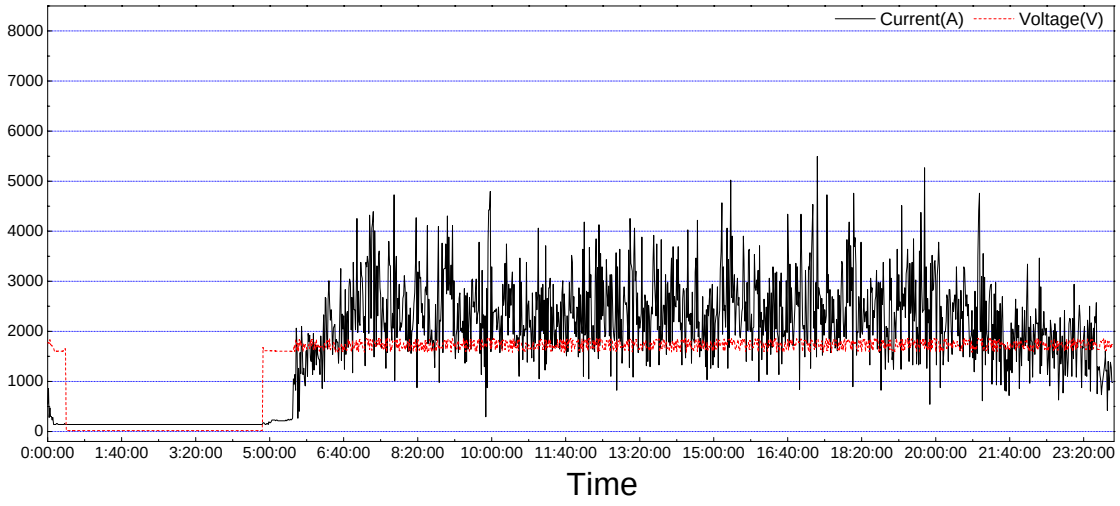


그림 3.18 가선 전압/전류 (주말, 영등포 시장)

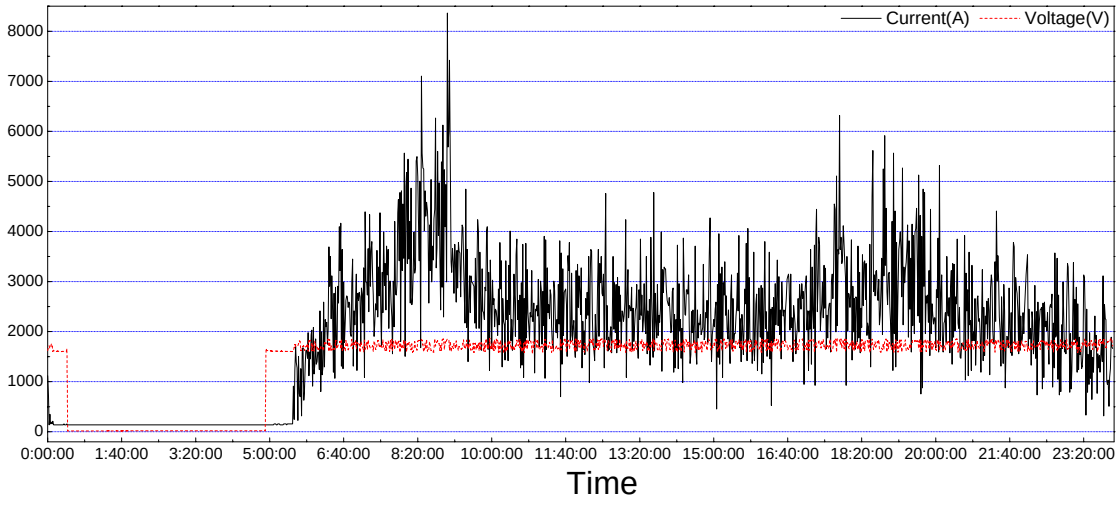


그림 3.19 가선 전압/전류(평일, 영등포 시장)

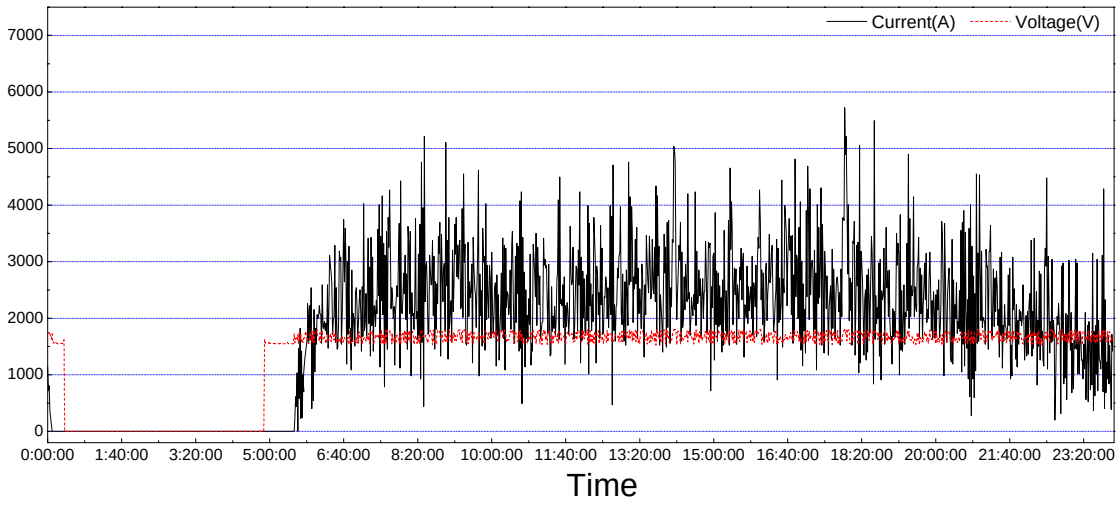


그림 3.20 가선 전압/전류 (주말, 을지 4가)

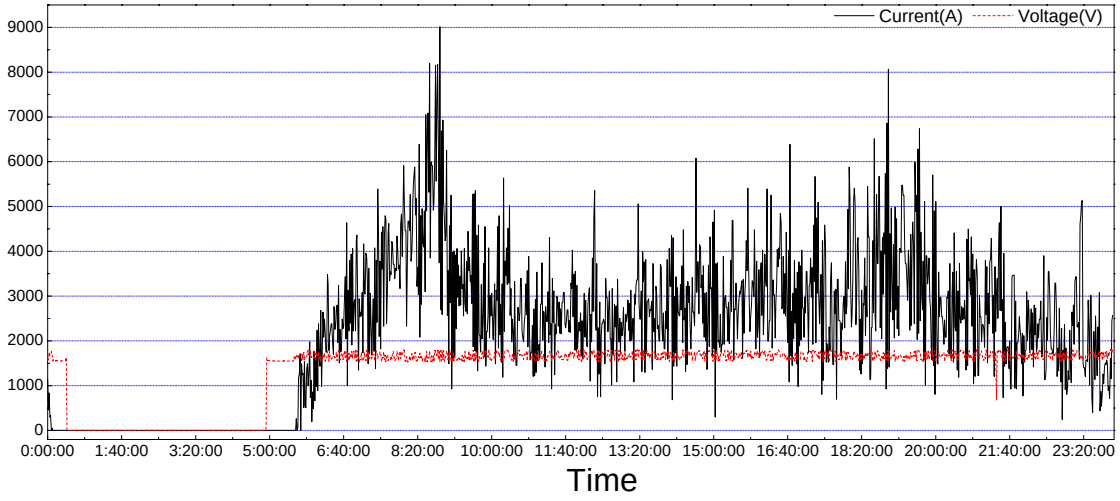


그림 3.21 가선 전압/전류(평일, 을지 4가)

(나) 7호선

그림 3.22~3.25는 7호선의 동절기 1월중 주말 및 평일 1일(1분단위) 변전소 가선전압 및 전류의 데이터를 정리한 것이다.

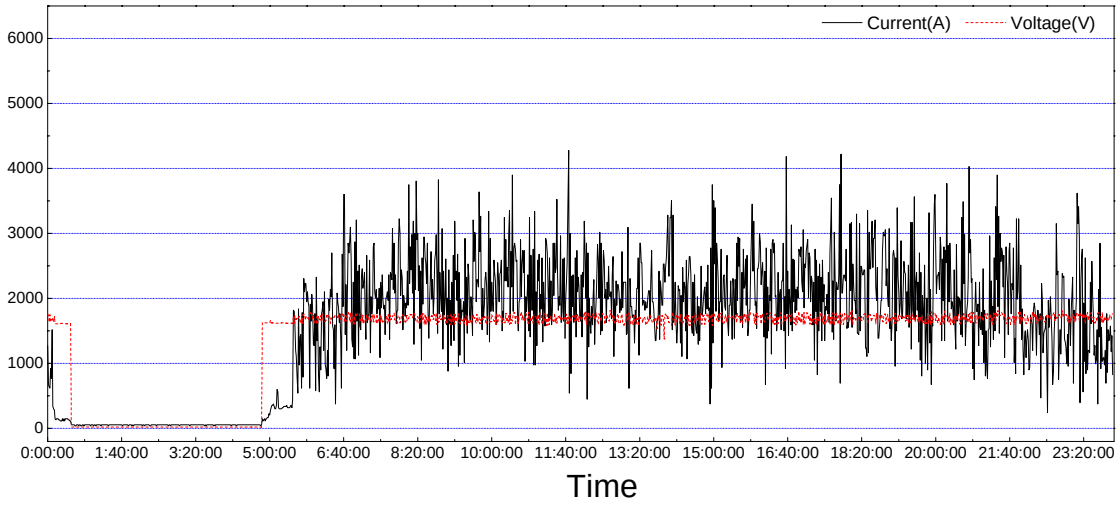


그림 3.22 가선 전압/전류 (주말, 건대입구)

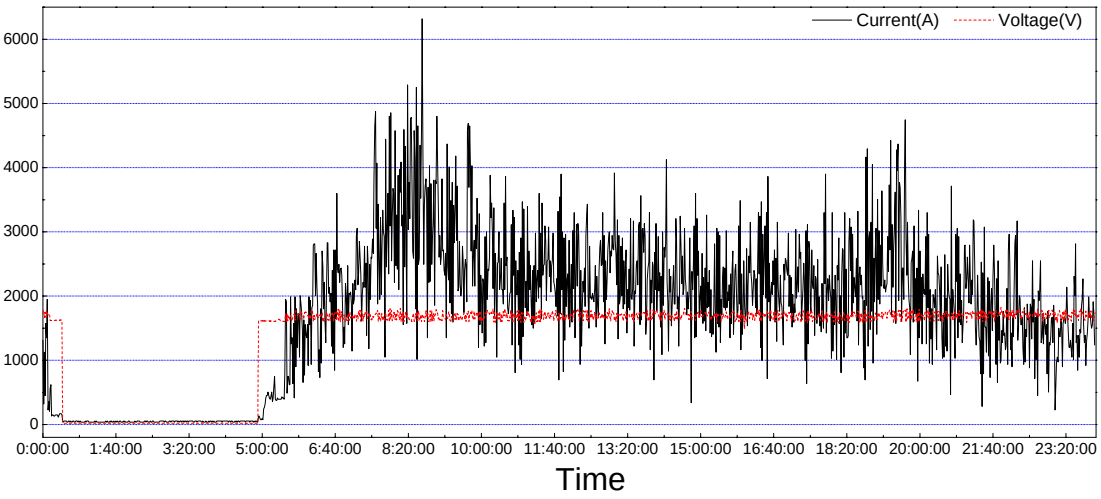


그림 3.23 가선 전압/전류 (평일, 건대입구)

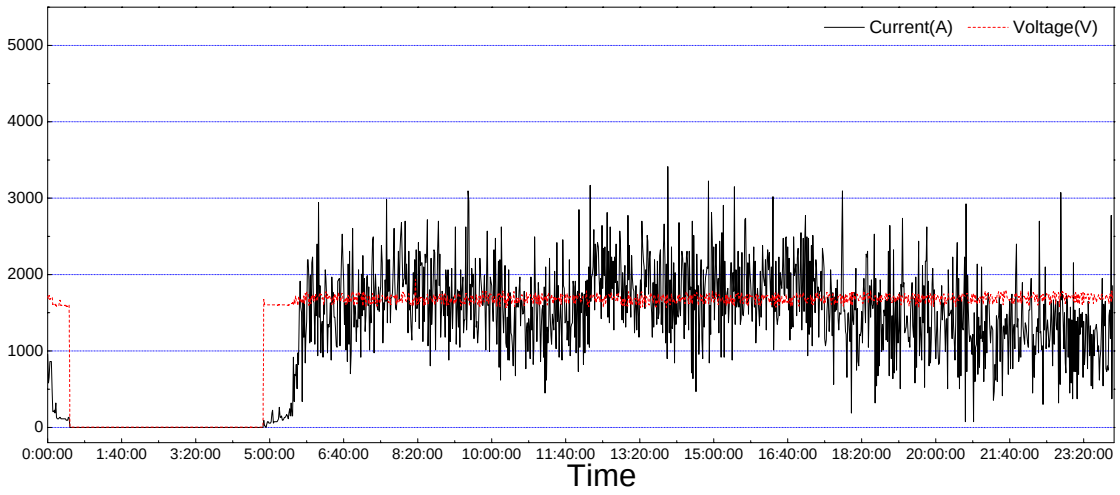


그림 3.24 가선 전압/전류 (주말, 상도)

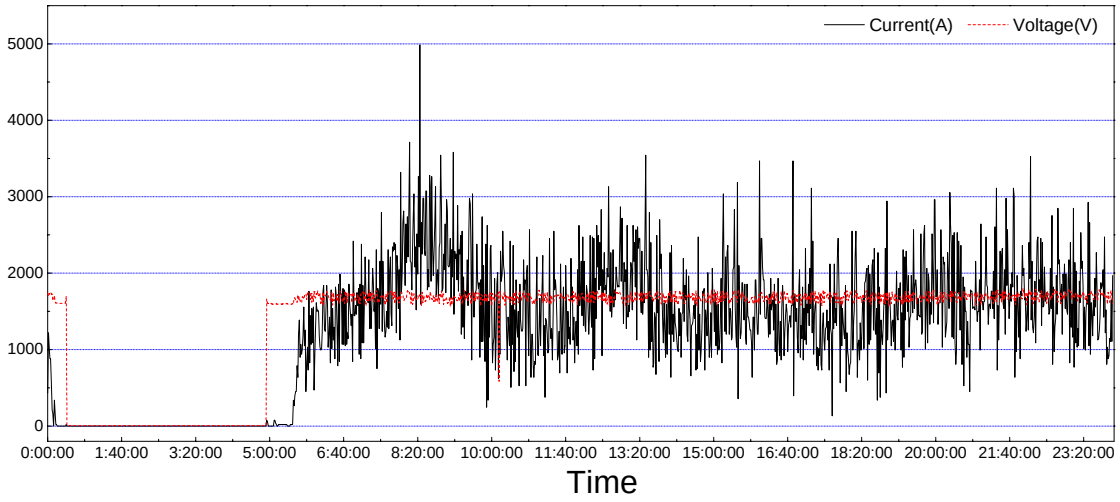


그림 3.25 가선 전압/전류 (평일, 상도)

(다) 8호선

그림 3.26~3.29는 8호선의 동절기 1월중 주말 및 평일 1일(1분단위) 변전소 가선전압 및 전류의 데이터를 정리한 것이다.

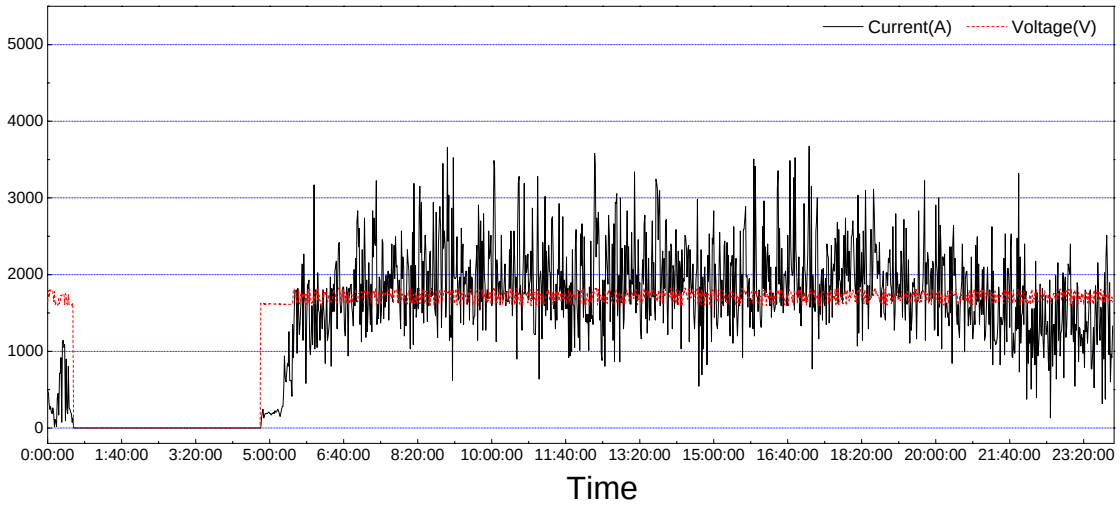


그림 3.26 가선 전압/전류 (주말, 단대오거리)

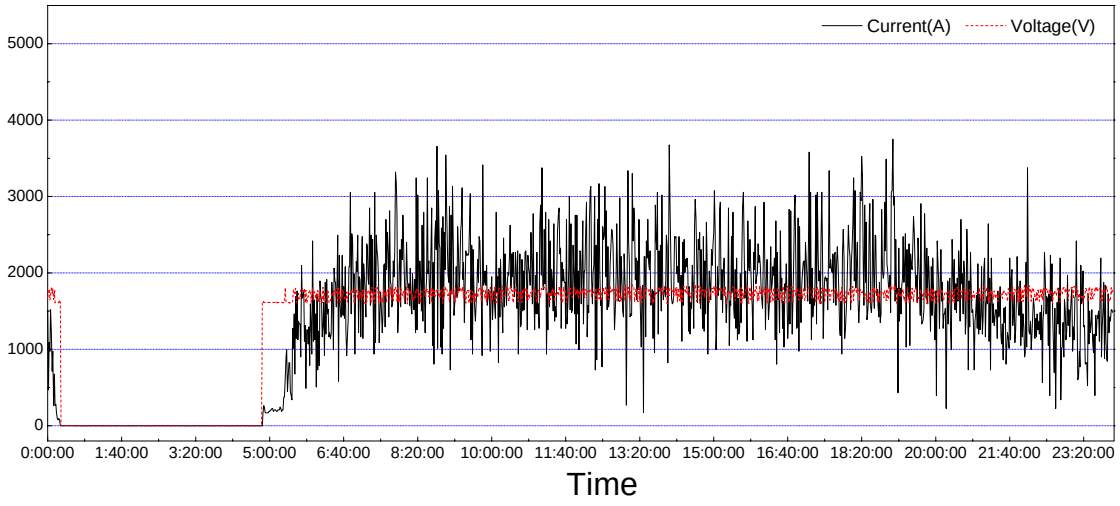


그림 3.27 가선 전압/전류 (평일, 단대오거리)

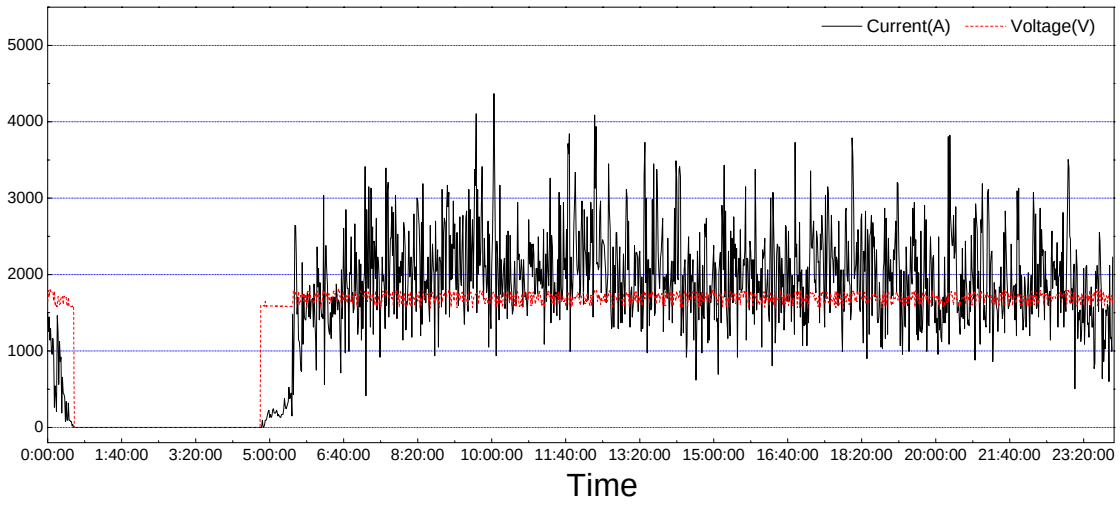


그림 3.28 가선 전압/전류 (주말, 복정)

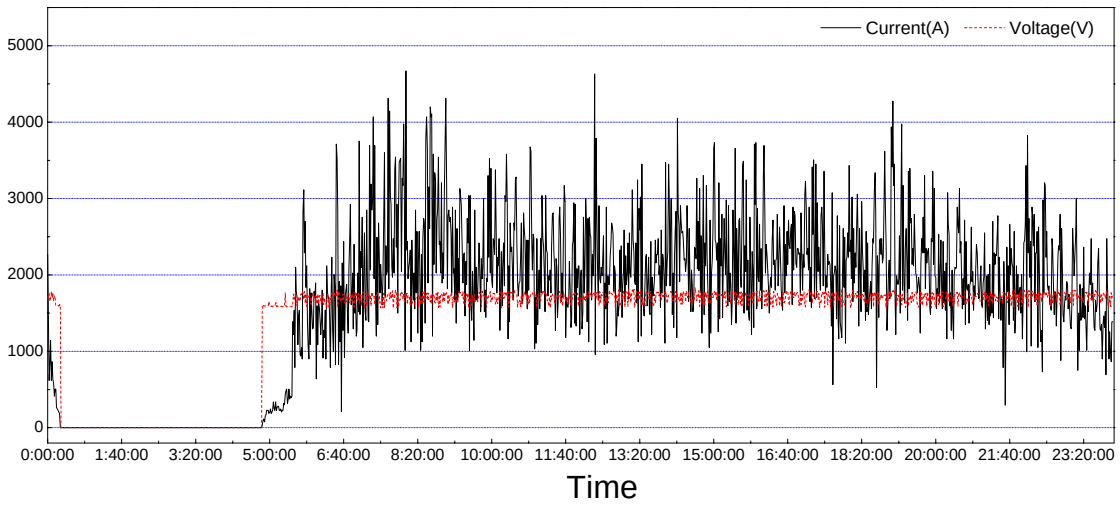


그림 3.29 가선 전압/전류 (평일, 복정)

그림 3.18~3.29는 각 호선별 선정 변전소에서의 가선 전압과 전류의 주말 및 평일의 그래프를 나타낸 것이다. 그래프를 관찰하면 5호선과 7호선의 변전소가 8호선보다 그리고 주말보단 평일의 가선 전압 및 전류의 크기 및 변동이 심하게 나타남을 알 수 있다. 이것은 순간의 변전소에 걸리는 부하(차량 및 승객 등)가 해당 변전소 구간

에 많이 걸리는 것으로 사료되고, 해당 변전소에서의 소비되는 전력 및 회생되는 전력의 크기가 상대적으로 크다고 할 수 있다. 또한 평일의 모든 그래프에서 오전 8시에서 9시경에 전류의 크기가 크게 나타나는데 이는 평일 출근시간의 이용승객의 증가에 따라 전력의 소모가 커짐으로 전류의 크기가 크게 나타난다고 할 수 있다.

다. 시뮬레이션 분석

(1) TPS 결과

TPS 시뮬레이션은 차량의 일반적인 데이터와 선로조건, 성능 등의 데이터에 의해 1차량이 호선을 왕복했을 때의 역행 에너지 및 회생 에너지, 전류 등을 알아보기 위함이다. 각 호선별 차량 데이터에 의한 TPS 시뮬레이션 결과는 표 3.3과 같다.

표 3.3 TPS 시뮬레이션 결과

구 분	5호선	6호선	7호선	8호선
총 주행거리[m]	94776	72842	94190	38084
총 주행시간[s]	9523.96	7903.44	9068.95	3677.82
표정속도[km/h]	35.82	33.18	37.39	37.28
역행 에너지[kwh]	1959.6	1512.4	1786.2	574.6
역행시의 I_rms[A]	1032.8	823.4	1012.6	780.6
역행시 평균전류[A]	493.8	459.3	472.7	375.0
총 회생에너지[kwh]	1073.2	616.5	963.3	317.2
회생시 I_rms[A]	693.7	510.2	703.7	541.3
회생시 평균전류[A]	-270.4	-187.2	-254.9	-207.0
총 Aux. 에너지[kwh]	446.3	370.7	425.1	130.1
Peak 전류[A]	3736.6[A] at location 84165[m]	2813.4[A] at location 44853[m]	3604.4[A] at location 95641[m]	2912.7[A] at location 2348[m]

TPS 결과에 의한 회생율은 표 3.4와 같다.

표 3.4 TPS 시뮬레이션 회생율

구 분	회 생 율	비 고
5호선	44.60 [%]	회생률 = [총회생/(역행+보조)]×100
6호선	32.73 [%]	
7호선	43.56 [%]	
8호선	45.01 [%]	

각 호선별 TPS 결과에 의하면 5호선과 7호선은 회생율뿐만 아니라 소비전력 및 총회생 에너지가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 각호선의 구배현황 및 부하(승객 등)가 가장 크다고 할 수 있고, 실 상황에서도 회수 회생전력량의 양이 많을 것으로 사료된다.

(2) 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 차량의 일반사항 및 운전 데이터, 시뮬레이션 데이터 등을 입력하여 각 호선의 전력 사항이나 각 변전소별 전력 사항을 알아보기 위함이다. 차량, 운전, 시뮬레이션 및 차량전력 데이터는 표 3.5~3.8과 같다.

표 3.5 차량데이터

구 분	5호선	6호선	7호선	8호선
차량/편성 [량]	8	8	8	6
무게 [ton]	272.0	272.0	270.6	206.2
가속도 [km/h/s]	3.00	3.00	3.00	3.00
감속도 [km/h/s]	-3.50	-3.50	-3.50	-3.50
최고속도 [km/h]	100.0	100.0	100.0	100.0

표 3.6 운전데이터

구 분	5호선	6호선	7호선	8호선
TPS 운전모드	표정속도	표정속도	표정속도	표정속도
시격 [sec]	150	150	150	150
역 정차시간 [sec]	20	20	20	20
교행시차 [sec]	30	30	30	30
보조동력 [kw]	168.0	168.0	168.0	126.0
전차선 저항 [ohm/km]	0.042	0.042	0.042	0.042
무부하전압 [V]	1620	1620	1620	1620

표 3.7 시뮬레이션 데이터

구 분	5호선	6호선	7호선	8호선	비고
시뮬레이션시간 [sec]	1800~12000	1800~10000	1800~11000	1800~5400	왕복시간기준
타임_스템 [sec]	1.0	1.0	1.0	1.0	
허용오차 [p.u]	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	

표 3.8 차량전력

구 분	5호선	6호선	7호선	8호선
최저전압 [V]	1357.3	1404.6	1376.6	1253.3
최고전압 [V]	1770.1	1769.9	1770.2	1695.0
차량이 소비한 총 에너지 [kwh]	150060.56	96211.65	124472.87	16897.40
총 회생전력 [kwh]	66717.18	31201.43	53804.04	7621.30
외부이용가능 회생전력 [kwh]	60195.49	27686.96	48582.27	6776.06
차량간 최단거리 [m]	278	719	1150	1130
총 미사용 회생에너지 [kwh]	2077.86	157.98	1154.54	426.42
총 Braking Time/1편성 [초]	1252.0	1036.0	1129.0	317.0

각 시뮬레이션 결과는 다음 표와 같다.

표 3.9 5호선 변전소별 결과

구 분	공급전력 [kwh]	회수전력 [kwh]	최대부하 [kw]	평균부하 [kw]
방화기지	3633.034	0.007	4902.21	1282.25
개화산	4433.031	0.001	4899.16	1564.60
마곡	5312.292	0.016	6923.44	1874.93
화곡	5288.773	0.085	5809.72	1866.63
목동	6235.076	0.108	8570.62	2200.61
영등포 시장	6397.609	0.000	6983.83	2257.98
여의나루	6290.989	0.008	10568.19	2220.35
공덕	5419.79	0.001	8295.78	1912.87
충정로	5836.599	0.007	7580.22	2059.98
을지 4가	6932.126	0.004	7818.12	2446.63
행당	5627.830	0.002	7334.75	1986.29
마장	5981.383	0.085	7492.10	2111.08
군자	5399.741	0.001	6450.86	1905.78
광나루	4482.587	0.009	6467.99	1582.09
강동	6337.018	0.001	7125.57	2236.59
고덕	4933.085	0.009	6501.02	1741.09
고덕기지	1555.872	0.005	2356.72	549.13

표 3.10 5호선 결과

변전소에서 공급된 총 에너지 [kwh]	90096.82
변전소에서 다시 흡수한 총 에너지 [kwh]	0.35
전차선 총 손실 에너지 [kwh]	6573.09

표 3.11 6호선 변전소별 결과

	공급전력 [kwh]	회수전력 [kwh]	최대부하 [kw]	평균부하 [kw]
응암	4802.388	0.119	7066.49	2108.37
연신내	4285.987	0.009	5066.93	1881.65
응암	5282.359	0.005	6623.23	2319.08
수색	5554.499	0.007	7526.33	2438.56
합정	5561.500	0.003	5462.63	2441.63
대흥	5301.007	0.008	5657.21	2327.27
삼각지	5830.815	0.000	4639.85	2559.87
한강진	5286.495	0.000	5449.39	2557.97
신당	6229.607	0.000	7115.84	2734.95
안암	5899.433	0.003	6896.88	2575.51
상월곡	5566.615	0.004	6245.28	2443.88
화랑대	4561.096	0.000	5415.54	2002.43
신내기지	1490.89	0.004	1928.85	654.54

표 3.12 6호선 결과

변전소에서 공급된 총 에너지 [kwh]	66159.69
변전소에서 다시 흡수한 총 에너지 [kwh]	0.16
전차선 총 손실 에너지 [kwh]	1149.32

표 3.13 7호선 변전소별 결과

	공급전력 [kwh]	회수전력 [kwh]	최대부하 [kw]	평균부하 [kw]
장암	3212.343	0.007	6173.77	1257.00
수락산	4003.597	0.116	3987.93	1566.93
중계	5257.687	0.017	7378.32	2057.36
태릉	5162.687	0.006	7879.76	2020.18
상봉	5420.520	0.008	6899.77	2121.07
중곡	5475.572	0.007	6191.96	2142.62
건대입구	4687.471	0.034	5899.76	1834.23
청담	5671.655	0.002	7011.11	2219.35
논현	5581.941	0.002	6257.33	2184.24
내방	4425.672	0.002	6382.96	1731.78
남성	4396.412	0.003	6319.38	1720.34
상도	4670.138	0.010	6891.38	1827.45
보라매	5023.291	0.009	6712.292	1965.64
남구로	4444.810	0.009	5930.20	1739.27
철산	3991.311	0.000	5395.49	1561.82
천왕	3430.264	0.004	4389.74	1342.28
온수	960.201	0.000	2142.67	375.73

표 3.14 7호선 결과

변전소에서 공급된 총 에너지 [kwh]	75815.57
변전소에서 다시 흡수한 총 에너지 [kwh]	0.23
전차선 총 손실 에너지 [kwh]	5146.510

표 3.15 8호선 변전소별 결과

	공급전력 [kwh]	회수전력 [kwh]	최대부하 [kw]	평균부하 [kw]
천호	2041.311	0.000	6582.09	2041.31
석촌	2653.600	0.000	7364.82	2653.60
복정	2372.603	0.000	8961.45	2372.60
단대오거리	2136.520	0.000	6069.69	2136.52
모란기지	669.641	0.000	2536.81	669.61

표 3.16 8호선 결과

변전소에서 공급된 총 에너지 [kwh]	9873.65
변전소에서 다시 흡수한 총 에너지 [kwh]	0.00
전차선 총 손실 에너지 [kwh]	588.54

시뮬레이션 결과에 따른 회생율은 표 3.17과 같다.

표 3.17 호선별 회생율

구 분	총 회생율	외부이용가능 회생율	미사용 회생율
5호선	44.56 %	40.11 %	1.38 %
6호선	32.43 %	28.78 %	0.16 %
7호선	43.23 %	39.03 %	0.93 %
8호선	45.10 %	40.10 %	2.52 %

(3) 노선 선정 기준

본 노선의 선정은 현 수행 과제에서 조사 분석한 노선 5, 6, 7, 8호선 중에서 회생전력량이 가장 많이 발생할 만한 1개 노선을 선정하여 보다 정확한 분석을 하고자 함에 있다.

(가) 기준

- 구배분석 결과 장거리 구배구간과 표고차가 큰 노선
- 운행 차량데이터에 의한 전력량 및 회생율이 큰 노선
- 전력 시뮬레이션(TPS, SIM)에 의한 전력량 및 회생율이 큰 노선

(나) 분석

전철시스템 분석에서 구배 현황을 살펴보면 7호선의 구배정도가 심하게 나타남을 관찰 할 수 있고, 다른 호선에 비해 장거리 구배구간도 길며 표고차도 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 운행차량 데이터에 의한 전력량 비교에서도 큰 전력량 및 회생율의 크기가 크게 나타남을 알 수 있다. 마지막으로 시뮬레이션의 결과를 분석해 보면 TPS 회생률 분석과 회생률 결과 분석을 보면 7호선의 전력량 및 회생율이 크게 나타남을 알 수 있다. 5호선의 경우에는 실 차량운행의 회생율과 시뮬레이션에 의한 회생율의 차이는 실제 운행에서 부하(이용고객등)의 크기 및 주변 상황에 의해 투입되는 전력이 실제로 많은 양이 소모 된다고 할 수 있다.

(다) 결과

데이터 및 시뮬레이션에 의한 분석을 종합해 보면 7호선의 회생되는 에너지 중 사용되지 않는 무효분이 많을 것으로 사료된다.

2. 회생용 인버터 용량선정

회생인버터의 용량 및 설치대수는 그 목적에 따라 차이가 있다. 차량의 회생전력을 적극적으로 흡수하여 고배부하 등으로 공급하는 것을 목적으로 하여 설치할 경우에는 인버터의 연속용량을 늘이며, 인버터 전압을 작게 하는 것이 효과적이며, 정위치 정차 및 승차감 향상과 같은 회생실효억제를 목적으로 할 경우는 순시용량을 늘릴 필요가 있다. 본 연구과제에서는 잉여회생전력을 고배 부하단에서 소모하

여 에너지 절감효과를 얻는 것이 최종목표이므로 인버터의 용량 선정시 최대한의 연속용량을 갖도록 한다. 본 절에서는 서울2기 지하철 노선에 대해 회생전력시뮬레이션을 수행하여 회생인버터의 최적 설치개수 및 용량을 선정하였다.

가. 전력시뮬레이션

회생차량에서 발생된 회생전력을 100% 다른 역행차에서 소비할 수 없을 때에는 변전소에서 전력회생설비를 설치하여 회생전력을 교류전력계통 또는 고배부하에 송출할 필요가 있다. 전력회생설비의 용량결정시에는 설치노선 고유의 차량조건, 운전조건에 따라서 전력회생설비를 통과하는 전력의 패턴이 달라지기 때문에 그 노선 조건, 차량조건, 운전조건, 변전소조건에 기초한 전력시뮬레이션을 행하여 일련의 열차운전상황 중에서 전력회생설비를 통과하는 회생전력을 산정할 필요가 있다.

그림 3.30은 전력시뮬레이션을 이용하여 회생인버터의 설치 개수, 설치 위치, 최적용량을 산정하기위한 순서도를 나타낸다.

서울시 2기 지하철의 차량 및 노선데이터를 사용하여 TPS 및 전력시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 회생인버터 설치 개수 및 용량을 변화시킨 경우, 전체 노선에 대한 회생 실효율을 식(3.1)로 계산하였다. 서울 2기 지하철 각 노선의 경우 대부분 2개, 3개, 4개의 회생인버터를 설치한 경우가 그 이상의 회생인버터를 설치할 때와 회생전력흡수측면에서 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 따라서 각 노선의 모든 변전소에 회생인버터를 설치하는 것이 흡수 회생전력량은 많지만 회생인버터의 개발 및 추가로 설치비, 운영비 등의 경제성을 고려할 때 회생인버터의 최적설치 개수를 산정할 필요가 있다. 이후 선정된 개수와 위치에 회생인버터를 설치한 경우, 변전소에서 흡수되는 회생전력의 제곱평균값을 식(3.2)과 같이 계산하였다.

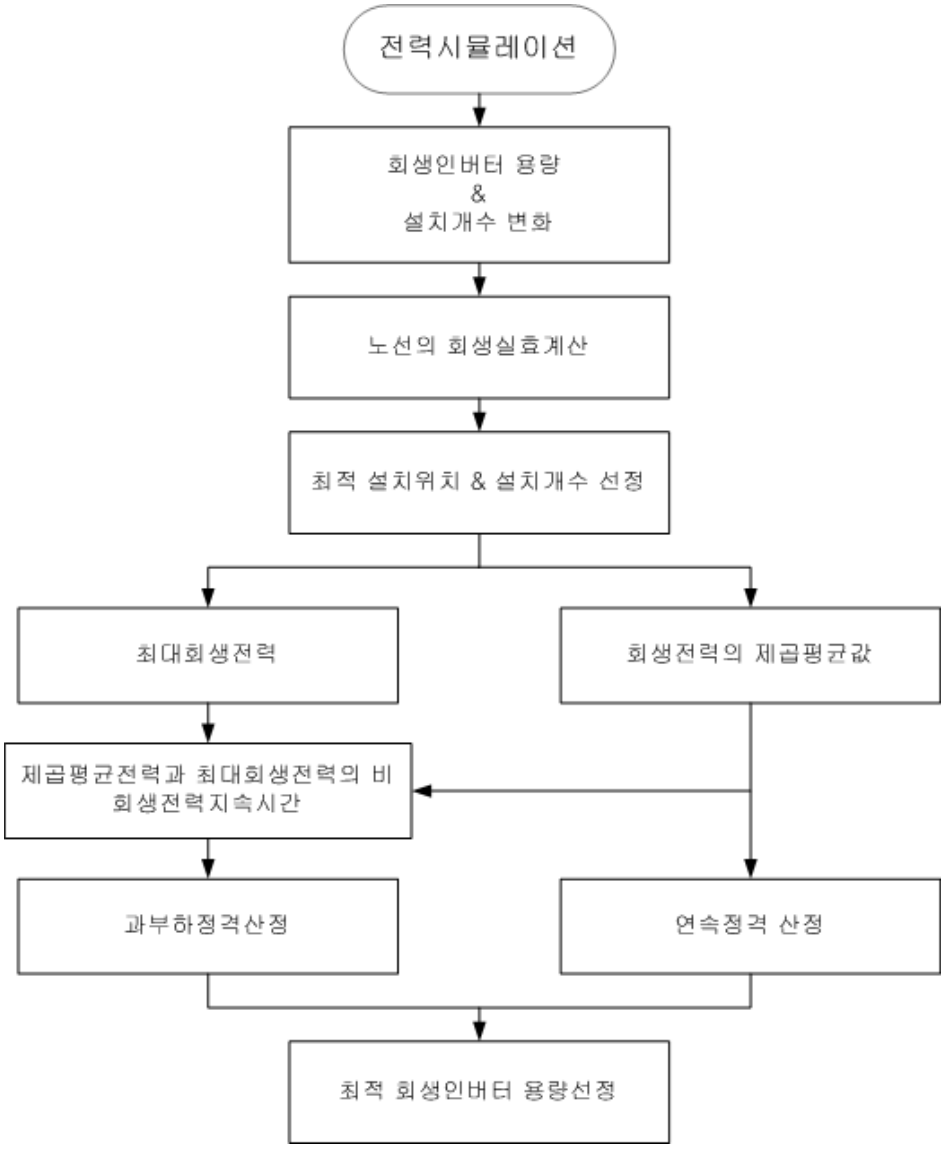


그림 3.30 회생인버터 용량계산 순서도

회생인버터의 연속정격용량은 시뮬레이션 결과로부터 얻은 제곱평균전력보다 큰 값으로 하고, 과부하정격은 제곱평균전력과 최고전력의 비율과 회생전력발생시간을 고려하여 연속정격의 500% 1분간으로 한다.

$$\text{회생실효율} = \frac{\text{회생전력량} - \text{회생인버터 전달전력량}}{\text{회생전력량}} \times 100 \qquad (3.1)$$

$$P_s = \sqrt{\frac{1}{T_s}\int_{t_1}^{t_2} P_{reg}(t)^2 dt} \tag{3.2}$$

이렇게 계산 용량의 회생인버터를 설치한 변전소와 설치되지 않은 변전소의 가선전압 및 사용된 전력을 얻기 위해 전력시뮬레이션 수행하였다. 회생인버터가 미설치된 변전소의 경우이며 발생된 회생전력을 변전소가 흡수할 수 있어 가선전압이 상승을 막아 보다 안정화시키고 있음을 확인할 수 있다. 반면에 회생인버터가 미설치된 변전소의 경우 회생전력발생으로 가선전압이 상승함을 보여주고 있다.

(1) 5호선 전력시뮬레이션

서울 지하철 5호선의 VVVF 인버터 차량 및 노선데이터를 사용하여 전력시뮬레이션을 수행하였으며 서울 5호선에 대한 시뮬레이션 조건을 표 3.18에 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이, 각각의 변전소마다 담당구간의 구배, 역간거리, 역의 개수, 차량의 운행조건이 상이하기 때문에 회생전력 발생량이 다른 게 나타난다. 따라서, 회생전력 발생량이 가장 적은 순으로 회생인버터를 제거하며 변전소별 회생전력 발생량을 사용하여 회생실효율을 계산하면 그림 3.32와 같다. 그림에서 보듯이 3개의 변전소에 회생인버터를 설치할 경우 가장 큰 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타난다. 그림 3.33은 전체 노선의 회생실효율 감소폭이 가장 클 때, 선택된 3개의 변전소에 대한 회생전력 흡수량을 RMS 값으로 나타낸 것이다. 서울 5호선에서 회생인버터의 설치 유무에 따른 변전소의 가선전압과 소비전력파형은 그림 3.34, 3.35와 같다. 그림 3.34는 회생인버터가 미설치된 변전소의 가선전압 및 소비전력파형이며, 전동차의 전기제동으로 인해 발생된 회생전력이 순간적으로 가선전압을 상승시키고 있다. 그림 3.35는 회생인버터가 설치된 변전소의 경우이며, 회생전력을 변전소에서 흡수함으로서 가선전압의 상승폭은 감소하였다.

(가) 시뮬레이션 조건

표 3.18 시뮬레이션 조건(5호선)

차량	차량/편성	8(4M4T)
	무게	270.6[ton]
	가속도	3.0[km/h/s]
	감속도	-3.5[km/h/s]
	최고속도	100.0[km/h]
운전데이터	TPS 운전모드	표정속도
	시격	300[sec]
	역정차시간	30[sec]
	교행시차	30[sec]
	보조동력	168.0[kW]
	전차선저항	0.03030[Ω/km]
	무부하전압	1620[V]
시뮬레이션 데이터	시뮬레이션시간	5000 ~ 8600[sec]
	샘플링시간	1.0[sec]
	허용오차	0.0005[p.u.]

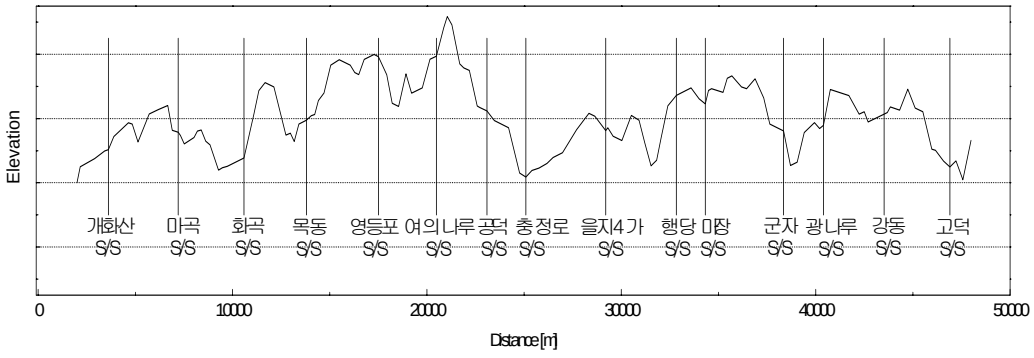


그림 3.31 5호선 구배도

(나) 회생인버터 설치변전소의 개수

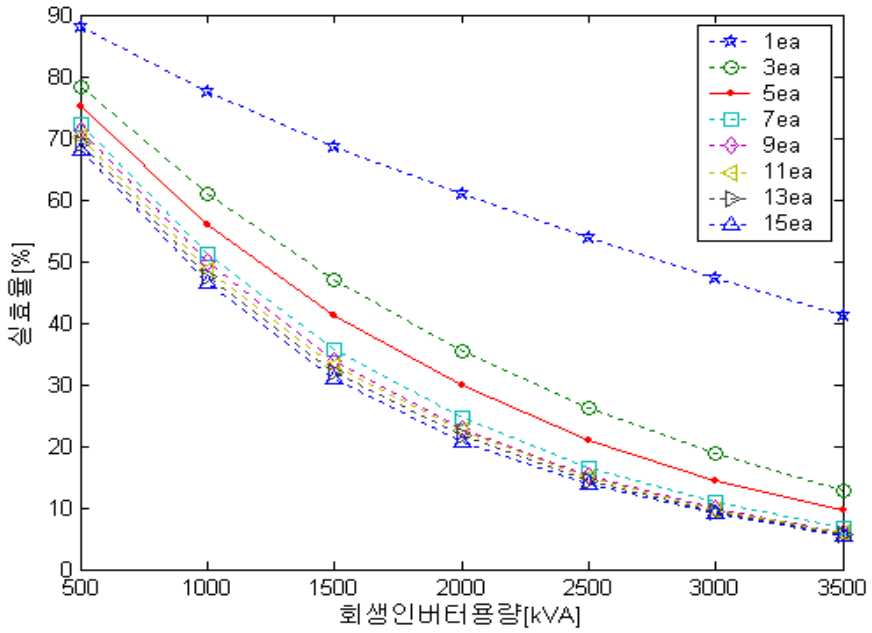


그림 3.32 회생실효율

(다) 회생인버터 용량산정

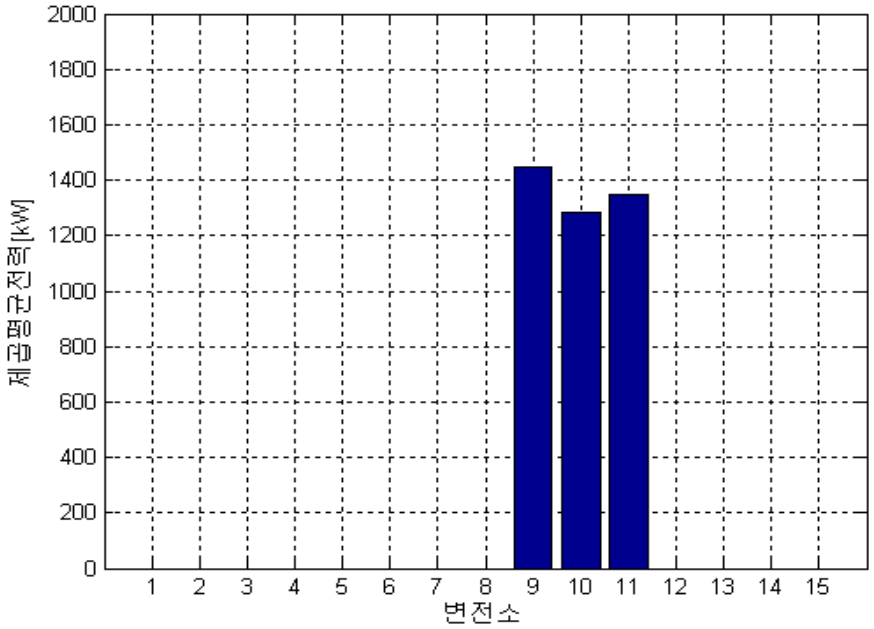


그림 3.33 회생전력의 제곱평균값

(라) 변전소의 가선전압 및 전력

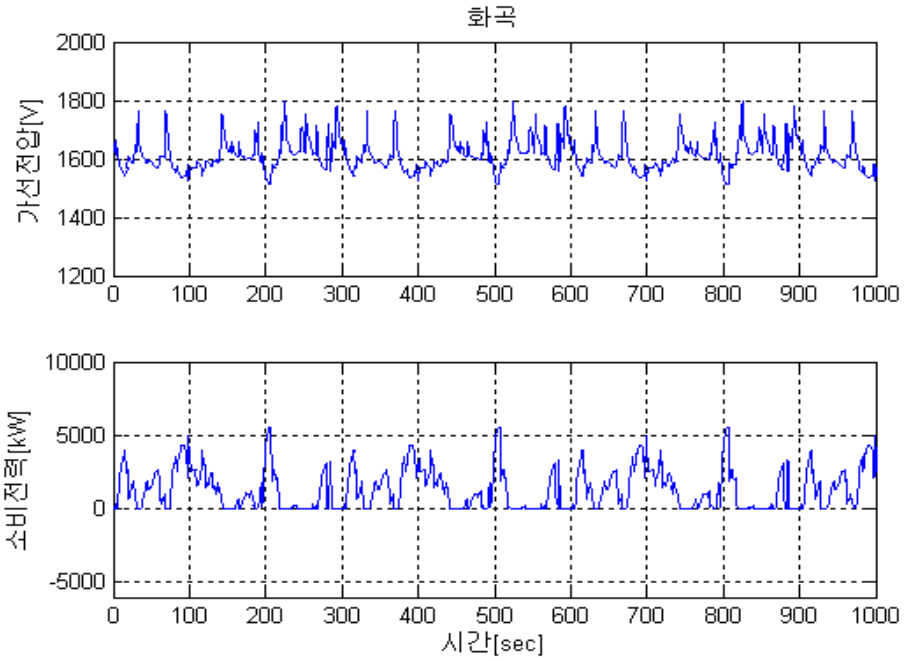


그림 3.34 변전소의 가선전압 및 소비전력

(회생인버터 미설치)

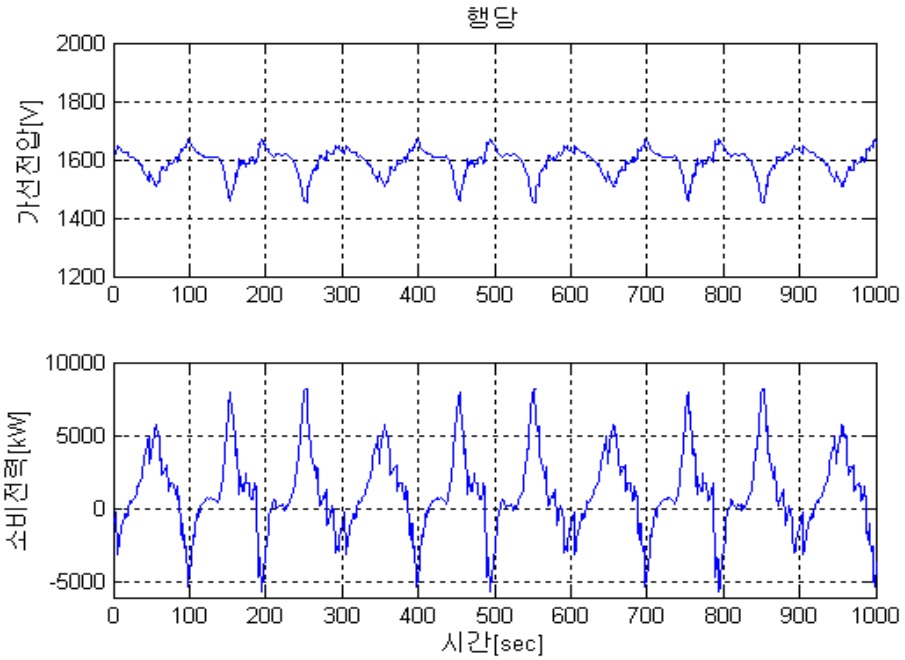


그림 3.35 변전소의 가선전압 및 소비전력

(회생인버터 설치)

(2) 6호선 전력시뮬레이션

서울 지하철 6호선의 VVVF 인버터 차량 및 노선데이터를 사용하여 전력시뮬레이션을 수행하였으며 서울 6호선에 대한 시뮬레이션 조건을 표 3.19에 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이, 각각의 변전소마다 담당구간의 구배, 역간거리, 역의 개수, 차량의 운행조건이 상이하기 때문에 회생전력 발생량이 다른 게 나타난다. 따라서, 회생전력 발생량이 가장 적은 순으로 회생인버터를 제거하며 변전소별 회생전력 발생량을 사용하여 회생실효율을 계산하면 그림 3.37과 같다. 그림에서 보듯이 4개의 변전소에 회생인버터를 설치할 경우 가장 큰 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타난다. 그림 3.38은 전체 노선의 회생실효율 감소폭이 가장 클 때, 선택된 4개의 변전소에 대한 회생전력 흡수량을 RMS 값으로 나타낸 것이다. 서울 6호선에서 회생인버터의 설치 유무에 따른 변전소의 가선전압과 소비전력파형은 그림 3.39와 3.40와 같다. 그림 3.39는 회생인버터가 미설치된 변전소의 가선전압 및 소비전력파형이며, 전동차의 전기제동으로 인해 발생된 회생전력이 순간적으로 가선전압을 상승시키고 있다. 그림 3.40은 회생인버터가 설치된 변전소의 경우이며, 회생전력을 변전소에서 흡수함으로서 가선전압의 상승폭은 감소하였다.

(가) 시뮬레이션 조건

표 3.19 시뮬레이션 조건(6호선)

차량	차량/편성	8(4M4T)
	무게	270.6[ton]
	가속도	3.0[km/h/s]
	감속도	-3.5[km/h/s]
	최고속도	100.0[km/h]
운전데이터	TPS 운전모드	표정속도
	시격	240[sec]
	역정차시간	30[sec]
	교행시차	30[sec]
	보조동력	168.0[kW]
	전차선저항	0.03030[Ω/km]
	무부하전압	1620[V]
시뮬레이션 데이터	시뮬레이션시간	5000 ~ 8600[sec]
	샘플링시간	1.0[sec]
	허용오차	0.0005[p.u.]

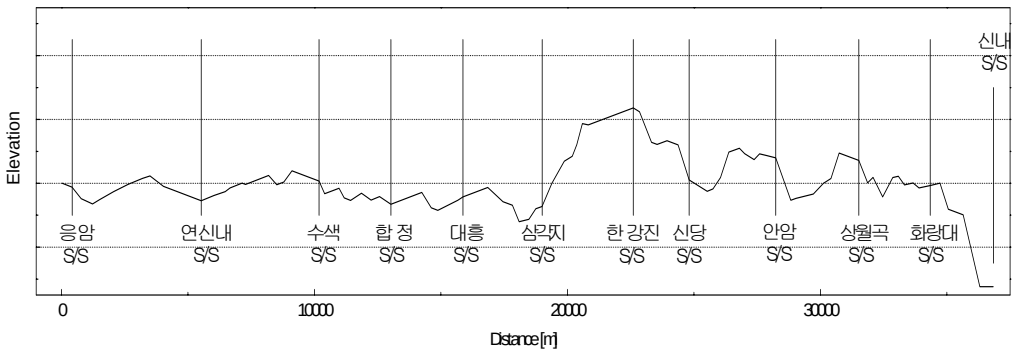


그림 3.36 6호선 구배도

(나) 회생인버터의 설치변전소 개수 변화

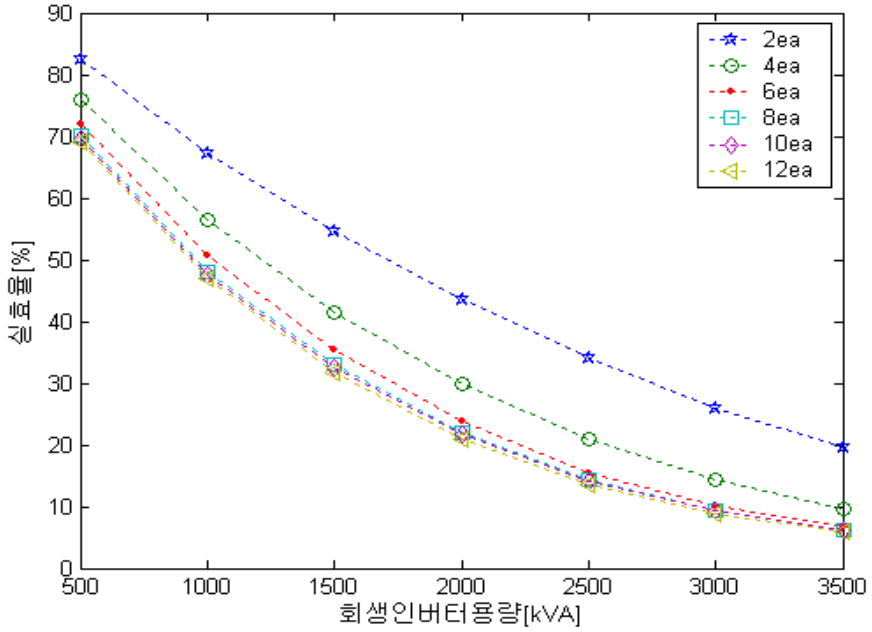


그림 3.37 회생실효율

(다) 회생인버터 용량산정

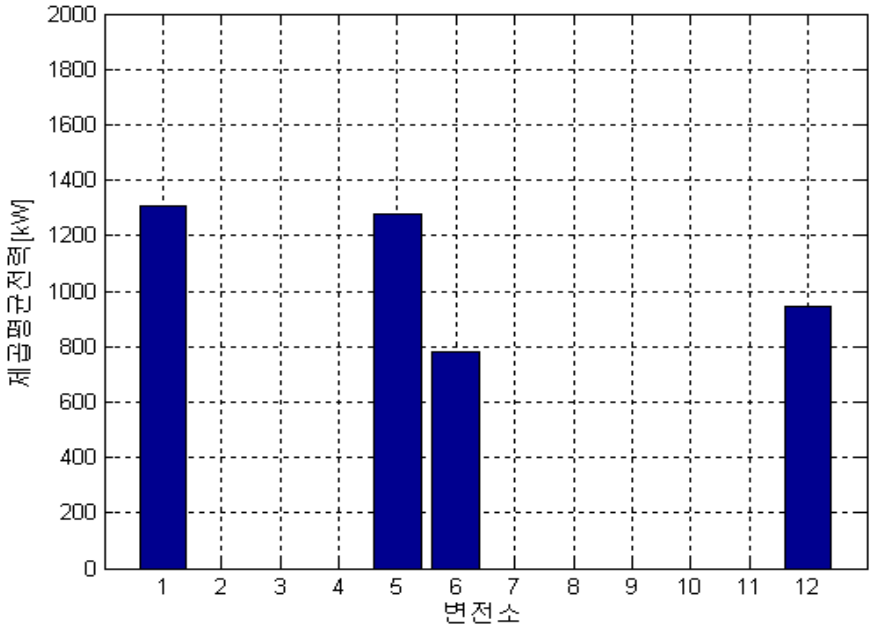


그림 3.38 변전소 평균전력

(라) 변전소의 가선전압 및 전력

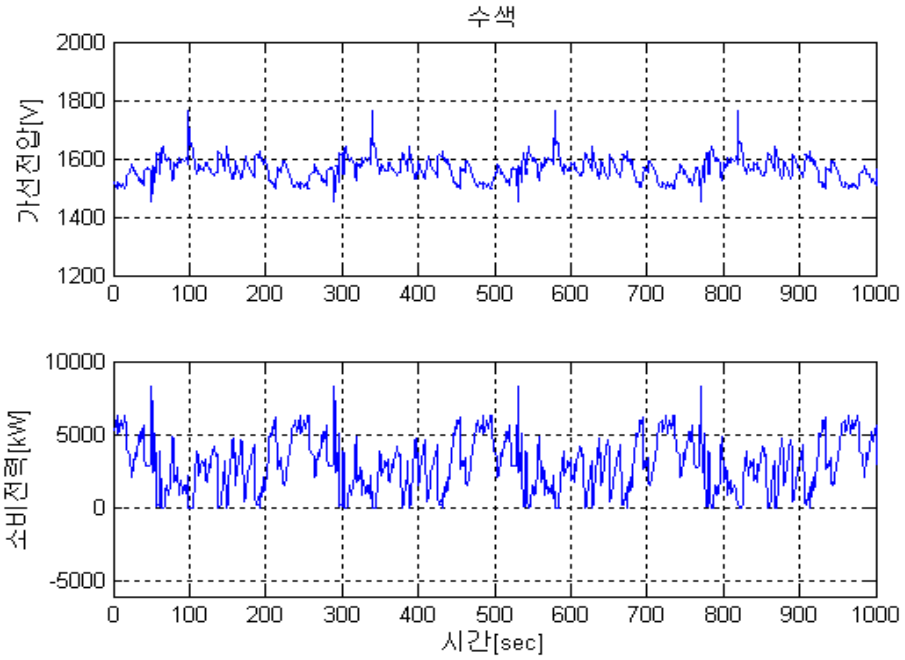


그림 3.39 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 미설치)

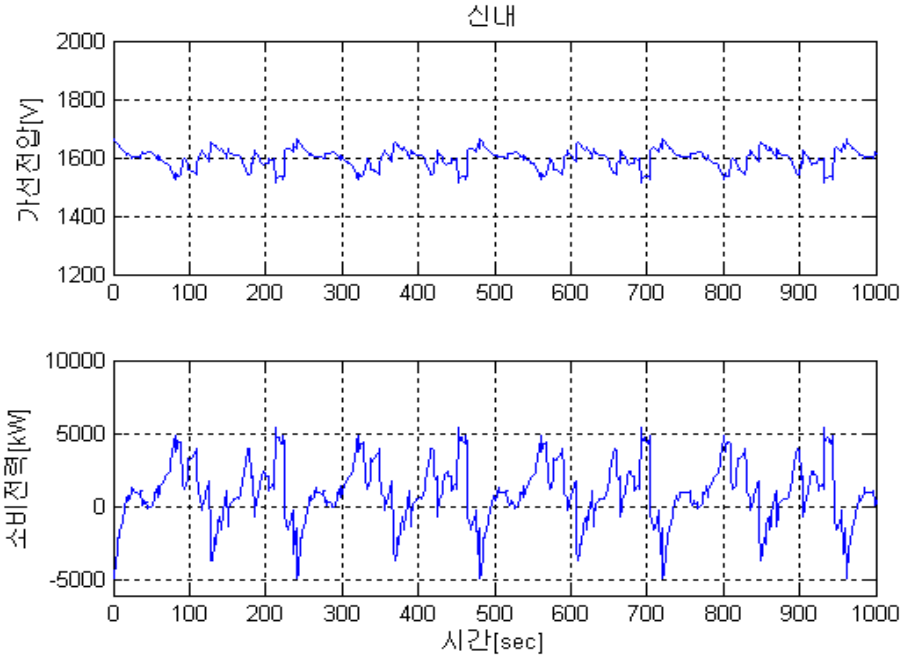


그림 3.40 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 설치)

(3) 7호선 전력시뮬레이션

서울 지하철 7호선의 VVVF 인버터 차량 및 노선데이터를 사용하여 전력시뮬레이션을 수행하였으며 서울 7호선에 대한 시뮬레이션 조건을 표 3.20에 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이, 각각의 변전소마다 담당구간의 구배, 역간거리, 역의 개수, 차량의 운행조건이 상이하기 때문에 회생전력 발생량이 다른 게 나타난다. 따라서, 회생전력 발생량이 가장 적은 순으로 회생인버터를 제거하며 변전소별 회생전력 발생량을 사용하여 회생실효율을 계산하면 그림 3.42와 같다. 그림에서 보듯이 4개의 변전소에 회생인버터를 설치할 경우 가장 큰 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타난다. 그림 3.43은 전체 노선의 회생실효율 감소폭이 가장 클 때, 선택된 4개의 변전소에 대한 회생전력 흡수량을 RMS 값으로 나타낸 것이다. 서울 7호선에서 회생인버터의 설치 유무에 따른 변전소의 가선전압과 소비전력파형은 그림 3.44와 3.45와 같다. 그림 3.44는 회생인버터가 미설치된 변전소의 가선전압 및 소비전력파형이며, 전동차의 전기제동으로 인해 발생된 회생전력이 순간적으로 가선전압을 상승시키고 있다. 그림 3.45는 회생인버터가 설치된 변전소의 경우이며, 회생전력을 변전소에서 흡수함으로서 가선전압의 상승폭은 감소하였다.

(가) 시뮬레이션 조건

표 3.20 시뮬레이션 조건(7호선)

차량	차량/편성	8(4M4T)
	무게	270.6[ton]
	가속도	3.0[km/h/s]
	감속도	-3.5[km/h/s]
	최고속도	100.0[km/h]
운전데이터	TPS 운전모드	표정속도
	시격	150[sec]
	역정차시간	30[sec]
	교행시차	30[sec]
	보조동력	168.0[kW]
	전차선저항	0.03030[Ω/km]
	무부하전압	1620[V]
시뮬레이션 데이터	시뮬레이션시간	5000 ~ 8600[sec]
	샘플링시간	1.0[sec]
	허용오차	0.0005[p.u.]

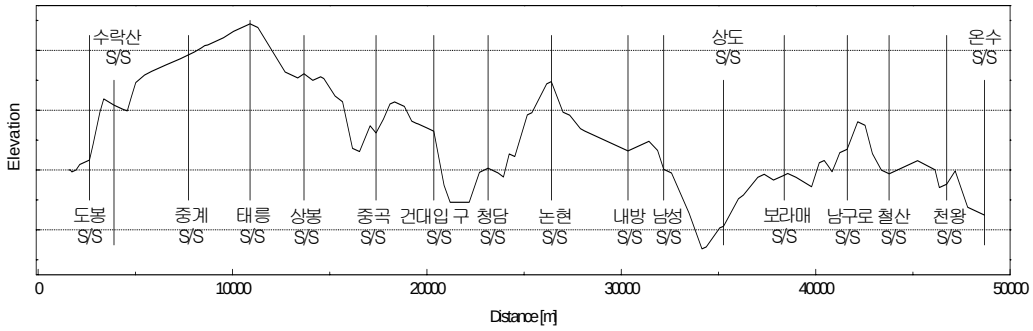


그림 3.41 7호선 구배도

(나) 회생인버터의 설치변전소 개수 산정

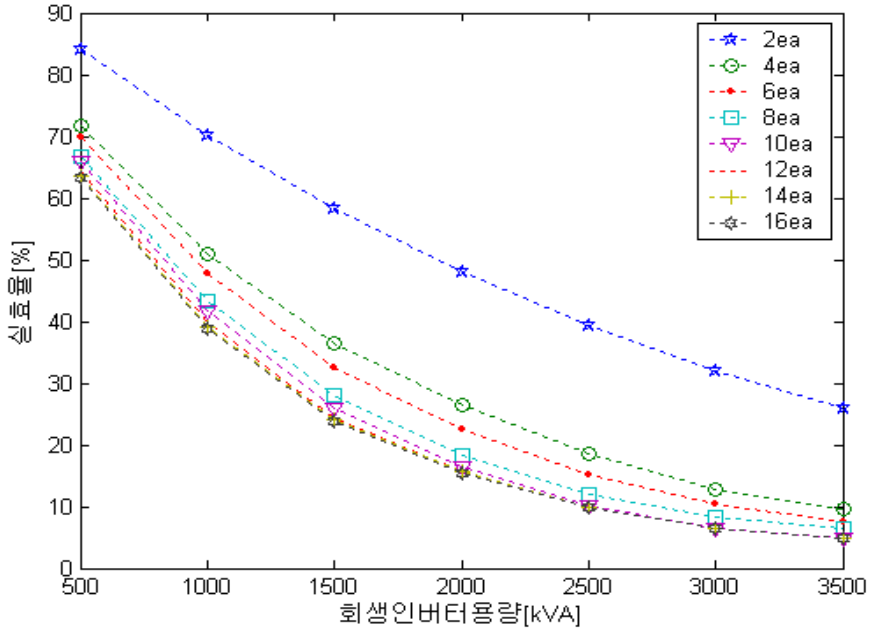


그림 3.42 회생실효율

(다) 회생인버터 용량산정

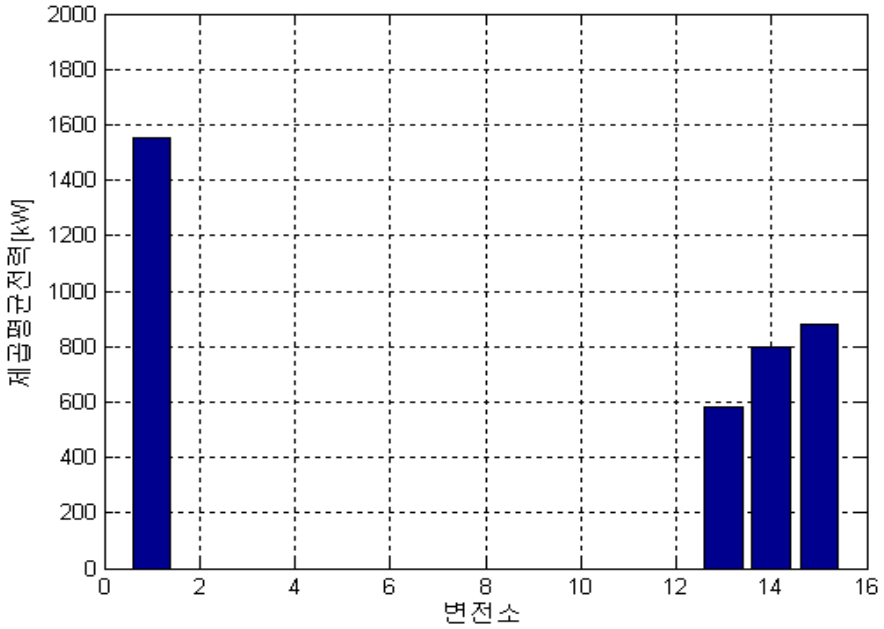


그림 3.43 변전소별 제곱평균전력

(라) 변전소의 가선전압 및 전력

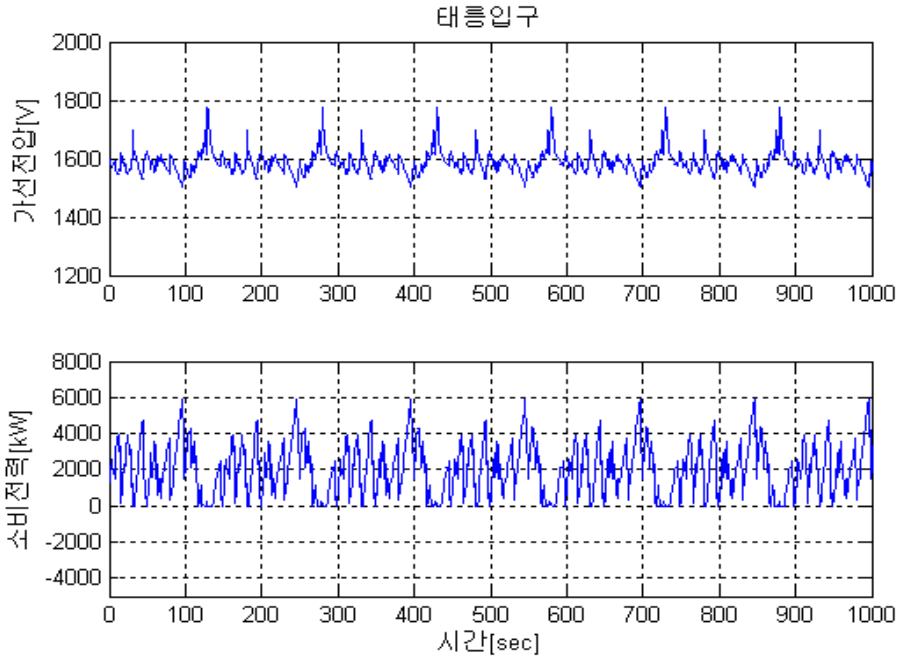


그림 3.44 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 미설치)

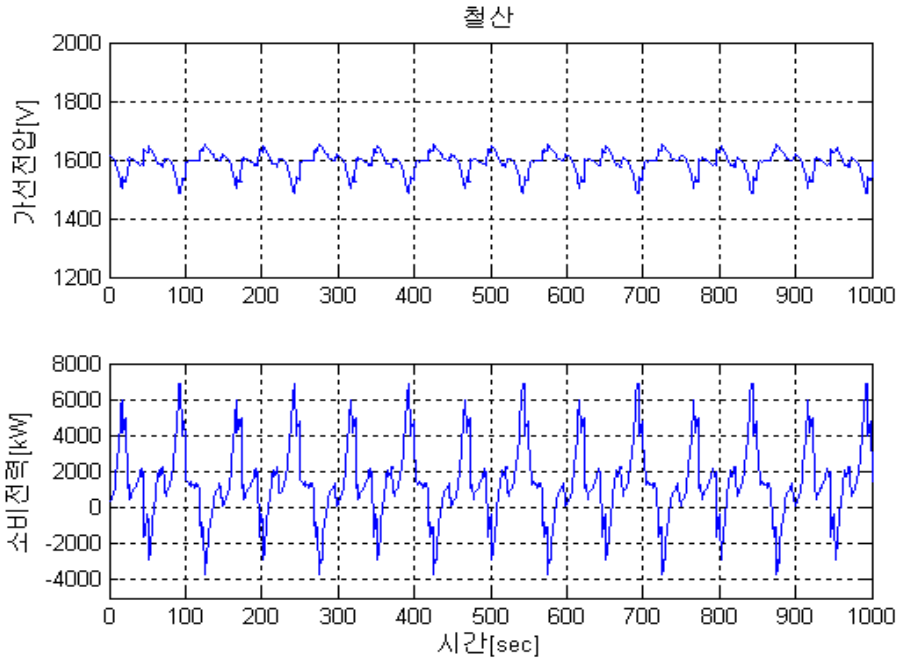


그림 3.45 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 설치)

(4) 8호선 전력시뮬레이션

서울 지하철 8호선의 VVVF 인버터 차량 및 노선데이터를 사용하여 전력시뮬레이션을 수행하였으며 서울 8호선에 대한 시뮬레이션 조건을 표 3.21에 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이, 각각의 변전소마다 담당구간의 구배, 역간거리, 역의 개수, 차량의 운행조건이 상이하기 때문에 회생전력 발생량이 다른 게 나타난다. 따라서, 회생전력 발생량이 가장 적은 순으로 회생인버터를 제거하며 변전소별 회생전력 발생량을 사용하여 회생실효율을 계산하면 그림 3.47과 같다. 그림에서 보듯이 1개의 변전소에 회생인버터를 설치할 경우 가장 큰 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타난다. 그림 3.48은 전체 노선의 회생실효율 감소폭이 가장 클 때, 선택된 1개의 변전소에 대한 회생전력 흡수량을 RMS 값으로 나타낸 것이다. 서울 8호선에서 회생인버터의 설치 유무에 따른 변전소의 가선전압과 소비전력파형은 그림 3.49와 3.50과 같다. 그림 3.49는 회생인버터가 미설치된 변전소의 가선전압 및 소비전력파형이며, 전동차의 전기제동으로 인해 발생된 회생전력이 순간적으로 가선전압을 상승시키고 있다. 그림 3.50은 회생인버터가 설치된 변전소의 경우이며, 회생전력을 변전소에서 흡수함으로서 가선전압의 상승폭은 감소하였다.

(가) 시뮬레이션 조건

표 3.21 시뮬레이션 조건(8호선)

차량	차량/편성	6
	무게	169.2[ton]
	가속도	3.0[km/h/s]
	감속도	-3.5[km/h/s]
	최고속도	100.0[km/h]
운전데이터	TPS 운전모드	표정속도
	시격	150[sec]
	역정차시간	30[sec]
	교행시차	30[sec]
	보조동력	168.0[kW]
	전차선저항	0.03030[Ω/km]
	무부하전압	1620[V]
시뮬레이션 데이터	시뮬레이션시간	5000 ~ 8600[sec]
	샘플링시간	1.0[sec]
	허용오차	0.0005[p.u.]

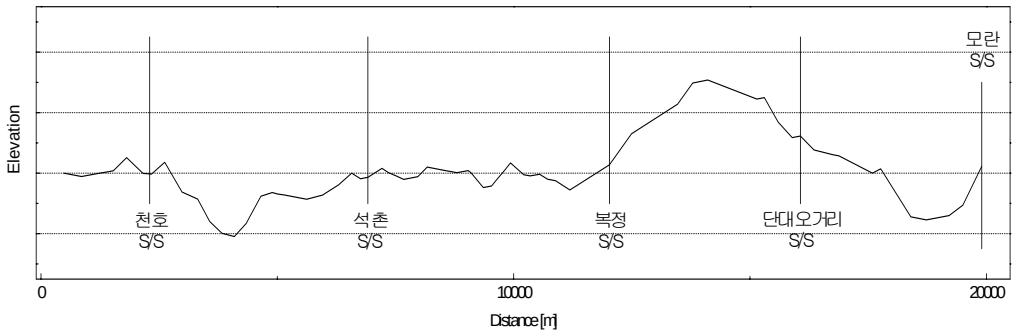


그림 3.46 8호선 구배도

(나) 회생인버터 설치변전소의 개수

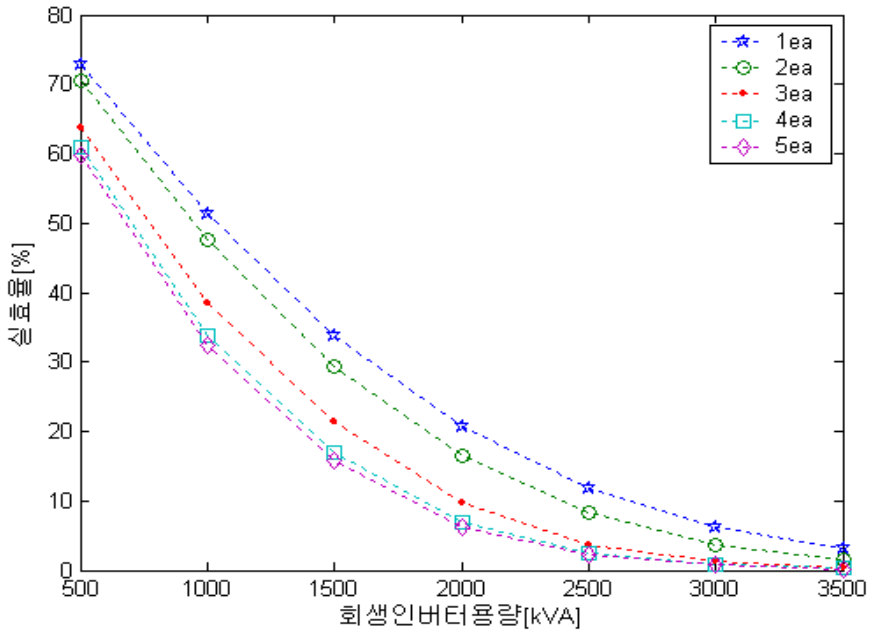


그림 3.47 회생실효율

(다) 회생인버터 용량산정

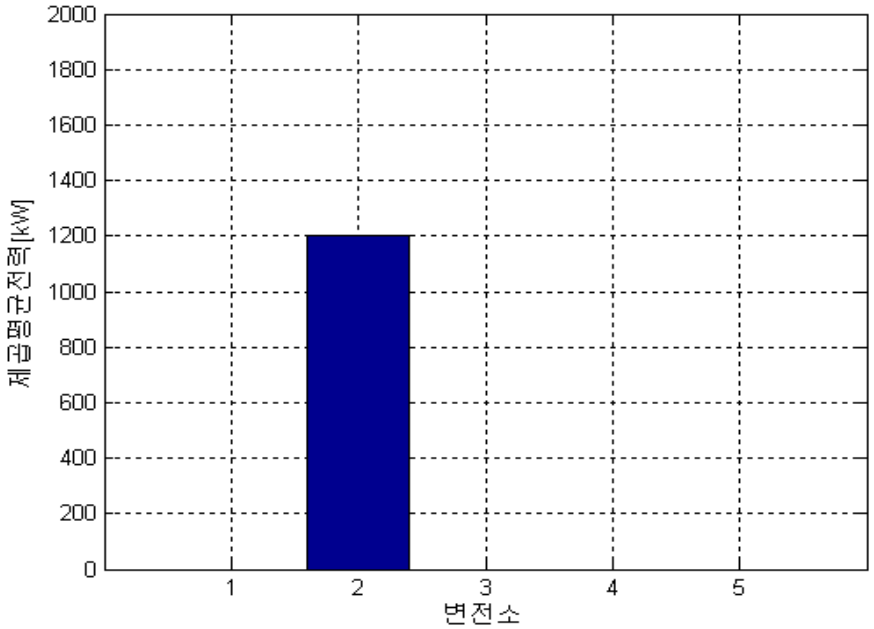


그림 3.48 변전소 평균전력

(라) 변전소의 가선전압 및 전력

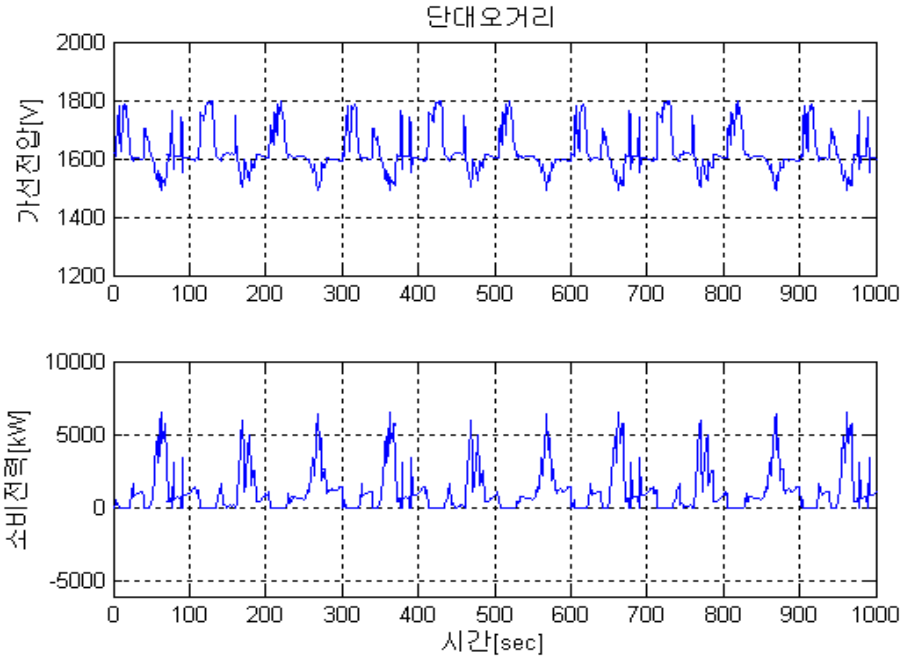


그림 3.49 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 미설치)

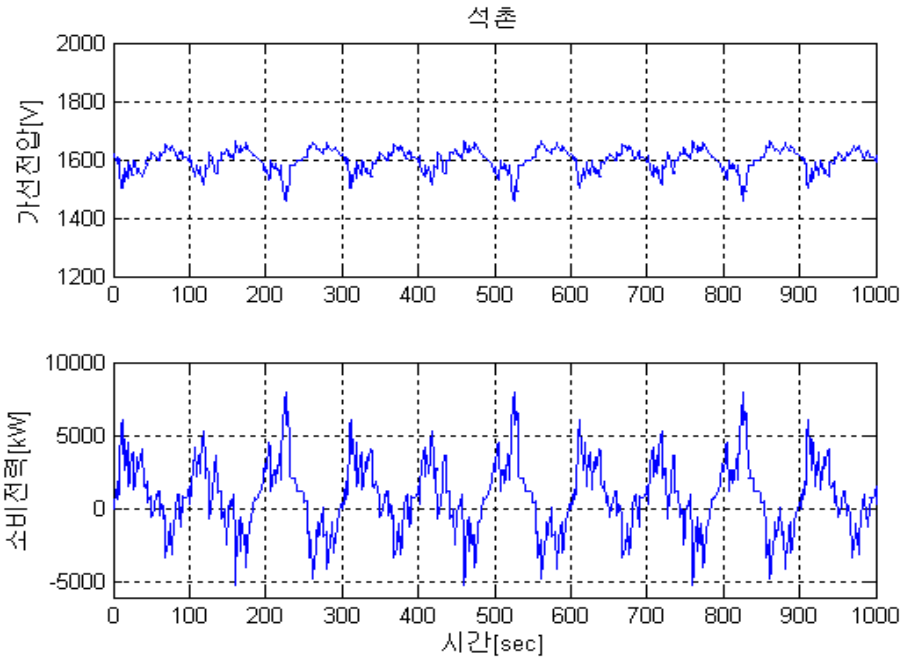


그림 3.50 변전소의 가선전압 및 소비전력 (회생인버터 설치)

나. 전철시스템의 측정자료

(1) 고압배전단 소비전력량

서울지하철 2호선과 부산지하철 1,2호선의 직류급전변전소들의 고배단 소비전력량을 조사하였으며 아래 그림과 같이 나타났다. 그림 3.52는 1년간의 2호선의 고배단 총 소비전력량을 보여주는데, 여름철인 8,9월에는 에어콘부하로 인하여 소비전력량이 증가하였음을 보여주며 그 외 기간에서는 비슷한 전력소비특성을 보여준다. 각각 1월과 8월의 최대소비전력을 조사한 결과는 그림 3.53과 3.54와 같이 나타나는데, 회생인버터로부터 1.5MVA정도의 회생전력을 고배단으로 전송할 경우가 가장 적합한 것으로 사료된다.

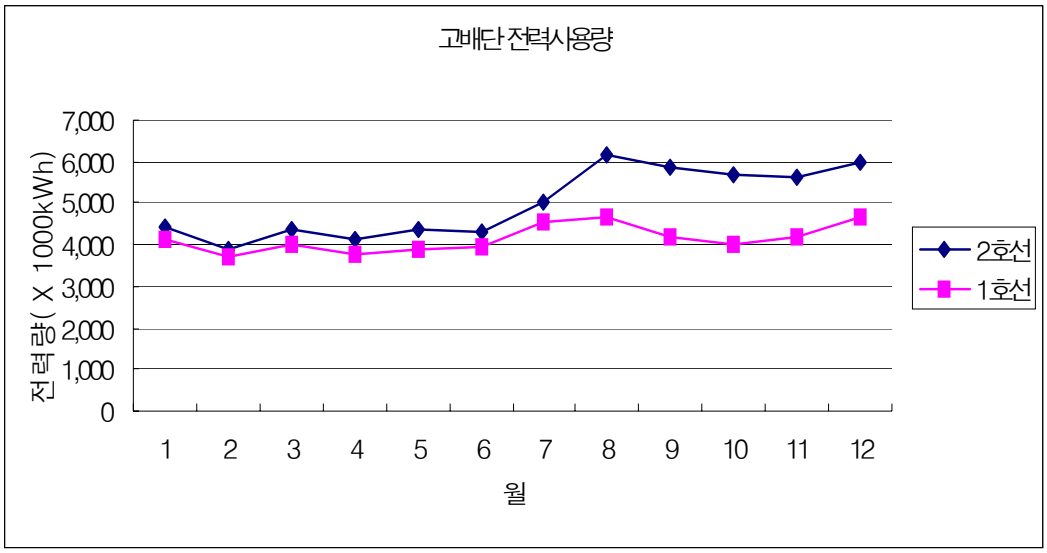


그림 3.51 부산지하철 고배단 소비전력량(2002년)

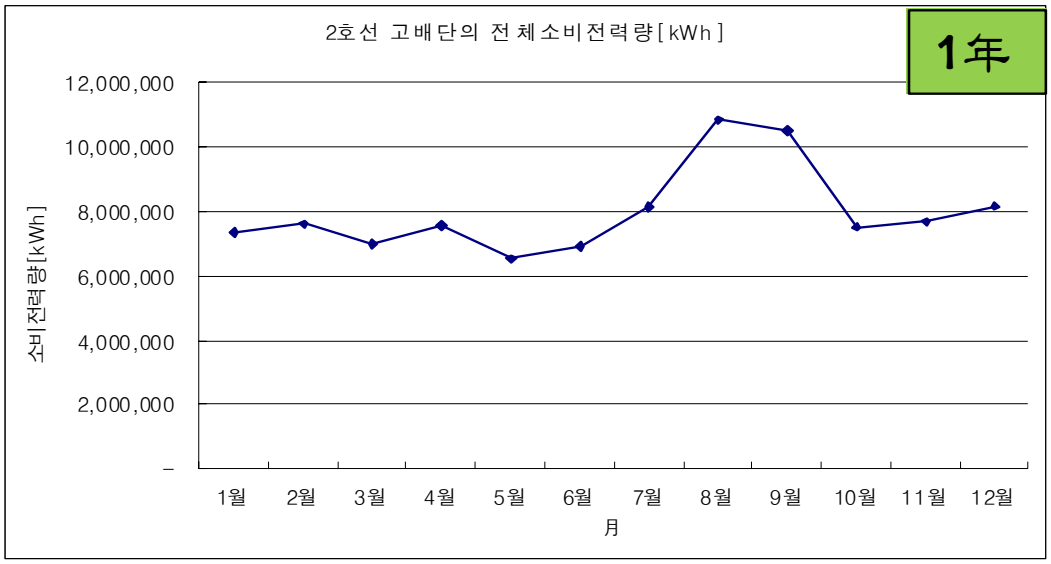


그림 3.52 서울 2호선 고배단 소비전력량(2003년)

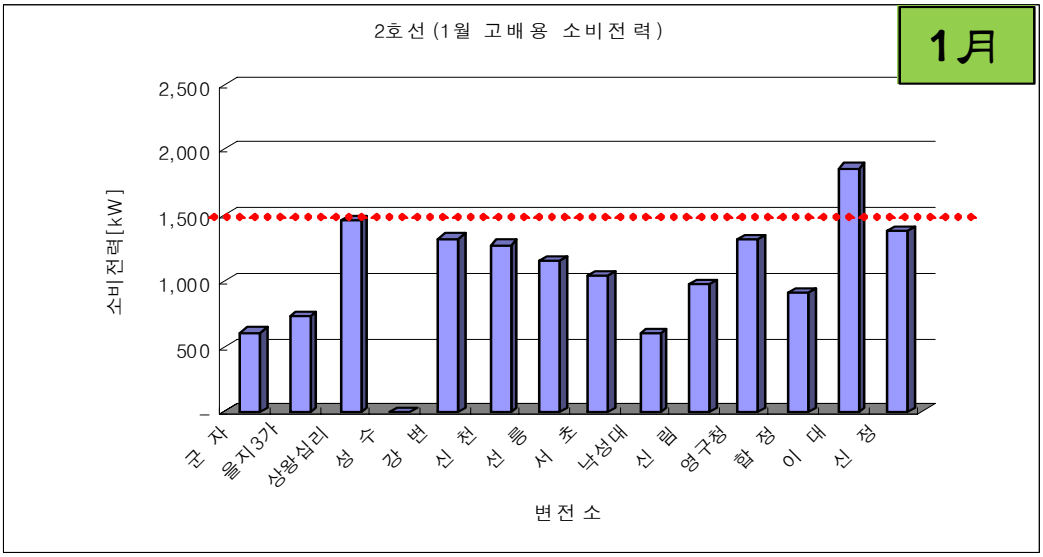


그림 3.53 서울 2호선 1월 최대소비전력(2003년)

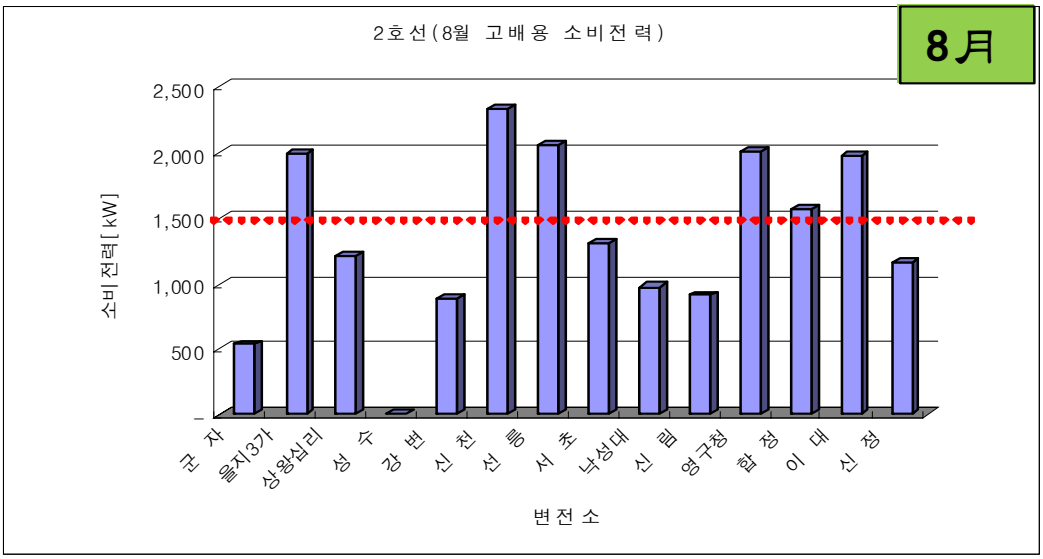


그림 3.54 서울 2호선 8월 최대소비전력(2003년)

(2) 부산지하철의 회생률

회생용 흡수장치를 설치한 변전소에서 측정된 소비 및 회생전력량을 사용하여 다음과 같은 다양한 지수들을 산정하고 있다.

o 회생률 = 회생전력량/역행전력량

o 회생가능전력량 = 회생전력량 + 회생실효전력량

o 회생유효율 = 회생전력량/회생가능전력량

o 회생실효율 = 회생실효 전력량/회생가능전력량

o 회생실효전력량 : 발생된 회생전력 중에서 모선으로 회생되지 못하고 근방의 열차에서 소비되지도 않은 전력량

부산지하철 1,2호선의 경우, 사이리스터 더블 컨버터를 사용하여 회생전력을 계통으로 반환시키고 있어 실제 노선에서의 회생전력량을 측정할 수 있다. 부산지하철의 변전소에서 측정된 회생전력 및 소비전력으로 회생률을 계산한 결과 아래 그림에서와 같은 회생률을 얻고 있다.

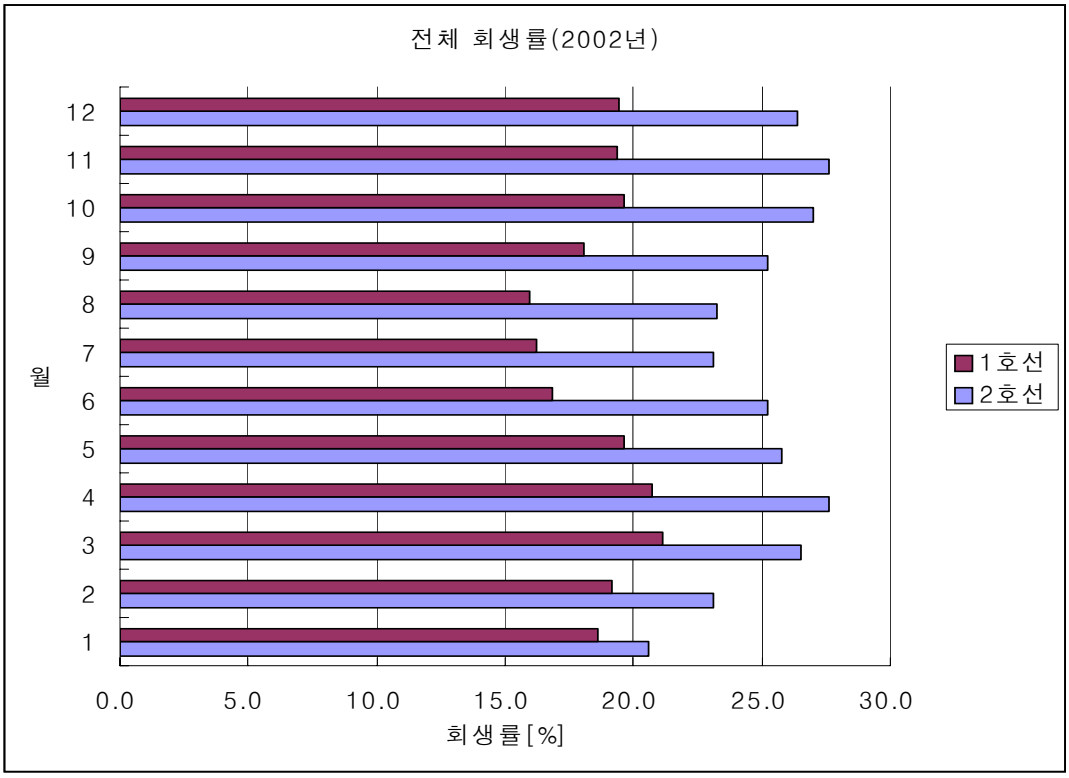


그림 3.55 부산지하철 1,2호선의 회생률

다. 용량 결정

서울 2기 지하철 노선들에 대한 전력시뮬레이션을 수행하고 회생전력을 계산하였다. 회생인버터 설치 변전소의 개수를 변화시키면서 전체 노선의 회생실효율을 계산한 결과, 5~7호선의 경우에 최고의 회생전력이 발생되는 1개의 변전소에 회생인버터를 설치한 경우보다 2~3개의 회생인버터를 추가로 설치하면 회생실효가 큰 폭으로 감소함을 확인하였다. 따라서 최고의 회생전력이 발생되는 2~3의 변전소에 회생인버터를 설치하는 것이 효과적이다. 이렇게 결정된 회생인버터 설치 변전소들에 대한 제곱평균회생전력과 최고회생전력을 계산하였으며 표 3.22와 같다. 제곱평균전력 값으로부터 연속정격용량을 산정하였으며, 제곱평균전력과 최고회생전력과의 비율을 고려하여 500% 1분간의 과부하정격을 산정하였다. 본 연구과제에서는 회생인버터의 개발용량을 최대회생전력이 발생되는 곳을 근거로 하여 개발할 필요가 있다. 또한 잉여회생전력이 소비되는 고압배전단의 최대소비전력이 1.5~2MW

부근이므로 1.5~2MVA의 연속정격과 500% 1분간의 정격을 갖는 회생인버터 개발이 필요하다.

표 3.22 전력시뮬레이션 결과

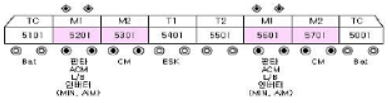
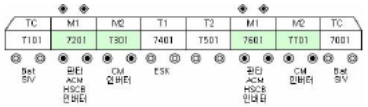
노선	변전소	제곱평균전력[kW]	최고회생전력[kW]	비율[%]
5호선	을지로4가	1449	7102	490
	행당	1284	5664	441
	마장	1350	6554	485
6호선	응암	1305	6780	520
	대흥	1279	6481	507
	삼각지	780	3827	491
	신내	941	4833	514
7호선	수락산	1549	9347	603
	남구로	581	3038	523
	철산	796	3724	468
	천왕	877	4621	527
8호선	석촌	1202	5140	428

3. 회생용 인버터 설치효과 분석

본 절에서는 5호선 및 7호선을 대상으로 하여 전력시뮬레이션을 좀 더 상세히 실시하여, 소비되는 회생 에너지량을 예측하고, 회생인버터의 설치에 적합한 변전소 위치를 결정하기 위해서 직류급전시뮬레이터를 이용하였다. 도시철도공사 5호선 및 7호선의 선로데이터, 차량데이터, 변전소 데이터 및 선로데이터를 적용하여 TPS 및 전력시뮬레이션을 실시하고, 회생전력 발생량을 계산하여 회생용 인버터의 설치 변전소와 회생량을 예측하였다.

TPS를 실시하기 위한 차량 주요 제원은 표 3.23과 같고, 5호선 및 7호선 구간의 곡선반경, 구배, 역위치가 TPS의 입력데이터로 사용된다. TPS의 결과로 차량 1편성이 구간을 왕복한 결과에 대한 차량운행곡선(차량에서 소비하는 전력, 전압, 전류)을 얻을 수 있고, 그림 3.56과 3.57은 TPS로부터 얻어진 결과이다.

표 3.23 차량 주요 제원

항 목	5호선	7호선
차량편성 총질량 (8량, 만차기준)	425.6[ton] Tc: 30.9, M1: 38.5, M2: 34.6, T: 28.8, 승객: 20 ton/량	430[ton] Tc: 32.5, M1: 36.7, M2: 36.8, T: 29, 승객: 20 ton/량
차량 편성		
가속도	3[km/h/s]	
감속도	-3.5[km/h/s]	
보조동력	168[kW] x 2	
최고속도	100[km/h]	

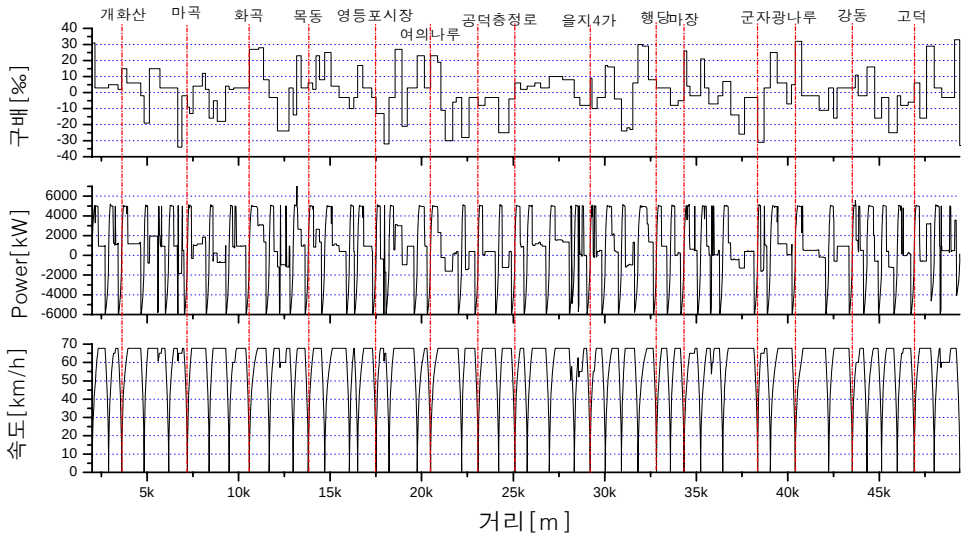


그림 3.56 5호선 TPS결과

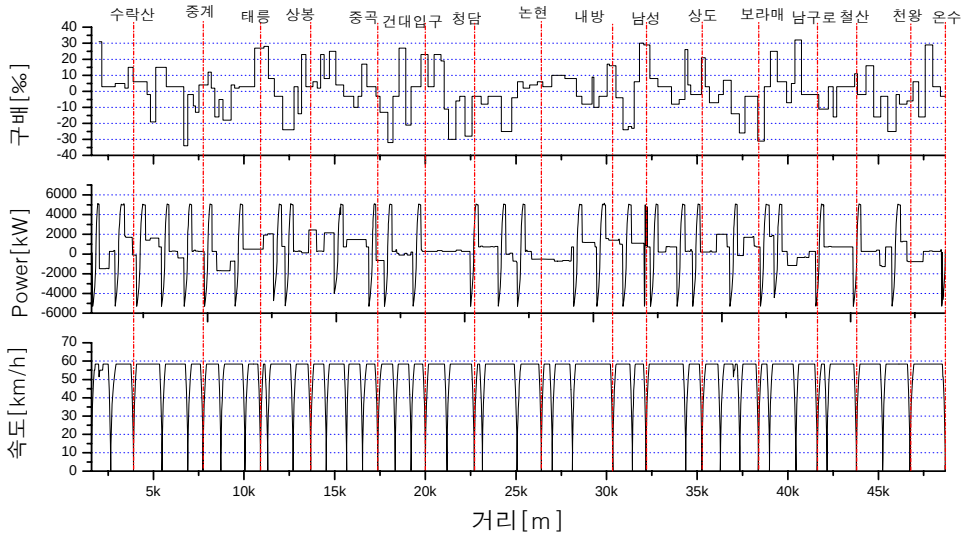


그림 3.57 7호선 TPS결과

표 3.24는 TPS결과를 정리한 것으로 각 호선에 대한 총 주행거리, 주행시간, 표정속도, 역행 에너지, 회생에너지 량을 나타내고 있다.

표 3.24 5호선 및 7호선 TPS결과

항목 \ 노 선	5호선	7호선
총 주행거리[m]	94,776	94,190
총 주행시간[s]	9708.75	9730.69
표정속도[km/h]	35.14	34.85
역행 에너지[kwh]	3168.3	2331.2
총 회생에너지[kwh]	1773.0	1229.8
총 보조에너지[kwh]	911.8	913.8

TPS결과, 변전소 파라미터, 선로데이터, 열차 운행조건을 가지고 전력시뮬레이션을 실시하였다. 차량이 운행되는 동안에 발생하는 회생에너지를 계산하기 위해서, 운행시격 및 정차시간과 같은 차량운행조건을 반영하여 전력시뮬레이션을 실시하였다. 표 3.25는 전력시뮬레이션에 사용된 변전소, 차량운행조건을 나타내고 있다. 차량운행조건에서 운행시격을 3 종류로 나누어 실시하여 실제로 차량이 운행하는 패턴을 유사하게 모의 하였다.

표 3.25 전력시뮬레이션 입력조건

차량운행조건	운행시격	180[s], 300[s], 360[s]
	역정차시간	30[s]
	교행시차	30[s]
변전소 조건	전철변전소 내부저항	0.02949[Ω]
	변전소에서 전차선까지 저항	0.0007[Ω]
	최대허용 전압	1,800[V]
	공칭전압	1,500[V]
	무부하전압	1,620[V]

시뮬레이션 조건	시뮬레이션시간	3,600[s]
	샘플링시간	1[s]
	허용오차	0.0005[p.u.]

전력시뮬레이션의 열차운행시격은 열차운행 계획표를 참고하여 실시하였으며, 각 변전소별 회수전력량 검토, 회생용 인버터 1.5[MVA]의 용량을 설치했을 경우에 따른 회수전력량 검토하였다.

회생용 인버터를 설치하였을 경우 가장 많은 에너지를 회수할 수 있는 변전소를 선택하기 위해서 모든 변전소에 회생용 인버터가 설치하여 시뮬레이션을 실시하였다. 운전시격과 1일 동안 전동차 운행시간을 고려하였으며, 그 결과는 그림 3.58에 운행 시간을 고려하여 변전소로 회수되는 회생전력량은 계산한 결과이다. 그림으로부터 5호선의 경우는 개화산변전소, 고덕변전소, 영등포시장변전소, 화곡변전소 순으로 회생전력량이 많이 나온 것으로 계산되었다. 그림 3.59는 7호선에 대한 1일 회수전력량 결과이며, 수락산, 남구로, 중계, 철산 순으로 회생전력량이 많이 나온 것으로 계산되었다.

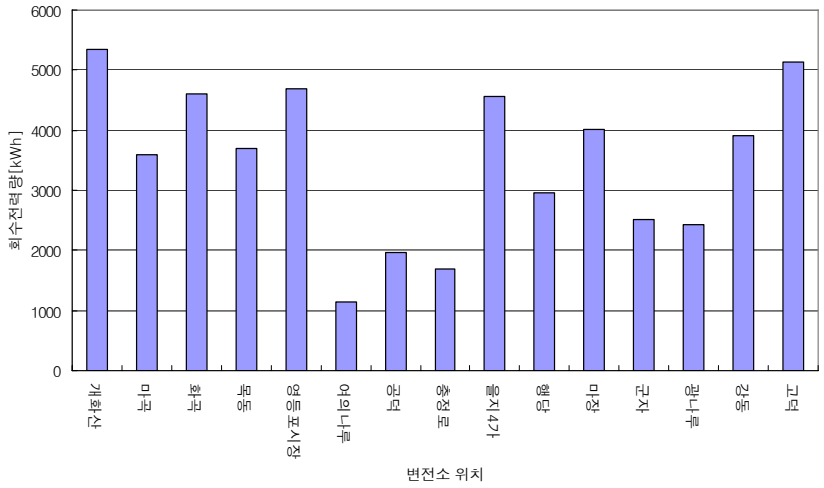


그림 3.58 5호선 1일 회수전력량(모든 변전소에 회생용 인버터 설치시)

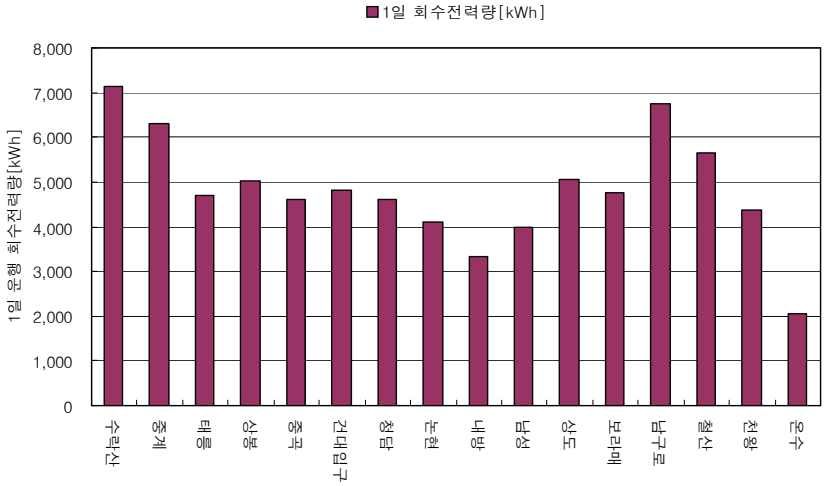


그림 3.59 7호선 1일 회수전력량(모든 변전소에 회생용 인버터 설치시)

회생용 인버터를 1개의 변전소에 설치했을 경우, 각 변전소 위치에 따른 회생량 시뮬레이션 결과를 그림 3.60 및 3.61에 각각 나타내었다. 그림 3.60 및 3.61은 차량 운전시격이 360[s]이며, 1시간 동안 차량이 운행된 경우를 시뮬레이션한 결과이다. 5호선의 경우 그림 3.60에서 볼 수 있듯이 화곡변전소에서 회수 전력량이 약 700[kWh]로 가장 크게 나왔으며, 실효율이 약 35 %로 나왔다. 그림 3.61은 7호선 변전소 위치에 따른 회수전력량을 나타내면 운전시격은 360[s], 시뮬레이션 시간은 1시간이다. 7호선의 경우는 수락산 변전소에서 회수 전력량이 약 550[kWh]이었으며, 실효율이 약 32 %로 가장 작은 것으로 계산되었다.

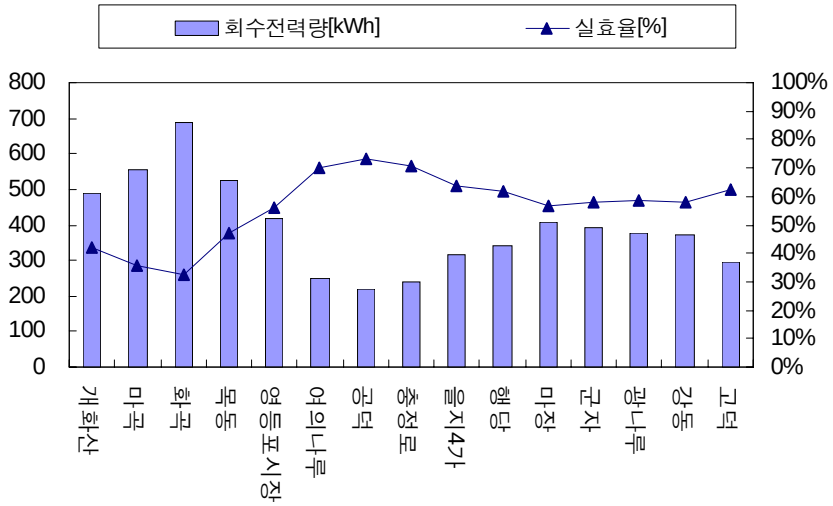


그림 3.60 5호선 변전소 위치에 따른 회수전력량(운전시격:360[s], 1시간)

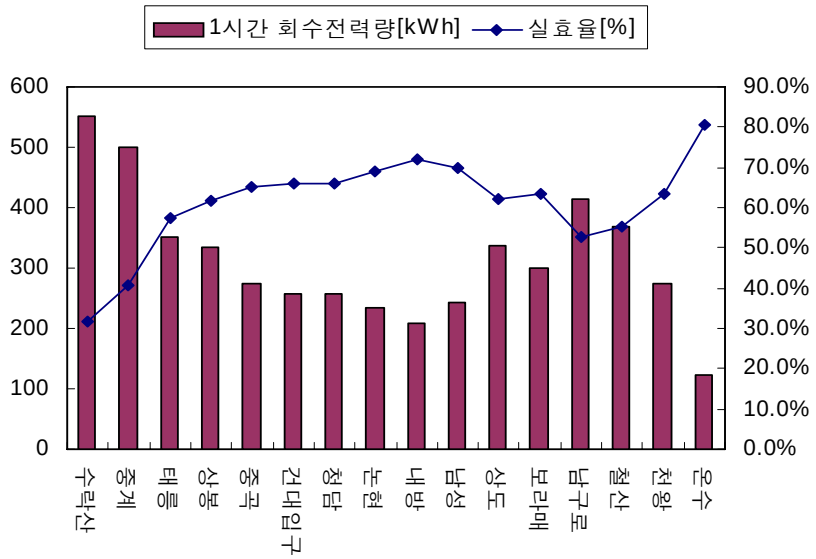


그림 3.61 7호선 변전소 위치에 따른 회수전력량(운전시격:360[s], 1시간)

위의 시뮬레이션 결과로부터 회생용 인버터 설치 위치를 회수 전력량이 크게 나온 변전소를 대상으로 하여 1일 동안 전동차가 운행할 경우 회수전력량을 각각 시뮬레이션 하였다. 그림 3.62는 5호선 전동차 운행시간을 고려한 1일 회수전력량 결과이며, 화곡변전소에서 약 9,000[kWh/일]로 계산되었다.

그림 3.63은 7호선의 변전소 위치에 따른 1일 회수전력량으로 수락산 변전소가 약 7,100[kWh/일]로 계산되었다.

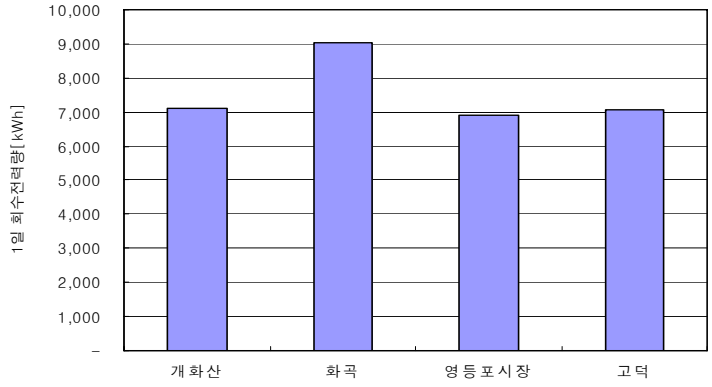


그림 3.62 변전소에 따른 1일 회수전력량(5호선)

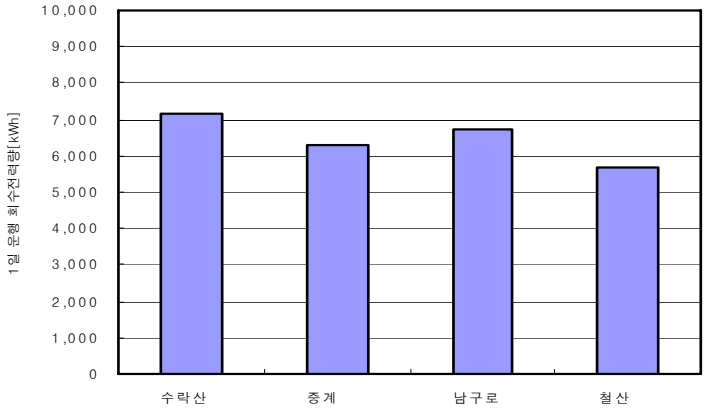


그림 3.63 변전소에 따른 1일 회수전력량(7호선)

회생인버터 용량에 따른 1일 회수전력량을 회생용 인버터 용량에 따라서 계산한 결과를 그림 3.64 및 3.65에 각각 나타내었다.

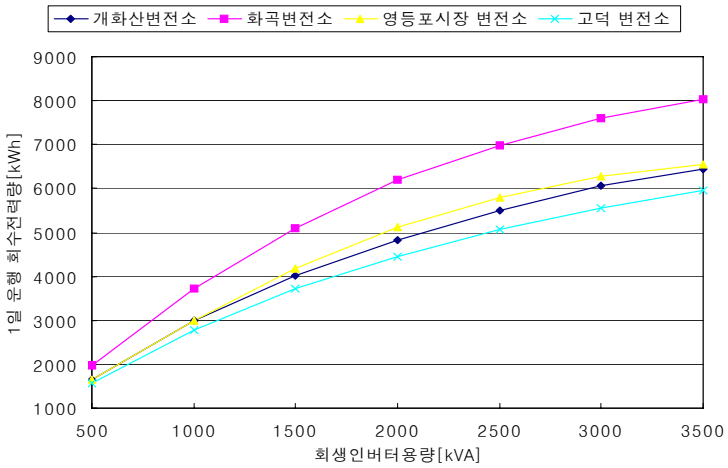


그림 3.64 회생용 인버터 용량에 따른 1일 회수전력량(5호선)

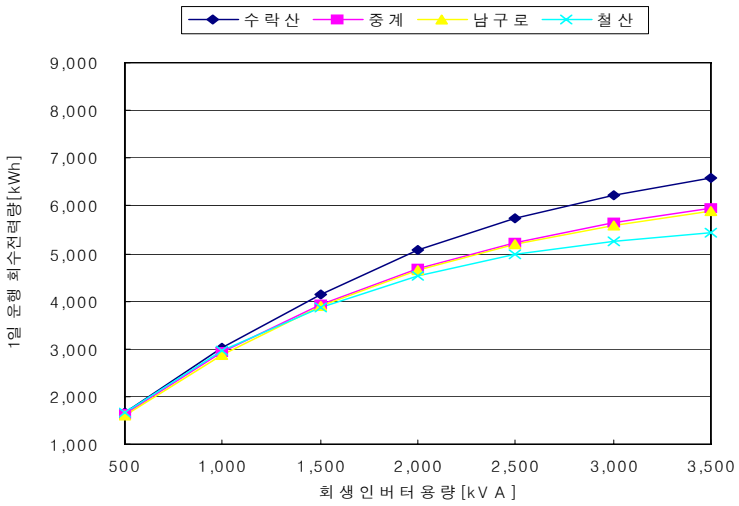
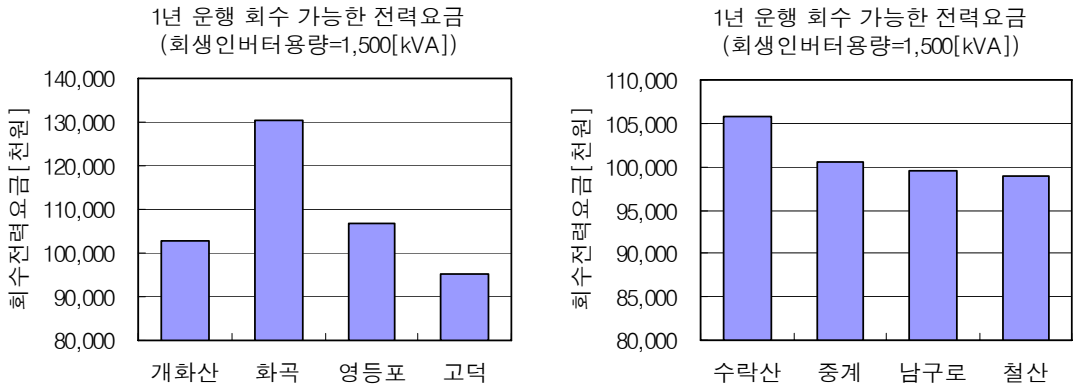


그림 3.65 회생용 인버터 용량에 따른 1일 회수전력량(7호선)

그림 3.64와 3.65의 결과로부터 1,500[kVA]회생인버터를 설치하였을 경우 1년간 운행시 회수 가능한 전력요금이 그림 3.66과 같이 계산되었다. 5호선의 경우 화곡변전소에 설치시 약 1억 3천만원/년의 전력요금이 예상되면, 7호선의 경우 수락산 변전소에 설치시 약 1억5백만원/년의 전력요금이 절약되는 것으로 예측되었다.



(a) 5호선 (b) 7호선

그림 3.66 1,500[kVA]회생용 인버터 설치시 회수 가능한 전력요금

시뮬레이션 결과 전력 회수량이 가장 큰 변전소는 수락산 변전소와 화곡 변전소로 선정 되었다. 이 변전소에 1,500[kVA] 회생용 인버터를 설치했을 경우, 5호선의 경우

화곡변전소에 설치시 약 1억 3천만원/년의 전력요금이 예상되면, 7호선의 경우 수락산 변전소에 설치시 약 1억5백만원/년의 전력요금이 절약되는 것으로 예측되었다.

제 3 절 에너지 회생시스템 엔지니어링

1. 회생전력량 측정 및 분석

서울지하철 2호선 선릉지하철 변전소와 광주도시철도 1호선 1단계 구간의 양동시장 지하철 변전소의 1일 동안의 가선전압과 피더별 전류량을 측정한 결과를 분석한다. 측정결과로부터 변전소들의 전압-전류 특성곡선을 얻어 병렬 운전되고 있는 다이오드 정류기의 동작특성을 확인하고, 피더별 소비 및 회생전력 평균값을 계산하고, 피더별로 발생된 회생전력이 타 피더로 전달되는 전력량을 계산하여 소비전력요금 감소량을 계산한다. 또한 변전소에서 회생전력이 교류될 수 있는 거리를 타 변전소와의 중간지점으로 가정하고, 전동차 1편성의 회생전력량을 기초로 변전소에서 발생되는 총 회생전력량을 근사식으로 계산한다. 이렇게 얻어진 값과 측정된 피더간 교류된 회생전력량을 사용하여 변전소의 회생전력 실효 전력량을 계산하고 회생인버터가 설치된 후 재활용할 수 있는 회생전력량을 근사적으로 계산한다.

가. 회생전력량

직류급전 전철시스템에서 전동차의 제동 시 운동에너지를 전기에너지로 변환하면서 회생전력이 발생된다. 회생전력은 집전장치의 전압을 상승시킴으로서 다른 역행 전동차와의 전압차에 따른 전력공급을 발생시킨다. 상하행선을 구분한 피더별로 제동 차량에서 발생된 회생전력을 피더간에 교류하여 소모시킬 수 있다. 따라서 급전용 변전소의 운전 전력을 절감하는 효과가 발생한다.

회생전력을 흡수할 수 있는 회생인버터가 설치된 변전소에서는 회생전력의 대부분을 타 전동차나 계통으로 전달함으로서 가선전압을 안정화시키고 에너지 절약을 도모한다. 반면 회생전력흡수가 불가한 변전소에서는 가선전압이 최대치까지 상승하고, 발생된 회생전력을 전동차에 장착된 제동저항기에서 열로 소모시킨다. 차상과 지상에서 잉여회생전력에 대한 대응방법은 표 3.26과 같다.

표 3.26 잉여회생전력 대응방법

차상	소모방식	발전 제동저항기
지상	소모방식	제동쵸퍼 및 저항기
	변환방식	회생인버터
	저장방식	배터리, 슈퍼캡, 플라이휠

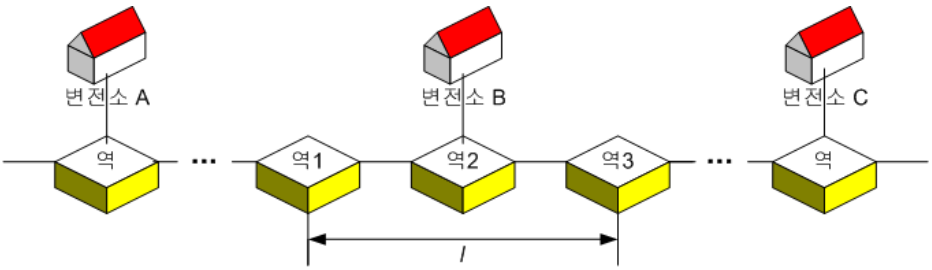


그림 3.67 직류전기철도의 역과 변전소

변전소 A와 B사이에서 전동차가 회생제동을 실시할 때 발생된 회생전력은 양쪽 변전소의 역행부하로 공급된다. 변전소 B를 대상으로 회생전력의 피더간 교류량을 측정한다고 가정하면, 구간 l에 h의 시격으로 v_s의 표정속도로 운행 중인 편성수(n)는 다음 식과 같다.

$$n = \lceil \frac{l}{v_s \times h} \rceil \tag{3.3}$$

여기서 $\lceil a \rceil$는 a보다 큰 정수를 의미하며, 거리 l의 단위는 m, 시격 h은 분, 표정속도 v_s는 km/h이다. l구간에서 1일 동안 발생되는 총 회생전력량은 다음 수식으로 근사할 수 있다.

$$E_g = 2 \times \frac{T_o}{h} \times n \times (k-1) \times E_1 \tag{3.4}$$

여기서 T_o는 1일 동안의 영업시간이며 단위는 분이다. k은 l구간 내에 위치한 역의 개수이며, E_1은 전동차 1편성이 회생제동 시에 발생시키는 회생전력량이다. 변전소의 직류반 측정결과를 활용하여 1일간 피더간에 교류된 회생전력량과 위 식으로부터 얻어진 1일간 총 회생전력량을 사용하여 변전소에서 실효되고 있는 잉여 회생전력량을 간접적으로 추정할 수 있다.

$$E_g = E_t + E_r \tag{3.5}$$

여기서 E_g는 l구간에서 발생된 총 회생전력량이며, E_t는 피더간 교류된 회생전력량 측정치이다. E_r은 가선전압을 상승시키고 전동차의 제동저항기에서 실효되는 전력량이며, 전차선로의 내부저항에 의한 손실 전력을 포함한다. 위 식으로부터 회생인버터 설비를 설치 시에 회수할 수 있는 전력량을 근사적으로 계산할 수 있다. 하지만 계산된 흡수 가능한 회생전력량에는 급전선로의 내부저항에 의한 손실분도 포함되는 문제점을 갖고 있다. 이러한 내부저항에 의한 손실전력은 소비전력이 증가할 때도 커질 뿐만 아니라 피더간 교류되는 회생전력에도 비례하여 증가한다.

나. 변전소 측정

선릉변전소와 양동시장변전소에 대해 1일간 직류반의 전압과 전류를 측정하고 기록하였다. 그림 3.68에서 보듯이, 변전소의 측정은 4개의 피더에 설치된 보호계전기 DCCT 출력값과 직류반 전력기록장치의 DCPT 출력값을 DAQ 카드와 노트북 PC에 연결하여 기록하였다. 그림 3.69과 3.70는 변전소 측정 시의 측정용 DAQ 보드, 노트북, 측정화면을 나타낸다. 2시간마다 데이터를 분할하여 기록할 수 있는 LabView 프로그램을 작성하였으며, 그림 3.71과 같다.

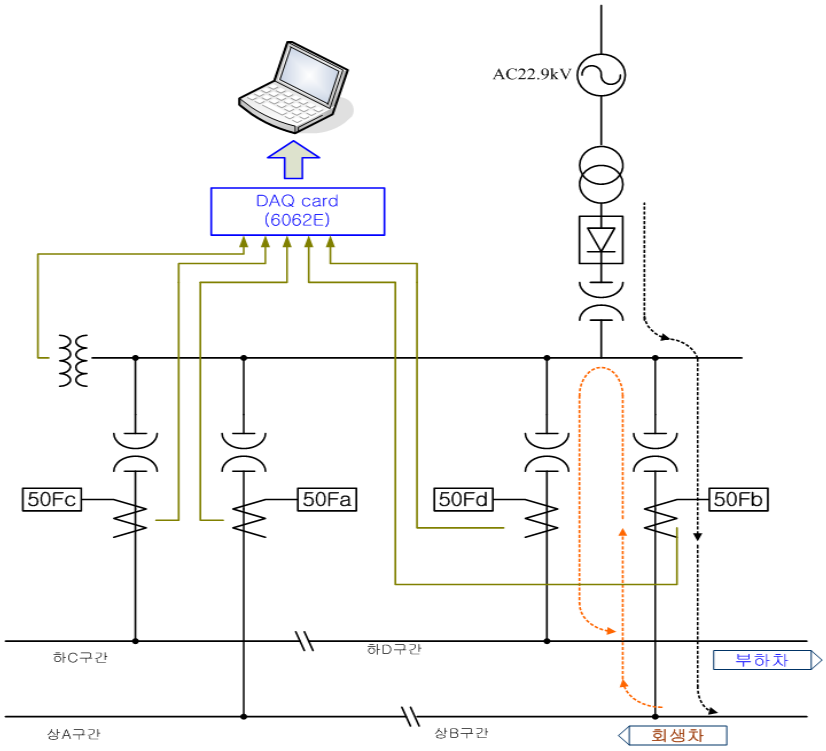


그림 3.68 변전소 측정 개략도



그림 3.69 측정장비

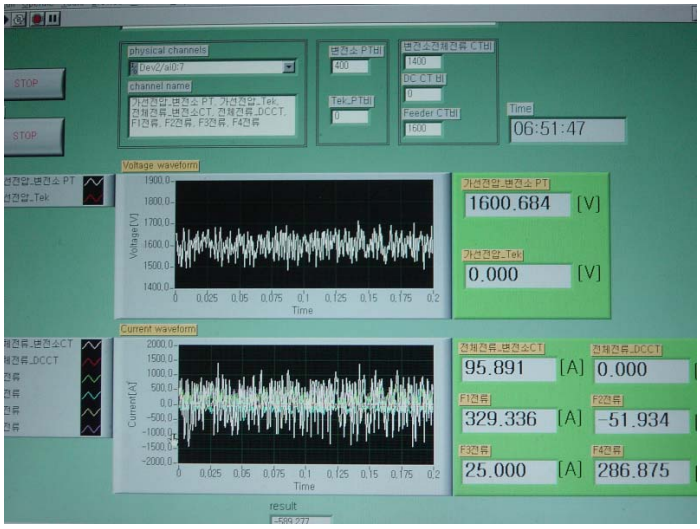


그림 3.70 기록 화면

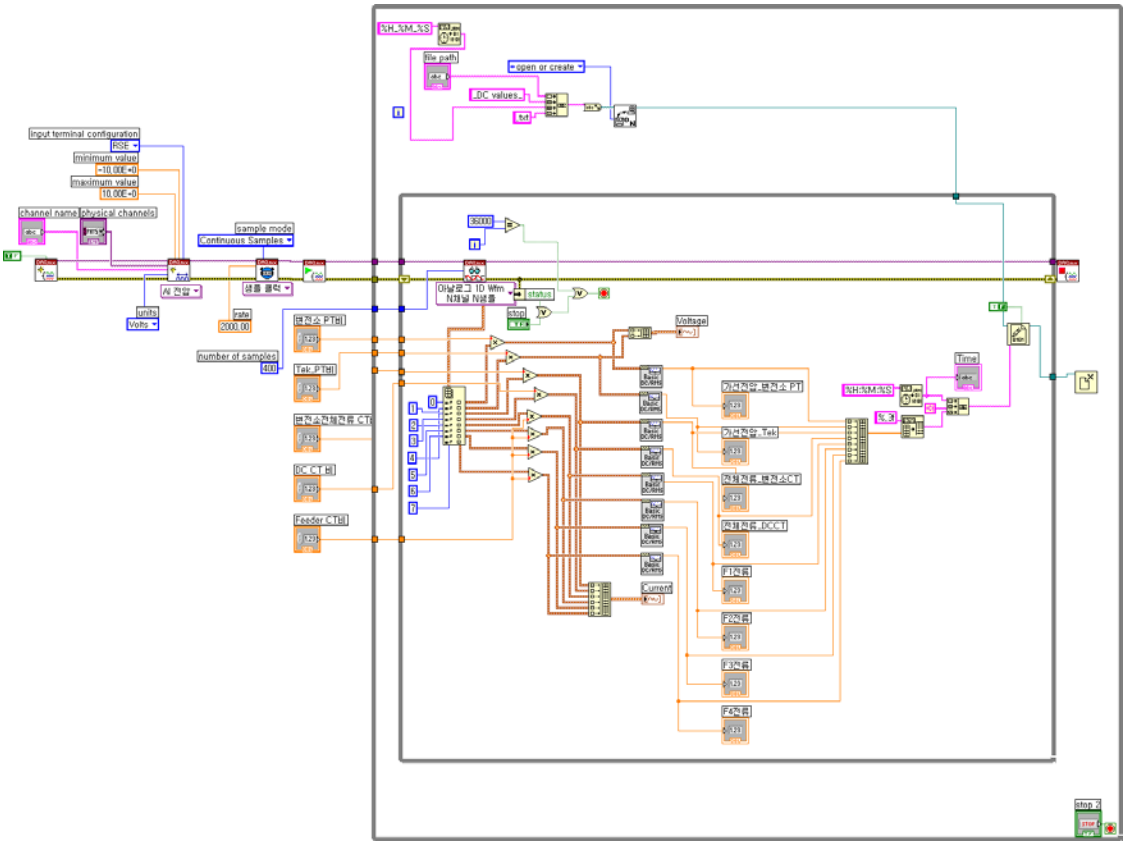


그림 3.71 LabView 프로그램

(1) 선릉변전소

(가) 전압-전류특성곡선

그림 3.72~3.80은 선릉변전소의 직류단 전압-전류 특성곡선을 보여준다. 무부하 전압(1,650V)로부터 부하전류량이 증가함에 따라서 정류기의 내부임피던스 전압강하가 증가되고 직류전압을 낮춘다. 그림에서 보듯이, 병렬로 운전되는 다이오드정류기들의 전압-전류 특성이 일치하지 않기 때문에 직류단 전압이 일정기울기로 감소하지 못하고 꺾어지는 현상이 나타난다. 즉, 초기 약 500[A]까지의 급격한 감소는 병렬 구동되는 정류기의 불평등 전압 감소분을 의미하며, 병렬구동 정류기의 전압 및 전력 특성이 동일하면 없어진다. 또한 잉여 회생전력을 흡수할 수 있는 회생인버터 설비가 갖추어져 있지 않기 때문에 직류단 전체전류값이 음의 값을 갖지 못하고 대신에 가선전압이 1,800[V] 이상까지도 증가됨을 확인할 수 있다. 선릉변전소에 회생인버터의 설치와 병렬구동 다이오드 정류기의 특성을 동일하게 조절하면 이상적인 직류변전소의 전압전류파형을 얻을 수 있다.

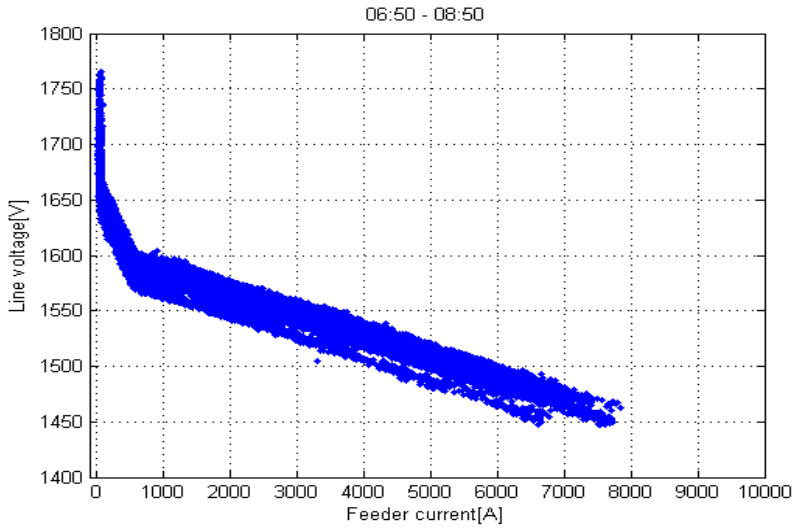


그림 3.72 선릉변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 06:50 ~ 08:50)

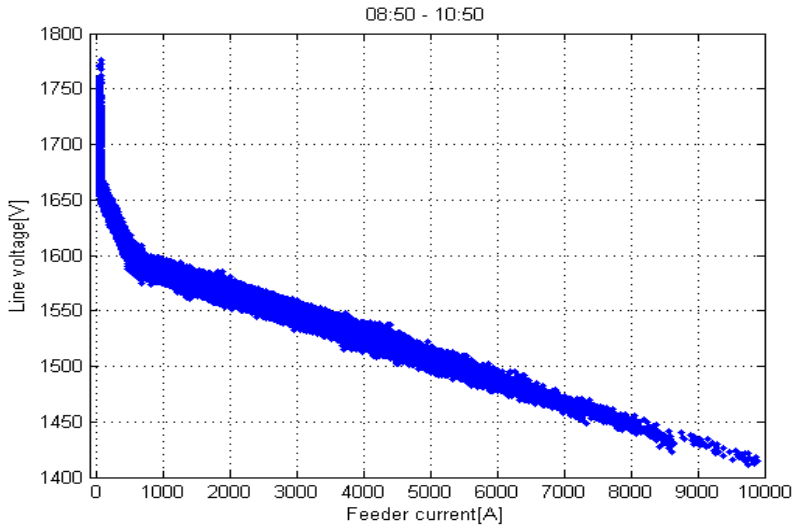


그림 3.73 선릉변전소 전체전류와 가선전압

특성곡선(측정시간 : 08:50 ~ 10:50)

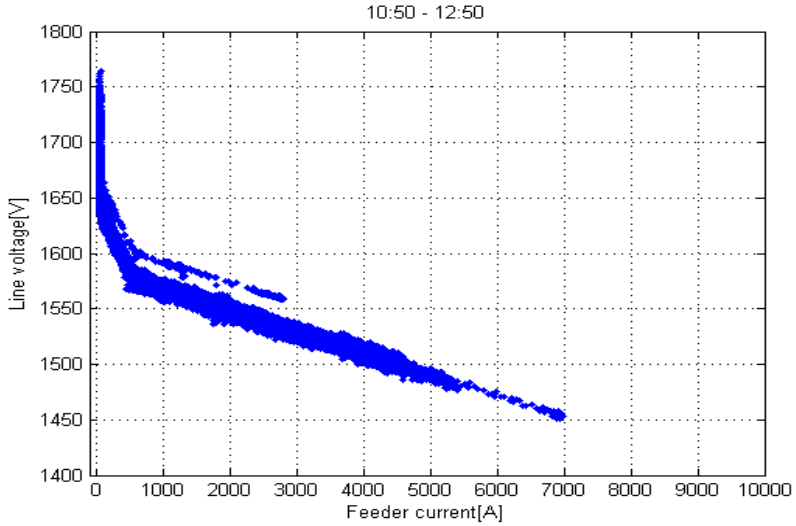


그림 3.74 선릉변전소 전체전류와 가선전압

특성곡선(측정시간 : 10:50 ~ 12:50)

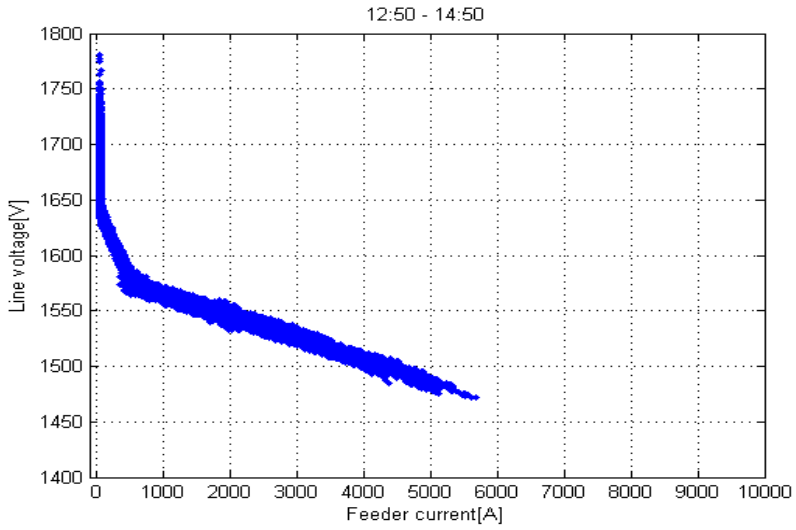


그림 3.75 선릉변전소 전체전류와 가선전압

특성곡선(측정시간 : 12:50 ~ 14:50)

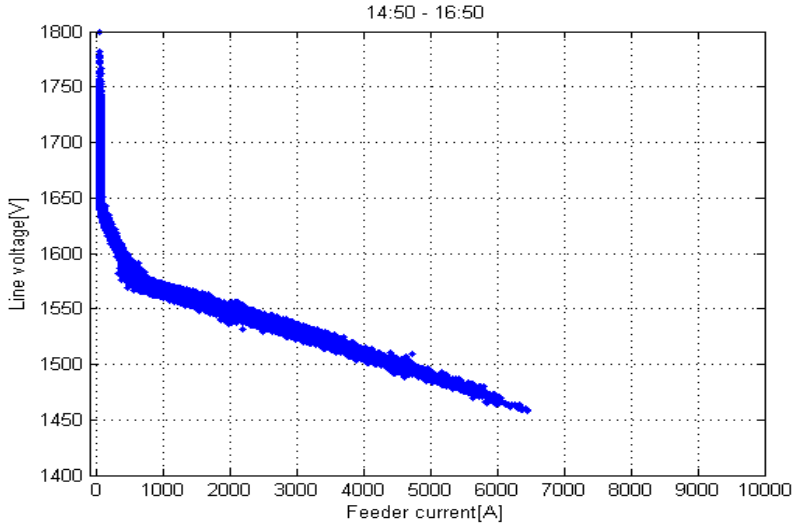


그림 3.76 선릉변전소 전체전류와 가선전압

특성곡선(측정시간 : 14:50 ~ 16:50)

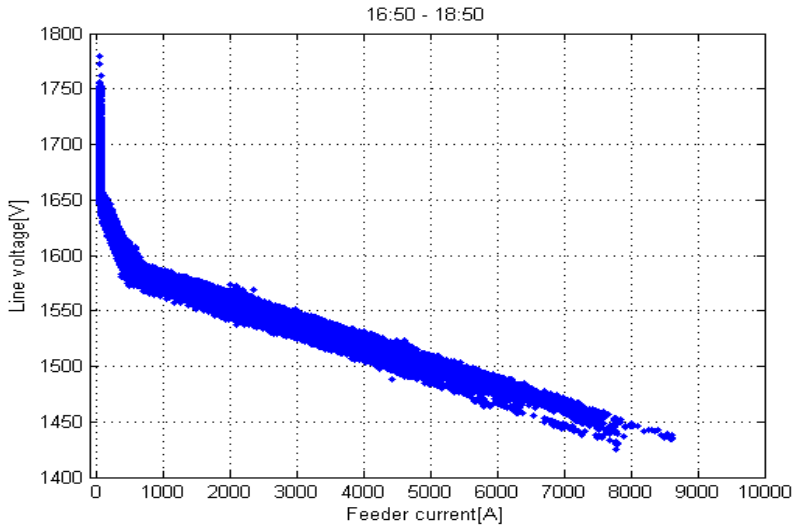


그림 3.77 선릉변전소 전체전류와 가선전압

특성곡선(측정시간 : 16:50 ~ 18:50)

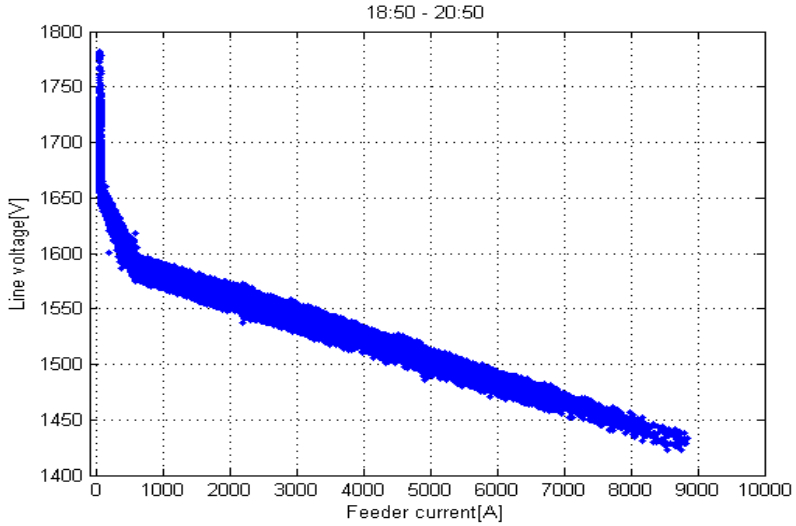


그림 3.78 선릉변전소 전체전류와 가선전압

특성곡선(측정시간 : 18:50 ~ 20:50)

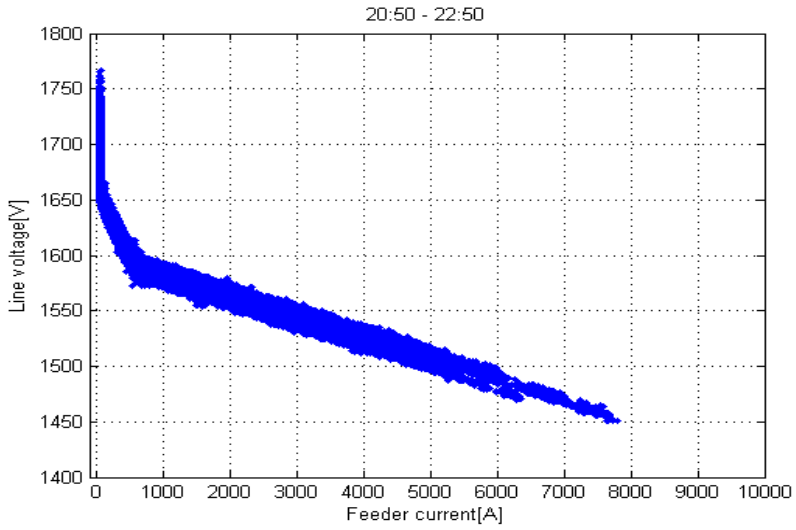


그림 3.79 선릉변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 20:50 ~ 22:50)

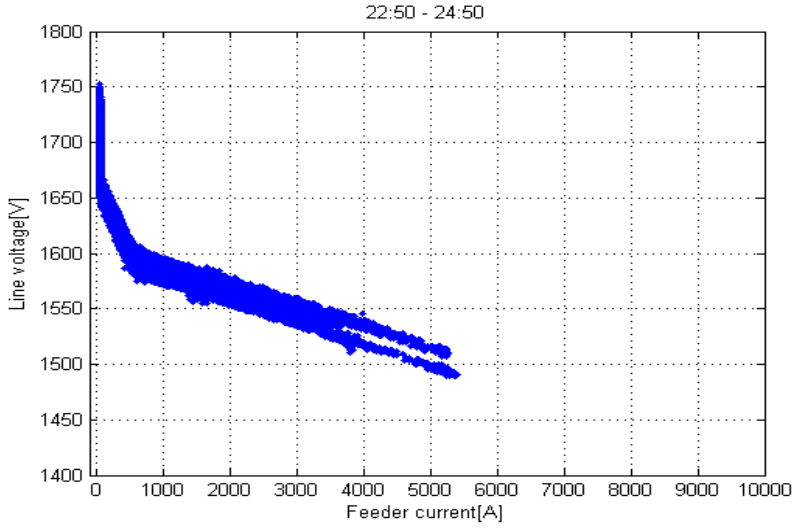
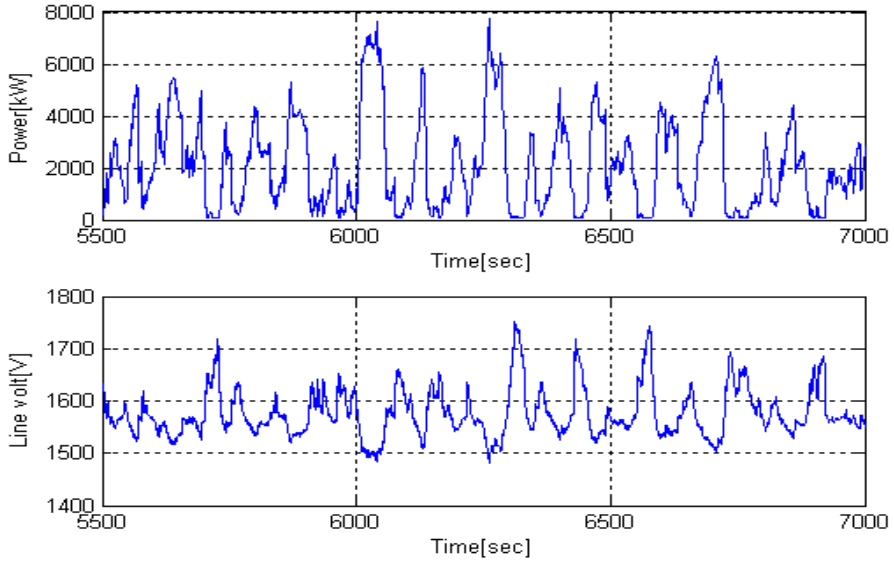


그림 3.80 선릉변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 22:50 ~ 24:50)

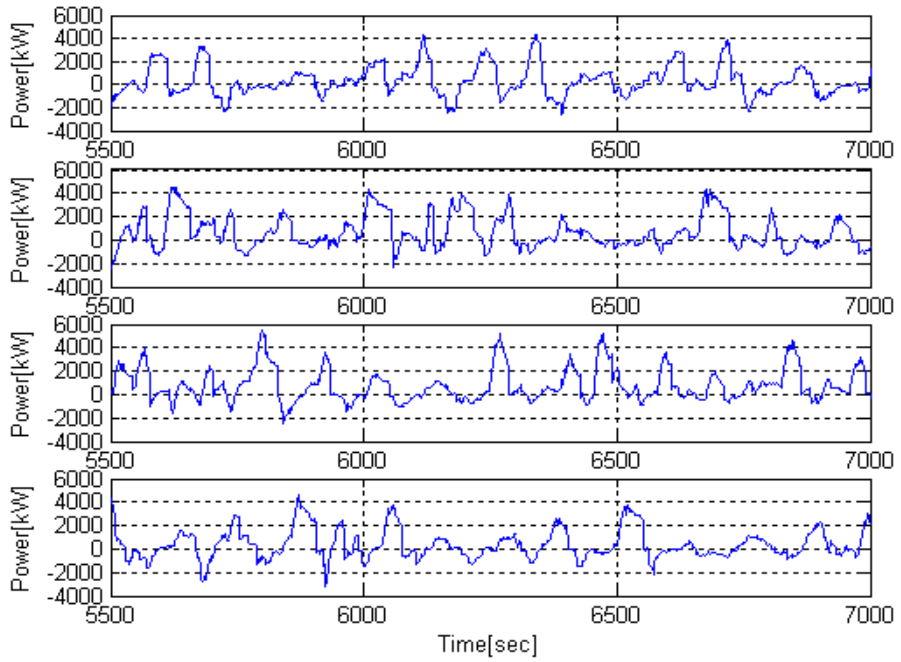
(나) 소비 및 회생전력

그림 3.81은 선릉변전소의 전체소비 전력, 가선전압, 피더별 소비 및 회생전력파형을 보여준다. (a)는 전체 소비 전력과 가선전압파형으로 소비전력이 발생되지 않는 경우에는 항시 전동차의 회생전력으로 가선전압이 상승한다. 선릉변전소의 경우

다양한 종류의 전동차와 짧은 시격으로 운행되기 때문에 가선전압의 변동이 불규칙적이다.



(a) 전체소비전력과 가선전압파형



(b) 피더1~4의 소비전력파형

그림 3.81 선릉변전소의 소비전력 및 가선전압

(b)는 피더별 소비전력파형을 나타내며, 한쪽 피더에서 발생된 회생전력이 다른 쪽 피더의 소비전력으로 재활용되고 있으며 피더별 회생전력교류가 없는 경우, 즉 회생전력을 소비할 수 있는 부하가 타 피더에 존재하지 않는 경우에 가선전압은 상승하게 된다.

(다) 전력량 분석

시간대별로 평균소비전력에 대한 평균회생전력값을 비율로 나타내면 그림 3.82와 같다. 노선의 거리와 구배특성에 따른 회생전력 변화가 확인되고 피더들간에 비슷한 변동폭을 갖는다.

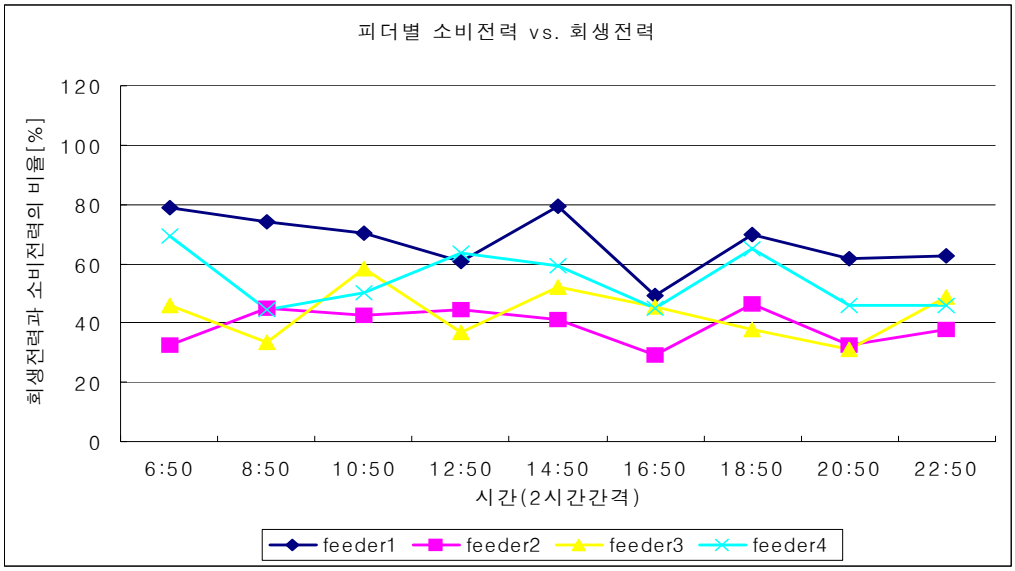


그림 3.82 선릉변전소의 피더별 소비 및 회생전력 비율

표 3.27 선릉변전소의 피더별 역행 및 회생전력 최대값

시간	피더	역행전력 최대값[kW]	회생전력 최대값[kW]	비율[%]
06:50 - 08:50	1	5117.1	4048.6	79.1
	2	10088.4	3270.4	32.4
	3	7549.8	3457.9	45.8
	4	7154.1	4950.5	69.2
08:50 - 10:50	1	5164.1	3837.9	74.3
	2	7063.9	3180.1	45.0
	3	8868.5	2969.0	33.5
	4	6933.6	3099.6	44.7
10:50 - 12:50	1	5649.3	3977.1	70.4
	2	7144.4	3049.0	42.7
	3	6102.5	3569.9	58.5
	4	5799.0	2915.0	50.3
12:50 - 14:50	1	5281.3	3193.1	60.5
	2	6413.1	2839.6	44.3
	3	7643.8	2825.8	37.0
	4	5987.9	3818.2	63.8
14:50 - 16:50	1	4844.0	3858.1	79.6
	2	6957.9	2864.9	41.2
	3	6296.4	3280.9	52.1
	4	5490.7	3259.4	59.4
16:50 - 18:50	1	7124.7	3516.1	49.4
	2	9197.5	2702.4	29.4
	3	8007.2	3616.6	45.2
	4	8391.9	3762.1	44.8
18:50 - 20:50	1	6531.7	4571.7	70.0
	2	8794.4	4091.8	46.5
	3	7681.2	2886.5	37.6
	4	6750.7	4401.8	65.2
20:50 - 22:50	1	5823.7	3587.5	61.6
	2	7818.8	2534.8	32.4
	3	8552.0	2651.9	31.0
	4	6898.8	3180.5	46.1
22:50 - 24:50	1	4909.6	3081.3	62.8
	2	6845.4	2590.8	37.8
	3	5798.2	2823.3	48.7
	4	5532.5	2553.0	46.1

1일 동안 측정된 피더별 전류량과 가선전압 값을 사용하여 피더별 역행 및 회생

전력량을 계산한 결과는 표 3.27과 3.28에 나타낸다. 표 3.28는 선릉변전소의 경우로서 측정된 데이터로부터 계산된 선릉변전소의 1일 전력 사용량은 53,180 [kWh/day]이며, 소비전력량에 대한 회생전력량의 비율은 43%이며, 피더간 회생전력교류에 따른 1일간의 전력요금 절감액은 약 1,015,000원(70원/kWh)이다.

표 3.28 선릉변전소의 피더별 역행 및 회생전력량 (측정시간: 06:50 ~ 24:50)

	역행전력량 [kWh/day]	회생전력량 [kWh/day]	소비전력량 [kWh/day]	
피더-1	13,846	4,470	9,376	변전소에서 기록한 1일 평균 소비전력량 (12월)
피더-2	20,481	3,376	17,105	
피더-3	18,305	3,175	15,130	
피더-4	15,060	3,491	11,569	
합계	67,692	14,512	53,180	69,580

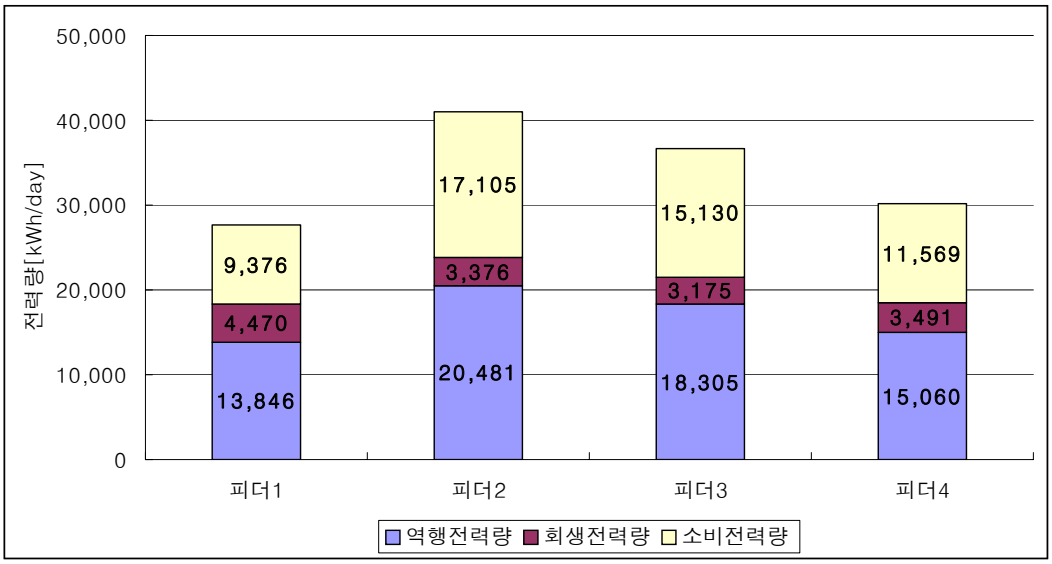


그림 3.83 선릉변전소의 피더별 역행 및 회생전력량 (측정시간: 06:50~24:50)

선릉변전소에서 측정된 피더간의 회생전력량과 수식으로 근사화 하여 계산한 총

회생전력량을 이용하여 회생인버터가 설치될 경우 흡수 가능한 잉여 회생전력량을 산출하였다. 그림 3.84에서 보듯이 서울 2호선 삼성역에서 강남역까지의 구간에 5분 시격으로 운행하는 조건에서 계산하였다. 표 3.29의 조건에서 얻어진 총 회생전력량, 실제 측정된 피더간 회생전력교류량, 회생실효전력량을 표 3.30에 나타낸다. 표 3.30에서 보듯이 선릉변전소는 15,310[kWh/day]의 실효된 회생전력량을 발생하며, 매일 1,071,700원의 전력이 손실되고 있다. 다만, E_r은 회생실효전력량 뿐만 아니라, 전차선의 전류 흐름에 의한 전력손실 분을 포함한 값이지만, 일반적으로 전차선 저항에 의한 손실분은 전동차 회생제동에 의한 잉여회생전력보다는 적다.

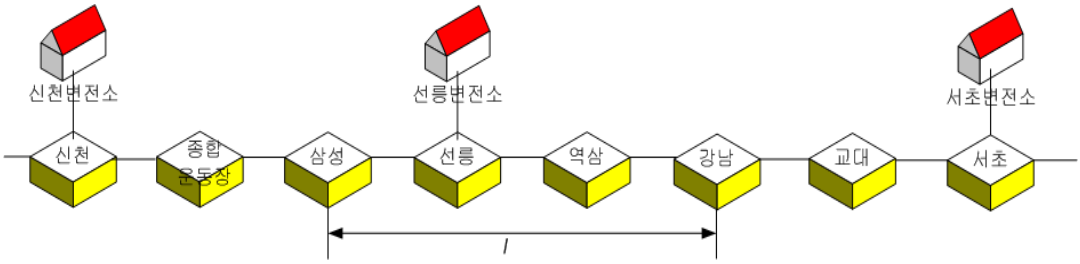


그림 3.84 선릉변전소 주변개략도

표 3.29 총 회생전력량 근사계산 조건

조건	선릉	비고
거리	3.3km (삼성~강남)	
시격	5분	
1편성 회생전력량	22.8kWh	차량 설계자료
표정속도	35km/h	
운행시간	17:21	측정시간과 동일

표 3.30 회생전력량 분석

변전소	회생전력량[kWh]			비고
	E_g	E_t	E_r	1편성 제동시에 발생된 회생전력량
선릉	29,822	14,512	15,310	22.8

(2) 양동시장변전소

(가) 전압-전류특성곡선

그림 3.85~93은 양동시장의 직류단 전압-전류 특성곡선을 보여준다. 무부하 전압(1,650V)로부터 부하전류량이 증가함에 따라서 정류기의 내부임피던스 전압강하가 증가되고 직류 전압을 낮춘다. 또한 양동시장변전소는 잉여 회생전력을 흡수할 수 있는 회생인버터 설비가 갖추어져 있지 않기 때문에 직류단 전체 전류값이 음의 값을 갖지 못하고 대신에 가선전압이 1,800[V] 이상까지도 증가됨을 확인할 수 있다.

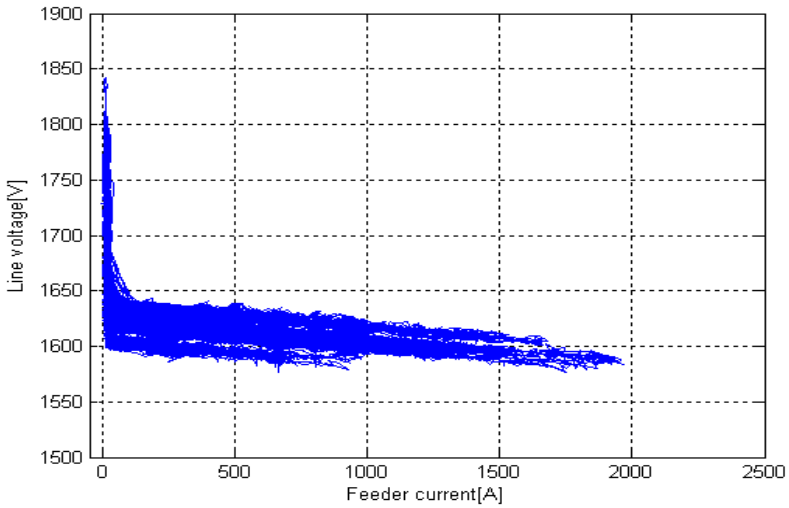


그림 3.85 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 06:47 ~ 08:47)

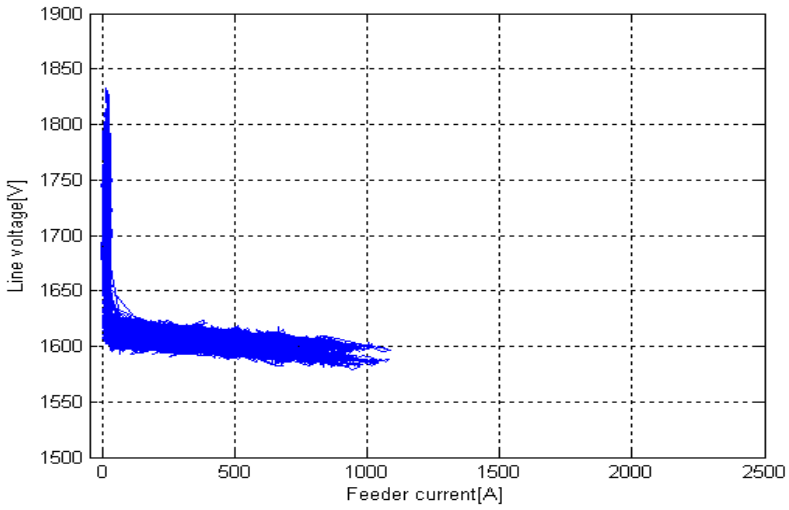


그림 3.86 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 08:47 ~ 10:47)

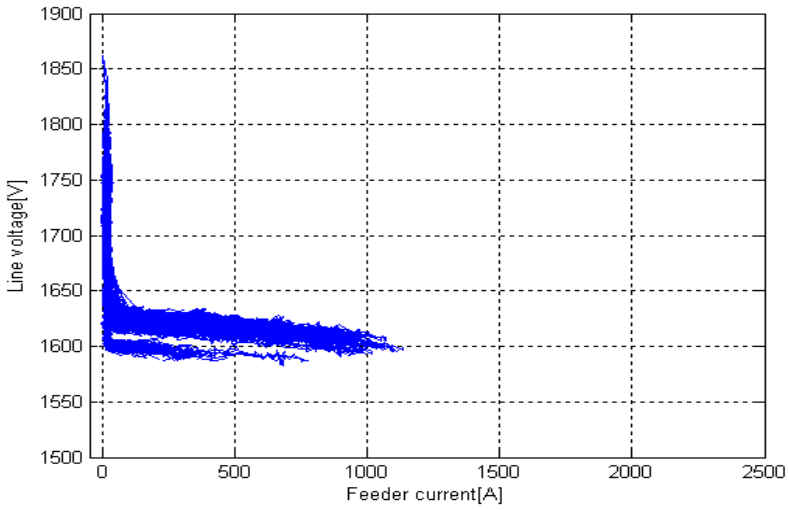


그림 3.87 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 10:47 ~ 12:47)

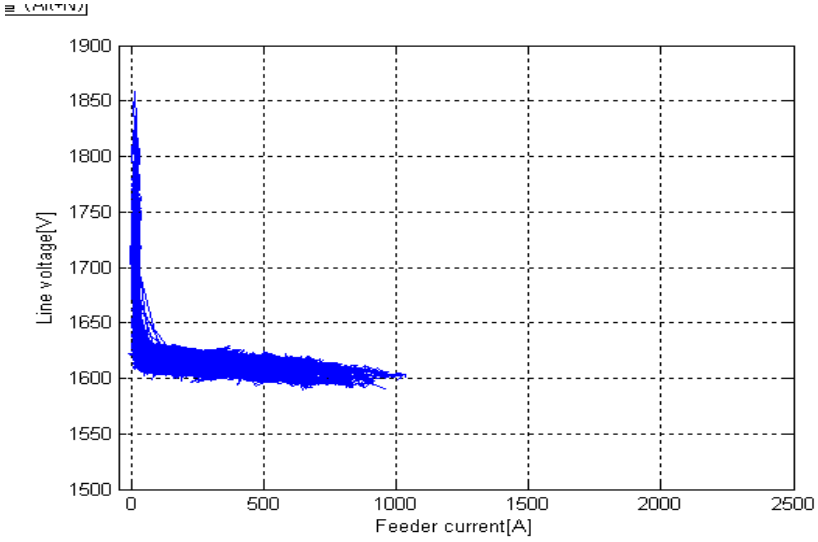


그림 3.88 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 12:47 ~ 14:47)

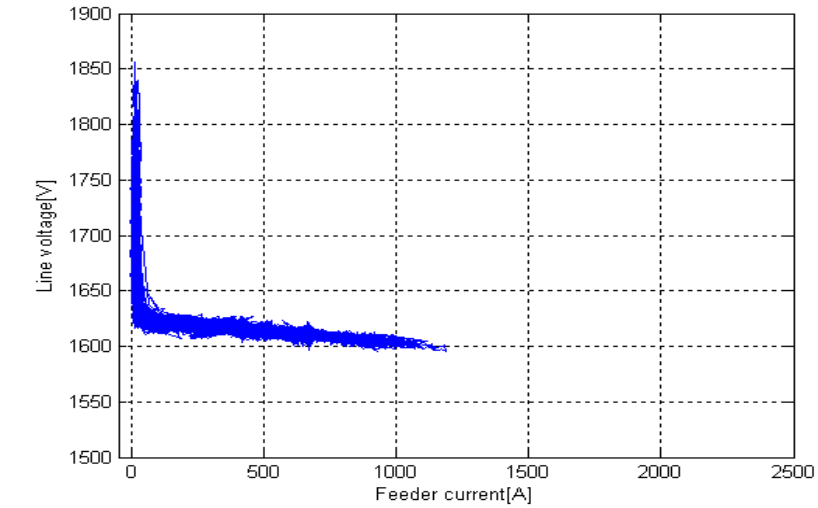


그림 3.89 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 14:47 ~ 16:47)

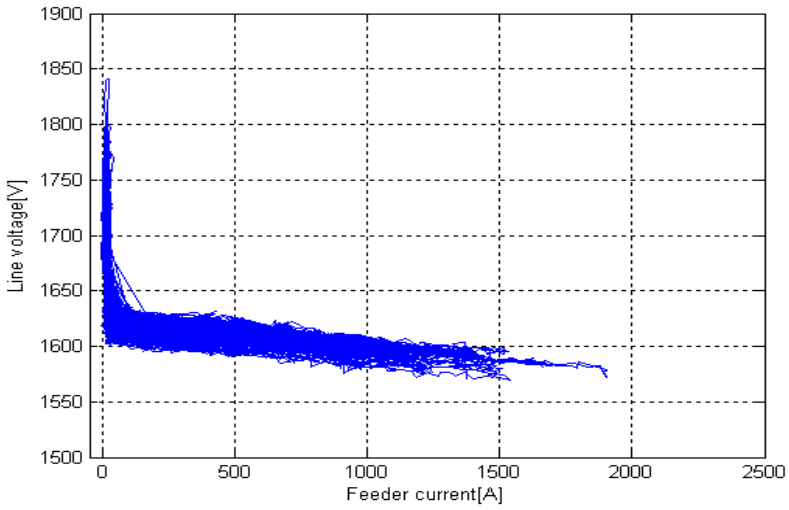


그림 3.90 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 16:47 ~ 18:47)

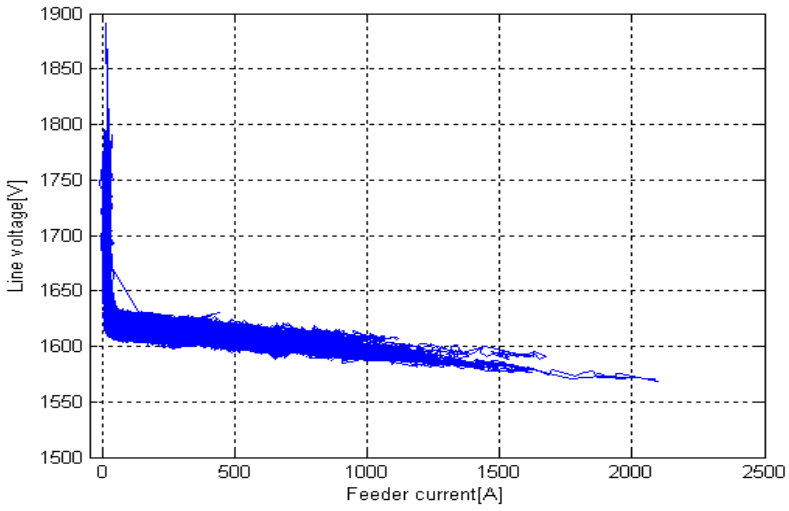


그림 3.91 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측간시간 : 18:47 ~ 20:47)

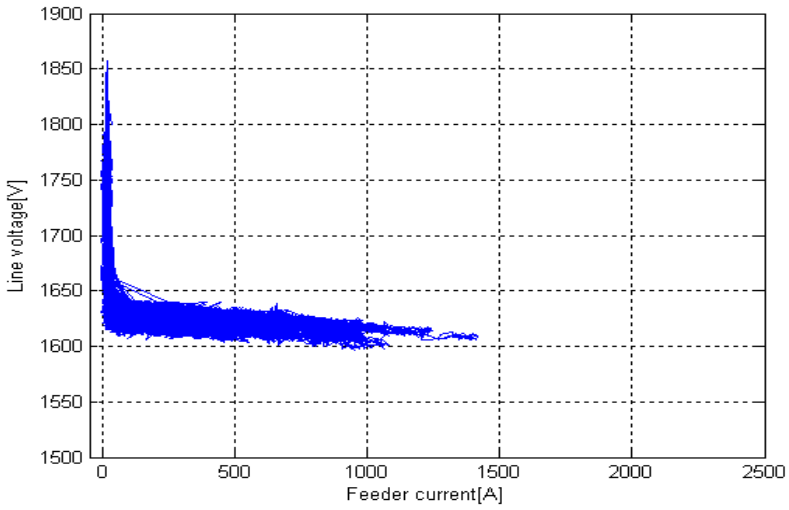


그림 3.92 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 20:47 ~ 22:47)

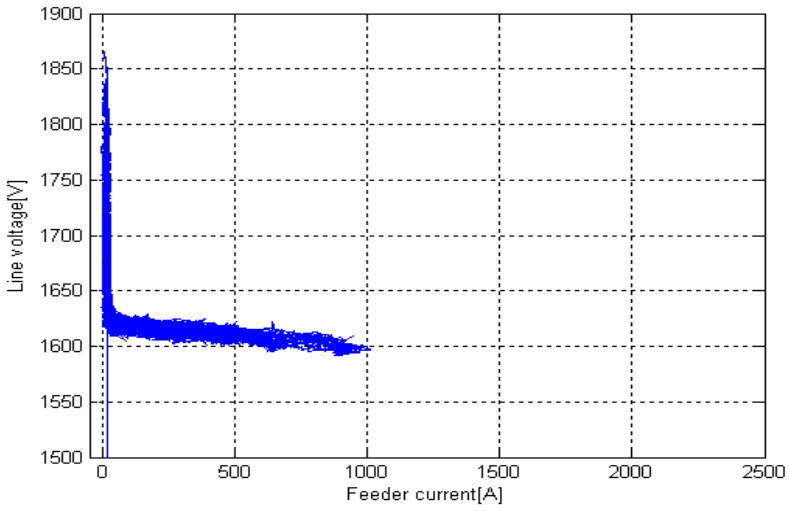
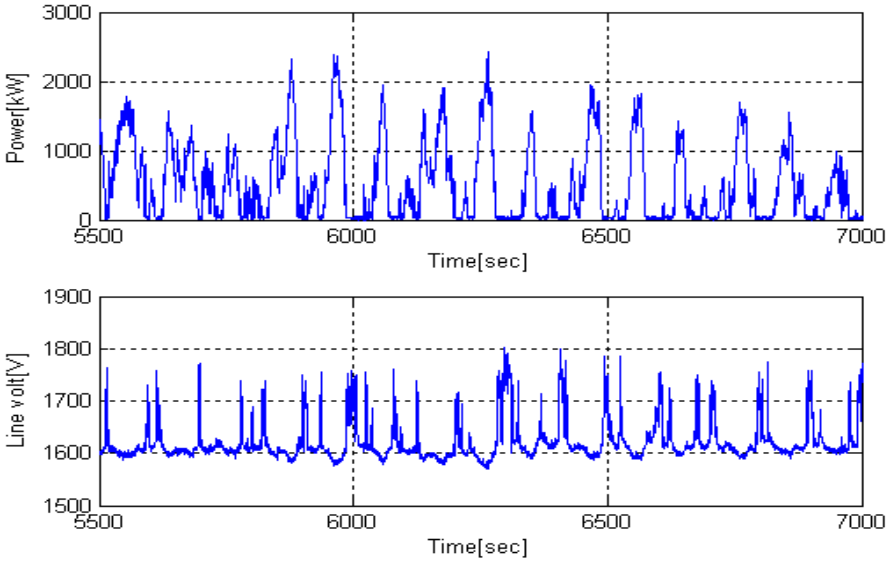


그림 3.93 양동시장변전소 전체전류와 가선전압
특성곡선(측정시간 : 22:47 ~ 24:47)

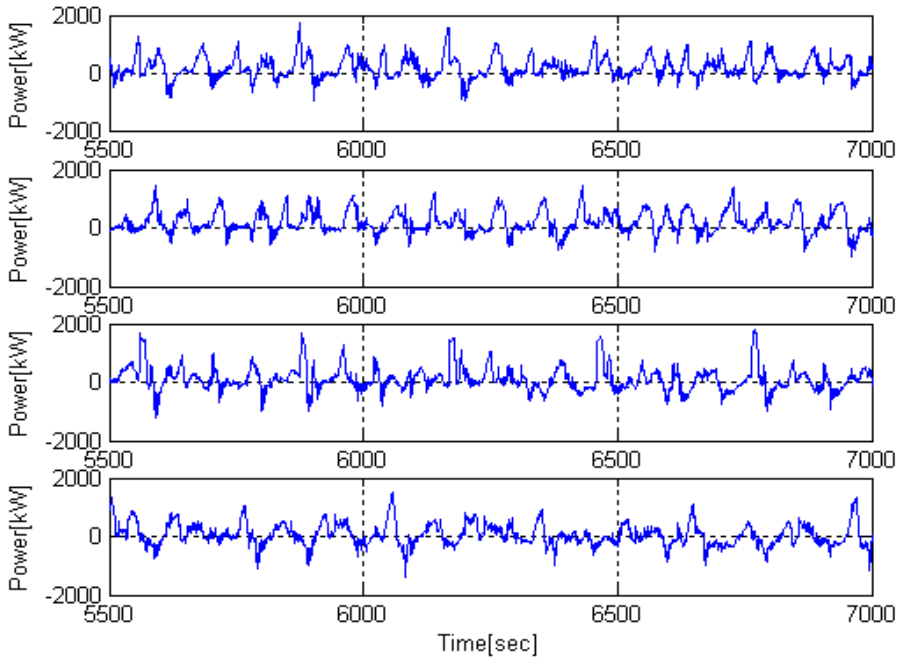
(나) 소비 및 회생전력

그림 3.94는 양동시장변전소의 전체소비 전력, 가선전압, 피더별 소비 및 회생전력파형을 보여준다. (a)는 전체 소비 전력과 가선전압파형으로 소비전력이 발생되지 않는 경우에는 항시 전동차의 회생전력으로 가선전압이 상승한다. 또한 양동시

장변전소의 경우에는 동일 차종이 8분 또는 10분 시격으로 운행하기 때문에 전동차의 회생제동 발생 시에 가선전압이 상승되는 시점을 명확히 확인할 수 있다.



(a) 전체소비전력과 가선전압파형



(b) 피더1~4의 소비전력파형

그림 3.94 양동시장 변전소의 소비전력 및 가선전압 파형

(b)는 피더별 소비전력파형을 나타내며, 한쪽 피더에서 발생된 회생전력이 다른 쪽 피더의 소비전력으로 재활용되고 있으며 피더별 회생전력교류가 없는 경우, 즉 회생전력을 소비할 수 있는 부하가 타 피더에 존재하지 않는 경우에 가선전압은 상승하게 된다.

(다) 전력량 분석

시간대별로 평균소비전력에 대한 평균 회생전력값을 비율로 나타내면 그림 3.95와 같다. 양동시장 변전소의 피더-4에서는 회생전력이 역행전력보다도 높은 값을 갖는 경우가 존재하며, 이것은 피더-4에서 소비전력보다 높은 회생전력이 발생되고 타 피더의 역행차량으로 전송하고 있음을 의미한다. 실제 노선도를 점검한 결과, 양동시장변전소의 피더-3,4는 광주1호선 1단계 말단변전소인 쌍촌변전소와 연결되었기 때문에 회생전력을 교류할 수 있는 변전소가 쌍촌변전소 1개뿐이고 상대적으로 피더-1,2번에 비해 회생전력을 교류를 위한 전동차수가 적다. 또한 쌍촌변전소에서 호남대입구역까지는 연속된 하구배구간이며, 발생된 회생전력이 교류되는 곳은 양동시장변전소 밖에 없어 높은 회생전력을 만들기 때문에 나타난다.

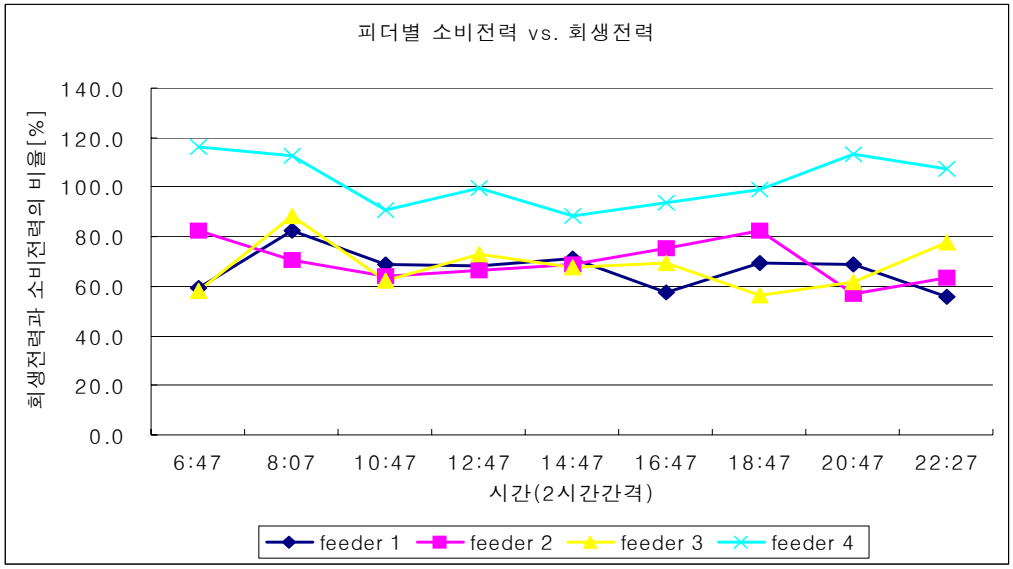


그림 3.95 양동시장변전소의 피더별 소비 및 회생전력비율

표 3.31 양동시장 변전소의 피더별 역행 및 회생전력 최대값

시간	피더	역행전력 최대값[kW]	회생전력 최대값[kW]	비율[%]
06:47-08:47	1	1948.1	1160.8	59.6
	2	1580.9	1300.1	82.2
	3	2056.2	1194.8	58.1
	4	1582.4	1835.5	116.0
08:47-10:47	1	1612.7	1325.5	82.2
	2	1518.1	1071.8	70.6
	3	1713.8	1509.8	88.1
	4	1312.7	1477.6	112.6
10:47-12:47	1	1529.8	1056.0	69.0
	2	1469.4	937.3	63.8
	3	1547.2	966.5	62.5
	4	1390.0	1263.8	90.9
12:47-14:47	1	1440.9	987.0	68.5
	2	1477.9	986.3	66.7
	3	1492.2	1092.9	73.2
	4	1310.4	1303.7	99.5
14:47-16:47	1	1385.3	985.8	71.2
	2	1414.8	972.7	68.8
	3	1564.0	1058.5	67.7
	4	1349.1	1193.6	88.5
16:47-18:47	1	1841.2	1062.2	57.6
	2	1438.3	1080.8	75.1
	3	1797.7	1242.7	69.1
	4	1513.5	1420.2	93.8
18:47-20:47	1	1656.2	1147.7	69.3
	2	1639.2	1353.1	82.5
	3	1901.4	1069.0	56.2
	4	1530.6	1518.6	99.2
20:47-22:47	1	1536.1	1059.5	69.0
	2	1517.3	863.0	56.9
	3	1560.3	963.0	61.7
	4	1235.0	1398.7	113.3
22:47-24:08	1	1642.9	916.3	55.8
	2	1312.8	835.2	63.6
	3	1403.5	1087.1	77.5
	4	1001.0	1077.2	107.6

1일 동안 측정된 피더별 전류량과 가선전압 값을 사용하여 피더별 역행 및 회생

전력량을 계산한 결과는 표 3.32에 나타낸다. 양동시장 변전소에서는 6시 47분부터 24시 8분까지 측정하였으며, 측정된 데이터로부터 계산된 전력사용량은 8,494[kWh/day]다. 양동변전소의 피더들간에 서로 교환함으로써 재활용되는 회생전력량은 3,718[kWh]다. 이 값은 소비전력량의 27%에 해당하며 1일간 약 260,000원(70원/kWh) 정도이다.

표 3.32 양동시장변전소의 피더별 역행 및 회생전력량 (측정시간:06:47~24:08)

	역행전력량 [kWh/day]	회생전력량 [kWh/day]	소비전력량 [kWh/day]	
피더-1	3,277.7	712.9	2,564.8	변전소에서 기록한 1일 평균 소비전력량 (9월)
피더-2	3,584.0	700.4	2,883.6	
피더-3	2,360.2	1,426.1	934.1	
피더-4	1,871.9	1,576.9	295	
합계	11,093.8	4,416.3	6,677.5	6,650

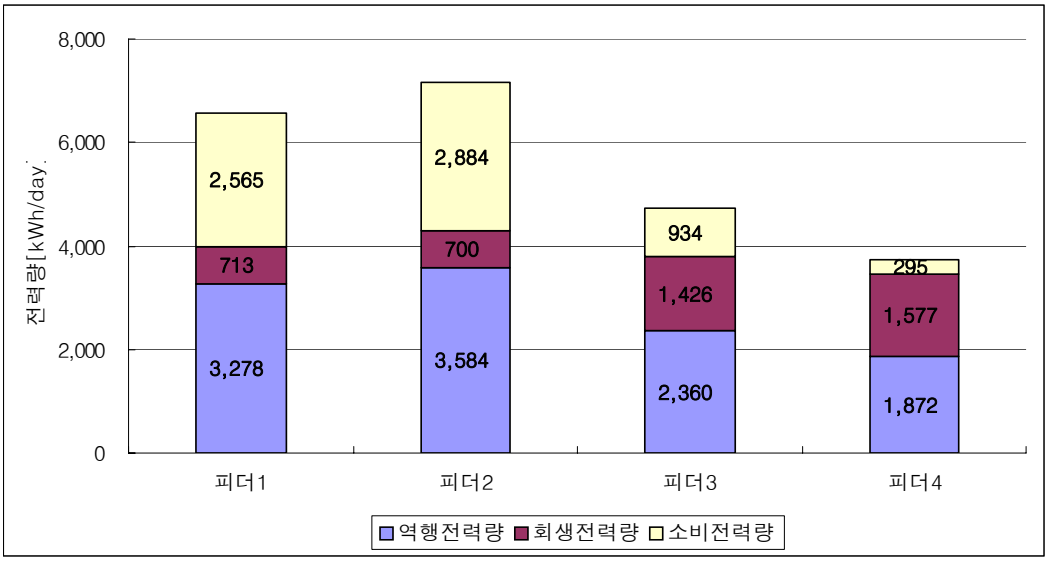


그림 3.96 양동시장변전소의 피더별 역행 및 회생전력량

양동시장에서 측정된 피더간의 회생전력량과 수식으로 근사화하여 계산한 총 회생전력량을 이용하여 회생인버터가 설치될 경우 흡수 가능한 잉여 회생전력량을 산출하였다. 그림 3.97에서 보듯이 금남로4가에서 쌍촌역까지의 구간에 대해 전동차가 8분 시격으로 운행하는 조건에서 계산하였다. 표 3.33의 계산조건에서 계산된 변전소들의 총 회생전력량, 측정된 피더간 회생전력의 교류량, 회생실효전력량을 표 3.34에 나타낸다. 표 3.34에서 보듯이 양동변전소는 매일 5,740kWh의 전력량이 실효되며, 70[원/kWh]으로 비용을 산출한다면 매일 401,800원이 손실되고 있다. 다만, E_r은 회생실효전력량 뿐만아니라, 전차선의 전류 흐름에 의한 전력손실 분을 포함한 값이지만, 일반적으로 전차선 저항에 의한 손실분은 전동차 회생제동에 의한 잉여회생전력보다는 적다.

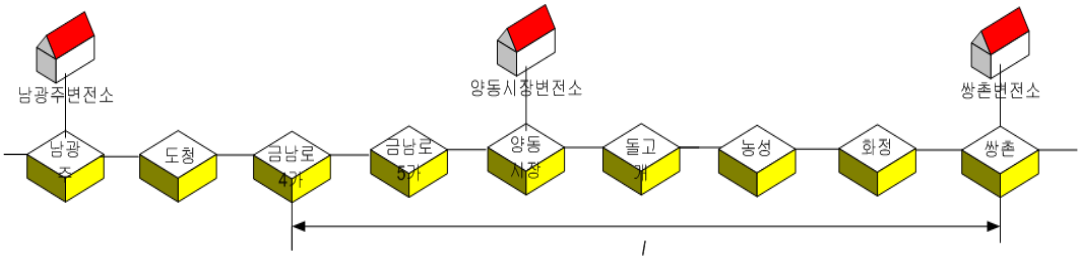


그림 3.97 양동시장변전소 주변개략도

표 3.33 총 회생전력량 근사계산 조건

조건	양동시장	비고
거리	4.6km (금남로4가～쌍촌)	
시격	8분	
1편성 회생전력량	9.13kWh	차량 설계자료
표정속도	35km/h	
운행시간	18:10	측정시간과 동일

표 3.34 회생전력량 분석

변전소	회생전력량[kWh]			비고
	E_g	E_t	E_r	1편성 제동시에 발생된 회생전력량
양동시장	9,459	3,719	5,740	9.13

다. 결과 검토

회생제동을 실시하는 전동차들이 운행 중인 노선의 전철변전소를 대상으로 가선전압과 피더별 전류량을 측정한 결과에 대해 변전소의 전압전류특성을 파악하였고, 소비 및 회생전력량 분석결과를 제시하였다. 피더별 소비전력과 회생전력의 순시치를 비교하여 최대 소비 및 회생전력 비율을 비교해 보았고, 1일간의 소비 및 회생전력량을 계산함으로서 피더간 회생전력 교류에 따른 소비전력량 절감분을 계산하였다. 서울 선릉변전소와 광주 양동시장변전소의 경우 4개의 피더간에 약 27%와 43%정도의 잉여 회생전력 교류가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 전력 및 전차선설비의 손실분이 포함한 값이지만, 양동시장변전소에서의 회생실효전력량이 5740kWh/일, 선릉변전소에서는 15,310kWh/일으로 추정할 수 있다.

최근의 지구온난화에 의한 이상기후 현상이 빈번히 발생함에 따라 이와 관련하여 각종 환경규제가 강화되고 있다. 특히 교토의정서 발효에 따른 이산화탄소 배출저감 문제는 범국가 차원에서 전략적으로 대응책을 수립하고 있다. 이산화탄소는 에너지 소비에 따라 발생하는 오염물질로 운송수단의 에너지 절감은 기후변화협약 대응을 위해 중요한 고려 사항이다. 전동차에서 회생전력을 통해 에너지 소비를 줄임으로써 이산화탄소 배출 저감 효과를 기대할 수 있다. 일반적으로 에너지원에 따라 이산화탄소 배출량은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시한 탄소배출계수를 활용하여 산출한다.

표 3.35 IPCC의 탄소배출계수

연 료 구 분			탄소배출계수	
			Kg C/GJ	Ton C/TOE
액체화석 연료	1차 연료	원유	20.00	0.829
		천연액화가스(NGL)	17.20	0.630
	2차 연료	휘발유	18.90	0.783
		항공가솔린	18.90	0.783
		등유	19.60	0.812
		항공유	19.50	0.808
		경유	20.20	0.837
		중유	21.10	0.875
		LPG	17.20	0.713
		납사	20.00	0.829
		아스팔트(Bitumen)	22.00	0.912
		윤활유	20.00	0.829
		Petroleum Coke	27.50	1.140
		Refinery Feedstock	20.00	0.829
고체화석 연료	1차 연료	무연탄	26.80	1.100
		원료탄	25.80	1.059
		연료탄	25.80	1.059
		갈탄	27.60	1.132
		Peat	28.90	1.186
	2차 연료	BKB & Patent Fuel	25.80	1.059
		Coke	29.50	1.210
기체화석 연료		LNG	15.30	0.637
바이오매스		고체바이오매스	29.90	1.252
		액체바이오매스	20.00	0.837
		기체바이오매스	30.60	1.281

IPCC의 기준방법론에 따라 연료소비량(L)을 계산한 다음 화석연료에 따른 환산 기준을 이용하여 열량단위(kcal or GJ)로 전환한다. 그리고 탄소배출계수를 곱하여 주면 탄소배출량이 산출되고, 최종적으로 이산화탄소 배출량으로의 전환을 위해 화학적으로 이산화탄소와 탄소간의 질량비인 44/12를 곱하여 준다. 이와 같은 과정을 통해 연료 소비에 따른 이산화탄소 배출량을 산출할 수 있다. 그러나 전력의 경우, 전력 생산을 위한 에너지원이 화력, 수력, 원자력 등으로 다양하기 때문에 각 국가에서는 전력에 대한 탄소배출계수를 별도로 산정하고 있다. 국내에서는 산업자원부에서 전력소비에 따른 탄소배출계수의 평균값을 발표하고 있다.
본 연구에서는 이를 바탕으로 회생전력량에 대한 이산화탄소 배출 저감량을 다음 표와 같이 산출하였다.

표 3.36 회생전력량에 따른 이산화탄소 배출 저감량

	회생전력량 [kWh/day]	CO_2 배출 저감량 [ton/day]
피더-1	4,470	1.89
피더-2	3,376	1.43
피더-3	3,175	1.35
피더-4	3,491	1.48
합계	14,512	6.59

그 결과, 1일 약 6톤 이상의 이산화탄소 배출량이 저감될 것으로 추정할 수 있다. 또한 1일 동안 측정된 전력량을 바탕으로 이산화탄소 배출량을 산출하여 비교해 본 결과, 회생장치를 활용함으로써 전체적으로 약 20% 이상의 저감 효과를 얻을 수 있다. 결국 본 연구성과는 전력소비 절감 효과뿐만 아니라 전동차 운행을 통해 발생하는 이산화탄소 배출량도 효율적으로 줄일 수 있다. 다시 말해 향후 전동차의 전력 소비에 따른 이산화탄소 배출량 저감 수단으로 회생장치가 중요한 대응 수단임을 나타내고 있다.

2. 전력품질 및 향상

본 연구에서 개발한 회생용 인버터는 전동차의 역행 및 제동 상태에 따라 그 역할이 구분된다. 즉, 직류급전 선로에서 운행중인 전동차가 감속을 위하여 전기적 회생제동을 사용할 경우에는 인버터를 이용하여 일반 역사전기 계통으로 회생전력을 공급하고, 전동차가 가속 혹은 타행을 유지할 때에는 능동전력필터로 동작하여 일반 3상 전력계통으로 유입되는 고조파를 저감하는 역할을 한다. 따라서 실제 운영중인 도시철도 변전소에서 계통으로 유입되는 고조파를 측정하고 그 결과를 분석하는 것이 요구된다.

가. 측정 방법

본 연구를 통하여 측정이 요구되는 전력품질 항목은 고조파로 한정될 수 있지만, 3상 수전부의 PT와 CT에 전력분석기를 설치하여 측정하기 때문에 전압강하와 부하 특성도 설명하기로 한다.

측정은 차량이 선로를 운행하면서 전철변전소의 급전구간을 점유할 경우의 전철변전소에서 이루어 졌으며, 그림 3.98과 같이 한국전력에서 수전 받는 22.9kV 3상 계통에서 전압과 전류의 측정으로 모든 데이터를 수집하였다.

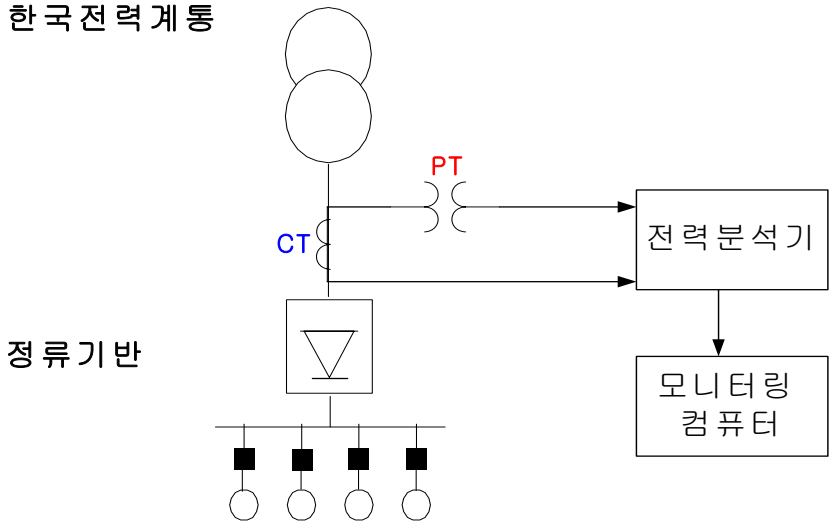


그림 3.98 전력품질 측정 개념도

또한, 측정 결과의 활용성을 위하여, 도시철도 이용 승객이 많은 편에 속하는 선릉변전소 구간에서 24시간동안 측정을 하였으며, 그중 이용 승객이 가장 많은 오후 7시 ~ 8시까지의 측정결과를 기준으로 분석하기로 한다.

나. 측정 결과

앞에서 설명한 조건으로 측정한 결과는 다음과 같이 전류, 전압 및 전력으로 나누어 살펴볼 수 있으며, 전압 및 전류의 고조파 성분을 마지막으로 분석한다.

(1) 수전부 측정

(가) 전류 측정

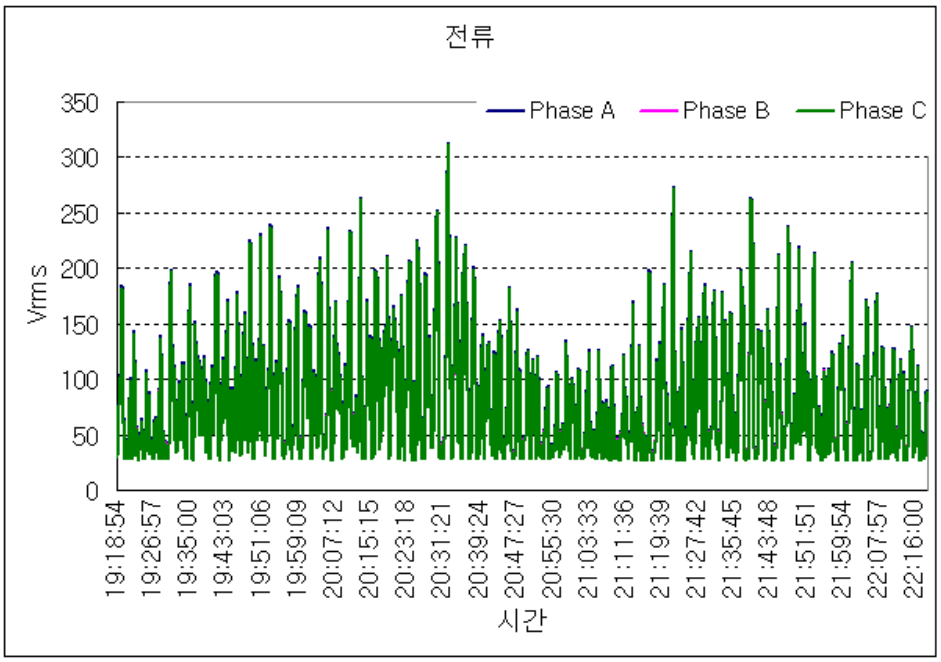


그림 3.99 3상 수전부 전류 측정 결과

도시철도 직류 급전시스템의 3상 수전부에서 측정한 전류는 그림 3.99와 같다. 그림에서 전류의 최고 레벨은 300A 이상으로 나타났으며, 최소 레벨은 30A 근처에서 측정되었다. 앞서 측정 조건에서도 언급하였듯이 측정 장소는 서울메트로 2호선 선릉변전소에서 이루어졌으며, 측정시간대는 오후 7시에서 8시까지 이다. 즉, 2호선

중 지하철 이용승객이 많은 편에 속하는 구간의 변전소와 하루중 가장 많은 승객이 이용하는 시간대의 측정이기 때문에 아래의 전류 레벨은 대체적인 도시철도 변전소의 최대 전류레벨이라 생각해도 무리는 없을 것이다.

표 3.37 3상 수전부 전류 측정 결과

	A상 [A]	B상 [A]	C상 [A]
최대 전류	312.8	310.3	311.3
최소 전류	28.2	28.1	26.3

(나) 전압 측정

전류의 측정결과와 동시간대에 측정한 전압의 측정 결과는 아래 그림 3.100과 같다. 아래 측정 결과를 보면 전압의 레벨이 B상과 C상의 경우 22.3kV에서 22.8kV정도로 A상의 22.1kV～22.6kV 레벨 보다는 다소 높게 측정되었다.

측정된 전압의 결과로 전압강하율을 살펴보면 다음과 같다.

i. A상

- 전압 강하 : 22,900[V] - 22,186[V] = 714[V]
- 전압강하율 : (22,900[V]-22,186[V])/22,900[V] × 100[%] = 3.12[%]

ii. B상

- 전압 강하 : 22,900[V] - 22,313[V] = 587[V]
- 전압강하율 : (22,900[V]-22,313[V])/22,900[V] × 100[%] = 2.56[%]

iii. C상

- 전압 강하 : 22,900[V] - 22,237[V] = 663[V]
- 전압강하율 : (22,900[V]-22,237[V])/22,900[V] × 100[%] = 2.89[%]

가장 많은 전압강하를 보인 A상을 기준으로, 공칭 수전전압 22.9[kV]를 기준 전압(1 p.u.)으로 보았을 때, 최저전압은 0.97(p.u.)로서 전압강하는 적정한 수준임을 알 수 있다.

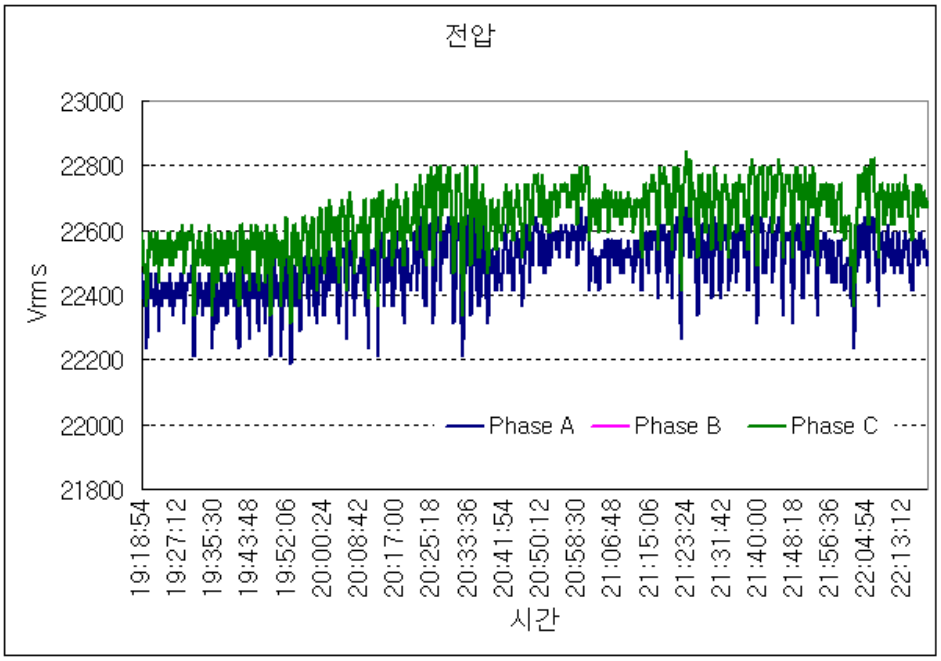


그림 3.100 3상 수전부 전압 측정 결과

표 3.38 3상 수전부 전압 측정 결과

	A상 [V]	B상 [V]	C상 [V]
최대 전압	22,669	22,847	22,745
최소 전압	22,186	22,313	22,237

(다) 유효전력

유효전력은 도시철도 급전시스템에서 실제 소비하는 에너지를 의미하며, 수전측에서 취득한 유효전력은 전동차에 전달되거나 일반 역사전기 계통에서 사용된다. 아래 그림은 유효전력을 측정한 결과를 보여주며, 각 상 모두 최대 6.5MW정도에서 최대값을 보여주고 있다. 물론, 최대 유효전력이 측정된 시점은 전류 또한 최대값을 보인다.

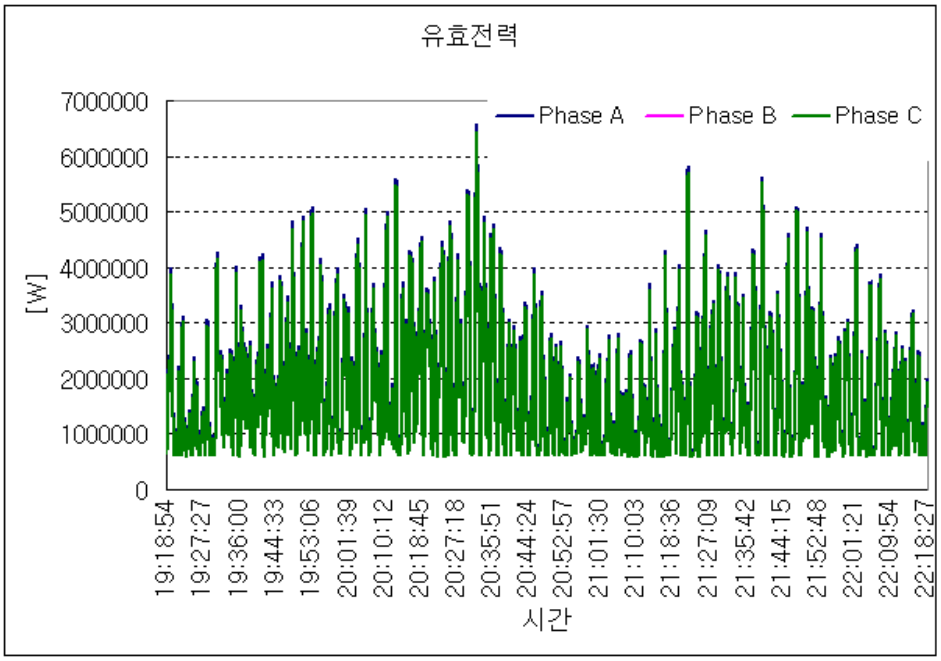


그림 3.101 3상 수전부 유효전력 측정 결과

표 3.39 3상 수전부 유효전력 측정 결과

	A상 [kW]	B상 [kW]	C상 [kW]
최대 전력	6,580.009	6,446.,976	6,548.450
최소 전력	635.325	584.598	593.623

(라) 무효전력

3상 수전부에서 측정한 무효전력은 전동차를 견인하는 부하 혹은 일반 전기계통의 임피던스에 의해 발생하며, 그 결과는 다음 그림과 같다.

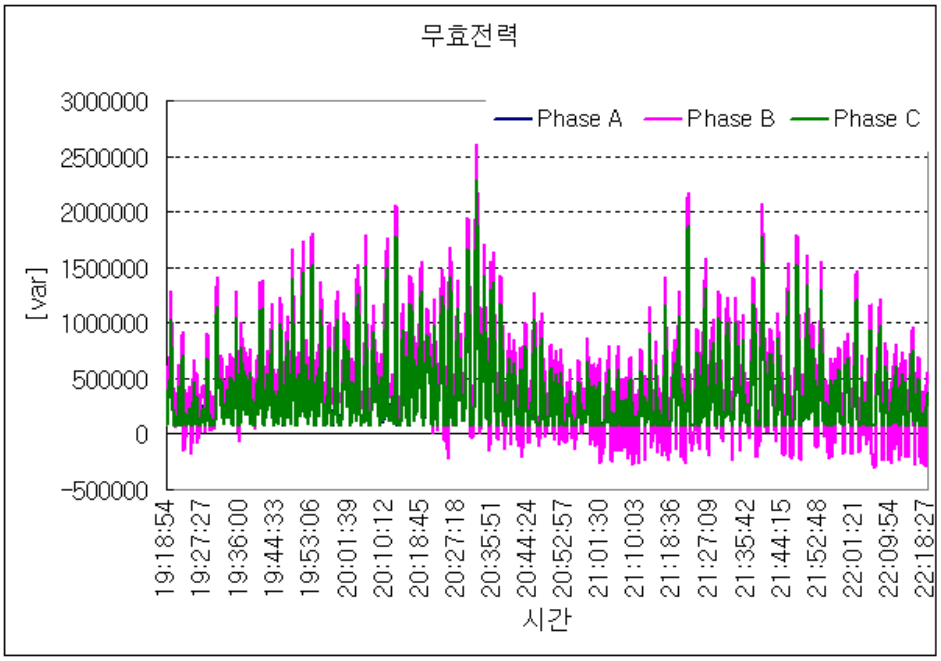


그림 3.102 3상 수전부 무효전력 측정 결과

표 3.40 3상 수전부 무효전력 측정 결과

	A상 [kvar]	B상 [kvar]	C상 [kvar]
최대 무효전력	2246.843	2606.534	2286.969
최소 무효전력	67.999	-298.288	73.362

(마) 전류 왜형율

측정된 고조파 전류를 이용하여 구한 전류 왜형율은 다음 그림과 같다. 그림에서 보듯이 전류 왜형율은 B상의 레벨이 가장 높고 C상, A상 순으로 높았다. 또한 최대 전류 왜형율은 B상의 10.03%로 계산되었다.

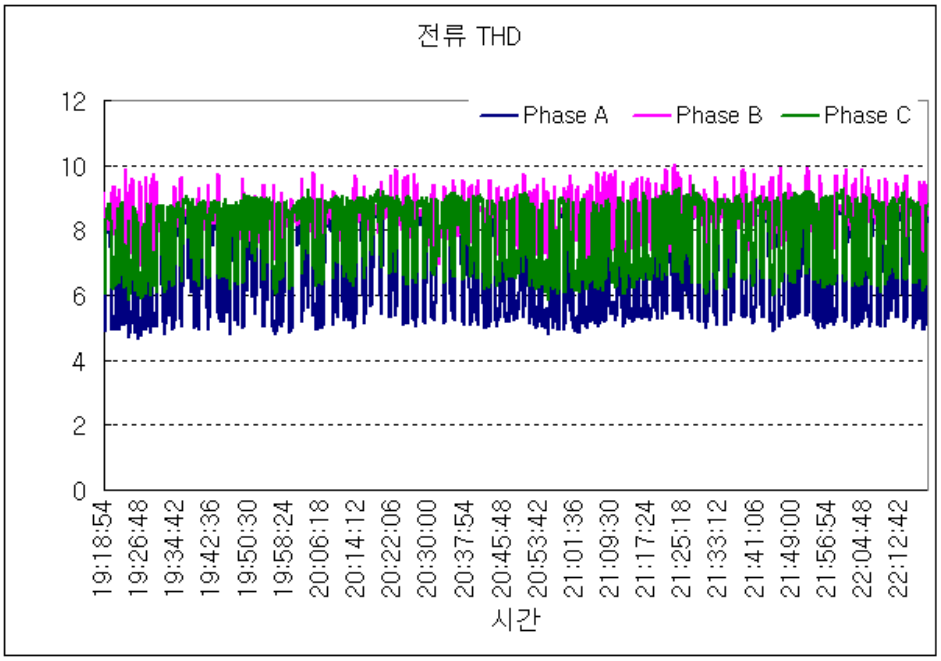


그림 3.103 3상 수전부 전류 왜형율

표 3.41 수전부 전류 왜형율 결과

	A상 [%]	B상 [%]	C상 [%]
최대값	9.2	10.03	9.4
최소값	4.68	6.93	5.85

(바) 전압 왜형율

위의 전류 왜형율과 마찬가지로 수전부에서 측정한 전압 고조파를 대상을 왜형율을 계산한 결과는 그림 3.104에 나타내었다. 그림에서 보듯이 전압 왜형율은 최대 2.6%에서 최소 1.1%까지 분포하며, 앞의 유효전력 측정결과 그림과 비교하여 볼 때 부하의 크기가 클수록 전압 왜형율도 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 부하의 크기가 크면 그에 따라 전압이 낮아지기 때문이다.

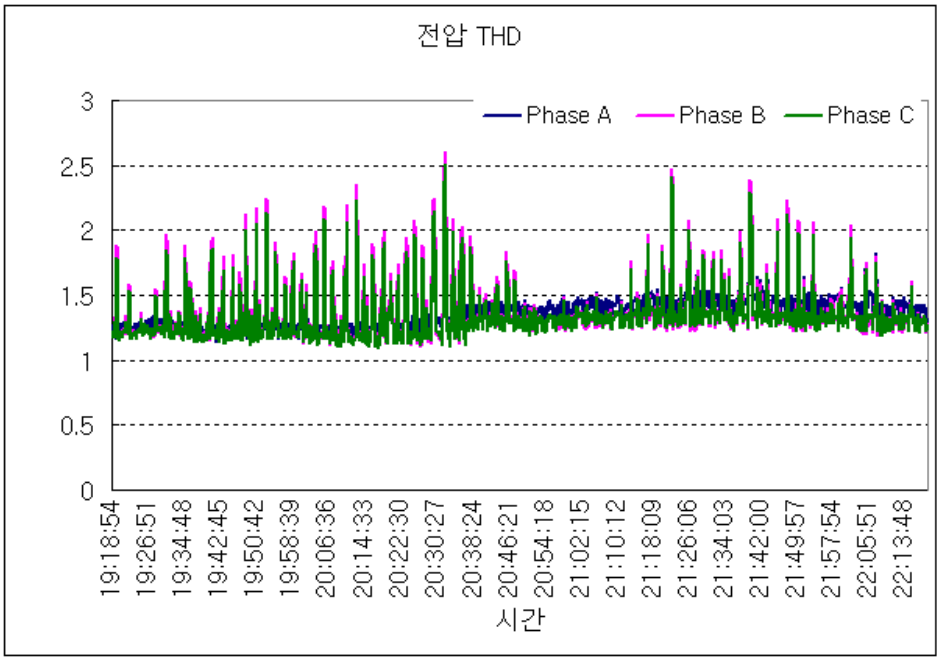


그림 3.104 3상 수전부 전압 왜형율 결과

표 3.42 수전부 전압 왜형율 결과

	A상 [%]	B상 [%]	C상 [%]
최대 전력	2.57	2.6	2.51
최소 전력	1.14	1.1	1.09

(1) DC 측정

도시철도 직류급전시스템은 수전받은 22.9kV의 3상전력을 정류기를 통하여 직류로 변환한 후에 전동차에 공급한다. 아래 그림은 직류급전부에서 측정한 전압 및 전류의 측정 결과이다.

(가) 전압

도시철도에서는 급전시스템의 공칭전압은 DC 1,500[V] 이용하고 있으며, 전동차가 가속을 위하여 에너지를 사용할 때에는 전압이 낮아지고, 감속을 위하여 전기제동을 사용할 때에는 전압이 상승한다. 아래 그림은 1시간 동안 측정한 전차선의 전

압으로서 최대 1,760[V]에서 최저 1,447[V]로 측정되었다. 도시철도의 이용승객이 많은 시간대의 결과임에도 불구하고 전압강하는 적정수준을 유지하였다.

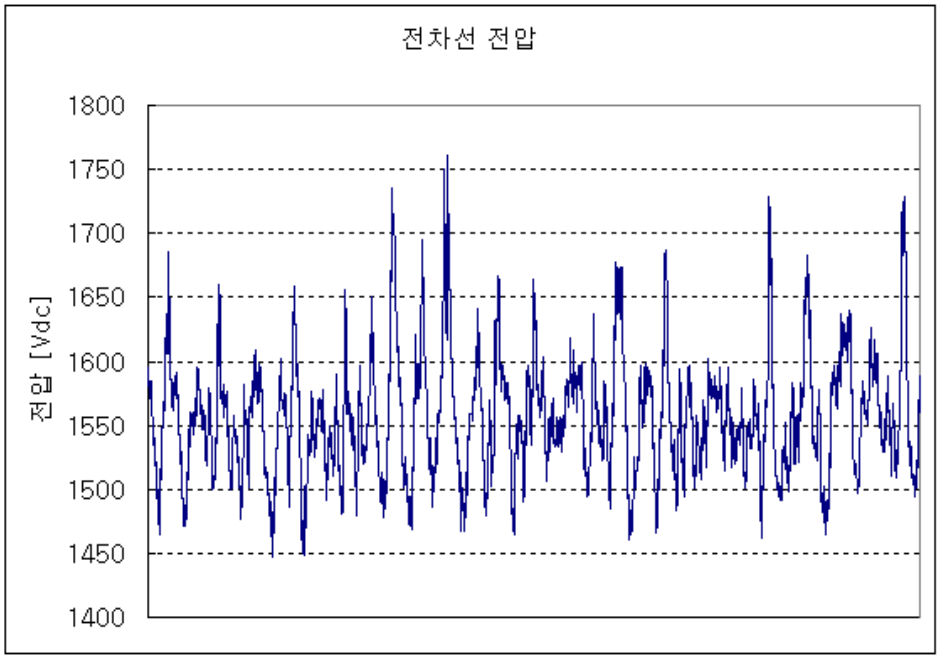


그림 3.105 직류 급전부 전압 측정 결과

(나) 전류

전류의 경우, 그림 3.106과 같이 측정되었다. 그림의 결과는 피더 1~4에서 측정한 것으로서 대체적으로 최대 전류 레벨이 3,000[A]~4,000[A] 정도에서 나타났으나, 피더 2의 경우 순간적으로 6,000[A] 이상까지 상승하였다.

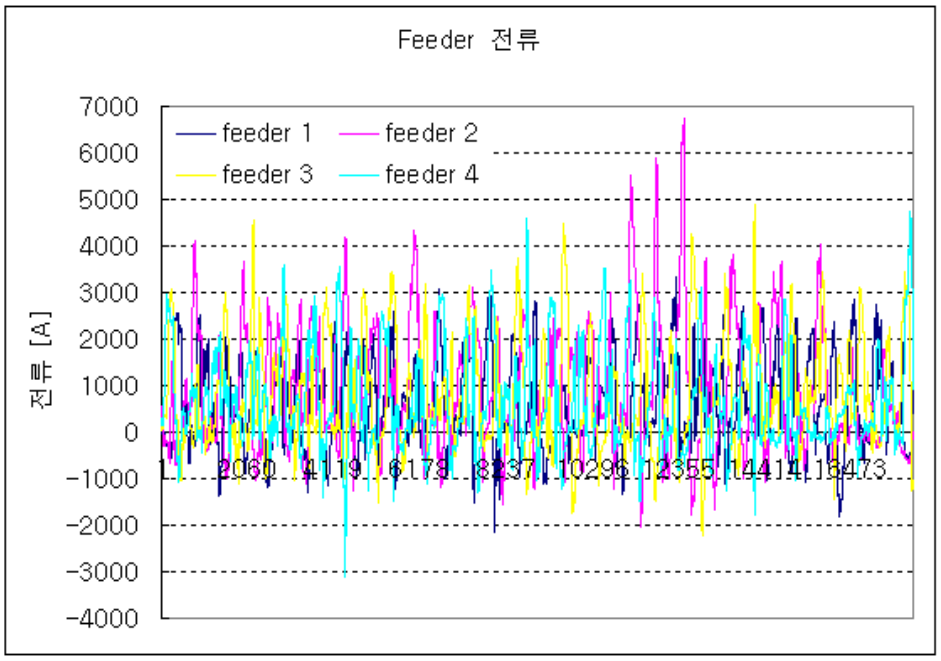


그림 3.106 직류 급전부 전류 측정 결과

나. 검토 및 결론

(1) 고조파 필터 동작 요건

본 연구에서 개발한 회생용 인버터 시스템은 앞서도 설명하였듯이 전동차의 회생제동으로 직류급전부에서 발생한 회생전력을 일반 전기계통으로 공급하는 역할을 하게 되고, 회생전력이 발생하지 않을 때에는 급전시스템에서 발생하는 고조파를 저감하는 능동전력필터로 동작할 수 있다.

전동차는 시간에 따라 이동하는 이동집중부하로서 가속과 감속을 반복한다. 따라서 회생용 인버터도 이에 따라 응동하여야 한다. 여기서는 인버터가 회생전력을 공급하는 역할이 아닌 고조파 필터로서 동작할 때의 충족하여야할 조건을 설명한다.

도시철도는 수전받은 3상 교류 전력을 정류기를 통하여 직류로 변환하여 전동차를 구동하기 때문에 전력변환과정에서 발생하는 고조파가 3상계통으로 유입된다. 그러나 고조파 전류의 필터링은 고조파 전류의 완전 제거는 현실적으로 어렵다. 즉, 능동전력필터도 용량 한계가 있기 때문에 필터 사용으로 얻을 수 있는 가장 효과적인 대상 조파 전류를 선택하고, 그 저감량을 결정해야 한다. 다음은 능동전력필터의 동작 조건이며, 각 조건은 발생한 고조파중 필터링 대상 고조파의 전류크

기, 인버터의 용량에 대한 한계로 규정할 수 있다.

i. 대상 고조파 전류의 크기

아래 식은 능동전력필터에서 필터링 대상으로 하는 차수의 전류가 기준으로 정한 크기 이상으로 계통에 유입될 때, 필터가 동작해야 한다는 것을 의미한다. 물론, 대상이 되는 차수의 전류는 다수가 될 것이다.

$$I_{i_{th}} \geq I_{i_{th}}^{\min}$$

여기서, $I_{i_{th}}$: 계통에 유입되는 i차 전류의 RMS 값 [A]

$I_{i_{th}}^{\min}$: i차 전류의 필터링 개시 최소전류 값 [A]

단, i는 필터링 대상 전류의 차수

ii. 인버터의 전류 한계

i.에서 필터링 대상 전류의 동작 개시 최소값을 조건으로 설정 하였다면, 아래 식은 대상 전류의 RSS(Root Sum Square)값이 전력필터의 전류 용량보다 작아야 한다는 것을 의미 한다.

$$\sqrt{\sum (k_{i_{th}} I_{i_{th}})^2} \leq I_{inv}^{\max}$$

여기서, $k_{i_{th}}$: i차 전류의 저감비율

$I_{inv}^{\max}$: 필터의 전류 용량

iii. 능동전력필터의 용량 한계

전류의 한계와 마찬가지로 피상전력의 최대값도 동작조건이 된다. 즉, 수전받는 전력의 크기와 사용되고 있는 전력의 차가 능동 전력필터의 정격용량보다 커야 한다. 이 조건은 능동 전력필터도 동작시 직류급전시스템의 부하로 작용하기 때문에 전체 시스템의 용량내에서 동작될 수 있음을 나타낸다.

$$S_{rate}^{sys} - (S_{traction} + S_{station}) \geq S_{rate}^{inv}$$

여기서, S_{rate}^{sys} : 급전시스템에서 수전받는 전력의 용량 [VA]

$S_{traction}$: 전동차 견인에 소요되는 전력 [VA]

$S_{station}$: 일반 전기계통에서 소요되는 전력 [VA]

S_{rate}^{inv} : 능동 전력필터의 정격용량 [VA]

iv. DC 전압 한계

능동 전력필터는 직류 급전부의 DC 전압을 전원으로 사용하여, 교류 계통에 유입된 대상 조파 전류의 일정 부분을 동일 조파의 전류를 반대 위상으로 유입시켜 고조파 전류를 감쇠시킨다. 따라서, 직류 급전부의 직류전압이 일정 수준으로 이상으로 유지 되어야 동작이 가능하므로 다음 식과 같은 조건이 성립된다.

$$V_{traction} \geq V_{inv}^{\min}$$

여기서, $V_{traction}$: 전차선 DC 전압 [V]

$V_{inv}^{\min}$: 능동 전력필터의 최소 동작 전압 [V]

이상과 같이 회생용 인버터는 위의 동작 조건을 만족하여야만 능동 전력필터로 동작할 수 있다.

(2) 필터링 대상조파 저감량

위에서와 같은 조건으로 능동 전력필터가 동작하면, 필터는 주어진 알고리즘에 의하여 발생된 고조파 전류를 저감시킨다. 이때, 필터링 대상을 어떻게 선정하는가에 따라서 고조파 저감효과는 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고조파 차수별 전류의 저감량을 선정하는 방법을 제안한다.

그림 3.107~109는 교류계통에서 측정한 차수별 고조파 전류를 보여주고 있다. 그림의 전류 값은 3조파에서 49조파까지이며, 전류값은 1시간 측정값 중 최대값을 나타낸다. 각 상의 측정결과가 보여주듯이, 5, 7, 11, 13 조파의 전류가 다른 차수에 비하여 큰 값을 나타낸다. 그 이유는 △-△, △-Y 변압기 2대로 12펄스 정류를 하는 선릉변전소에서 1개 변압기 1차측에서 측정한 전류의 고조파량이기 때문이다. 전철변전소에서 발생하는 고조파를 위의 4개 조파라고 가정하고, 이 4개의 조파를 필터

링 한다면, 4개의 전류크기의 합에서 각 조파가 차지하는 비율만큼 필터의 보상량을 결정하는 방법을 취하였다. 즉, 각 상별로 계산하여 보면, 다음과 같다.

A상의 경우,

- 대상조파들의 전류 합 : 41.3 [A]
- 대상조파들에서의 비율

  : 41.8%(5조파), 18.1%(7조파), 25.0%(11조파), 15.1%(13조파)

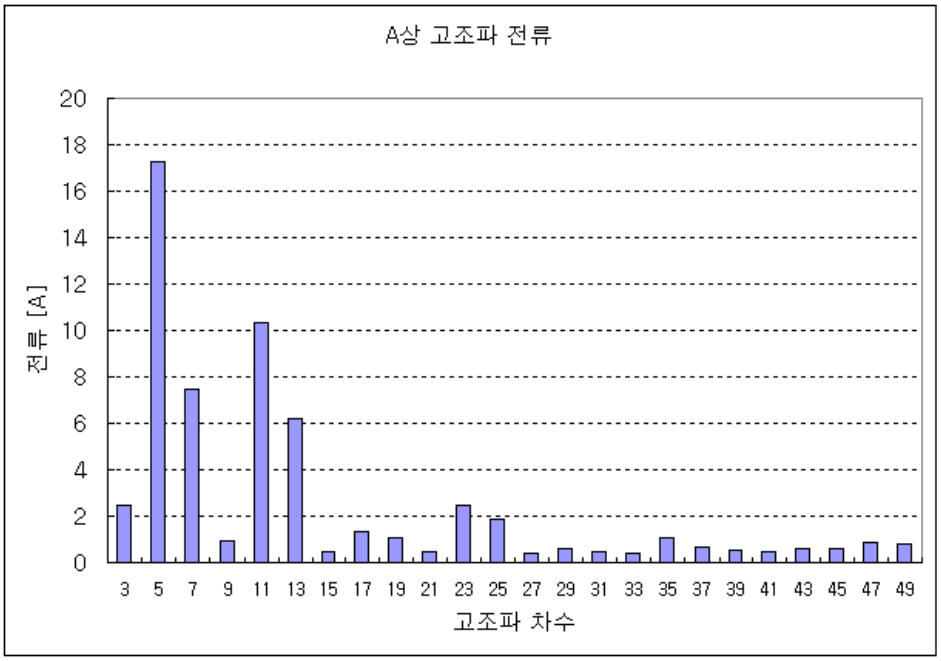


그림 3.107 3상 수전부의 고조파 전류 최대값 (A상)

B상의 경우,

- 대상조파들의 전류 합 : 40.4 [A]
- 대상조파들에서의 비율

  : 40.0%(5조파), 18.5%(7조파), 24.6%(11조파), 16.9%(13조파)

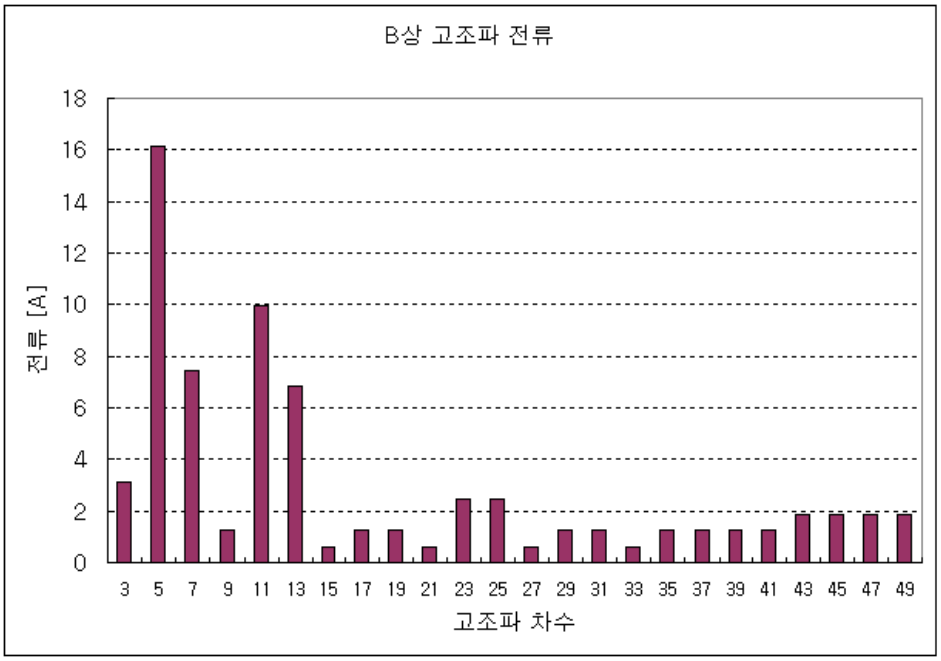


그림 3.108 3상 수전부의 고조파 전류 최대값 (B상)

C상의 경우,

- 대상조파들의 전류 합 : 41.9 [A]

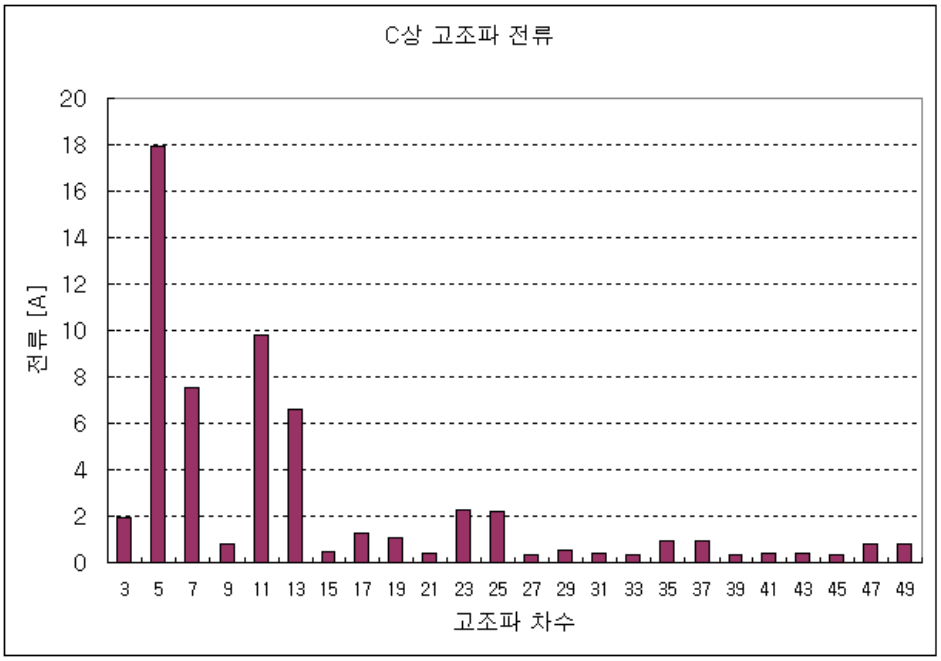


그림 3.109 3상 수전부의 고조파 전류 최대값 (C상)

- 대상조파들에서의 비율

: 42.9%(5조파), 18.0%(7조파), 23.4%(11조파), 15.8%(13조파)

위의 결과처럼 5조파의 경우 41%, 7조파의 경우 18%, 11조파의 경우 25% 13조파의 경우 16% 정도의 비율로 필터링을 한다면, 비교적 양호한 저감 효과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 이 저감비율은 향후 계측과 피시품의 시험을 통하여 더욱 최적화된 방향으로 변경될 수 있다.

3. 급전계통 인터페이스

가. 직류급전시스템

우리나라 도시철도 직류급전시스템의 전력공급은 한국전력의 변전소로부터 도시철도 전용 선로를 통하여 교류 3상 22.9kV로 직류전철변전소에서 수전을 받으며 도시철도 각 변전소 간에 전력계통을 상호 운영하고자 22.9kV 연락송전선로를 구성하여 무정전 상태를 유지하도록 하고 있다. 직류전철변전소에서는 전차선용 전력을 위하여 22.9kV의 수전전압을 강압하고, 정류기에 인가하여 직류 1,500V로 변환, 전차선 설비를 통하여 철도차량에 급전하고 있다.

도시철도변전소는 전압강하 등을 고려하여 약 4 ~ 10 km 정도의 간격으로 배치되어 철도시스템에 전력을 공급하고 있다. 또한, 직류급전시스템은 인접한 직류전철변전소가 병렬로 접속되는 병렬급전방식을 표준으로 하고 있다. 급전시스템은 변전소(SS : Substation), 급전구분소(SP : Sectioning Post), 급전타이포스트(TP : Tip-post), 정류포스트(RP : Rectifying post) 등으로 구성되어 있고, 그 배치는 그림 3.110과 같다.

각 회선은 이상 시 외에 고속도 차단기에 의하여 다른 계통과 분리되도록 되어 있으나 정상 급전 시에는 전압강하의 경감, 섹션에서의 아크 방지 때문에 급전선과 변전소 및 급전구분소 모선을 전기적으로 연결하여, 인접 변전소와 병렬급전방식으로 운영하고 있다. 이 방식은 변전소 간의 중간점에 상하의 급전선을 직류 모선으로 연결하고, 급전회로의 저항을 낮게 하여 전압 강하를 경감시키는 방식인데, 복선 구간의 시간대에 따라 상하선의 부하가 크게 다른 구간에 유효한 방식이다.

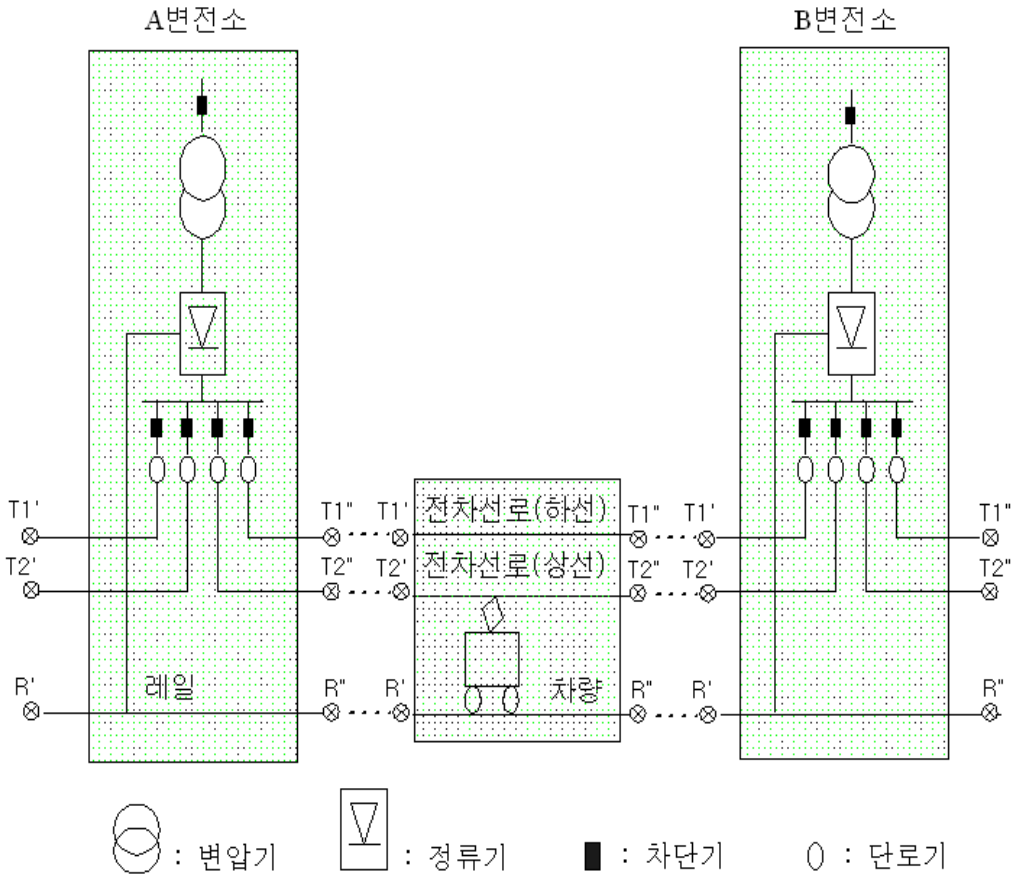


그림 3.110 직류급전시스템 구성

(1) 직류급전시스템의 설비구성

변전소는 수전한 교류 3상 전원을 전기차의 공급 전원에 적합한 형태로 변환시켜 공급하여 주는 역할을 수행한다. 직류변전소는 수전설비, 변성설비, 급전설비, 고압배전설비, 소내전원설비 등으로 구성되어 있다.

(가) 수전설비

○ 송전선로에서 특별고압의 전원을 수전하기 위한 설비들

○ 교류차단기(52R), 단로기(89R), 계기용변류기(CT), 계기용변압기(PT), MOF (Metering Out Fit), 수전모선, 보호계전기

(나) 변성설비

○ 수전모선의 분기로부터 교류차단기, 정류기용 변압기, 정류기와 정류기 2차측 고속도 차단기를 경유하여 직류모선까지의 설비들

○ 정류기용 변압기, 실리콘 정류기, 교류차단기(52), 직류고속도차단기(54), 변류기(CT), 보호계전기

(다) 급전설비

○ 직류모선으로부터 각 방면별 급전 개폐장치를 통하여 급전선에 접속된 설비들

○ 직류 고속도차단기(54F), 단로기(89F), 직류변류기(DCCT), 분류기(SHUNT), 직류모선, Z모선, 피뢰기, 보호계전기

(라) 고압배전설비

○ 고압배전설비는 22.9kV의 수전전압을 열차의 운전 및 승객 수송에 필요한 신호, 조명, 동력, 환기, 냉방 등의 설비에 전원 공급을 목적으로 22.9kV를 6.6kV로 변압하여 공급하는 설비

○ 6.6kV의 전압은 고압모선에서 3회선으로 배전하게 되며, 이들 중 2회선(1호계, 2회계)은 조명, 동력, 신호설비 등에 전력을 공급하고, 3호계는 터널환기와 역사 냉방설비 등에 전력을 공급

○ 경우에 따라서 3호계는 1 · 2호계의 예비설비로도 활용할 수 있도록 구성

(마) 소내전원설비

○ 고압배전설비의 고압배전 단로기 2차측에서 분기된 소내 전원공급설비

○ 변전소내 차단기 등의 투 · 개방전원, 각종 계전기 동작 전원, 각종 제어전원, 변전소내의 조명, 환기, 전열기 등의 일반 부하에 전원을 공급

○ 소내변압기 1, 2호, 자동절체스위치, 충전기, 축전지

(2) 직류급전시스템의 보호계전기

직류급전시스템 보호설비는 크게 보호계전기, 교류차단기 및 직류 고속도차단기로 구성되어 있다. 차단기를 동작시키기 위한 보호계전기는 보호대상인 설비의 전

기방식(교류, 직류), 접지방식(유효접지, 비유효접지) 등에 따라 종류와 기능을 다르다. 그림 3.100은 직류급전시스템의 보호시스템을 나타내며, 각 계통에 따라 설치된 보호계전기의 종류와 기능을 제시하였다.

(가) 송, 수전, 연락수전 계통

○ 순시, 한시과전류계전기(50, 51) : 변전소 구내 단락사고 및 과부하 보호

○ 접지과전류계전기(50/51N) : 변전소 구내의 지락사고 보호

○ 무전압계전기(84) : 연락급전선의 가압상태를 확인하여 양측의 다른 계통과의 혼촉사고를 보호

○ 부족전압계전기(27) : 주모선에 설치하여 변전소의 정전에 대비

(나) 정류계통

○ 순시, 한시과전류계전기(50R, 51R) : 정류기 내부단락 및 과부하 보호

○ 접지과전류계전기(50/51N) : 정류기 교류측 지락사고 보호

○ 압력계전기(63) : 정류기용 변압기 절연 보호

○ 온도계전기(26) : 정류기용 변압기, 정류기의 과열보호

○ 접지계전기(64) : 정류기함 접지 또는 내부접촉검출

○ 정류이상계전기(58) : 정류기 다이오드의 이상검출

○ 역류계전기(32) : 정류기 소자 등의 고장으로 인해 병렬운전 중의 인접변전소로부터 전류가 흘러 들어오는 것을 검출

○ 직류과전류계전기(76) : 정류기 2차측에 설치하여 직류과전류 검출

(다) 직류급전회로 계통

○ △I 고장선택장치(50F) : 급전구간 내에 전차선의 단락사고 검출

○ 직류 과전류 계전기(76F, 176F) : 급전회로의 과전류(순시, 한시)검출

○ 직류 지락과전압 계전기(64P) : 급전 구간내 직류 고압의 지락사고 검출

○ 연락차단장치(85F) : 인접 변전소간의 병렬 급전에 따라 전차선 구간 사고시 사고확대를 예방하기 위해여 상호 연락차단 신호를 검출

(라) 고압배전 및 소내전력계통

○ 순시, 한시과전류계전기(50, 51) : 고압배전계통 내의 단락사고 및 과부하 보호

○ 접지과전류계전기(50/51N) : 고압배전계통 내의 지락사고 보호

○ 온도계전기(26) : 고압배전용 변압기 및 소내용 변압기의 과열검출

○ 지락과전류계전기(64) : 고압배전 계통내의 지락사고 보호

○ 선택지락 계전기(67) : 고압배전 계통내의 지락사고시 고장회선만을 선택하여 차단하기 위한 방향성 지락보호

○ 부족전압계전기(27) : 고압배전계통 내의 저전압 검출

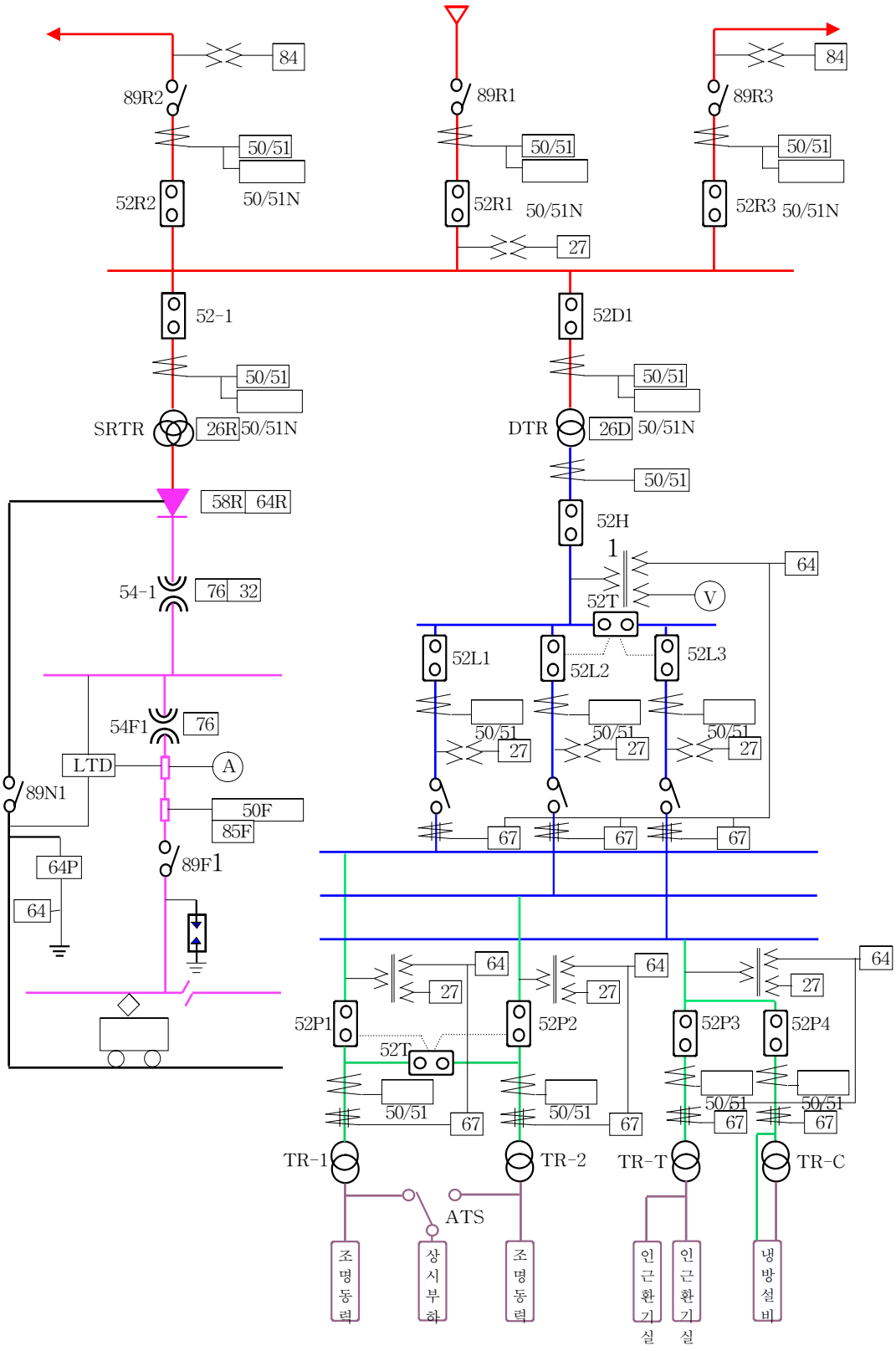


그림 3.111 직류급전시스템 보호계통도

(3) 회생차량 도입에 따른 보호계전기 동작특성

(가) 지상측 보호계전기

직류 급전회로 보호를 위한 지상설비로는 일정시간동안 사고전류와 부하전류의 크기 변화를 이용하여 고장을 검출하는 △I 고장선택장치(50F)와 과도전류로부터 급전회로를 차단하는 직류 고속도 차단기(54F)가 있다. 또한 변전소 구내의 직류모선 지락사고에 대해서 변전소 접지극의 전위상승을 검출하는 직류접지전압계전기(64P)가 있다.

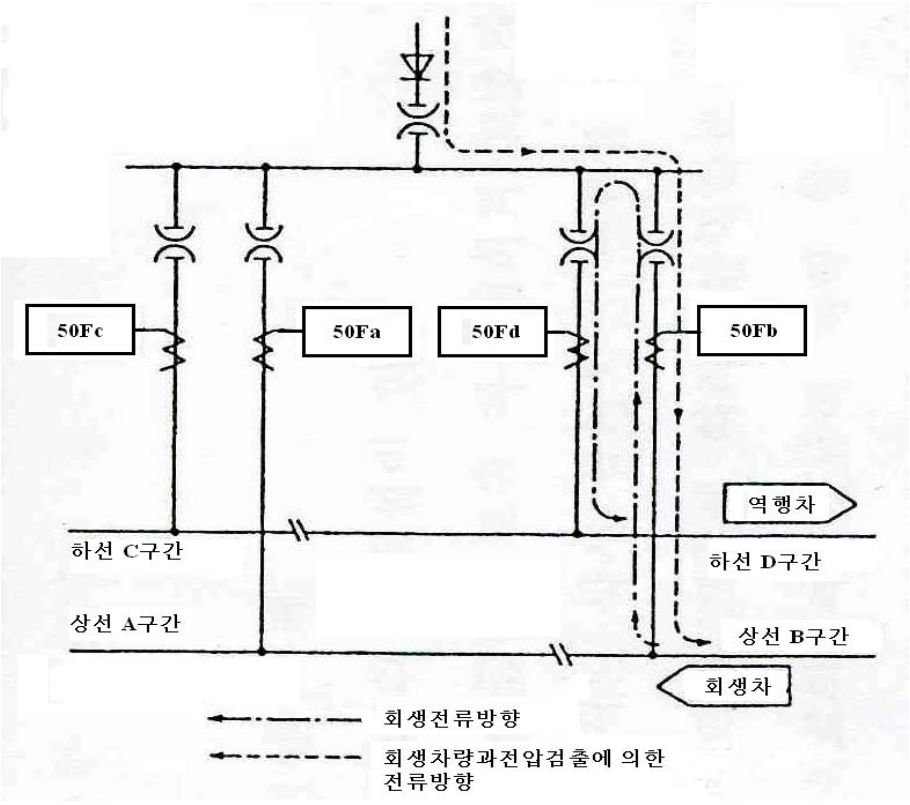


그림 3.112 회생차량에 의한 △I 고장선택장치(50F)의 오동작 사례

표 3.43 △I 고장선택장치(50F) 특성 비교

종류	전자형	FM형	MEF형 (전류방향 판별형)	구배추적형 (디지털형)	윈도우형
제품명	EF-	FM-	MEF J- MEF H-	EFD-2-200	EFD-W-4Z
사용 시기	1976년	1984	1992	1987	1991
특징	<추종성 향상> 1. HSCB에 의해 자동 차단된 급상승하는 전류라도 정정값 이상이라면 검출 2. 역방향의 사고차단 전류에서 오동작하지 없음	<분해능 향상> 1.부하전류의 △I에 대한 분해능력 향상(100ms) <회생차 대응> 2.(-)전류 급감에 따른 오동작 문제에 대해 「전(全)선 보상식」으로 대응	<분해능 향상> 1.부하전류의 △I에 대한 분해능력 향상(100ms) <회생차 대응> 2.자기회선 (-)방향 전류를 무시하므로 (-)방향 전류 급감에 좌우되지 않음	<분해능 향상> 1.부하전류의 △I에 대한 분해능력 향상(2ms) <회생차 대응> 2.자기회선 (-)방향 전류를 무시하므로 (-)방향 전류 급감에 좌우되지 않음	<분해능 향상> 1.부하전류의 △I에 대한 분해능력 향상(40ms) <회생차 대응> 2.(-)방향 전류를 무시하므로 (-)방향 전류 급감에 좌우되지 않음.
분해 능력	약 1s	100ms	100ms	2ms	40ms
(-)전류 급감시 동작 (자(自)회선 회생전류 급감)	(+)전류 급증으로 간주	(+)전류 급증으로 간주, 전회선보상으로 (+)전류 급감 회선에서 보상	자기회선의 (-)값 변화는 무시	자기회선의 (-)값 변화는 무시	(-)값 변화는 무시
(-)전류 급증 시동작 (후방 회선)	섹션 보상 요인	섹션 보상 요인	섹션 보상 요인	섹션 보상 요인	(-)값 변화는 무시
주 정정값	1~3kA까지 0.5A 간격	0.5~1.5kA까지 1~3kA까지 2~4kA까지 2.5~5kA까지 0.25A 간격	1~3kA까지 2~4kA까지 0.25A 간격	△I/ms : 0~200 A/ms 10/ms 간격 I : 0.3~4kA 0.1kA 간격	0.4~4kA까지 0.2kA 간격
재폐로 시 감도 정정값	주 정정값의 50% (자동 설정)	주 정정값의 50% (자동 설정)	주 정정값의 50% (자동 설정)	주 정정값의 50, 60, 70, 80, 90% (선택 설정)	0.4~4kA까지 0.2kA 간격 (독립 설정)
DCCT	코일식	코일식	코일식+홀 소자식	홀 소자식	홀 소자식
동작 시간	α=50±5, 증가분이 정정값의 300%에서 증가분 개시부터 35ms 이내				
과도 특성 (순시 대전류로의 추종)	고속도 차단기가 단락 전류를 자동 차단하고, 그 전류값이 장치의 정정값을 초과했을 때는 지체없이 동작				
저(底)부하 특성	정격 전류값의 기초값이 있는 경우, 기본 특성과의 유도(裕度)는 ±6.5% 이내				
섹션 보상율	50% (고정)	50% (고정)	50% (고정)	0~90%까지 10% 간격 (설정)	50% (고정)
섹션 보상관계의 설정	섹션 보상용 CT의 설치에 의한 임의의 설정 가(可)	「전선 보상식」 : 모든 타(他) 회선의 $-i_{100}$ 중 가장 큰 $-i_{100}$로 보상	4회선 임의 설정 가능. 본체 내에서 설정	마주 향하는 2회선 간으로 한정 본체 내에서 설정	4회선 임의 설정 가능. 본체 내에서 설정

회생차의 운행으로 인해 급전회로 보호를 위한 △I 고장선택장치(50F)의 오동작이 발생할 수 있다. 그림 3.111과 같이 회생하고 있는 열차 부근의 역행차가 역행을 중지하는 경우에는 회생전력이 소모되지 않아 전차선로의 전압이 상승되어 순간적으로 △I값이 계전기의 정정값보다 커지게 된다. 이러한 오동작을 방지하기 위해서 부방향(회생전류방향)의 전류에서는 동작하지 않고, 정방향(급전방향)의 전류방향에서만 동작하는 계전기가 사용되고 있다.

표 3.43은 현재 적용중인 △I 고장선택장치(50F)의 종류와 각각의 특성을 나타낸 것이다.

(나) 차상측 보호계전기

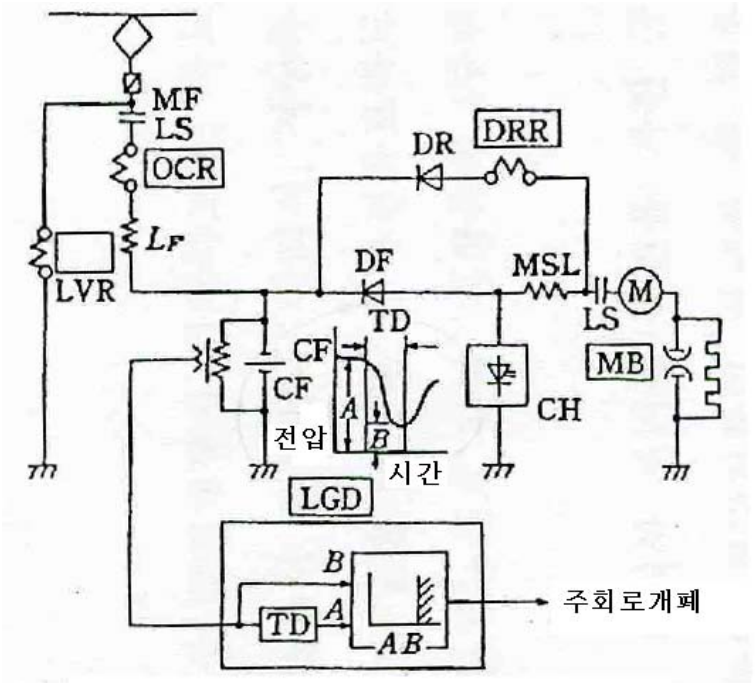


그림 3.113 차량보호시스템

차량의 보호설비로는 그림 3.113과 같이 주회로의 과전류를 검출하는 과전류계전기(OCR)와 회로전압의 저하를 검출하는 저전압계전기(LVR) 또는 사고시 전압변동

을 검출하는 가선 접지검출기(LGD)로 사고를 검출한다. 검출된 신호로부터 고속도 차단기(MB)를 동작시켜 차량내 회로를 보호한다.

회생차량이 운행에 따라 가선전압이 전체적으로 상승하여 차량 내부의 과전압 보호장치의 동작이 발생할 수 있다. 또한 회생차량의 회생 중에 급전회로에서 아크를 동반한 단락사고가 발생한 경우에 회생중인 차량에서는 고장발생시의 전압강하분인 △V를 검출하여 가선 접지검출기(LGD)로 사고를 검출한다. 하지만 회생차량이 변전소 부근에 존재하는 경우에는 △V의 크기가 매우 작아져 검출이 어려워진다. 이러한 경우에 변전소의 전류공급은 차단되었지만 회생차량으로부터 사고점으로 지속적인 전류가 공급되어 사고 확대가 야기될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 변전소의 고속도 차단기의 과전류 검출 및 자기 트립(trip) 기능을 부가하거나 변전소의 △I고장선택장치의 기능과 같이 필터 콘덴서 전압을 감시하여 규정치 이상으로 전압이 저하되면 동작하는 기능을 부가하고 있다. 또한 LGD의 정정치를 낮추는 것이 요구되나 급전선의 전압 리플(ripple)이나 저항제어차의 전류 변화분으로 인한 오동작을 발생시킬 수 있어 이를 고려한 최적의 정정값을 선정해야 한다.

이와 같이 회생차량 도입으로 인한 지상측, 차상측 보호설비의 오동작이 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해서는 보호계전기의 적정한 정정값을 선택하거나 계전기간의 긴밀한 보호협조가 요구된다. 뿐만 아니라 전력저장장치나 회생인버터 등을 도입하여 회생시 발생하는 회생전류의 적절한 제어가 요구된다.

4. 계통연계기술

가. 계통연계기술 검토

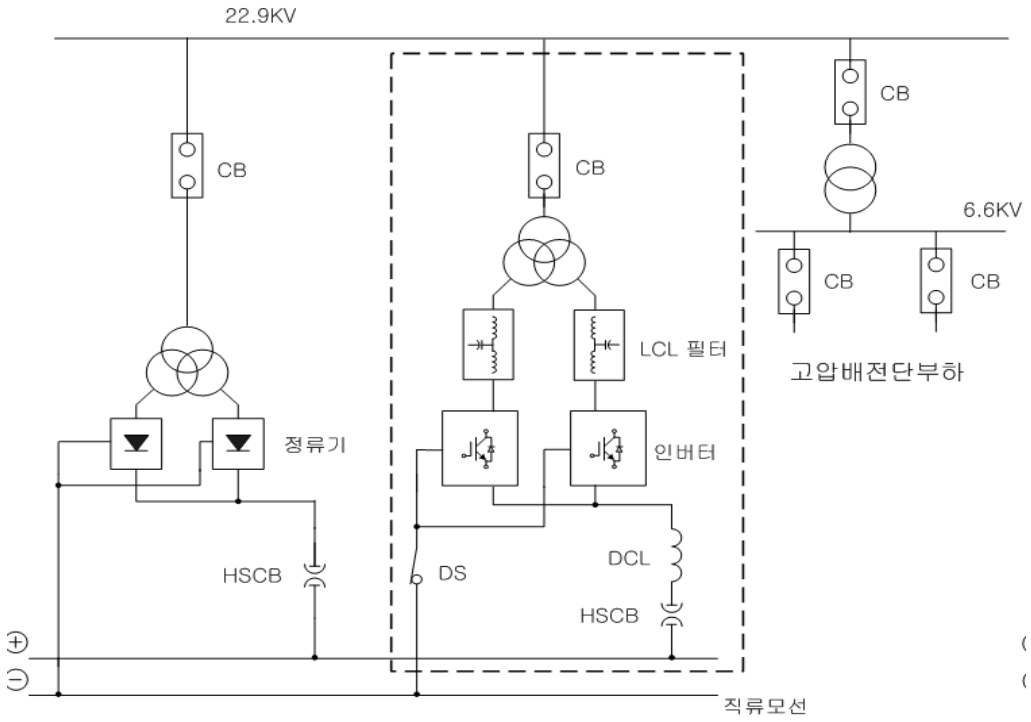


그림 3.114 회생인버터 변전소 설치도

그림 3.114는 개발중인 차세대 회생인버터 시스템의 변전소 설치도이다. 본 연구에서 개발한 회생인버터의 경우에는 차량 역행시 정류기에서 전력을 공급하는 시점에서는 능동형 필터 역할을 수행하며, 차량 회생시 정류기의 전력공급이 중단되는 시점에서는 회생전류를 22.9kV 고압배전단 부하로 전력을 공급하도록 되어있다. 따라서 기존의 특고압 배전선로에 연계되어 능동형 필터와 고압배전계통 부하에 전력을 공급하는 역할을 수행한다.

에너지 회생장치를 고압배전계통에 안정적으로 연계하여 운영하기 위해서는 에너지 회생장치의 연계운전기능인 동기투입제어, 유,무효 전력제어, 자동전압조정, 자동역률조정 등과 연계설비인 수전 및 고압배전설비인 변압기, 차단기, 보호계전기, 고조파필터, 무효전력보상설비 등의 기능을 고려해야 한다. 특이 상호간의 연계운전에 있어서 검토되어야 할 기술적인 사항은

○ 전력품질(전압변동, 고조파, 주파수, 상불평형, 역률)

○ 보호협조(계통측 및 시스템의 설비보호, 단락용량)

○ 안정성(운전제어, 협조제어, 유/무효전력제어)

로 요약될 수 있다.

(1) 전압변동

고압배전단에 전력을 공급하기 위해서는 적정범위의 일정전압을 유지해야 한다. 일반적으로 수전계통으로부터 전력을 공급받는 경우에는 변압기 탭 변경 등을 통해 일정전압을 유지할 수 있다. 하지만 에너지 회생장치가 도입되는 경우에는 회생시 연계점의 전압상승을 일어날 수 있어 적정한 전압을 유지할 수 없게 된다. 특히 에너지 회생장치로부터 공급되는 전력은 미리 예측할 수 없기 때문에 전압변동이 더욱 더 심해질 수 있다. 따라서 회생장치의 제어특성에 따라 공급점의 전압변동에 대한 기술검토가 요구된다.

(2) 고조파

에너지 회생장치는 인버터를 이용하여 직류/교류변환을 하기 때문에 고조파가 발생한다. 고조파의 발생량은 인버터 방식에 따라 다르지만, 그것이 계통의 허용량을 초과하게 될 경우는 고압배전단에 접속되어 있는 타 부하기기의 동작에 악영향을 초래할 우려가 있다. 현재 개발중인 회생장치의 경우에 내부에 고조파를 제거할 수 있는 필터를 삽입하여 외부로 유출되는 고조파를 최소화하도록 되어 있지만, 향후 성능평가에 따라 고조파 발생에 따른 고조파 필터 등의 고조파 억제요소를 고려해야 한다.

(3) 주파수

에너지 회생장치를 통해 회생 에너지를 공급받는 중에 고장 등의 여러 요인으로 인해 회생장치의 출력이 순간적으로 0이 되는 경우에 일시적인 주파수의 변동이 발생할 수 있다. 회생장치를 통해 공급받는 전력량이 크지 않는 경우에는 크게 문제가 없겠지만 전반적인 시스템 안전성을 확보하기 위해서는 이러한 경우를 대비한 분석이 필요하다.

(4) 역률

배전계통에 있어서 역률유지는 선로의 전압변동, 전력손실 및 유효전력의 공급한계 등의 측면에서 대단히 중요하다. 따라서 현재 우리나라의 경우, 수용가의 역률유지규정을 0.9(지상)~1.0사이로 두고, 0.9이하의 경우는 전기요금추가, 0.9이상은 전기요금감액 등의 규정을 두고 있다. 이러한 상황에서 에너지 회생장치가 도입되는 경우에는 고압배전단의 역률에 영향을 미치게 된다. 먼저, 에너지 회생장치의 역률이 1.0으로 운전하는 경우에는 계통에 유효전력만을 공급해주기 때문에 선로의 역률은 본래보다 악화되지만, 선로의 전력손실은 적어진다. 또, 지상운전의 경우 유효 및 무효전력을 모두 계통측에 공급하게 되어 선로의 전압변동에 커다란 영향을 미치게 된다. 하지만, 선로에 흐르는 무효전력의 감소로 상위 수전변전소에서 배전선로에 공급해 주어야 할 무효전력공급량은 감소하게 된다. 한편, 진상운전의 경우 유효전력은 계통에 공급하고 무효전력은 계통측으로부터 공급받아야 하기 때문에 선로의 전압변동에 미치는 영향은 작지만, 선로에 흐르는 무효전력의 증가로 역률은 악화되고, 수전용 변전소측에서 공급해야할 무효전력량은 증가하게 된다. 따라서, 에너지 회생장치의 운전역률에 따라 기존 계통의 전압변동, 손실, 무효전력증가 등의 요소에 대한 분석이 필요하다.

(5) 상불평형

에너지 회생장치가 연계되는 배전계통이 22.9kV 다중접지방식이므로 상불평형이 발생하는 경우에는 중성선에 불평형전류가 흐르고 이로 인해 중성선 전위가 상승한다. 이로 인해 고압배전단의 3상유도전동기의 과열과 소손, 전압의 과대한 상승과 저하에 의한 정보기기의 오동작과 부동작, 가전제품의 수명손실 및 플리커 장해 등의 피해가 발생될 수 있다. 따라서 에너지회생장치로 인한 상불평을 발생시킬 수 있는 요소에 대한 분석이 요구된다.

(6) 보호협조

급전회로의 지락 및 단락사고가 발생하는 경우에 정류기 측에 고속도차단기(54F)를 이용하여 정류계통을 차단하여 보호하며 변전소 교류측에 대한 보호를 위해서는 교류차단기를 이용하고 있다. 에너지 회생장치의 경우에도 직류측 사고에 대한 보호를 위하여 고속도 차단기를 그리고 교류측 사고에 대한 보호를 위해서는

교류차단기를 이용하여 사고시 기존시스템에서 분리한다. 하지만 급전회로 사고시 정류계통측의 고속도 차단기가 동작하여 급전회로가 차단된 상태에서 에너지 회생장치 차단기기의 동작이 늦어지는 경우에 과전압 등이 발생하는 문제가 발생한다. 따라서 기존의 설비보호를 위한 보호설비와 에너지 회생장치 보호를 위한 보호설비간의 보호협조에 대한 전반적인 검토가 요구된다.

(7) 단락용량

에너지 회생장치가 연계 운영되는 경우에 사고시 기존 시스템의 차단기의 차단용량이 부족할 수 있기 때문에 다양한 사고에 대한 각 차단설비에 단락용량 검토가 수행되어야 한다.

나. 회생인버터 운영사례 검토

(1) 회생인버터 조작연동

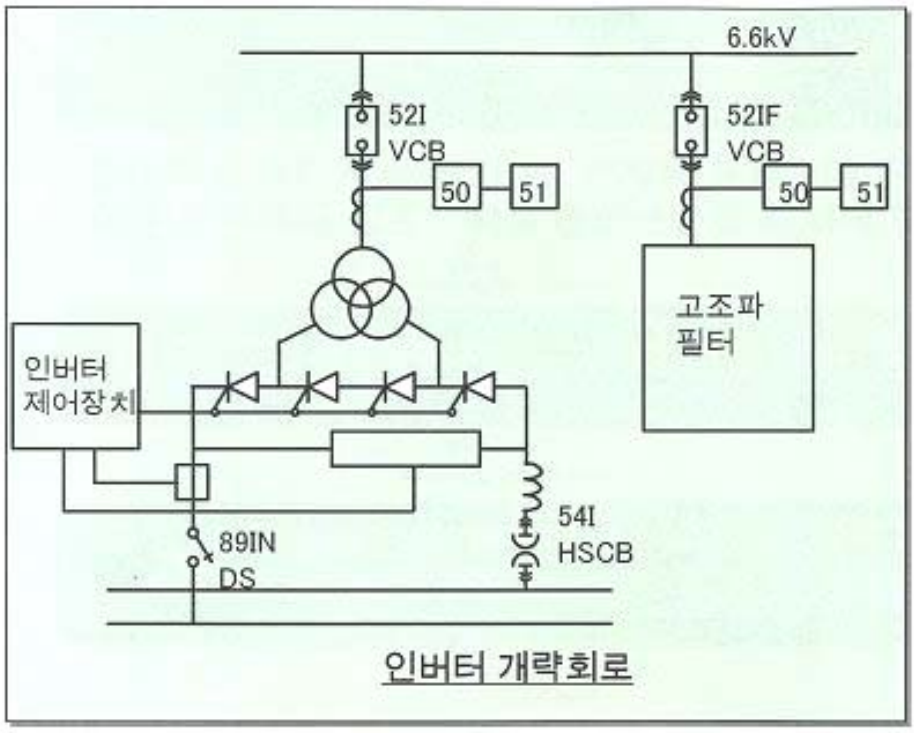
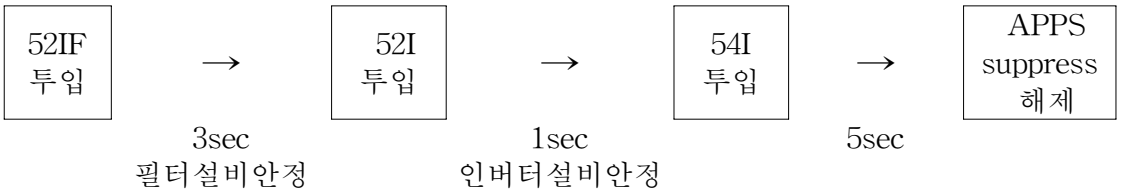


그림 3.115 회생인버터 시스템(히타찌)

일본 히타찌에서는 그림 3.115와 같이 회생에너지 흡수장치로 회생인버터 시스템을 개발하여 운영중이다. 직류 회생에너지를 사이리스터 인버터를 이용하여 교류로 변환하여 6.6kV 고압배전계통의 부하로 전력을 공급하고 있다. 고압배전계통의 부하에서 회생에너지를 이용하기 위해서 계통연계에 요구되는 부가설비는 고조파 필터, 직류 필터, 역률 및 전압보상장치, 인버터용 변압기 등의 부대설비 등으로 구성되어 있다.

회생인버터의 계통연계를 위해서는 아래와 같은 절차에 의해 운영되고 있다.

ⅰ) 투입시(ON 조작)



ⅱ) 개방시(OFF 조작)

- 52IF, 52I, 54I 동시 개방
- 52I를 54I보다 먼저 개방하는 경우에는 전류용 전원을 상실하여 전류가 실패하고, 이러한 경우에는 직류측 사이리스터를 통해 단락상태가 되고 52I 개방단은 역여자되어 고전압이 인가됨
- 54I 개방시 전류가 실패한 경우에는 교류측 전압과 직류측 전압이 합쳐져 일반적으로 54I 극간에 2배의 전압이 인가됨

타려식 인버터는 그림 3.116과 같이 통전시 위상관계상 교류측에 진상전류를 흘려보내게 되는데, 교류측에 실효전력을 흘려보냄과 동시에 교류측에서 무효전력을 받게 된다. 이로 인해 연계된 6,6kV 고압배전모선의 전압강하 및 변동이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해서 고압배전용 변압기의 $\%V_z$가 커서 전압강하가 발생하는 경우에는 변압기 임피던스인 $\%V_z \approx 4.5\%$ 값을 갖는 변압기로 교체하거나 진상콘덴서를 설치하여 개선하고 있다.

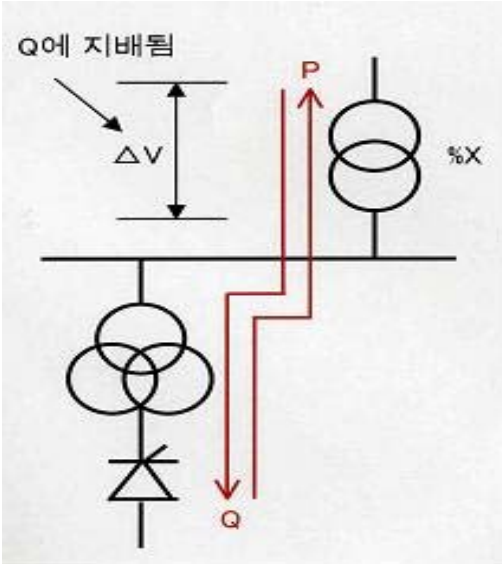


그림 3.116 계통연계시 전압강하

(2) 인버터 설비보호 및 보호협조

표 3.44는 일본 남북선의 오시 변전소, 신요츠야 변전소에 설치 운영중인 회생용 인버터 설비보호를 나타낸 것이다. 과부하 보호, 전류실효 보호 등을 하기 위해서 교류측은 계전기를 이용하여 과전류를 검출하고, 직류측은 직류고속차단기로 과전류를 검출하여, 교류차단기와 직류차단기를 동작시켜 보호차단을 한다.

(3) 신호・통신설비의 유도장애

인버터는 정류기와 마찬가지로 출력단 교류전류에 고조파 성분들을 포함하고 있다. 이러한 고조파 발생은 교류측의 계통기기와 직류측의 신호・통신선으로 유도장해현상을 발생시켜 통신불량을 야기할 수 있다. 실제 일본의 토야마(東山) 변전소의 경우, 전철변전소 내 직류모선과 연결된 전력회생 인버터의 직류전압 주파수 분석을 실시한 결과 100kHz~200kHz 데이터에서 소음레벨이 최고로 약 20dB상승하였다. 이것은 회생인버터의 사이리스터 소자의 On/Off 시에 발생되는 과도한 전압왜곡으로부터 발생한 것으로 그림 3.117과 같은 투입경로를 갖는다. 이러한 유도장애에 대한 영향을 없애기 위해서 유도 무선측과 회생인버터측에 표 3.45와 같은 대책을 운영 중이다.

표 3.44 인버터 보호장치

보호연동내용	개방한 차단기			변전소		제어소
명칭	54I	52I	52IF	표 시	경고	표시
인버터 과전류(순시)	●	◉	◎	50V	○	86V
인버터 과전류(한시)	○	◎	◎	51V	○	VM
54V 자동차단	○	◎	◎	54V	○	VM
인버터용 변압기 가스압 상승	○	◉	◎	63VTH	○	86V
인버터용 변압기 가스압 저하				63VTL	○	30V
인버터용 변압기 온도상승				26VT	○	30V
인버터 소자온도상승	●	◉	◎	26V	○	86V
인버터 소자고장	●	◉	◎	71V	○	86V
인버터제어 전원이상	●	◉	◎	80V	○	86V
펄스 업(up) 이상	●	◉	◎	PAMP	○	86V
인버터 자려발진(自勵發振0	○	◎	◎	HFD	○	VM
고압모선정전	○	◎	◎	27V	○	VM
필터 과전류	◉	◉	●	51FL	○	86V
필터 이상	◉	◉	●	86FL	○	86V
인버터 시험				원방・시험	○	43V
인버터 보호연동 시험중						INVSP

○는 개방기기 표시 ◎는 연동개방 기기를 표시

●는 개방 후 쇄정한 기기 표시 ◉는 연동개방 후 쇄정한 기기를 표시

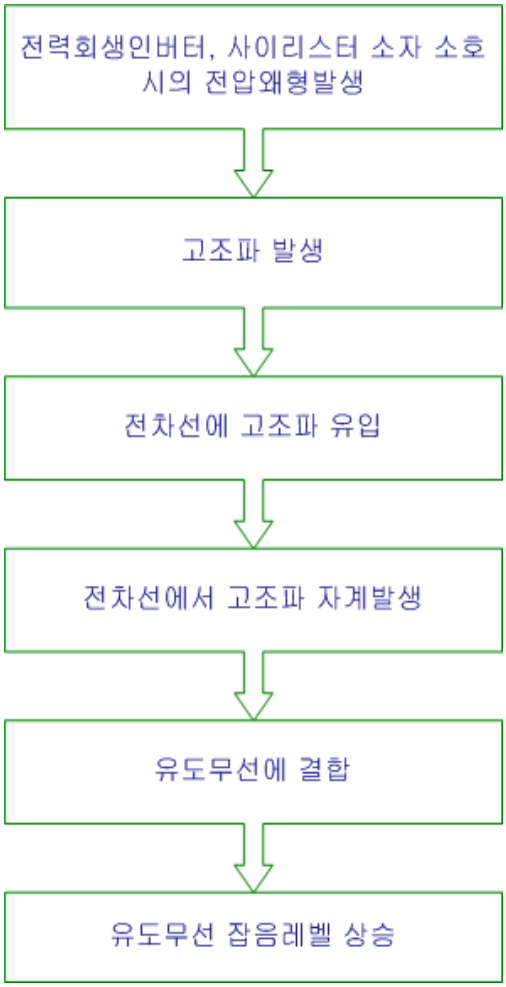


그림 3.117 잡음투입 경로도

표 3.45 유도장애 대책

신호・통신설비측	회생인버터측
・유도선의 반송파신호를 잡음레벨 이상으로 키운다. ・유도무선에 고조파 필터를 넣는다. ・신호・통신방식을 변경한다.	・사이리스터 소자에 아놀드 리액터를 투입한다 ・교류측에 필터를 설치한다. ・직류측에 필터를 설치한다.

나. 회생용 인버터의 계통연계

회생인버터의 전기철도 계통에 연계시키기 위해서는 전철용 변전소의 각종설비들에 대한 사양, 동작 조건, 운전방법들을 사전에 파악하여 회생인버터 개발품에 적용시켜야 한다. 또한 지하철 변전소의 가선전압 변동상황을 파악하여 계통에 연계시키기 이전에 회생인버터의 동작조건을 구체적으로 모의하고 검증해야 한다. 또한 회생인버터의 계통연계시 보호계전방식과 보호협조, 단독운전 등으로 인한 안전문제와 긴급시 연락 및 복구체제등의 공급신뢰도 문제와 전압변동, 역률저하, 고조파 발생 등 전력 품질 측면에서 많은 문제점이 검토되어야만 원활한 회생전력의 재이용이 이루어질 수 있다. 직류전철 급전계통에서 발생할 수 있는 여러 가지 고장상황에 대한 보호 대책을 마련하지 않은 상태에서 급전계통과 연계하여 운전하는 중 고장이 발생되면 계통에 연계된 급전설비의 고장영향이 계통에 파급되지 않도록 발전설비를 분리하고, 전력계통의 고장에 대해서는 신속하고 확실하게 계통으로부터 회생인버터를 분리하여 계통운영에 큰손실과 전력품질 저하 등의 문제가 없도록 해야 할 것이다. 이러한 보호방식에 대한 연구가 기존의 분산형 급전시스템 분야에서 활발히 연구가 이루어지고 있다. 따라서 회생인버터의 기존 급전계통에 연계될 경우에는 발생 가능한 여러 고장상황들에 대한 정확한 해석이 마련되어야 하고, 이를 근거한 보호방안이 수립되어야 할 것이다.

회생 전력이 직류 계통으로부터 교류측 부하로 공급되기 위해서는 직류 계통에서 교류 부하측으로 전류가 흐르는 것이 필요하다. 즉, 회생 인버터 시스템에서는 인버터에 의해 직류 1,500V 단에서 회생되는 직류를 교류로 변환하여 교류측 부하에 회생전력을 공급하도록 하는 방식이다.

(1) 회생인버터시스템 구성도

(가) 시스템 구성

정류기 2차측 직류 1,500V 계통에 회생 인버터를 병렬로 설치하여 교류 590V로 변환한 후 3권선 변압기를 통해서 590V/22.9kV로 승압하여 교류 22.9kV 계통에 연결한다.

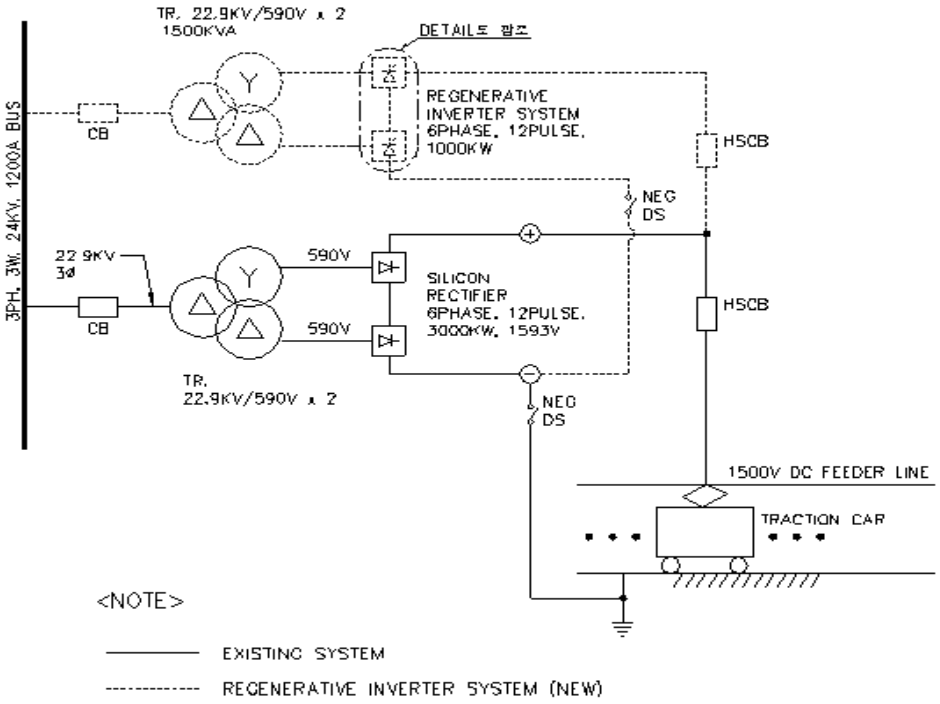


그림 3.118 회생인버터 시스템 구성도

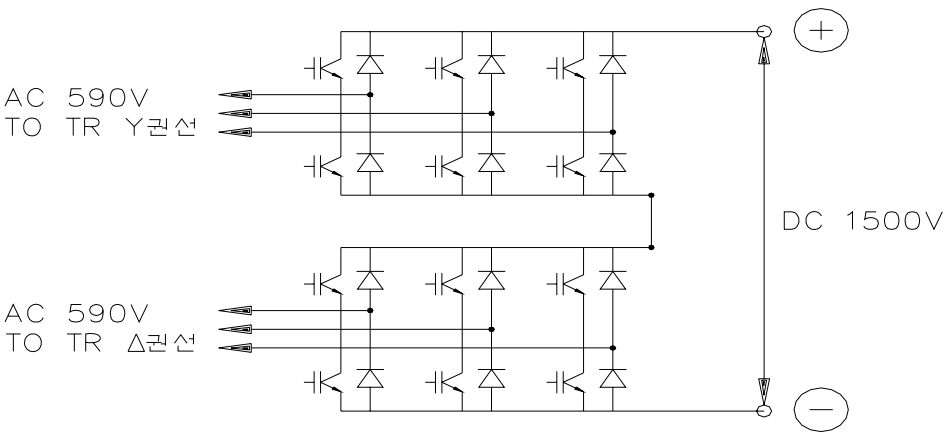


그림 3.119 인버터 기본 회로도

(나) 회생용 인버터 시스템 추가 설비

전차선에서 발생한 회생전력을 교류시스템으로 흘려보내기 위한 추가로 요구되는 회생인버터용 설비는 다음과 같다.

표 3.46 회생인버터 설비 구성

전력 설비	설비 구성
(1) 특고압 배전반	- 정류기용 차단기반 1면
(2) 인버터용 변압기	- 인버터용 변압기 1대
(3) 인버터반	- 회생인버터반 1면
(4) 직류 고속도 차단기반	- 인버터용 차단기반 1면

(2) 회생인버터 시스템 주요 기기

(가) 인버터

PWM방식 3상 인버터 2대가 직렬로 연결된 6상 12펄스 인버터를 사용하여 직류 전차선 계통에서 회생되는 전력을 교류로 변환하여 인버터용 변압기의 1차 △ 및 Y 권선에 각각 교류 590V 3상 전원을 공급한다.

6상 12펄스 인버터를 채용하여 고조파 발생을 경감시킴으로써 계통에의 고조파 확대 현상을 억제하도록 한다.

인버터의 용량은 최대회생 전력치 이상의 것으로 선정해야 하나 전력시뮬레이션을 통해 선정한다.

(나) 변압기

정류기 측과 마찬가지로 3권선 변압기를 채용하여 인버터 2차에서 출력되는 교류 590V 전압을 △ 및 Y로 결선된 1차권선을 통하여 공급받아 2차 22.9kV로 승압하여 계통으로 회수 하도록 한다.

변압기 용량은 각각의 인버터 용량을 기준하여 선정한다.

(다) 개폐기

인버터 1차측 직류계통에 급전용 HSCB 및 부극용 단로기를 설치하여 직류계통에서 발생하는 회생전력을 인버터로 공급하도록 하며, 3권선 변압기 2차측에는 24kV 차단기를 설치하여 22.9kV 계통으로 회생전력을 공급할 수 있도록 한다.

차단기용량은 회생전류을 계통으로 회수하기에 충분한 용량으로 선정한다.

(라) 리액터

인버터 출력측에 교류 리액터(교류 590kV, 3상.)를 설치하여 출력파형에 남아있는 고조파 성분을 흡수하여 파형을 정현파에 가깝게 개선하고, 고장전류를 제한하며, 전류의 급격한 변동 현상을 억제하여 계통에 안정된 전원을 공급 하도록 한다.

(마) 동기회로

인버터 출력을 교류계통과 동기 시키기 위하여 동기회로를 둔다. 즉 교류 계통으로 부터 주파수, 전압 등의 신호를 동기회로에서 받아서 인버터 출력을 계통과 일치시키도록 한다.

(바) 제어회로

GATE DRIVE 및 SMPS(Switching Modulation Power Supply) 등 제어회로를 인버터에 내장하여 인버터가 소정의 목적에 따라 운전, 제어될 수 있도록 한다.

(3) 계통연계 안전 및 보호기능

정상적인 기능이 확인된 회생인버터가 전철용 변전소에 설치되고 계통에 연계되어 운행중일 때 사람에 대한 안전과 함께 변전소 및 회생인버터 설비들에 대한 안전 및 보호기능에 대해 설명한다. 또한 회생인버터의 안전 및 보호기능에 대한 안전시험에 대해 기술한다.

(가) 비정상적인 전기 상태에 대한 대응

회생인버터는 항시 지하철 변전소의 비정상적인 조건에 대해 대응을 할 수 있어야 한다. 이러한 대응은 회생인버터를 포함하여 연결된 설비들에 대한 손상을 방지하고 장치의 유지보수 인력들에 대한 안전을 보장할 수 있어야 한다. 회생인버터는 전력상황을 감시하여 전압 및 주파수 등이 기준 범위를 벗어난 경우 즉시 전기 공급을 차단해야 한다.

① 전압 장애

회생 인버터는 비정상적인 계통 전압을 감지하고 이에 대응하여야 한다. 표 3.47은 PCC에서 측정된 전압의 실효치로서, 기준전압 V에 대해 퍼센트 비율을 나타낸 것이다. PCC에서 측정된 전압의 조건에 따라 최대 트립시간 내에 회생인버터가 전력공급을 중단시킬 수 있어야 한다. 여기서 허용 시간 지연의 목적은 단기적인 장애에는 회생인버터의 상태를 그대로 유지되도록 하여 과도한 방해 트리핑을 피하기 위함이다.

표 3.47 비정상 전압에 대한 대응

(PCC에서의) 전압	최대 트립 시간
V < 50%	6 사이클
50% ≤ V < 88%	120 사이클
88% ≤ V ≤ 110%	정상 구동
110% < V < 137%	120 사이클
137% ≤ V	2 사이클

② 주파수 장애

회생인버터 출력교류의 주파수가 59.3 ~ 60.5 Hz의 범위를 벗어나게 되면, 회생인버터는 6사이클 이내에서 전기공급을 중단되야 하며, 허용 시간 지연의 목적은 과도한 방해 트리핑을 피하도록 단기적인 장애에도 그대로 유지되도록 하는 것이다. 이러한 주파수 트립기능의 충분한 동작 수행을 위해 59.2와 60.6Hz에서 동작시험이 이루어져야 한다.

③ 장애 이후 재연결

회생인버터가 계통단의 이상동작에 의해 전기공급을 중단되면, 계통의 전원이 최소 5분 동안 정상인 경우에만 자동으로 재폐로 되도록 한다.

(나) 직류 공급

정상적인 상태이거나 비정상적인 상태에서도 회생인버터는 정격 인버터 출력의 0.5% 미만인 DC전류를 AC인터페이스에 공급하지 않아야 한다. DC전류를 교류 계통으로 전달되지 않기 위해서는 AC 출력단에 절연변압기를 설치하는 방법이 있으며 또한 교류전류의 DC 성분을 검출하는 센서를 사용하여 회생인버터를 차단시킬 수 있다.

(다) 전기연결 인터페이스 해제 스위치

"전기장치 인터페이스 연결해제 스위치"는 직류 및 교류전원단으로부터 회생인버터의 출력을 차단할 목적으로 회생인버터에 포함되어 있는 스위치를 나타낸다. 이 스위치는 NEC가 요구하는 스위치와 같이 기타 차단 스위치에 추가로 사용될 수 있다. 전기장치 인터페이스 차단 스위치는 스위치의 위치를 분명하게 나타내는 수동식, 잠금형 부하차단 스위치이며 전기관련 인력이 확인하고 접근할 수 있는 형태이다. 이 스위치는 스위치가 열림(Open)위치에 있을 때 스위치 접점 위치를 육안으로 확인 가능해야 한다. 다수의 저전압 안전스위치들은 스위치가 "닫힘(Closed)"위치에 있을 때 열릴 수 없는 커버를 포함하고 있으나 스위치가 열림(Open)위치에 있으면 접점이 열린 것을 육안으로 확인하여 열 수 있다. 이와 같은 스위치는 본 조항의 요건을 따른다. 또한 전기연결 인터페이스 차단스위치는 기타 기술과 관계없이 또는 사업과 관련된 이유로 설치하게 되는 경우도 있다. 예를 들어, 설비는 계약조건 위반 시에 PV장치의 사용을 중단시키기 위해 잠금장치가 있는 외부 접근용 부하 차단 스위치를 규정하는 계약요건을 가지고 있을 수 있다.

(4) 분산전원의 계통연계 현황

현재 분산에너지의 계통연계를 위해서는 *전기사업법 제15조 송배전용전기설비*의 규정에 의해 *송전사업자 또는 자가 전기설비가 이용요금 및 이용조건관한 규정*을 산자부장관의 인가를 받도록 하고 있다. 이와 관련한 제도로는 *송전용 정기설비 이용에 관한 규정제정*(2004. 12 개정인가)과 *배전용 전기설비 이용에 관한 규정 제정*(2005. 신규인가)이 있다.

(가) 배전망 계통연계 기술기준

2004년 12월 공표되어 정부의 승인을 얻은 중 · 소규모 설비용량의 신·재생에너지의 전력계통 연계와 관련한 기술기준으로 배전망 이용규정에 나와 있다. 여기서 100 ~ 3,000kW의 설비용량규모는 22.9kV 배선선로와 연계하고 10,0000kW미만의 용량은 22.9kV 전용선로와 연계하도록 하였다.

*배전용 전기설비에의 접속에 관련한 기준*과 *배전용 전기설비의 성능기준*은 한전이 제공하는 [배전용전기설비의 성능]와 같다. 또한 고객의 전기설비를 배전용 전기설비에 접속할 경우는 *전력시장운용규칙의 전력계통운용 등에 관한 규정*에 따를 것이며, 정해지지 않은 사항에 대해서는 한전이 적용하는 '*발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 기준서*'및 '*분산형 전원 저압계통 연계기준*'에 따른다. 만약 고객과 한전의 이견이 있을 경우 전기사업법 제57조의 규정에 의거 전기 위원회에 재정을 신정할 수 있다.

배전용 전기설비에의 접속과 관련한 더 자세한 사항을 알아보면 다음과 같이 같다. 고객의 배전용 전기설비 이용 신청에 따라 한전이 접속설비를 새로이 설치하거나 기존 배전용 전기설비를 보강하는 경우 한전이 적용하는 *배전분야 설계기준 및 시공기준*에 따라 기술적·경제적으로 설치 또는 보강한다. 접속설비는 가공(架空)으로 설치하며 다만 다음의 경우는 지중(地中)으로 설치할 수 있다.

- 지중 배전용전기설비가 설치되어 있는 지중 배전지역
- 한전의 배전용 전기설비 지중화 계획에 따라 지중화지역으로 선정, 공고된 지역 또는 그 인접지역
- 기술적 기타 부득이한 사유가 있는 경우
- 고객이 지중 배전용전기설비의 설치를 희망하는 경우

접속설비는 한전이 설치·소유하며, 고객은 *제4장[접속공사비의 계산 및 납부]*의 규정에 따라 접속공사비를 부담한다. 다만, 기술적 기타 부득이한 경우가 발행하는 경우 고객과 한전의 협의를 통해 고객이 직접 설치·소유 할 수 있다.

접속설비의 설치장소 관해서는 고객이 배전용 전기설비를 이용함에 따라 한전 소유의 전기설비를 기술적 기타 부득이한 사유로 고객 구내에 설치하는 경우, 한전은 고객과 협을 통해 한전소유의 전기설비를 고객 구내에 설치 할 수 있으며, 이에 따른 조건에 대해서는 고객과 한전의 협의를 통해 결정을 한다. 전기설비의 존속사유가 소멸되는 경우에 있어서는 제1항의 규정에 의해 한전은 고객의 재산권 행사에

지장이 없도록 하고 있다.

수급지점과 전기안전관리 책임한계는 배전용 전기설비 이용에 따른 전기설비의 설치 및 그 시설물의 안전관리, 설비운용 및 유지보수 관리의 책임한계는 수급지점을 기준으로 하며 이에 따라 고객측 전기 설비는 고객이, 한전측 전기설비는 한전측이 맡는다. 수급지점에 관해서는 제1항의 규정에 의해 아래의 경우를 따르며 다만 기술적 또는 기타 부득이한 경우는 고객과 한전이 협의를 통해 수급지점을 정한다.

- 가공 배전지역에서 가공전선로로 접속하는 경우에는 고객 구내 또는 고객 구내에서 가장 가까운 위치의 구외에 한전이 설치하는 인입 전주의 연결점으로 한다.

- 가공 배전지역에서 지중전선로로 접속하는 경우에는 고객 구내 또는 고객 구내에서 가장 가까운 위치의 구외에 한전이 설치하는 인입 개폐기의 고객측 단자 연결점으로 한다.

- 지중(地中) 배전지역에서 지중전선선로로 접속하는 경우에는 고객 구내 또는 고객 구내에서 가장 가까운 위치에 한전이 설치하는 지중 배전용 다회로 개폐기의 고객측 단자 연결점으로 한다.

접속설비를 공용배전설비에 연계시킬 때의 연계점은 다음규정에 따른다.

- 가공 전선로로 연계하는 경우에는 수급지점에서 가장 가까운 위치에 설치되어 있는 한전의 가공 배전용전기설비로서, 수급지점의 전압과 동위전압(同位電壓)이 있는 연계 가능한 전주 등의 지지물로 한다.

- 지중 전선로로 연계하는 경우에는 수급지점에서 가장 가까운 위치에 설치되어 있는 한전의 지중 배전용전기설비로서, 수급지점의 전압과 동위전압(同位電壓)이 있는 연계 가능한 지중 배전용 다회로 개폐기 또는 맨홀로 한다.

- 전용접속설비로 연계하는 경우에는 앞서 위의 규정들에도 불구하고 해당 발·변전소의 인출개폐장치 고객측 개폐기의 고객측 단자 연결점으로 한다.

배전용 전기설비에의 접속과 관련한 주파수 및 전압은 표준주파수 60Hz로 하고, 이용전압은 *한전의 전기사업법 제16조[전기의 공급약관]*의 규정에 따라 산업자원부장관의 인가를 받은 *기본공급약관 제23조[전기공급방식, 공급전압 및 주파수]*를 따른다.

(나) 계통연계 비용

전력계통 연계와 관련한 신・재생에너지 발전사업자의 전력계통과 관련하여 부담해야 할 비용 종류는 전력망 사용요금과 접속요금이다. 송전망은 접속 시에는 배전망 접속시 보다 높은 접속비용을 지불하지만, 향후 발전 시 송전망 이용요금만을 지불하면 된다. 반면, 배전망 접속 시에는 상대적으로 낮은 접속비용을 지불하나 향후 발전 시 높은 수준의 송전망 이용요금과 배전망 이용요금을 모두 지불해야 한다. 따라서 계통연계시에 비용최소화를 위해 입지선정에 있어 기술적 제약뿐만 아니라 경제적 비용을 고려해야한다.

계통연계 비용 관련해 송전망 이용규정은 아래와 같다.

① 제24조(재산한계점의 결정)에 의해 결정된 재산한계점과 제25조(연계점의 결정)에 의해 결정된 연계점사이의 접속설비는 고객이 비용을 부담하고 한전이 소유한다.

② 제1항의 접속설비에 대한 송전접속비용 및 공사시행과 관련된 사항은 제 56조(송전접속비용의 구성)부터 제67조(공용송전망 전환에 따른 환급)까지의 규정에 따른다.

송전접속비용은 신규(변경)이용신청이 있는 경우 발생하는 건설비용, 대체공사가 사유가 발생하는 경우의 대체공사비, 접속설비가 필요할 경우에 운전유지비 그리고 이용계약의 해지로 해당 접속설비의 철거 사유가 발생할 경우 철거비로 구성된다. 송전접속비용 부담의 기본원칙은 아래와 같다.

① 고객이 전용으로 이용하는 접속설비에 대한 송전접속비용은 해당 고객이 부담한다.

② 2인 이상의 고객이 동시 또는 서로 전후하여 이용신청이 있고, 접속설비의 일부 또는 전부를 공용할 경우에 한전은 그 공용하는 접속설비에 소요되는 송전접속비용(이하“공동부담 송전접속비용”이라 한다.)을 고객의 계약용량 비례로 고객에게 배분한다. 다만, 공동부담 송전접속비용의 배분에 대하여 고객간에 별도 합의가 있는 경우에는 그에 따른다.

③ 한전의 “장기 송・변전 설비계획”에 따른 공용송전망과 접속설비가 중복되는 구간의 건설 및 보강은 공용송전망으로 처리한다. 다만, 고객의 요청에 의하여 투자시기, 설비규모 등 공용송전망공사 설비계획의 변경이 필요한 경우 추가

되는 비용은 고객이 부담한다.

④ 계약된 접속설비에 변경이 있는 경우에는 고객과 한전이 협의하여 처리한다. 이 경우 변경비용은 원인유발자가 부담하는 것을 원칙으로 한다.

⑤ 동일한 접속설비를 통하여 송전 및 수전하는 고객은 송전접속비용을 중복 부담하지 않는다.

⑥ 고객은 송전접속비용을 부담한 접속설비용량 한도 내에서 송전접속비용의 추가부담 없이 계약용량을 변경하여 이용할 수 있다.

⑦ 22.9kV이하 송전용전기설비 또는 배전용전기설비에 접속된 구역전기사업자가 전기사업법 제31조 제3항에 의거 공급구역의 수요에 부족한 전력을 전력시장에서 구매하는 경우 구역전기사업자가 공용하는 변전소 내 154kV 주변압기 이하 설비에 대한 송전접속비용은 다음 각호에 따라 부담한다.

송전접속비용 분담비율 = 구역전기사업자의 수전계약용량(kW)÷0.9(역률)÷구역전기사업자가 이용하는 주변압기 용량(kVA)÷직전년도(1월1일부터 12월31일까지)당해 변전소 부등률

여기서 직전년도 당해 변전소의 부등률은 구역전기사업자가 접속하는 변전소의 배전선로별 최대부하(kW)의 합을 변전소 동시 최대부하(kW)로 나누어 산출한다. 구역전기사업자가 한전 배전선로에 연계되는 경우에는 배전선로용 개폐장치를 포함한다.

- 송전접속비용 산정기준과 관련한 송전접속비용

① 건설비와 대체공사비

가. 송전접속비용을 산정하는 구간은 한전과 고객의 재산한계점으로부터 기술적, 지리적 제약 등을 합리적으로 고려한 한전의 연계점까지로 하며 기타 세부기준은 접속설비 처리 세부기준에 따른다.

나. 이용신청에 따른 접속설비의 설계는 관련법규, 발전소 계통연계 기준 및 한전의 설계기준에 따라 한전 부담분과 고객 부담분을 분리하여 설계한다. 이때 접속설비가 아닌 기준설비의 보강 또는 한전과 공용하는 설비의 신설은 한전 부담분으로 한다.

다. 한전은 접속설비의 내용연수, 노후화, 운전유지 등을 감안하여 필요시

한전의 관련 기준에 따라 접속설비의 전부 또는 일부를 대체할 수 있다. 이 경우 한전은 접속설비 대체와 관련하여 필요한 사항을 고객과 협의한다.

② 설비별 연간 운전유지비

가. 송전설비 : 회선긍장(C-km) × 가공 · 지중 전업별 평균운전유지비(원/C-km)

나. 변전설비 : 한전 변전설비전체의 평균운전유지비 × [(변전접속설비의 신설대체가액)/(한전 변전설비전체의 신설대체가액)]

다. 평균운전유지비는 직전 3년간의 실제 운전유지에 소요된 제비용의 평균을 말하며 매년 갱신된다.

③ 철거비 : 제각 및 한전조치에 소요된 실비용으로 한다.

④ 이 규정의 송전접속비용에 관한 규정은 기설접속설비에 대하여도 적용한다. 이 때 기설접속설비의 건설비는 기설접속설비에 대한 장부가액을 기준으로 산출한다.

- 송전접속비용의 납부방법

① 건설비

가. 2001.7.12이후 한전이 착공한(건설공사계약 체결일 기준)접속설비는 공사기간 내 공사 진척 에 따른 분납을 원칙으로 하되, 접속비용부과시기 확정 이전에 착공한 신설접속설비의 경우는 전체공사에 소요된 기간동안 분납하며 세부적인 납부방법(공사이행보증 등)은 고객과 한전 간 상호계약에 따른다.

나. 2001.7.12이전 한전이 착공한(건설공사계약 체결일 기준) 또는 준공한 접속설비의 경우는 일시납을 원칙으로 하되 고객이 희망할 경우에는 잔여 내용연수기간동안 분납할 수 있고 필요시에는 한전과 납부방법의 변경을 협의할 수 있으며 세부적인 납부방법은 고객과 한전 간 상호계약에 따른다.

② 대체공사비 : 공사기간 내 공사 진척에 따른 분납을 원칙으로 하되 세부적인 납부방법(공사이행보증 등)은 고객과 한전 간 상호계약에 따른다.

③ 운전유지비 : 설비별 연간 운전유지비를 12개월 균등 분할하여 매월 송전 이용요금과 함께 납부해야하며 세부적인 처리방법은 제49조(송전이용요금의 납부의무 및 납기일)부터 제54조(일수계산)까지의 규정에서 정한 송전이용요금의 처리방법과 동일한 방법으로 한다.

④ 철거비 : 철거사요 발생시 일시에 납부해야한다.

⑤ 기타 : 건설비와 대체공사비의 분납 등에 의해 이자가 발생하는 경우 고객은 분납기간에 따른 이자를 부담하여야 하며, 분할납부 시 이자율은 미납잔액에 대하여 전년도말 한전 차입금 가중평균 이자율을 적용한다.

- 한전과 고객간 공사책임 범위

① 재산한계점으로부터 연계점까지의 접속설비에 대한 건설, 대체공사는 한전이 시행하는 것을 원칙으로 한다. 이 경우에는 한전이 접속설비공사의 설계, 시공 및 품질유지의 책임을 진다. 다만, 고객이 원할 때에는 고객과 한전이 협의하여 관련법규 및 한전의 설계기준을 적용하여 고객이 접속설비 공사를 시행할 수 있으며 이 경우에는 고객이 접속설비공사의 설계, 시공 및 품질유지의 책임을 진다.

② 재산한계점으로부터 접속점까지의 접속설비에 대한 건설, 대체공사는 고객이 시행한다. 이 경우에는 고객이 접속설비공사의 설계, 시공 및 품질유지의 책임을 진다.

③ 제1항 단서의 규정에 불구하고 한전의 변전소, 개폐소 구내에서 행해지는 접속설비의 건설, 대체공사는 한전이 시행하며 설계, 시공 및 품질유지의 책임을 진다.

④ 한전은 제1항 단서 및 제2항 설계 및 시공과정에 입회할 수 있다.

- 접속설비의 공사완료 후 인계내용

① 고객이 직접 접속설비의 건설 또는 대체공사를 시행한 경우에는 송전접속비용 중 건설비 또는 대체공사비를 납부를 면제받고, 공사완료 후 자신 단위별 명세서, 준공도면 등 사후관리에 필요한 서류를 포함하여 접속설비를 한전에 인계한다.

② 한전이 고객이 신공한 접속설비를 인수할 때 그 설비가 당초의 설계기준에 부적합하게 시공된 경우 한전은 이의 보완을 요구하고 보완이 이루어 질 때까지 그 설비의 인수를 거부할 수 있다.

③ 자산의 인계인수관련 세부사항은 한전의 관련규정에 따른다.

- 접속설비의 활용관련

① 발전소 스위치 야드에서 배전변전소 또는 배전변압기, 자체수요 이외 직거래고객 등의 수요를 공급하는 경우 산업자원부의 송전용전기설비기준 및 변전설비는 공용송전망으로 전환한다.

② 조상설비 등 공용송전망의 운영을 위하여 발전소 스위치야드에 추가되는 설비는 공용송전망으로 처리한다.

③ 기존 발전소 접속설비를 공용송전망으로 사용하기 위하여 선로의 중간에서 분기할 경우, 분기점에서 계통 측 접속설비는 공용송전망으로 전환합니다.

④ 기존 발전사업자의 접속설비를 활용하여 다른 발전사업자가 접속하고자 하는 경우에는 고객간에 별도 합의가 있어야합니다.

(다) 전력회사(한국전력)와 협의시 준비 자료

(1) 계통연계기술기준상의 계통연계보호장치의 적합성검토자료

(2) 역조류유무에 관한 자료 : 발전설비의 운전출력과 부하곡선

(3) 수전설비구성자료 : 구내수전설비와 연계설비의 설치도 (단선결선도)

(4) 분산형전원이 위치할 상세지도

(5) 발전설비에 관한 자료:

1) 회전기의 경우:

○ 원동기: 형, 정격, 관성계수

○ 발전기: 형, 정격출력, 정격전압, 정격역률, 관성정수

○ 전압조정기: 범위 및 정도(정격전압의 %로 표시)

○ 역률조정기: 범위 및 정도(전부하기준의 %로 표시)

○ 발전기리액턴스: 동기(%, kVA), 과도(%, kVA, 시정수), 초기과도(%, kVA, 시정수), 역상(%, kVA), 정상(%, kVA)

○ 변압기: 정격(O.A., F.A., F.O.A.kVA), 고압측(kV, 결선), 저압측(kV, 결선), 임피이던스(%, 저항%, 리액턴스%), 운용탭

○ 각 부분의 전압과 전류정격을 표시한 단선결선도

○ 교류 및 직류의 제어와 보호기구를 표시한 구성도

○ 운전 및 정지방식에 관한 설명

○ 측정데이터(돌입전류, 고조파, 과전류 등)

○ 기타(절연용변압기, 축전지유무, 한류리액터 등에 대한 스펙)

2) 직류발전+역변환장치의 경우

○ 각 부분의 전압과 전류정격을 표시한 단선결선도

○ 교류 및 직류의 제어와 보호기구를 표시한 구성도

○ 직류발전부문에 대한 기본스펙: 종별, 형식, 출력특성, 환경성 등

○ 역변환장치에 관한 기본스펙

- 교류출력에 관한 정격: 전기방식, 정격출력, 정격전압, 운전역률
- 주회로방식에 관한 설명: 전력변환방식, 스위칭방식, 절연방식
- 제어방식에 관한 설명: 전력제어방식, 출력제어방식
- 운전정지방식에 관한 설명

○ 측정데이터(돌입전류, 고조파, 과전류 등)

○ 기타(절연용변압기, 축전지유무, 한류리액터 등에 대한 스펙)

(3) 보호계전기에 대한 스펙: 시퀀스, 메이커, 형식, 특성, 정정범위 등

(4) 보상설비의 형식, 용량 등

(5) 차단기의 종별, 차단용량, 차단시간 및 개폐기의 종별, 개폐용량

(6) 자동동기검정장치의 형식, 성능

(7) 자동부하차단장치의 시퀀스, 차단용량시한, 차단부하용량(저압연계의 경우 제외)

(8) 보안통신설비의 종별, 방식(저압연계의 경우 제외)

(9) 계기용변성기(CT,PT)의 스펙, 사용법

(10) 전송차단방식의 시퀀스, 설치도

(11) 기타(운전체제, 연락체제에 관한 설명, 보안규정 등)

제 4 절 축소형 회생용 인버터를 이용한 제어알고리즘 개발

1. 지하철 급전시스템용 전력변환 회로

가. 전력 변환 회로

국내의 지하철 정류회로를 설명하기 위해서는 기본적으로 3상 6펄스 다이오드 정류기, 3상 6펄스 사이리스터 정류기, 3상 12펄스 다이오드/사이리스터 정류기 시스템에 대한 구성을 이해하여야 한다.

(1) 3상 다이오드 정류기

3상 다이오드 정류기는 일반적으로 대용량 부하에 직류전압과 전류를 공급하는 산업용과 직류전동차 전원 공급용으로 국내에서 사용되고 있다.

3상 전파제어 정류기를 거론하기 전에 먼저 3상 정류기에 대해 보게 되면, 3상 정류기는 일반적으로 대용량부하에 직류전압과 전류를 공급하는 산업용으로 사용되고 있다. 3상 전파브리지 정류기는 그림 3.120과 같다.

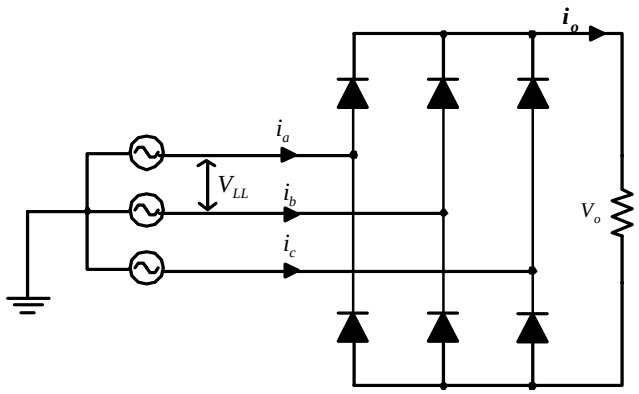


그림 3.120 다이오드 정류회로

3상 변압기의 2차측을 3상 다이오드 반파 정류기의 입력으로 사용한다면 변압기 각 상의 전류는 교류가 되지 않고 직류 성분을 포함하게 되므로 변압기가 자기적

으로 포화되어 버린다.

따라서 3상 반파 정류회로는 특수한 경우에만 사용되며, 3상 전파 정류회로 방식이 일반적으로 사용된다. 3상 전파 정류를 하면, 위에서 언급한 반파 정류회로에서의 문제점이 해결되며 또한 출력전압 파형의 리플성분이 크게 감소하는 이점도 있다.

전원전압의 한 주기 내에 펄스폭이 $\frac{\pi}{3}$인 6개의 펄스 형태의 선간전압으로 직류 출력전압이 얻어지므로 3상 전파 정류기를 6-펄스 정류기라고도 한다.
그림 3.121은 3상 다이오드 정류기의 출력전압과 a상의 입력전류 파형을 나타내고 있다.

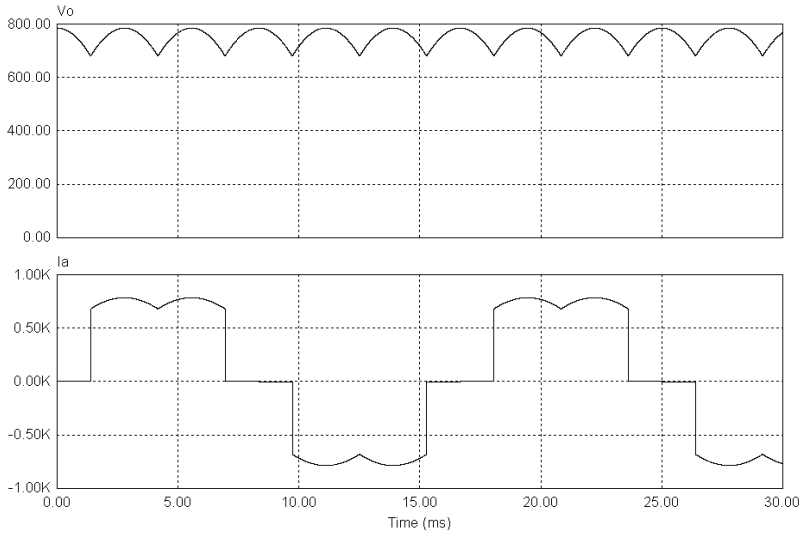


그림 3.121 3상 다이오드 정류 시 출력전압과 입력전류 파형

파형에서 보듯이 각 다이오드는 120°씩 온 되고 상하 다이오드는 상호 180°의 위상차를 가지고 온 된다. 따라서 각 상의 전원에는 3상 반파 정류와 달리 양, 음의 전류가 120° 도통하는 교류전류가 흐르게 된다.

이때, 출력전압의 평균값을 얻기 위해서는 출력전압 V_o에 나타나 있는 6개의 선간 전압중 임의의 전압에 대해 평균값을 구하면 된다. 입력 선간전압이 교류 555V일 때 평균 출력 전압은 다음과 같다.

$$V_o = \frac{3}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{3}} v_{ab}\,d(\omega t) = \frac{3}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{6}\,V_{LL}\sin(\omega t + \frac{\pi}{3})\,d(\omega t) \qquad (3\text{-}6)$$
$$= \frac{3\sqrt{2}\,V}{\pi} = \frac{3\sqrt{2}\times 555}{\pi} = 750[\,V]$$

출력전압 v_o의 푸리에 급수를 구하면

$$v_o(t) = 1.3504\,V_{LL} + \sum_{n=6,12\ldots}^{\infty} \frac{6\,V_{LL}}{\pi(n^2-1)}\cos n(\omega t) \qquad (3\text{-}7)$$

이 되는데 출력전압은 n=6k (k=1,2,3,....)의 고조파 성분을 갖는 6펄스의 특성을 나타낸다. 하지만 3상 전파 정류 시 그림 3.122와 같이 입력전류에는 기본파와 더불어 과도한 고조파(6k ±1)가 함유되고 있기 때문에 입력전류 왜곡에 따른 교류 전원에 악영향을 줄 수 있다.

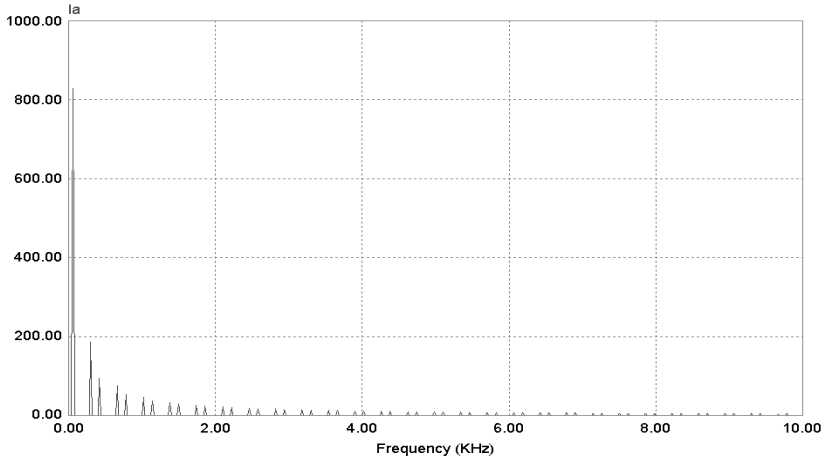


그림 3.122 3상 다이오드 정류기 입력전류 FFT 분석

(2) 3상 사이리스터 위상제어 정류기

위상제어 정류기는 다이오드 정류기와 비교하면 정류기를 구성하는 전력 반도체 소자만 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, 다이오드 정류기는 온/오프 제어 불가 소자인 다이오드로 구성되지만, 위상제어 정류기는 온 제어가능/오프 제어불가 소

자인 SCR 사이리스터로 구성된다.

3상 반파 정류회로에서 저항부하인 경우 지연각 α가 30° 이하이면 출력전류 Io가 연속이었으나 전파 정류에서는 지연각 α가 60° 이하이면 연속이고 60° 이상에서는 불연속이다.

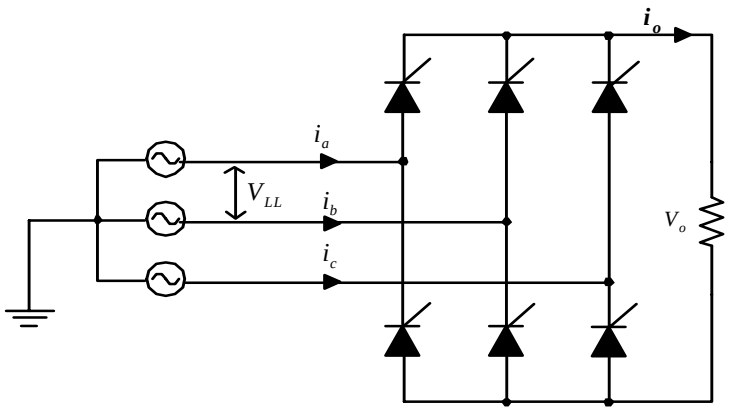


그림 3.123 사이리스터 제어 정류기

그림 3.124에서 출력전압은 전원전압의 한 주기 내에 6개의 펄스 형태의 선간전압으로 구성되므로 3상 전파 위상제어 정류회로를 6-펄스 위상 제어정류회로라고도 한다.

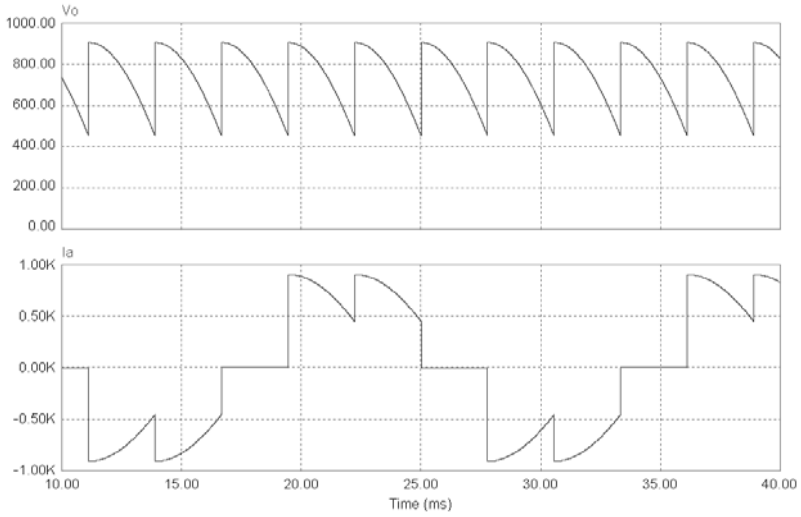


그림 3.124 3상 사이리스터 제어 정류기 α=30도 일 때 출력파형

이때 출력평균 전압은 3상 정류 제어기에서 구한 평균전압 수식에 적분 영역만 변하여 다음과 같은 식을 같게 된다.

$$V_o = \frac{3}{\pi}\int_{\alpha+60^\circ}^{\alpha+120^\circ} v_{ab}\,d(\omega t) = \frac{3}{\pi}\int_{\alpha+60^\circ}^{\alpha+120^\circ} \sqrt{2}\,V_{LL}\sin\omega t\,d(\omega t) \qquad (3\text{-}8)$$
$$= \frac{3\sqrt{2}\,V}{\pi}\cos\alpha = \frac{3\sqrt{2}\times 640}{\pi} \fallingdotseq 750[\,V]$$

따라서, 지연각 α가 증가할수록 평균출력전압이 감소하게 되는 것을 나타낸다.

그림 3.125는 3상 사이리스터 위상 제어 정류기의 입력전류 FFT 분석 파형을 나타내고 있다. 3상 다이오드 전파 정류기와 출력 조건이 같다고 하고 입력전원의 a 상전류를 분석해 보면 사이리스터 위상 제어 정류기가 고조파를 더 많이 포함하고 있음을 파형을 통해 확인 할 수 있다.

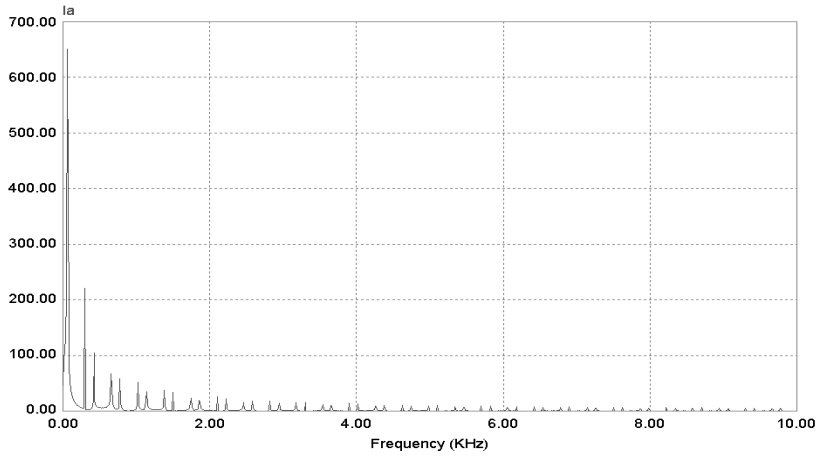


그림 3.125 3상 위상제어 정류기 입력전류 FFT 분석

(3) 3상 12펄스 다이오드 정류기

3상 6펄스 다이오드 정류기는 단상 정류기보다 직류 출력전압의 질이 현저하게 개선되며 출력전압의 고조파는 감소하고 주파수는 전원주파수의 6배가 되었다. 하지만 6펄스 다이오드 정류기는 입력전류에 제 5차와 제 7차 고조파를 함유하게 되어 전원에 고조파 문제를 야기할 수 있다.

그림 3.126과 같이 다이오드 정류기의 입력과 출력특성을 개선하기 위하여 2대의 6펄스 전파 정류기를 직렬로 연결하여 고전압용으로 사용하면 출력 고조파성분은

더욱더 감소시킬 수 있다. 이러한 형태를 12펄스 정류기라 한다.

하나의 정류기는 Y-Y로 결선된 변압기에 의해 전력을 공급받고 다른 정류기는 Y-Δ변압기에 의해 공급 받게 된다. Y-Δ 결선은 각 정류기에 30°의 위상차를 갖는 3상 전압을 공급하기 위하여 위상변압기 목적으로 사용하였다.

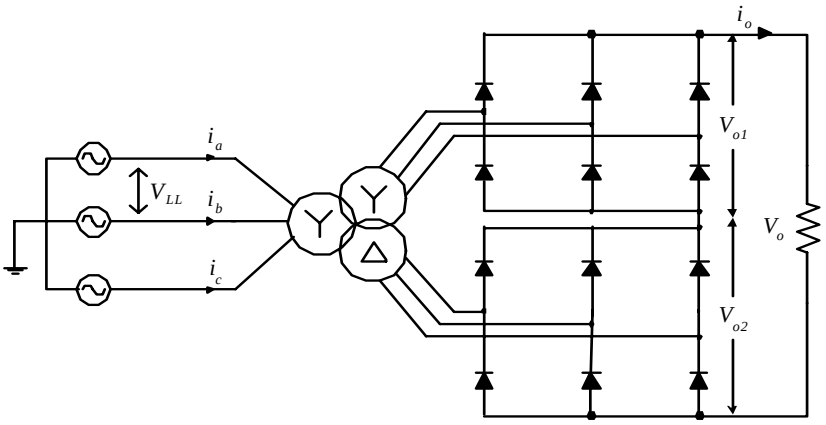


그림 3.126 3상 12펄스 다이오드 정류기

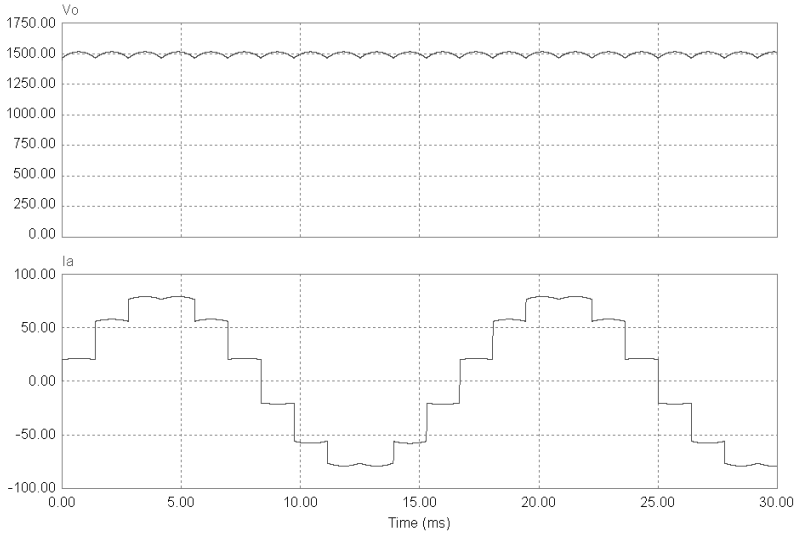


그림 3.127 3상 12펄스 다이오드 정류 시 출력전압과
입력전류 파형

그림 3.127은 3상 12펄스 다이오드 정류기의 출력전압 파형과 입력전류 파형을 나타내고 있다. 각 정류기의 출력을 직렬로 연결하므로 출력전압 V_o는 각 정류기

의 출력전압 V_{o1}과 V_{o2}의 합으로 되며, 평활 커패시터가 없을 때를 기준으로 하여 6펄스 다이오드 정류기보다 출력전압의 리플이 감소함을 알 수 있다.

출력전압의 평균값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_o = \frac{6}{\pi}\int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} (\sqrt{2}V_{LL}\sin\omega t + \sqrt{2}V_{LL}\sin(\omega t + \frac{\pi}{6}))d(\omega t) \quad (3\text{-}9)$$
$$= 2.7009V_{LL} \fallingdotseq 1500[V]$$

출력전압 v_o의 푸리에 급수를 구하면 다음과 같다.

$$v_o(t) = 2.7009V_{LL} + \sum_{n=12,24\cdots}^{\infty} \frac{12V_{LL}}{\pi(n^2-1)}\cos n(\omega t) \quad (3\text{-}10)$$

식 (3-10)로 부터 출력전압의 고조파는 n=12k(k=1,2,3...)로 되어 12펄스 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

입력전류의 고조파는 n=12k ±1(k=1,2,3...)의 고조파 성분을 포함하여 11, 13차 고조파의 영향을 받고 있음을 그림 3.128의 3상 12펄스 다이오드 정류기 입력전류의 FFT 분석을 통하여 확인 할 수 있다.

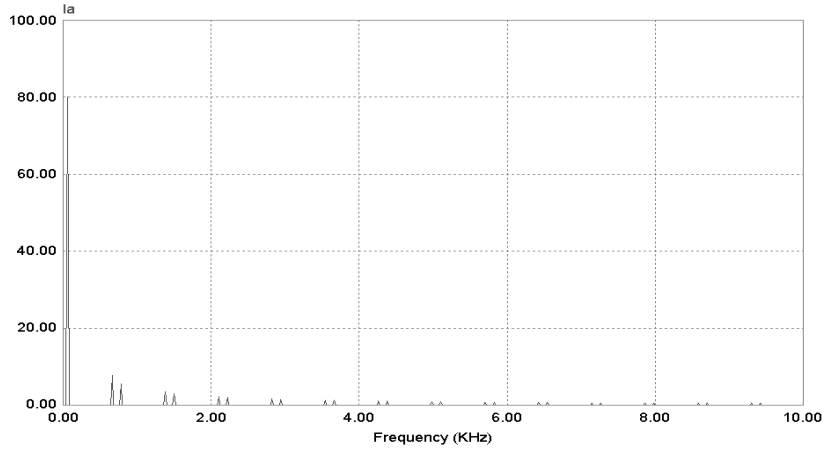


그림 3.128 3상 12펄스 다이오드 정류기 입력전류 FFT 분석

(4) 3상 12펄스 사이리스터 제어 정류기

부산 지하철에서는 12펄스 다이오드 정류기 방식 대신 사이리스터를 사용한 방식이다. 그림 3.129는 부산 지하철에서 실제 운전되고 있는 사이리스터 12펄스 위상제어 정류기 부분만을 나타낸 그림이다. 하지만, 부산지하철에서는 여기에 부가적으로 회생이 가능하도록 역방향 사이리스터 12펄스 위상제어기를 설치하여 DC 라인의 회생전력을 교류 모선으로 공급이 가능하도록 하였다.

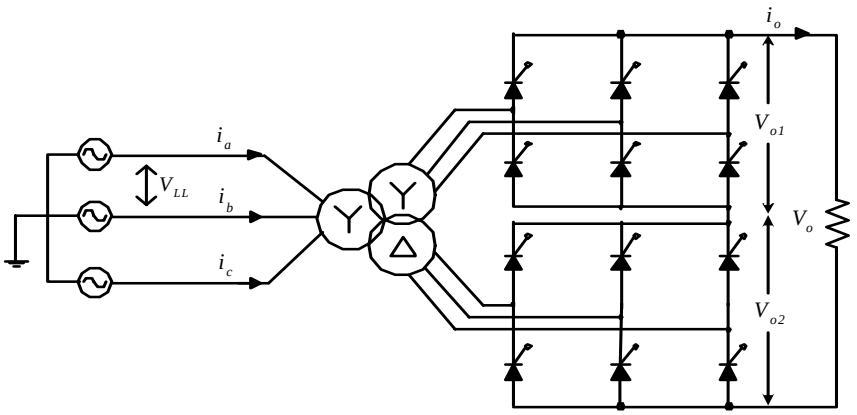


그림 3.129 부산 지하철의 사이리스터 12펄스 정류 제어기

6펄스 사이리스터 위상제어 정류기의 스위칭에 의한 고조파 성분을 저감하기 위해 사용하는 필터의 용량을 줄이는 방법의 하나로 펄스폭 변조(PWM)방식이 있으나 위상제어 정류기를 다중화 하였다.

그림 3.130과 같이 사이리스터 12펄스 정류제어기를 사용할 경우 다음과 같은 평균전압이 나오게 된다. 이때 평균 출력 전압은

$$V_O = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi}\cos\alpha + \frac{3V_{m,L-L}}{\pi}\cos\alpha = \frac{6V_{m,L-L}}{\pi}\cos\alpha \qquad (3\text{-}11)$$

와 같다.

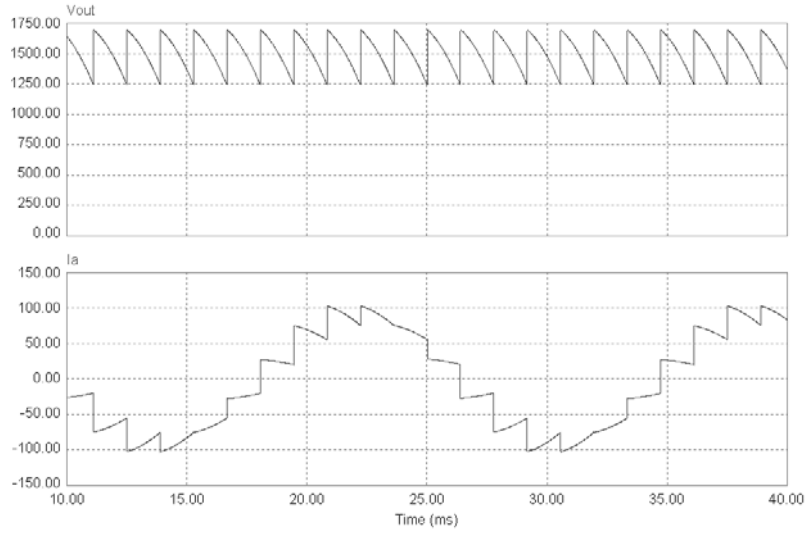


그림 3.130 3상 12펄스 위상제어 정류 시 출력전압과
입력전류 파형

그림 3.131은 3상 12펄스 사이리스터 위상제어 시 입력전류의 FFT 분석 파형을 나타낸다. a상의 전류 파형을 분석해 보면 n=12k ±1(k=1,2,3...)의 고조파 성분만 존재하여 최저차가 11차 고조파가 된다.

또한 6펄스 위상제어 정류기의 a상 교류전원전류 파형에 비해 12펄스 위상제어 정류기의 파형이 정현파에 가깝기 때문에 역률도 개선된다.

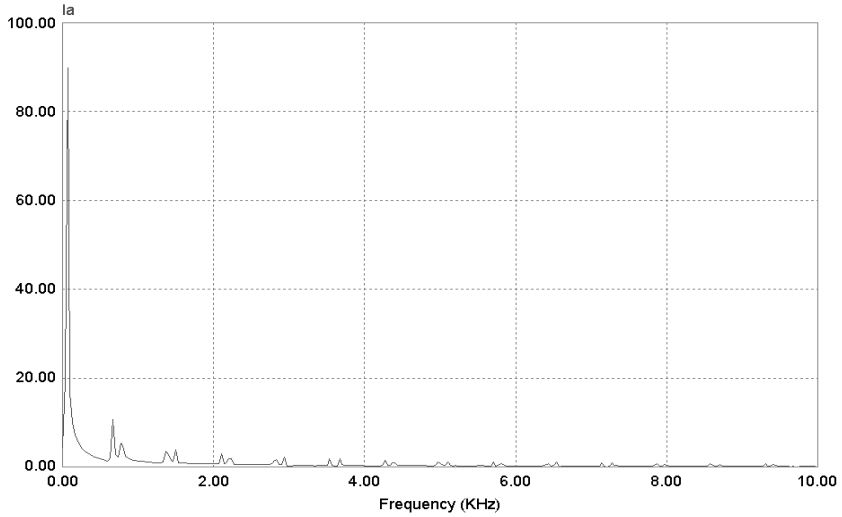


그림 3.131 3상 12펄스 위상제어 정류기 입력전류 FFT 분석

2. 회생용 인버터

가. 회생 전력 제어용 전력변환장치

전동차가 운행 중인 구간이 하구배 구간이나 감속 운행 시에는 전동차에서 에너지가 회생되어 많은 양의 전력이 발생하게 된다. 이러한 에너지는 전동차를 가속하기 위해 투입된 에너지의 45 ~ 47% 정도이며 약 20% 정도는 전동차에서 소모되나 나머지 20 ~ 27%의 에너지가 잉여 전력으로 직류 가선 전압을 상승시킨다. 상승된 전압은 저항을 통해 열로서 소비한다. 그림 3.132는 직류 전철 급전시스템에서 회생 가능한 에너지 분포를 나타내고 있다.

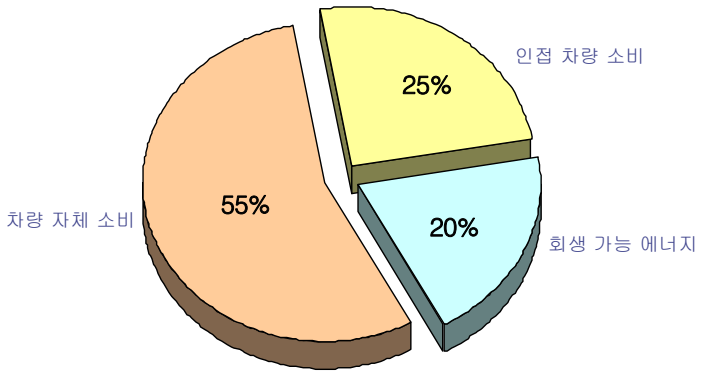


그림 3.132 회생 가능 에너지 분포

그림 3.133은 기존 직류 전철 급전시스템을 나타내고 있다. 현재는 차량 차체에 저항기를 부착하여 회생전력을 열에너지로 소모시키거나 배차 간격을 이용하여 인근의 역행 차량에 회생전력을 보내는 방법을 주로 사용하고 있다.

그러나 이러한 방법은 차체에 부착된 저항기로 차량 중량이 필요 이상으로 증가하여 역행 동작의 필요 전력량을 증가시키게 된다. 또한 배차 간격이 유동적인 경우 인근의 역행 차량 활용에도 제한적이므로 결국 급전 시스템 변전소의 용량에 영향을 주게 되어 설비투자 비용을 증대시킬 수밖에 없다. 회생된 에너지를 열로서 소비하게 되면 역사의 온도가 상승함에 따른 냉방에너지 사용량이 더욱 증가하게 된다.

이러한 현상을 해소하기 위하여 국내에 우선 도입이 고려되고 있는 시스템은 잉여 회생전력의 상당 부분을 전철 변전소에 설치된 저항기로 강제로 배류시켜 소모시키는 방식이나 이는 곧 활용 가능한 전력의 손실이므로 잉여 회생전력 재사용에 대한 연구가 절실하다. 그림 3.133은 회생 전력을 저항의 열로 소비하는 기존 급전 시스템을 나타내고 있다.

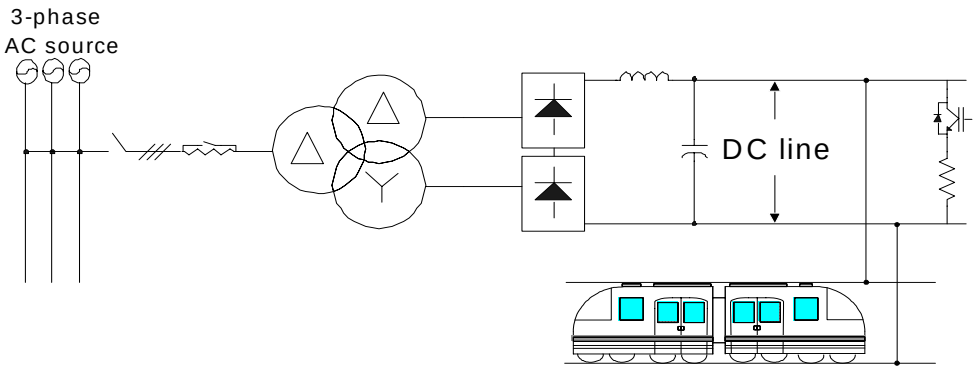


그림 3.133 기존 직류 지하철 급전 시스템

회생전력의 활용시스템은 우선 전철변전소에 회생전력 활용장치를 설치하여 전철 변전소가 담당하고 있는 계통 내에서 운행 중인 전동차에서 발생한 모든 회생전력을 해당 전철 변전소의 회생 전력 활용장치가 흡수하여 활용하는 방법이 있다. 또한 각 전동차에 저용량의 회생 전력 활용 장치를 부착하여 회생 전력을 전동차 자체에서 흡수하여 활용하는 방법으로 구분할 수 있다.

전자의 경우 기존 전철 변전소에 회생전력 활용장치를 설치함으로써 구간 내에 운용 중인 모든 차량의 회생 전력을 동시에 흡수하여 계통에서 활용이 가능하다. 또한 전동차에 부가적인 설비의 추가가 없고 기존 방식에서 저항기를 제거 또는 축소 할 수 있어 경량화에 따른 에너지 절약을 도모 할 수 있다.

후자의 경우 회생 전력 활용 장치를 차량에 부착하므로 기존 전철 변전소에 추가적인 설비 없이 곧바로 노선에서 활용이 가능하며 각 차량별로 회생전력을 활용하므로 적은 용량의 장치가 필요하게 된다. 그러나 각 차량별로 장치의 설치를 위한 부가적인 공간이 필요하게 되고 장치 추가에 따라 전체 중량이 증가하게 된다.

또한 구배, 선로 조건에 따라 회생 조건이 틀리므로 현재의 전력설비를 유지한 상태에서는 전철 변전소에 회생전력 활용 장치를 설치하는 것이 유리하다.

회생전력 활용 장치의 급전 시스템 설치와 관련한 국내외 연구 사례를 볼 때 회생 전력을 재활용하기 위한 방법은 본 과제에서 제안한 것과 동일한 전력변환 장치(회생인버터)를 사용하는 경우와 에너지 저장 장치를 활용하는 두 가지 방안으로 볼 수 있다.

표 3.48 회생전력 활용장치의 장점

항 목	장 점
전기제동 향상	- 제동의 안정된 동작에 따라 시스템 안정성 향상. - 전기 제동의 안정된 성능 확보에 따른 정차위치 정밀도 향상. - 공기제동의 사용량 경감에 따른 브레이크슈 마모 감소. - 제동 거리를 단축시키고 공기제동에 의한 차륜의 국부 마모 감소.
친환경	- 회생전력을 열손실로 소비하는 일이 없이 계통에서 재활용. - 공기제동 사용량 경감에 따른 분진 및 소음 감소. - 공기제동 사용량 경감에 따라 터널 내 온도 상승률 감소.
에너지 절약	- 열손실로 소모되던 회생전력을 고배단 부하에 활용 할 수 있어 전철 급전시스템의 전체 에너지 사용량 절약.

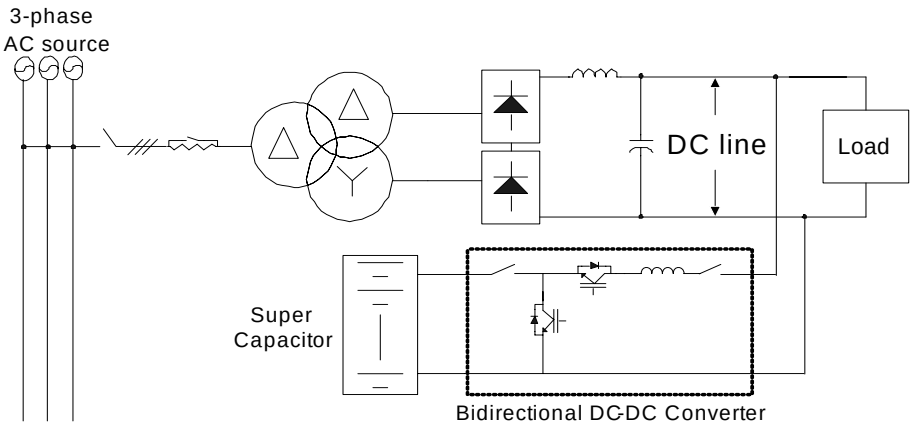


그림 3.134 에너지 저장 장치(슈퍼 커패시터)가 구성된 직류 급전시스템

에너지 저장장치는 플라이휠을 사용한 시스템과 슈퍼커패시터를 사용하는 시스

템으로 나눌 수 있다. 표 3.48은 회생 전력 활용 장치를 직류 전철 급전시스템에 도입함으로써 얻게 되는 장점을 나타내고 있다.

부산 지하철과 같이 다이오드 정류기가 아닌 사이리스터 소자를 이용한 정류기를 설치하거나 변압기에 가변탭을 설치하여 송출 전압을 인위적으로 변경할 수 있도록 하여 회생 전력 발생량에 따라 전압을 낮추어 차량의 전기제동 유효 시간을 늘여주는 방식도 있다.

기존 변전소의 설비를 변경하지 않고 단순히 사이리스터 초퍼 저항 장치를 정류기 출력단에 병렬로 설치하여 전철 계통에서 발생한 회생전력을 모두 열로 소비시키는 방법이 현재 일부 적용된 사례가 있다. 그러나 이러한 방법은 회생에너지를 재사용 하지 않고 모두 열로 소모시키는 방법이고 설비 투자비용이 높게 되는 단점을 가진다.

따라서 기존 직류 변전소 급전시스템을 변경하지 않고 회생인버터를 적용하는 방법이 가장 유효하다. 회생인버터 방식은 직류 가선에서 발생한 회생전력을 인버터를 통하여 회수하여 고압 배전단으로 배류시켜 전동차의 전기제동 유효율을 높이는 방식을 사용하고 있다.

그림 3.135는 회생인버터가 적용되어진 직류 급전시스템을 나타내고 있다. 현재 국내에서 개발할 회생인버터 장치는 기존 급전시스템에 적용가능하나 모두 회생기능에만 국한 되어 있다.

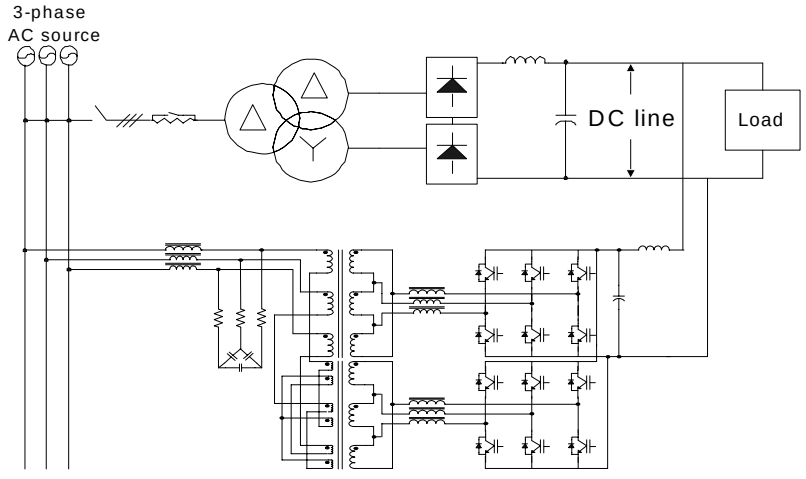


그림 3.135 회생인버터가 적용되어진 직류 급전시스템

그림 3.136은 일본 직류 지하철 급전시스템에 적용되어진 회생인버터 시스템을 나타내고 있다. 그러나 회생용 인버터에 사이리스터 소자를 사용하였기 때문에 위상제어에 따른 PWM방식보다 고조파 함유율이 높고, 회생용 인버터와 능동전력필터를 별도로 구성하였기 때문에 전체적인 전력 시스템이 커지는 문제가 있다.

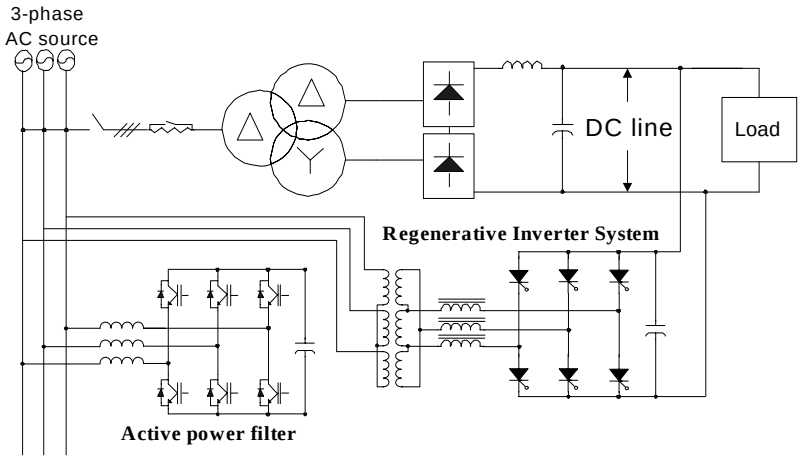


그림 3.136 능동전력필터가 별도로 구성된 사이리스터 회생장치

본 과제에서 개발한 PWM 회생인버터를 이용하여 가선전압의 상승분을 교류 모선으로 회생시킬 경우 직류 가선전압의 상승을 억제할 수 있고, 회생 되는 양 만큼 에너지를 절약할 수 있다. 또한, 전동차 시스템에는 평상시 전력변환 장치의 사용으로 고조파 전류발생, 역율 저하, 전압의 외형이나 불 평형이 수반되어 전력기기의 상호교란, 온도상승 등의 문제가 발생된다.

이러한 문제점을 해결하고자 본 과제에서 개발할 전력변환 장치는 회생전력이 발생하지 않는 경우 능동전력필터 기능을 함으로써 역률개선 및 고조파 저감 기능을 할 수 있다.

그림 3.137은 기존 직류전철 급전시스템인 12펄스 정류기에 제안된 회생 전력변환 장치를 추가로 설치한 구성도이다. 직류 가선 전압 상승분만큼 인버터가 회생에너지를 계통으로 회생 시키게 된다. 직류 가선 전압이 일정전압 이하로 감소할 경우 회생용 인버터로 동작 하지 않고 능동전력필터로 동작하게 된다. IGBT를 이용한 전력변환장치는 출력 측에 필터가 있으며 출력 변압기로 계통과 연결된다.

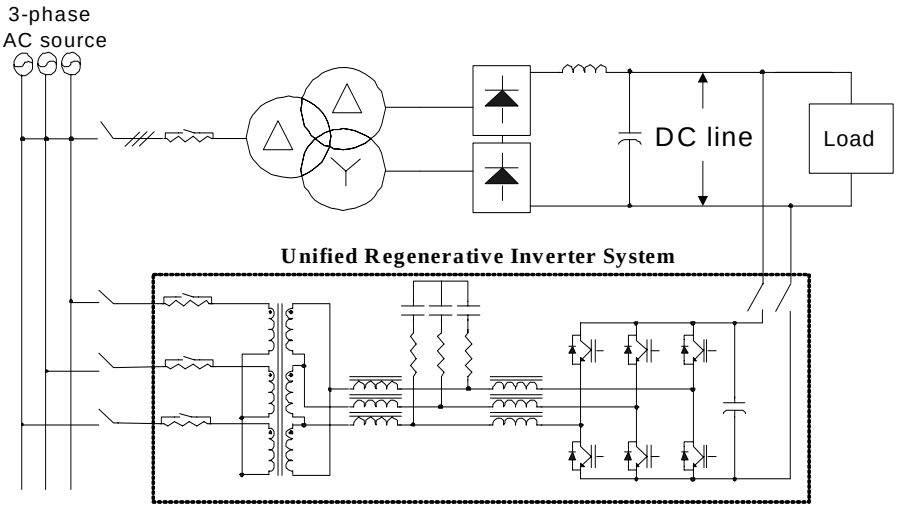


그림 3.137 회생 인버터 시스템이 적용된 지하철 급전시스템

나. 회생 인버터 제어 알고리즘

직류 가선 전압이 일정전압 이상으로 상승 시 제안된 시스템은 회생인버터로 동작한다. 그림 3.138은 제안된 시스템이 회생인버터 모드로 동작할 때 급전시스템의 전력흐름을 나타낸다.

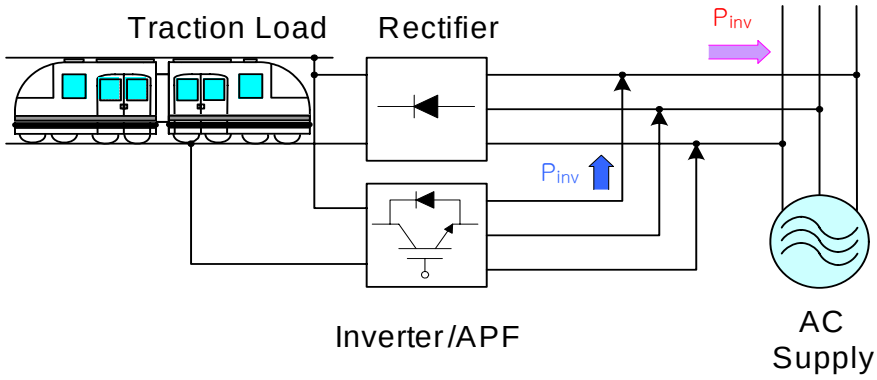


그림 3.138 제안된 시스템의 회생인버터 동작

그림 3.138과 같이 전동차가 제동할 때 구동용 전동기에서 회생 전력이 발생하게 되며, 이러한 회생 전력은 회생인버터를 통해 고압 고배단인 교류 계통으로 공급되게 된다. 기존 지하철 시스템에서는 잉여분의 전력을 저항에서 소비함으로 에너지 사용이 비효율적 이지만, 본 과제에서 개발한 회생인버터를 사용함으로써 잉여분의 회생 전력을 효율적으로 재사용할 수 있다.

또한 PWM 회생인버터는 전력의 흐름을 순시적으로 제어할 수 있기 때문에 회생인버터와 능동전력필터 동작이 빈번한 제안된 시스템에 가장 적합한 전력변환장치이다.

(1) 전압 방정식

그림 3.139는 3상 전원전압과 인터페이스 인덕터로 구성된 PWM 회생인버터의 간이 등가 회로를 나타낸다. 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e_a &= L\frac{di_a}{dt} + V_a \\ e_b &= L\frac{di_b}{dt} + V_b \\ e_c &= L\frac{di_c}{dt} + V_b \end{aligned} \tag{3-12}$$

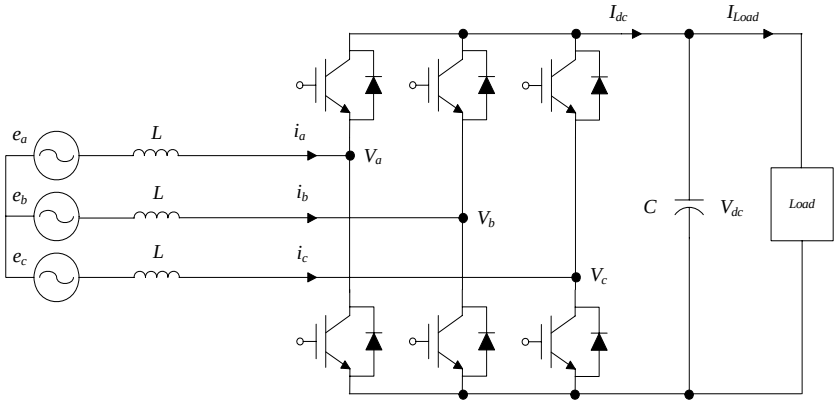


그림 3.139 전압방정식 해석을 위한 회생인버터 간이 회로도

여기서, e_a, e_b, e_c는 전원 전압, i_a, i_b, i_c는 상전류, V_a, V_b, V_c는 제어 전압이다. 그리고 L은 인터페이스 인덕터이다.

위의 방정식을 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$e_{abc} = L\frac{di_{abc}}{dt} + V_{abc} \tag{3-13}$$

여기서, $e_{abc}=[e_a, e_b, e_c]^T$, $i_{abc}=[i_a, i_b, i_c]^T$ 이고 $V_{abc}=[V_a, V_b, V_c]^T$ 이다.

(가) 동기좌표계(d-q) 전압 방정식

그림 3.140은 3상 정지좌표계의 벡터도와 2상 정지좌표계의 벡터도를 나타낸다. 2상 정지좌표계는 a, b, c상의 벡터 합으로 표현되는 것을 나타낸다. 3상의 변수를 임의의 좌표계로 변화하는 식은 다음과 같다.

$$f^{\omega}_{dqn}=T(\Theta)f_{abc} \tag{3-14}$$

여기서,

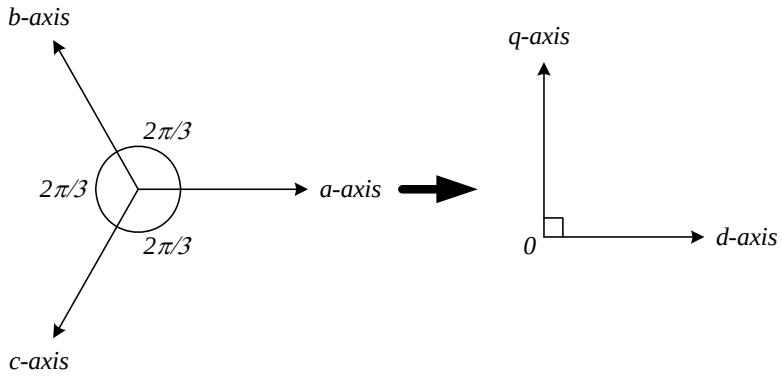


그림 3.140 2상 정지좌표계 변환 벡터도

$$(f^{\omega}_{dqn})^T=[f^{\omega}_d\ f^{\omega}_q f^{\omega}_n]$$

$$(f_{abc})^T=[f_a\ f_b f_c] \tag{3-15}$$

$$T(\Theta)=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}\cos\Theta & \cos(\Theta-\frac{2}{3}\pi) & \cos(\Theta+\frac{2}{3}\pi)\\ -\sin\Theta & -\sin(\Theta-\frac{2}{3}\pi) & -\sin(\Theta+\frac{2}{3}\pi)\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \tag{3-16}$$

여기서, $\Theta = \int_0^t \omega(\zeta) d\zeta + \Theta(0)$

로 정의 된다. 임의의 속도로 회전하는 좌표계에서의 3상 PWM 인버터의 $d-q$전압 방정식을 구하기 위하여, 식 (3-13)의 양변에 $T(\Theta)$를 곱하면 다음 식이 구해진다.

$$T(\Theta)e_{abc} = LT(\Theta)\frac{di_{abc}}{dt} + T(\Theta)V_{abc} \tag{3-17}$$

$$e^{\omega}_{dqn} = LT(\Theta)\frac{dT^{-1}(\Theta)i^{\omega}_{dqn}}{dt} + V^{\omega}_{dqn} \tag{3-18}$$

여기서. $e^{\omega}_{dqn} = [e^{\omega}_{d}, e^{\omega}_{q}, e^{\omega}_{n}]^{T}$, $i^{\omega}_{dqn} = [i_{d}{}^{\omega}, i^{\omega}_{q}, i^{\omega}_{n}]^{T}$, $V^{\omega}_{dqn} = [V_{d}{}^{\omega}, V^{\omega}_{q}, V^{\omega}_{n}]^{T}$ 이다. 식 (3-18)의 미분 항을 전개하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e^{\omega}_{dqn} &= LT(\Theta)T^{-1}(\Theta)\frac{di^{\omega}_{dqn}}{dt} + \frac{dT^{-1}(\Theta)}{dt} i^{\omega}_{dqn} + V^{\omega}_{dqn} \\ &= L\frac{di^{\omega}_{dqn}}{dt} + LT(\Theta)\frac{dT^{-1}(\Theta)}{dt} i^{\omega}_{dqn} + V^{\omega}_{dqn} \end{aligned} \tag{3-19}$$

또 변환행렬 $T(\Theta)$가 다음과 같은 성질이 있으므로

$$T(\Theta)\frac{d}{dt}T^{-1}(\Theta) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3-20}$$

식 (3-20)을 식 (3-19)에 적용하면 다음과 같은 $d-q$ 전압 방정식이 주어진다. 다시 표현하면

$$\mathrm{e}^{\omega}_{\mathrm{dqn}} = \mathrm{L_i}\frac{\mathrm{di}^{\omega}_{\mathrm{dqn}}}{\mathrm{dt}} + \mathrm{L_i}\begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\mathrm{i}^{\omega}_{\mathrm{dqn}} + \mathrm{V}^{\omega}_{\mathrm{dqn}} \tag{3-21}$$

$$e^{\omega}_{q} = L\frac{di^{\omega}_{q}}{dt} - \omega L i^{\omega}_{d} + V^{\omega}_{q}$$

$$e^{\omega}_{d} = L\frac{di^{\omega}_{d}}{dt} + \omega L i^{\omega}_{q} + V^{\omega}_{d} \qquad (3\text{-}22)$$

$$e^{\omega}_{n} = L\frac{di^{\omega}_{n}}{dt} + V^{\omega}_{n}$$

3상 평형전압과 3상 평형부하에서는 전압과 전류의 n상 성분은 영이 되므로 d 축과 q축의 변수만으로도 PWM 인버터 전압 식을 표현할 수 있다. 정지 좌표계에서의 d-q 전압 방정식은 식 (3-22)에서 $\omega = 0$을 대입함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e^{s}_{d} = L_{i}\frac{di^{s}_{d}}{dt} + V^{s}_{d}$$

$$e^{s}_{q} = L_{i}\frac{di^{s}_{q}}{dt} + V^{s}_{q} \qquad (3\text{-}23)$$

동기 좌표계에서의 d-q 전압방정식은 식 (3-22)에서 $\omega = 2\pi f$ (f : 전원 주파수)를 대입하여 다음과 같이 구해진다.

$$e^{e}_{q} = L_{i}\frac{di^{e}_{q}}{dt} - \omega L i^{e}_{d} + V^{e}_{q}$$

$$e^{e}_{d} = L_{i}\frac{di^{e}_{d}}{dt} + \omega L i^{e}_{q} + V^{e}_{d} \qquad (3\text{-}24)$$

전원 전압이 각주파수 ω를 가진 평형 3상 정현파 전압이라면 a상 전압을 기준각으로 하여 3상 전원전압을 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$e_{a} = -E\sin\omega t$$

$$e_{b} = -E\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \qquad (3\text{-}25)$$

$$e_c = -E\sin\omega t(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

여기서, E는 상전압의 최고치이다. 그러므로 전원전압은 $d^- q$ 정지좌표계에서 다음과 같이 표현되고,

$$e_q^s = -E\sin\omega t \qquad (3\text{-}26)$$
$$e_d^s = E\cos\omega t$$

$d^- q$ 동기좌표계에서는 다음과 같이 표현된다.

$$e_q^e = 0 \qquad (3\text{-}27)$$
$$e_d^e = E$$

식 (3-27)을 식 (3-24)에 대입하면

$$0 = L_i\frac{di_q^e}{dt} - \omega L_i i_d^e + V_q^e$$

$$E = L_i\frac{di_d^e}{dt} + \omega L_i i_q^e + V_d^e \qquad (3\text{-}28)$$

와 같이 된다.

입력전류가 기준전류를 추종하도록 하기 위해서, PI전류 제어기가 이용된다. 그러나 이 PI 전류 제어기는 식 (3-28)의 상호 연관된 시스템에서는 빠른 제어기로 동작하지 못한다.

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 (3-29)와 같은 전류 제어기를 이용하게 되는데, 그러면 전류 제어기가 좀 더 효과적으로 동작하게 되는 것을 알 수 있다.

$$V_d = \omega L i_q^e + E + \Delta V_d \qquad (3\text{-}29)$$
$$V_q = -\omega L i_d^e + \Delta V_q$$

여기에서 Δv_d 와 Δv_q는 전류제어기의 출력 신호로써,

$$\Delta v_d = k_p(i_d^{e*} - i_d^e) + k_i \int (i_d^{e*} - i_d^e) dt$$

$$\Delta v_q = k_p(i_q^{e*} - i_q^e) + k_i \int (i_q^{e*} - i_q^e) dt \qquad (3\text{-}30)$$

식 (3-30)과 같다. 상호 연관된 동적 시스템인 식 (3-28)에 전류제어기 식 (3-29)를 더함으로써 입출력 관계가 상호 선형 독립적인 1차 방정식이 되며, 용이한 가제어성을 가진 형태가 된다.

따라서, $d-q$ 동기좌표계에서의 전체 전류 제어기 식 (3-29)는 PI 전류 제어기의 과중한 부담을 감소시키고, 회생전류의 응답성을 향상 시킨다.

(2) 전압제어기 구성

전원측에서 공급되는 유효전력은 다음과 같다.

$$P_{\in} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = \frac{3}{2}(e_q^e i_q^e + e_d^e i_d^e) = \frac{3}{2} E i_d^e \qquad (3\text{-}31)$$

위 식에서 알 수 있듯이, 동기좌표계 d축 전류를 제어함으로써 전원측에서 공급되는 입력 유효전력을 제어할 수 있다. 그러므로 동기좌표계 d축의 전류를 “유효전력분 전류”라 한다. 전원전압과 전류가 정현파인 경우에, 역률(Power Factor, PF)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$PF = \frac{e_{dq}^e \cdot i_{dq}^e}{|e_{dq}^e||i_{dq}^e|} = \frac{i_q^e}{\sqrt{i_d^{e^2} + i_q^{e^2}}} \qquad (3\text{-}32)$$

그러므로 q축 전류는 유효전력과 무관하며 무효전력과 관련이 있으므로 “무효전력분 전류”라고 할 수 있고, 역률을 제어할 수 있는 전류임을 알 수 있다.

전동차가 전기 제동을 할 때 회생 전력이 발생하게 되면 직류 가선 전압이 증가

하고, 직류 가선상의 타 전동차가 역행시에는 직류 가선 전압이 감소하므로 입력전력을 제어함으로써 직류 가선 전압을 제어할 수 있다. 이는 곧 유효전력분 전류를 제어함으로써 직류 가선 전압을 제어하는 것과 동일하다.

그러므로 d축 전류 지령치는 직류 가선 전압을 일정하게 유지하기 위하여 가선에서 소비하는 전력에 대한 전향보상(feedforward)항과 직류링크 전압의 오차에 대한 궤환(feedback)항으로 구성 할 수 있다. 궤환 제어기로써 PI제어기를 사용하는 경우에는 다음 식과 같다.

$$i_d^{e^*} = [-K_p V_{dc} + K_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt] + P_{out} / (\frac{3}{2} E) \tag{3-33}$$

여기서 직류 가선에서 소비하는 전력은 직류 가선상의 전압/전류 정보로부터 구할 수 있다. 직류 가선 전압에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{C}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{\in} - P_{out} \tag{3-34}$$

여기서 C는 직류링크 커패시터이다. q축 전류제어가 완벽하고 가선상에서 소비하는 전력에 대한 보상이 완벽하다면 식(3-32)~(3-34)로부터

$$\frac{C}{2} \frac{dV_{dc}^*}{dt} = \frac{3}{2} E[-K_p V_{dc} + K_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt] \tag{3-35}$$

직류 가선 전압의 동작점(V_{dc0})에서 직류 가선 전압의 제곱을 테일러 시리즈로 전개한 후 , 2차 이상을 무시하여 구하면

$$V_{dc}^2 = V_{dc0}^2 + 2(V_{dc} - V_{dc0}) \tag{3-36}$$

이 되고, 이 식을 식 (3-35)에 대입하면

$$CV_{dc0}\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}E[-K_P V_{dc} + K_i \int (V^*_{dc} - V_{dc})dt] \tag{3-37}$$

이 된다. 위의 식의 전달함수를 구하면,

$$\frac{V_{dc}(s)}{V^*_{dc}(s)} = \frac{\frac{3}{2}\frac{EK_i}{CV_{dc0}}}{s^2 + \frac{3}{2}\frac{EK_p}{CV_{dc0}}s + \frac{3}{2}\frac{EK_i}{CV_{dc0}}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \tag{3-38}$$

과 같이 된다. 식 (3-38)에서 ω_n는 자연 비감쇄 주파수(natural undamped frequency)이고 ζ 는 감쇄비(damping ratio)이다.

PI제어기의 비례이득과 적분이득은 주파수 영역에서의 해석을 통하여 구 할 수 있다. 이 때, 직류 가선 전압제어가 원활히 수행되는 경우에는 직류 가선 전압의 동작점을 직류 가선 전압 지령치라고 생각할 수 있으므로, 비례이득과 적분이득은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_p = 2\zeta\omega_n \frac{CV^*_{dc}}{\frac{3}{2}E}$$

$$K_i = \omega_n^2 \frac{CV^*_{dc}}{\frac{3}{2}E} \tag{3-39}$$

이 경우 제어기의 대역폭(bandwidth)은 다음과 같이 정해진다.

$$BW = \omega_n[1 - 2\zeta^2) + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}]^{1/2} \tag{3-40}$$

동작점 부근에서의 선형화에 따르는 오차는 비례이득과 적분이득의 선정에 영향을 미치므로, 마치 파라메타 오차와 같이 해석될 수 있고 시스템의 제어성능에 큰 영향을 미치지 않는다.

(3) 역률제어기 구성

전원전압과 전류가 정현파인 경우에, 역률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$PF = \frac{i_d^e}{\sqrt{i_d^{e^2} + i_q^{e^2}}} \tag{3-41}$$

그러므로 역률제어를 행하기 위해서는 d축 전류 지령치를 다음과 같이 생성하면 된다.

$$i_q^{e^*} = i_d^{e^*} \frac{\sqrt{1 - PF^2}}{PF} \tag{3-42}$$

단위역률제어를 수행하는 경우에는 q축 전류를 영으로 제어하면 된다.

(4) 회생인버터 제어

그림 3.130은 3상 회생용 인버터의 전체 제어 블록도를 나타내고 있다. 전원 측 3상 전류를 2상 정지좌표계로 변환하여 이것을 다시 2상 동기 좌표계로 변환한다.

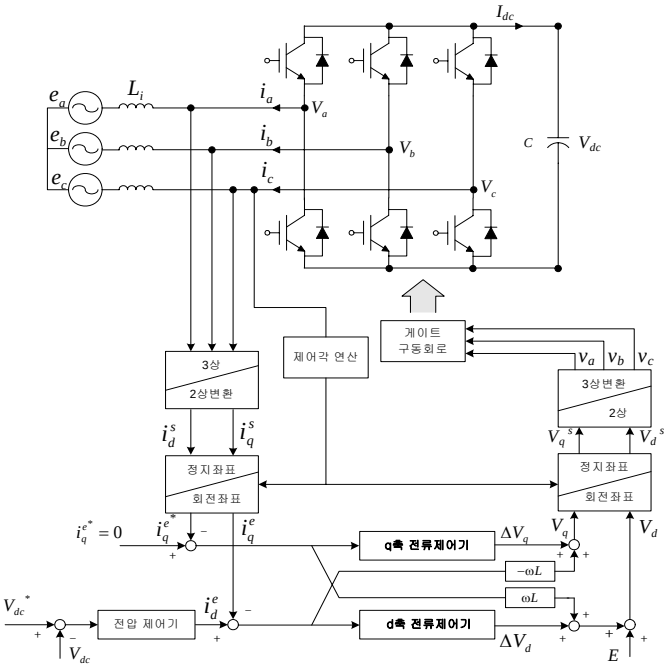


그림 3.141 회생인버터 모드 시 제어 블록도

여기서 q축 동기좌표계에서의 전류는 식 (3-30)에 따라 q축 전류 기준값과 비교한 값을 q축 전류제어기를 거쳐 q축 기준전압을 만든다. 또한 식 (3-30)에 따라 d축 동기좌표계에서의 전류는 직류 가선 전압을 검출한 값과 기준전압 값을 비교하고 전압제어기를 거쳐서 d축 전류 기준값을 만든다. 최종적으로 d축 전류제어기를 거쳐 d축 기준전압을 만든다.

그리고 각각 성분을 식 (3-24)에 따라 de-coupling 하게 되고 전류제어기의 응답성을 위해서 식 (3-29)에 따라 E가 추가된다. 이렇게 만들어진 d, q축 전압을 다시 역변환을 하여 게이트 구동회로의 기준값으로 입력되게 된다.

다. 회생용 인버터 연계운전 알고리즘

최근 직류 지하철 급전시스템에 회생인버터가 적용되어진 사례가 증가하고 있다. 쵸퍼 제어 방식이 감소하고 대도시의 고밀도 운송구간에 회생 제동을 얻기 위한 활용이 증가하고 있다. 회생인버터가 적용되어진 급전시스템의 경우 가선전압의 전압제어가 필수적이다. 전압제어의 목적은 다음과 같다.

- 에너지 재사용 및 에너지 사용량 저감
- 브레이크 슈 마모량 감소
- 변전소 전력 피크 감소

그림 3.142는 회생인버터가 적용되어진 직류 고속 전철 변전소의 전압 제어 패턴이다. 그림에서 영역 1은 실리콘 정류기가 동작하는 순변환 영역(역행)이고, 영역 2는 실리콘 정류기와 회생인버터가 동시에 동작하는 영역이다. 영역 3은 회생인버터가 동작하는 역변환 영역(회생)이다. 영역 4는 회생인버터가 정전압 동작하는 영역(회생)이다.

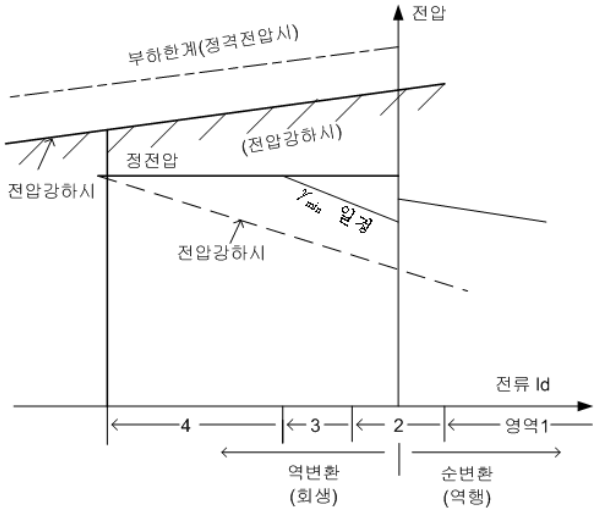
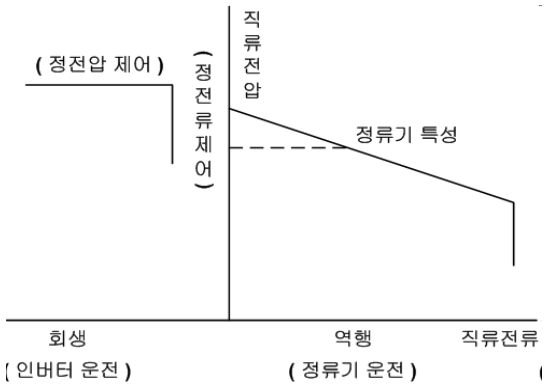


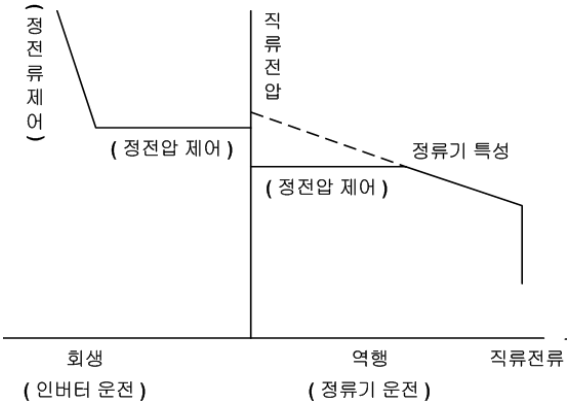
그림 3.142 변전소 전압제어

최근에는 회생인버터와 사이리스터 정류기를 각각 구성하거나 사이리스터 인버터(더블컨버터)를 사용하는 변전소에서도 전압제어를 하고 있다.

그림 3.143은 직류 변전소 회생인버터에 의한 전압제어 방법의 또 다른 예를 나타내고 있다. (a) 그림과 같이 인버터에 순환 전류를 흘리고 정전류 제어를 한다. 정전압 제어와 조합하여 사용할 수 있는 방식이다. 그림 (b)에서는 사이리스터 정류기를 사용하고 정류기 특성에 정전압 제어를 조합할 수 있다.



(a) 인버터 전압제어 1



(b) 인버터 전압제어 2

그림 3.143 회생인버터가 적용된 변전소 전압제어

이러한 제어 방법을 적용한 변전소의 경우 년 간 회생 전력량이 803MWh, 브레이크 패드의 교환 개수가 월 평균 205개(인버터 설치 전)에서 98개로 감소하였다.

그림 3.144는 또 다른 직류 고속 철도 변전소의 제어 예를 나타내고 있다. 정류기 부하전류가 감소하고, 직류 출력 전압이 E2에 근접하게 되면 인버터를 동작하게 되고 정류기와 인버터를 병렬 운전 할 수 있다. 정류기에서 회생인버터로 순환 전류가 흐르므로 초기 변환 속응성과 안정성을 향상 시킬 수 있다.

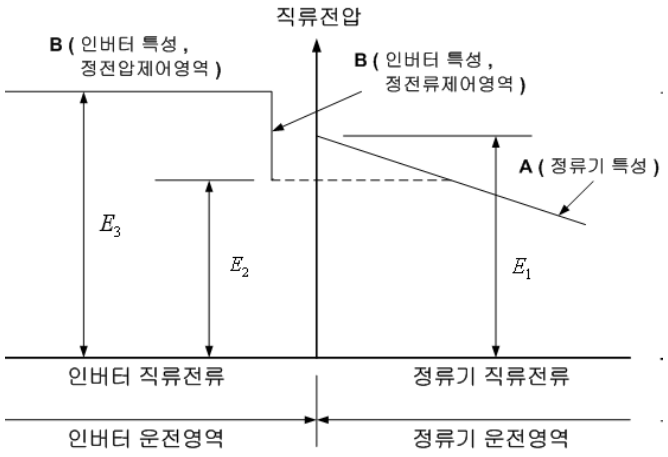


그림 3.144 회생인버터의 전압-전류특성 1

그림 3.145는 도시 전철 시스템에 적용되어진 제어 방법이다. 우선 사이리스터

정류기의 위상제어에 의한 정전압 제어를 수행하고 전차선 전압의 상승을 제어한다. 또한 전압차에 의해 인버터로 흐르는 순환전류 방지 제어를 추가 하였다. 인버터 제어는 기본적으로 사이리스터의 위상제어에 의한 정전압 제어를 하고, 전차선 전압의 상승을 저감하는 방식이다.

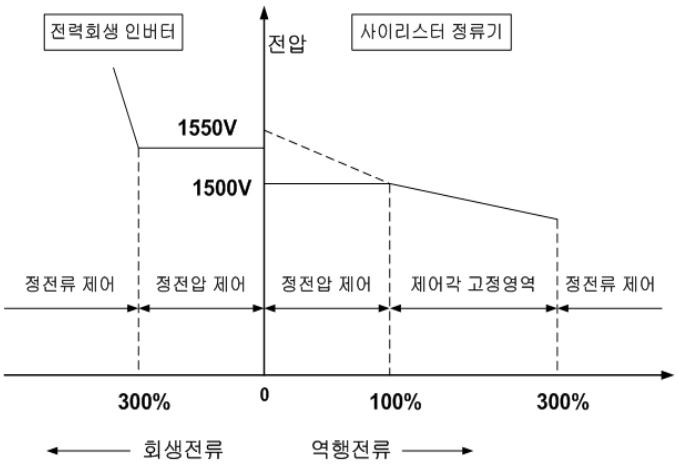


그림 3.145 회생인버터의 전압-전류특성 2

3. 능동전력필터

가. 고조파 발생 및 영향

(1) 개 요

전력수요의 증가에 따라 송전용량을 충분히 활용하고 전원 전압변동을 최대한 억제하여 양질의 전력을 공급하려면 전력계통과 부하와의 최적 인터페이스에 대한 연구가 필수적이다.

그 중에서도 전력전자 기기의 보급이 날로 증가 추세에 있어 전원과 전력전자기기 사이의 인터페이스에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 현재 우리의 전력품질은 전기사업법에 근거하여 전력회사 측에서는 정전시간, 전압적정율, 주파수유지율에 대한, 목표 관리치를 부여함으로써 적정하게 유지되어 왔다.

그러나, 최근 정보・통신・제어기술의 발달에 따라 정보 통신기기, 정밀 제어기기, 사무 자동화기기 및 전력용 반도체 소자의 대거 도입, 고효율 속도제어용 모터와 역률 보상용 커패시터의 사용, 그리고 경제 발전과 산업 활성화 등으로 인한 고정밀 단일 대형부하의 증가, 도시중심으로 변화되면서 이에 따른 대규모 아파트 단지의 등장, 단상 220V 가전제품의 대형화 등이 기존까지는 그다지 문제가 되지 않았던 전압・전류의 고조파 성분, 써어지 발생빈도, 순간 전압변동, 전압 불평형, 순간정전, 플리커 등과 같은 순시적 미소외란이 전력품질을 크게 저하시키고 있다.

이와 같은 순시적 미소외란은 그 외란의 크기가 작고, 순시적 국지적인 현상으로 나타나기 때문에 그 정확한 측정과 평가・진단이 어려워, 이에 따른 전력품질 유지 대책이 핫 이슈로 등장하고 있다. 이러한 순시성향의 전력 품질 저하현상은 본격적인 정보사회가 실현되는 21세기에 들어서게 됨에 따라 더욱 가속화 될 것이다.

(2) 고조파장해 대책(Harmonics)

최근 산업설비는 첨단화, 자동화 되면서 과거에 사용하던 설비들에 비해 전원품질 변동에 훨씬 민감한 장비들이다. 현대의 산업설비들은 주로 마이크로프로세서에 의한 제어방식을 채택하고 있으며, 전력품질 변동에 민감한 전력전자소자들로 구성되어 있다.

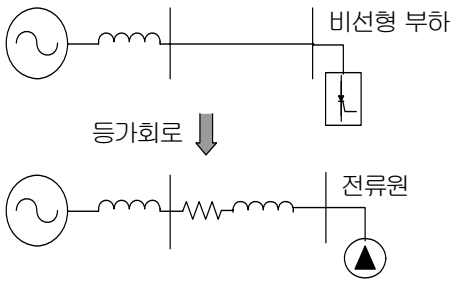


그림 3.146 비선형 부하의 고조파
전류원 등가회로

전력전자 소자들로 구성된 이러한 기기들의 사용은 필연적으로 고조파를 발생시키며, 이 발생된 고조파는 전원계통 측으로 유입되어 전원계통의 고조파 문제를 일으켜 수 많은 종류의 설비가 연계되어 있는 전원계통에서 불특정 설비의 오동작, 전력손실의 증가 등의 문제가 발생되고 있다.

또한 설비 중에서 히터의 온도제어를 위해 사용되는 전력 조정기에도 SCR, TRIAC 같은 전력전자소자가 대부분 사용되고 있으며, 특히 일반적으로 사용되는 위상제어방식은 전력전자소자의 점호각을 제어하므로 턴 온/오프 시 고조파를 많이 발생시키고 있다.

고조파가 함유가 되면 안정된 정현파가 일그러진 형태로 나타나게 된다. 원래 한전과 같은 전력회사로부터는 고조파가 보내지지 않는다. 가정에서 사용하는 개인용 PC로부터 오디오, 비디오, TV, FAX 기기에 이르기까지 거의 모든 가전제품은 교류 전력을 그대로 사용하지 않고 직류로 변환하여 사용하거나 정현파의 일부를 사용하게 된다. 고조파는 비선형 부하를 사용하는 장소에서 발생한다.

① 변압기, 회전기 등 철심의 자기포화에 의해 여자전류에 고조파를 함유하는 기기
② 전기아크로, 압연기, 용접기 등의 비선형 부하(변동부하)
③ 정류기를 사용하는 기기
④ 사이리스터 위상제어회로를 사용하는 기기
- 가정용 전기기구, 모터 드라이버, 조광장치, 인버터, 컴퓨터용 전원 등
⑤ 발생원은 아니지만 회로의 임피던스와 커패시터나 케이블의 정전용량과 병렬 또는 직렬 공진 할 때 고조파가 확대되는 수가 있다.

특히 산업용의 직류 정류기 전원장치나, 인버터를 이용한 속도제어장치 등은 사용전력이 매우 크기 때문에 파급효과도 커지게 된다.
이러한 변환장치는 크게 두 가지 문제 유형을 보이는데
첫째, 고조파 전류를 발생시켜 계통으로 유입시키고,
둘째, 지극히 낮은 역률을 나타내며, 역률 보상용 커패시터 뱅크에 과대한 고조파 전류를 유입시키는 것이다.

고조파는 공급 계통의 기본주파수의 정수배 주파수를 가지는 사인파의 전압 또는 전류를 말하며, 왜곡된 파형은 기본파와 고조파의 합으로 분리할 수 있다. 고조파 왜형은 전력계통의 부하와 기기의 비선형적인 특성에 의하여 발생되며, 이 왜형은 각 차 조파성분의 크기와 위상각으로 표현되는 고조파 스펙트럼에 의해 나타난다.

(3) 고조파가 전기기기에 미치는 영향

고조파가 전기기기에 미치는 주용 장해로는 전력계통에 고조파 장애가 가장 많은 전력용 커패시터, 리액터, 변압기, 발전기 및 유도전동기, 그리고 통신선 유도장해, 보호계전기의 오동작, 사이리스터 위상제어장치의 제어불량, 배선용 차단기와 누전차단기의 오동작 등을 들 수 있다.

① 전력용 커패시터 및 직렬리액터에 미치는 영향
- 특정 차수 고조파에서의 공진 현상 발생
- 전류 실효값의 증대
- 단자 전압의 상승
- 실효 정전용량의 증대

② 변압기에 미치는 영향
- 고조파 전류가 중첩되어 손실이 증대
- 철심의 자기왜곡으로 인한 이상음이 발생

③ 발전기에 미치는 영향
- 발전기에 유입된 고조파는 고정자 권선, 제동권선 등의 손실을 증가시키는 원

인과 함께 전압파형에 왜곡을 초래

④ 유도전동기에 미치는 영향

- 철손 및 동손의 증가
- 정상 진동 토크와 소음의 발생
- 축계의 비틀림 진동
- 회전수의 주기적 변동에 의한 맥놀이, 손실의 증가에 의한 온도 상승

⑤ 기타 영향

- 형광등의 커패시터, 쵸크 코일에 과대 전류가 흘러 과열, 소손
- 제어장치 등의 오동작 혹은 제어불능
- 컴퓨터 등의 연산착오 발생
- 계전기 등의 오동작, 전류 코일 과열

표 3.49 조파에 의한 장해현상

분 류	기 기	장해 원인	장해 현상	장해의 영향
송배전	변압기	고조파에 의한 과전류	과부하, 과열 이상음, 진동	절연노화, 수명저하
	진상 커패시터	〃	〃	〃
	지상리액터	〃	〃	〃
	3상 4선 케이블	〃	중성과열	〃
	계기용 변성기	〃	정밀도 약화	
	전력량계	〃	측정오차	코일 소손
	배전용 차단기	〃	오동작	
	누전차단기	〃	〃	
	부하제어장치	고조파에 의한 전압파현 왜곡	〃	
	과전류계전기	고조파에 의한 과전류 및 전압파형 왜곡	오차, 오동작	코일소손
	전력용 퓨즈	고조파에 의한 과전류	과열	융단
가전	라디오	고조파에 의한 과전류 및 유도장해	과열, 소음	수명저하
	텔레비전	〃	과열	〃
	앰프	〃	과열, 잡음	〃
지하철	전력변환장치	고조파에 의한 과전류 및 유도장애	과열, 잡음	보호계전기의 오동작 및 수명저하
	아크로	〃	〃	〃
	전기로	〃	〃	〃
	회전기기	〃	〃	〃
	변압기	〃	〃	〃

고조파 왜형의 정도를 나타내는 것으로서 THD(Total Harmonic Distortion)이라는 단위가 많이 사용되고 있지만, 전류왜형의 정도를 나타내는 데에는 문제가 잇다. 예를 들어 대부분의 가변속 드라이브 장치의 경우, 경부하 운전시는 입력전류에 대해서 높은 종합 왜형율을 갖는 특성을 갖고 있는데, 이것은 상대적인 왜형율

이 높지만 고조파 전류의 크기는 작기 때문에 이 경우 전류 왜형율을 THD로 나타내는 것은 큰 의미가 없다.

따라서 이러한 문제를 포함하여 고조파 전류를 특성화 시키기 위해서 IEEE에서는 새로이 TDD(Total Demand Distortion)이라는 것을 정의하고 있는데, 이는 각 차수별 고조파 전류의 제곱의 합의 제곱근을 정격전류로 나눈 수치로서 표현된다.

(4) 고조파에 의한 장해 방지 대책

3상 전원계통에 있어서 불평형 단상부하와 비선형 부하는 전원임피던스의 불평형 전압강하를 유발하여 3상 전원전압의 불평형을 가져오게 된다. 3상 전원전압의 불평형은 정지형 컨버터와 같은 비선형 부하의 특성화 되지 않은 저주파수의 고조파 성분을 발생시키고 이는 컨버터 시스템의 필터나 스위치 정격 용량을 증가시키는 요인으로 작용한다.

또한 불평형 전원이 인가되는 전기기기에 있어서는 낮은 역상분 임피던스로 인해 많은 양의 역상분 전류가 흐르게 되어 손실을 증가시킬 뿐만 아니라, 토크의 감소를 초래한다. 따라서 전원측 불평형 전압을 보상하여 부하측에 평형 전원전압을 공급해 줄 필요가 있다.

사이리스터 소자를 사용한 AC-DC 컨버터는 직류전동기 구동, 무정전전원공급장치의 입력단, HVDC 변환기 및 정지형 무효전력보상기의 한 형태인 TCR등에 폭넓게 사용 되어지고 있다.

이중 고전압의 응용분야인 HVDC 송전단이나 수전단의 전력변환기로서 12펄스 직렬 접속형 사이리스터 컨버터가 사용되고 있는데, 이때 사이리스터 컨버터의 스위칭 동작으로 출력전압과 입력전류에 12펄스와 관련된 고조파 성분이 발생하게 되어 입/출력 단에 11차 및 13차등의 고조파에 동조된 수동필터를 사용하여야 한다.

한편 인버터는 전동기의 가변속 구동장치, 무정전전원공급장치 및 무효전력보상장치등 많은 분야에서 사용되고 있다. 인버터 출력전압의 고조파를 제거하여 파형을 개선하기 위하여 여러 방식이 제안되었다.

기존의 다중화 방식은 복수의 인버터를 직렬 또는 병렬로 다중 접속하는 방법으로 대용량화하고 복수의 입/출력 전압/전류를 위상 변압기나 상간 리액터 등을 이용하여 결합시킴으로서 입/출력파형을 개선하는 방식이다.

고조파에 의한 장해의 방지 대책으로는

① 고조파 발생원에 대한 대책

- 필터의 사용 : 교류필터에 의한 고조파 흡수 또는 능동필터에 의한 고조파 제거 등
- 변환장치의 상수증가
- 위상제어각을 작게 함
- 직류전류의 리플을 저감
- 위상변이 : phase shift Tr. 설치
- ACL, DCL 설치
- PWM 제어방식의 반송주파수를 높게 한다.

② 장해를 받는 기기측의 대책

- 커패시터에 직렬리액터를 붙여, 임피던스를 고조파에 대해서 유도성이 되도록 하여 과대한 전류의 유입을 차단
- 보호계전기, 사이리스터 제어기기 제어회로의 입력부에 고조파 필터 설치

③ 배전전력계통으로의 대책

- 고조파 발생기기에 공급하는 배전선을 굵게 하여 임피던스를 작게 함
- 고조파발생 정도가 큰 기기는 대용량 전원계통에서 전용선로, 전용 변압기로 공급
- 배전계통의 절체에 의하여 선로구성을 바꿔 공진상태가 되는 것을 피함
- 전원의 상간전압이 불평형인 경우 정류기에 제 3고조파 발생이 크게 되는 염려가 있으므로 상간전압을 평균화 한다.
- 각각의 발생원에 대처할 수 없는 장해에 대해서 전력계통 측에 교류 필터를 설치

나. 능동전력필터

능동전력필터는 임의의 고조파를 폭넓게 보상할 수 있고, 보상되는 양을 순시적

으로 가변 제어할 수 있기 때문에 항상 최적의 전력 품질을 유지 할 수 있다. LC 필터에 비하여 고가이지만, 직류구간 전철 시스템에 대한 고려가 시작되고 있다.

L과 C로 구성된 수동필터는 직렬형, 병렬형 그리고 이를 혼합한 복합형으로 구분된다. 수동필터는 특정 차수의 고조파에 대하여 전원 측보다 낮은 임피던스를 취하게 함으로써 전류고조파 성분이 전원 측에 흐르지 않도록 한다. 이러한 수동필터 방식은 구조가 간단하고 설치 및 유지보수가 비교적 용이하다는 장점이 있으나 반면에 다음과 같은 단점이 있다.

a) 전원임피던스에 필터 특성이 크게 영향을 받는다. 고조파 전류의 제거정도는 필터 자체의 임피던스와 전원의 임피던스의 비율에 따라서 좌우되므로 전원의 임피던스를 측정할 수 있어야 수동필터를 용이하게 설계할 수 있다. 그러나 현실적으로 전원의 임피던스를 측정하기가 어렵기 때문에 필터 설계상의 어려움이 따른다.

b) 기본파와 더불어 고조파 전류 역시 필터를 통과하므로 필터의 정격이 높아야한다.

c) 고조파 전류성분이 증가되면 수동필터에 과부하가 걸리고 커패시터 양단의 전압이 증가하여 포화된다. 필터링 할 전류의 양이 증가하게 되면 전원과 병렬로 결선된 커패시터를 통하여 많은 양의 고조파가 도통된다.

d) 전원시스템과 수동 필터사이의 병렬공진이 발생하여 전원 측에서 특정주파수의 고조파 전류를 오히려 증가시켜 계통의 손실 증가를 가져온다.

e) 고조파 전류의 주파수 변동에 대해 성능저하의 문제를 발생한다.

교류 급전시스템에서 능동전력필터는 가격이 고가이고 손실이 크다는 단점이 있다. 그러므로 역률 보상용 커패시터, 수동필터와 능동전력필터가 결합된 고성능·저가격의 Hybrid 능동필터의 용량분배 최적화와 고조파 보상알고리즘이 필요하다.

직류급전 시스템의 경우에는 Hybrid 능동필터가 가격 및 용량 면에서 유리하지만, 본 연구에서는 회생이 주목적인 전력 변환장치의 용량이 능동 전력 필터의 용

량으로 충분하므로 100%능동 필터로 고조파 전류를 제거 한다.

또한 급변하는 부하에서는 수동필터는 속응성에 문제가 있기 때문에 능동전력필터로만 전력 품질 개선을 하는 것이 더욱 유리하다.

그림 3.147은 능동전력필터의 기본 원리도를 나타낸 것이다. 능동전력필터 부하전류 i_L에 포함된 고조파 전류를 제거하기 위해 보상전류 i_c를 주입하여 전원전류 i_s를 정현파로 복원하는 것이다.

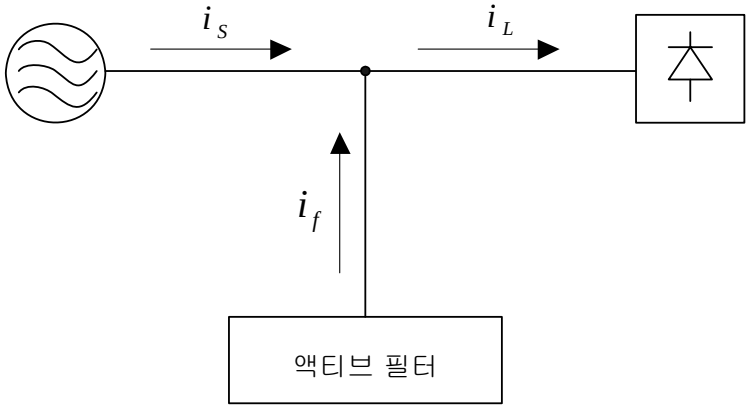


그림 3.147 능동전력필터의 원리

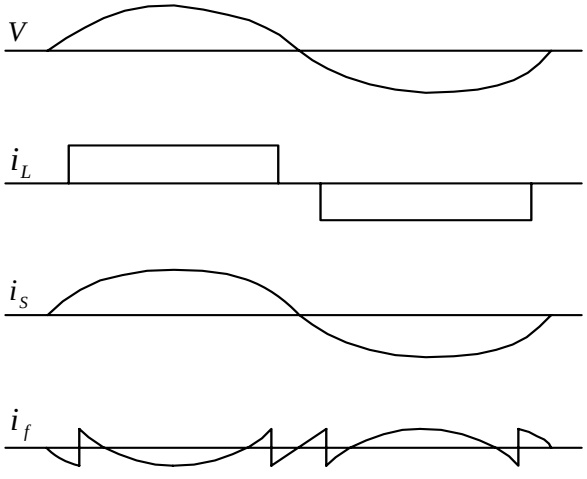


그림 3.148 각부의 파형

그림 3.148은 고조파 발생원으로서 3상 다이오드 정류회로를 가정했을 경우 각부

의 파형을 나타낸다.

그림 3.149는 그림 3.136의 능동전력필터의 고조파에 관한 등가회로를 나타낸 것이다. 여기서 고조파 발생원은 전류원 I_{Lh}로 가정하고, 능동전력필터는 보상전류 I_c 을 주입하는 전류원으로 가정한다.

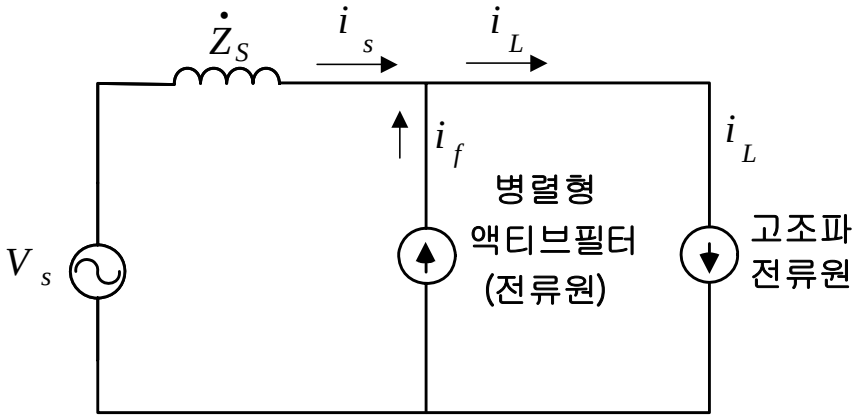


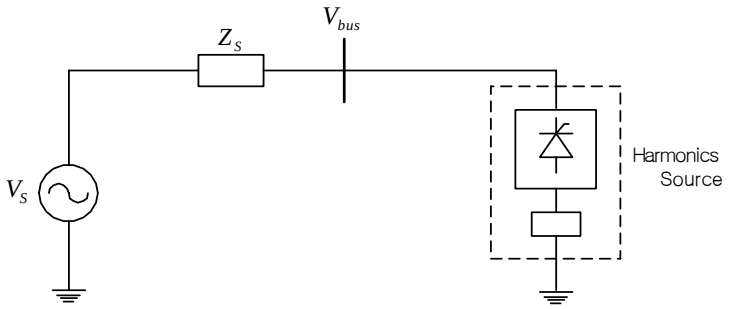
그림 3.149 능동전력필터의 고조파 등가회로

다. 능동전력필터의 분류

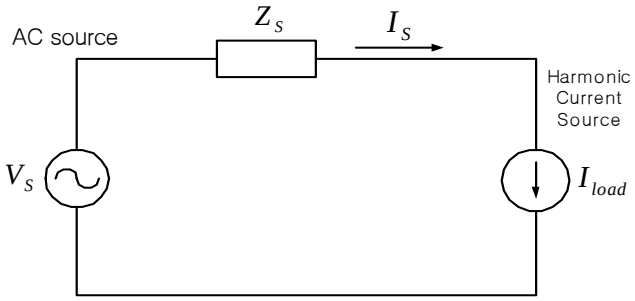
산업의 발전과 함께 사이리스터, 다이오드 등으로 구성된 반도체 전력변환장치들과 같은 비선형 부하의 사용이 급증하면서 이들에 의하여 발생되는 고조파 전류에 의해 전력회사와 소비자에게 전력품질에 심각한 문제를 발생한다.

위상제어 정류기를 사용하면 전류파형의 왜곡이 생기게 되어, 고조파 전류가 생기게 된다. 이러한 고조파는 정류기의 점호각, 파워서플라이의 인덕턴스, 직류부하 및 다른 파라미터에 의해 발생하게 된다.

그림 3.150의 (a), (b)는 사이리스터 위상제어 정류기와 등가회로를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 3.150 사이리스터 위상제어 정류기 및
등가회로

그림 3.151은 사이리스터 위상제어 정류기의 전원전압과 입력전류를 나타낸다.

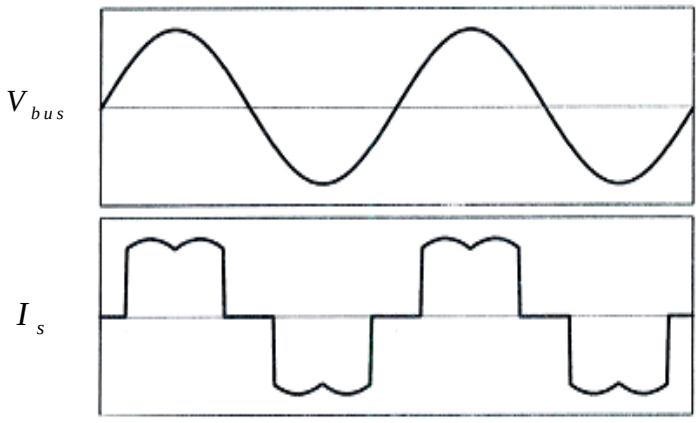
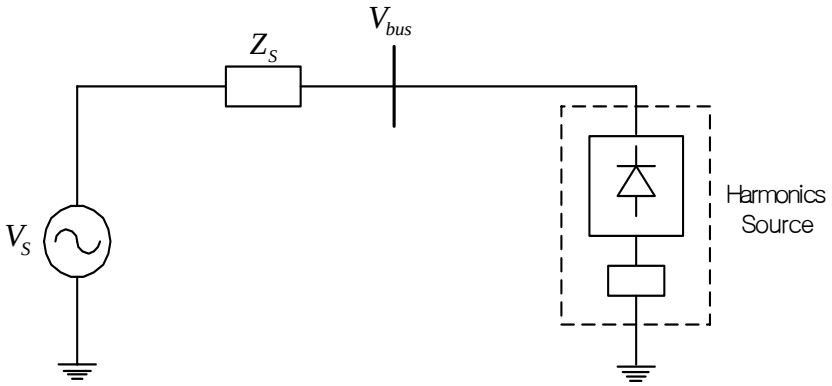


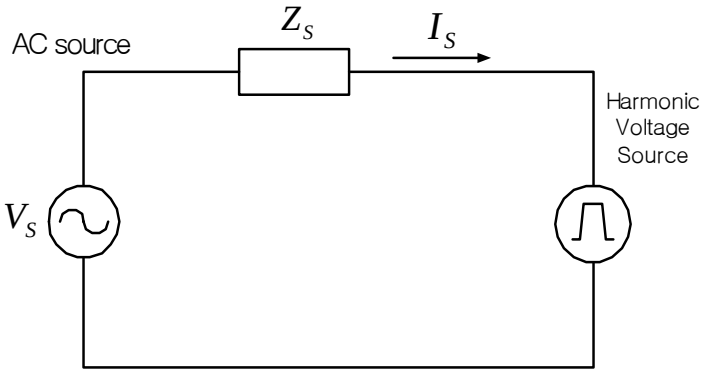
그림 3.151 사이리스터 위상제어 정류기 전원전압 및
입력전압

다른 고조파원은 정류된 출력전압의 맥동을 줄이기 위하여 그림 3.143의 (a)와 같이 DC 커패시터를 가진 다이오드 정류기이다.

그림 3.152의 (b)는 다이오드 정류기 시스템의 등가회로를 나타내며 다이오드 정류기는 고조파 전압원으로 나타낸다.



(a)



(b)

그림 3.152 다이오드 정류기 및 등가회로

따라서 고조파 전류는 정류기 전압, 고조파 전류의 량은 정류기 전압과 교류 임피던스에 결정된다. 그림 3.153은 다이오드 정류기의 전원전압과 정류기 입력전류를 나타낸다.

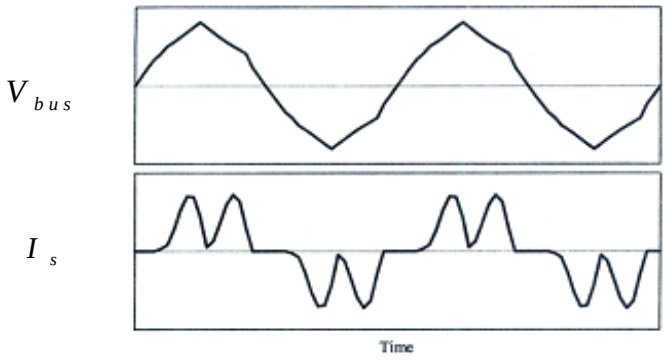


그림 3.153 다이오드 정류기 전원전압 및 입력전류

종래에는 수동 LC필터가 라인간의 고조파 장애를 제거하고 라인에 역률도 개선하는데 사용되었다. 그러나 실제적인 응용에서 수동필터는 고정된 보상이라는 단점이 있고, 상대적으로 크기가 크며 다른 시스템 요소에 공진을 일으킨다.

이러한 현상은 전력변환장치가 산업전반에 확대될수록 더욱더 가속화 될 것으로 판단된다. 전력품질 문제의 최적의 방법은 능동전력필터의 적용으로 해결할 수 있다.

먼저 능동전력필터의 현황과 각각의 특성을 요약하고 본 연구에 적절한 필터를 선정한다. 부하측 고조파 성분을 보상하기 위해 설계되는 능동전력필터의 경우 많은 제어 알고리즘이 발표 되고 있다.

능동전력필터는 주 회로 방식에 따라 전류형과 전압형, 결선 구조에 따라 직렬형 능동전력필터, 병렬형 능동전력필터, 복합형 능동전력필터로 분류된다.

실제 적용에 있어서는 병렬형은 사이리스터 컨버터와 같이 부하전류가 전류원의 특성이 강한 경우에 주로 적용되며, 직렬형은 큰 커패시터 필터를 지니고 있어서 전원전압의 첨두치 부근에서 돌입성의 큰 전류가 흐르게 되는 다이오드 정류기와 같은 부하에 적용된다.

또한 능동전력필터는 고조파 측정 방법에 의해서, 부하 전류 측정에 의한 궤환보상, 전원측 전압 측정에 의한 궤환 보상 등으로 분류 될 수 있다.

(1) 전류형 능동전력필터

전류형 능동전력필터는 펄스폭 변조 인버터 브리지 구조를 가지며 인덕터에 저

장된 에너지로 비정현 전류원의 역할을 하도록 구성된다. 직류회로에 비교적 큰 직류 인덕터를 설치하여 보상전류는 직류 인덕터에서 공급된다. 따라서 고조파 전류를 직접 주입함으로 응답특성이 좋고 변환장치 자체가 간단하며 신뢰성이 우수하다.

반면에 잔류 고조파를 제거하기 위한 필터를 부착해야 하며 일정전류의 직류를 리액터에 항상 흘리는 데 따른 손실이 증대되고 전압 고조파를 보상할 수 없다.

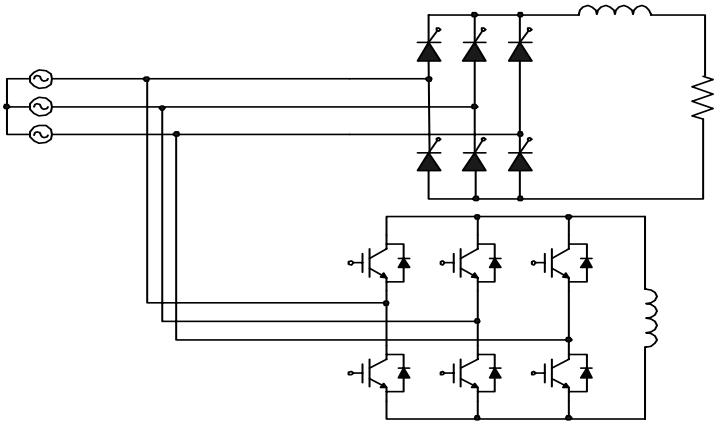


그림 3.154 전류형 능동전력필터

(2) 전압형 능동전력필터

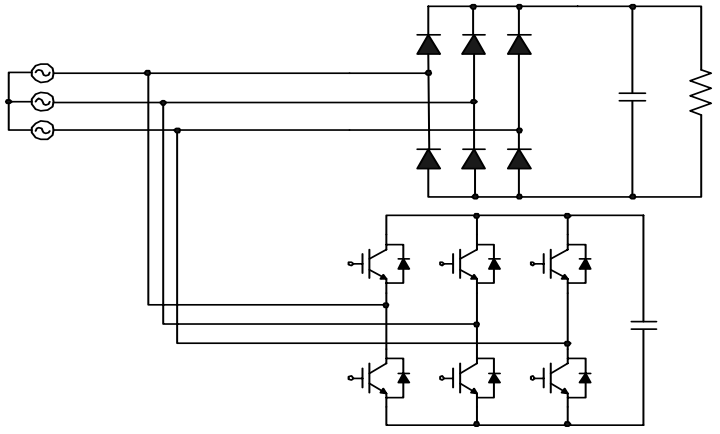


그림 3.155 전압형 능동전력필터

전압형 능동전력필터는 전류형과 마찬가지로 그림 3.144와 같이 펄스폭 변조 인

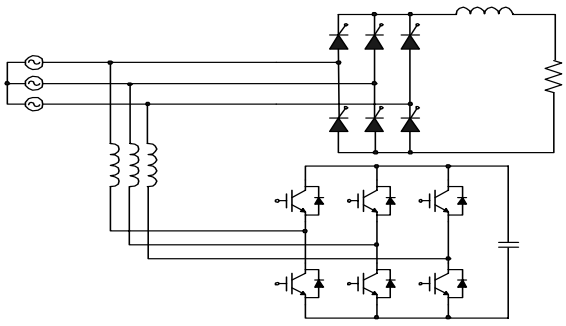
버터 브리지 구조를 갖으며 직류 커패시터에 저장된 에너지가 정 전압원의 역할을 한다. 직류측과 전원전압 사이에 전위차가 존재하면 대전류가 흐르므로 변환기와 전원사이에 전류 제한 요소로서 교류 리액터를 접속하게 된다.

이 리액터로 인해 시정수만큼 지연되므로 다소 느린 응답특성을 가지나 실시간 제어에 문제가 없고 잔류 고조파를 제거하기 위한 필터를 필요로 하지 않는다.

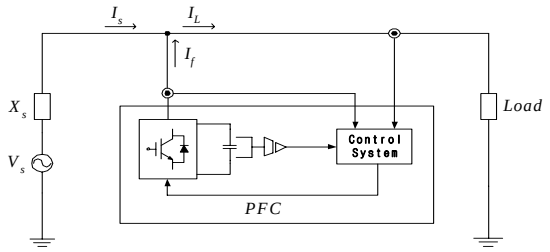
(3) 병렬형 능동전력필터

그림 3.156은 병렬형 능동전력필터의 구조를 보여주고 준다. 병렬형 능동전력필터는 부하측 고조파 성분을 능동전력필터 측으로 흐르도록 컨버터를 제어하여 고주파 전류 성분이 전원 측으로 역류하는 것을 방지 한다.

유도성 부하를 가진 다이오드 또는 사이리스터 정류기 등에 적합한 구조이다. Power factor 제어가 가능한 것이 장점이며 직렬형 능동전력필터와 Dual 관계에 있다. 그림 3.156의 (b)는 본 연구에서 사용하는 병렬형 능동전력필터의 제어방법을 간략화한 블록도를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 3.156 병렬형 능동전력필터

(4) 직렬형 능동전력필터

그림 3.157은 직렬형 능동전력필터의 구조를 보여준다. 직렬형 능동전력필터는 변압기를 통해 계통과 직렬로 연결되어 있다. 변압기 2차측의 전압을 제어하여, 부하 고조파 전류 성분에 대한 전원측 임피던스를 높여서 고조파 부하 전류가 전원에 역류하는 것을 제거할 수 있다.

일반적으로 유도성 부하를 가진 다이오드, 또는 사이리스터 정류기 등에 적합하다. 적은 용량으로 대용량의 부하에 대한 고주파 제거가 가능하며 AC 전압 조정이 가능하다.

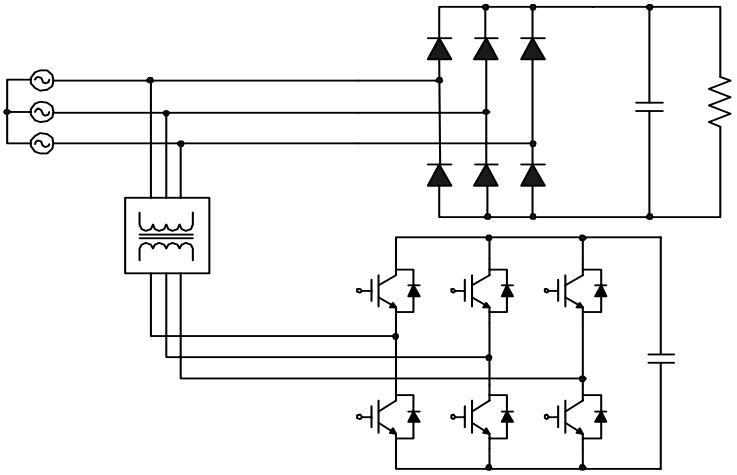


그림 3.157 직렬형 능동전력필터

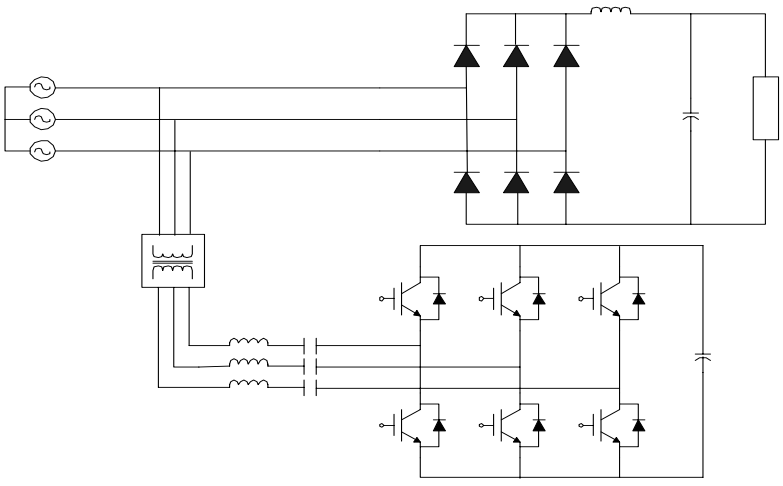
병렬형 능동전력필터로 가장 기본적인 형태로 계통으로부터 보상전류를 검출하여 부하에서 발생되는 고조파 전류를 상쇄시킨다. 직렬형 능동전력필터는 변압기를 통하여 계통과 직렬로 연결된다.

표 3.50 병렬형과 직렬형 능동전력필터의 비교

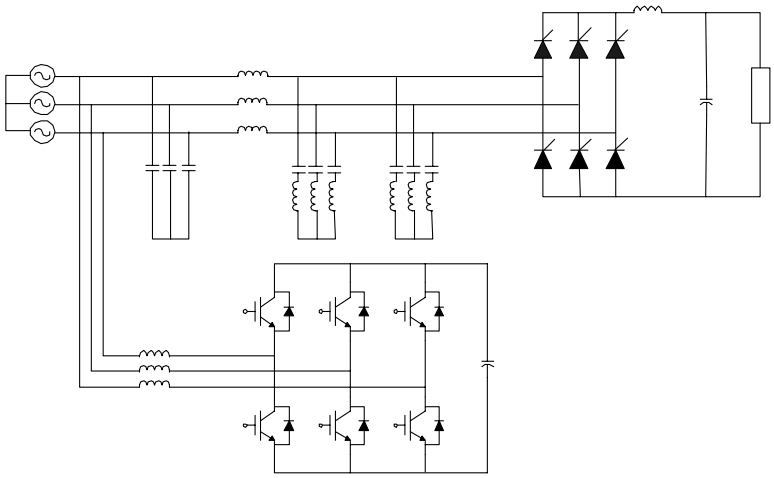
	병 렬 형	직 렬 형
시스템 구성	그림 3.156	그림 3.157
동작 특성	전류원으로 동작 고조파 보상 무효전력 보상	전압원으로 동작 전원과 부하사이의 고조파 절연 기본파 전압조정
적합한 부하	L 부하를 가진 다이오드 정류기 사이리스터 정류기, 사이리터 컨버터	C 부하를 가진 대형 다이오드 정류기

(5) 하이브리드 능동전력필터

수동형 필터(passive filter)와 능동형 필터(APF)의 결합형으로, 수동형 LC filter로 대부분의 고조파 보상을 하고, 나머지는 부분에 대해 능동전력필터가 동작하도록 설계된다. 따라서 능동전력필터의 용량이 줄어들고, 기존의 수동형 LC filter가 장착된 시스템에 적용 가능하다.



(a) 직렬형



(b) 병렬형

그림 3.158 직렬형-병렬형 복합능동전력필터

그림 3.158은 복합형 능동전력필터의 한 예로써, L과 C를 쌍으로 직렬로 수동필터를 결선하고 직·병렬로 능동필터를 부착한 형태이다. 직렬 수동필터는 고조파 전류를 방지하고 병렬 능동전력필터는 수동필터의 기능을 보완하면서 수동필터의 공진현상을 제거한다.

라. 수동전력필터와 능동전력필터의 비교

능동전력필터는 임의의 고조파를 폭넓게 보상할 수 있고, 보상되는 양을 순시적으로 가변 제어할 수 있기 때문에 항상 최적의 전력 품질을 유지 할 수 있다. LC 수동필터에 비하여 고가이지만, 사이리스터, 다이오드 정류기와 같은 전력변환소자에 의한 고조파 왜곡을 감소시키는데 유리하다. 특히 다이오드 정류기를 사용하는 직류구간 전철 시스템에서의 적용이 주목받고 있다.

L과 C로 구성된 수동필터는 직렬형, 병렬형 그리고 이를 혼합한 복합형으로 구분된다. 수동필터는 특정 차수의 고조파에 대하여 전원 측보다 낮은 임피던스를 취하게 함으로써 전류고조파 성분이 전원 측에 흐르지 않도록 한다. 이러한 수동필터 방식은 구조가 간단하고 설치 및 유지보수가 비교적 용이하지만 다음과 같은 단점이 있다.

① 전원임피던스에 필터 특성이 크게 영향을 받는다. 고조파 전류의 제거정도는 필

터 자체의 임피던스와 전원의 임피던스의 비율에 따라서 좌우되므로 전원의 임피던스를 측정할 수 있어야 수동필터를 용이하게 설계할 수 있다. 그러나 현실적으로 전원의 임피던스를 측정하기가 어렵기 때문에 필터 설계상의 어려움이 따른다.

② 기본파와 더불어 고조파 전류 역시 필터를 통과하므로 필터의 정격이 높아야한다.

③ 고조파 전류성분이 증가되면 수동필터에 과부하가 걸리고 커패시터 양단의 전압이 증가하여 포화된다. 또한 필터링 할 고조파 전류의 양이 증가하게 되므로 전원과 병렬로 결선된 커패시터를 통하여 많은 양의 고조파 전류가 바이패스 된다.

④ 전원시스템과 수동 필터사이의 병렬공진이 발생하여 전원 측에서 특정주파수의 고조파 전류를 오히려 증가시켜 계통의 손실 증가를 가져온다.

⑤ 부하의 변동에 따른 고조파 전류의 주파수 변동이 일어나므로 성능저하의 문제를 발생한다.

교류 급전시스템에서 능동전력필터는 가격이 고가이고 손실이 크다는 단점이 있다. 그러므로 역률 보상용 커패시터, 수동필터와 능동전력필터가 결합된 고성능·저가격의 Hybrid 능동필터의 용량분배 최적화와 고조파 보상알고리즘도 필요하다.

그러나 직류급전 시스템의 경우에는 Hybrid 능동전력필터가 가격 및 용량 면에서 유리하지만, 본 과제에서의 인버터 용량으로 동시에 능동전력필터 기능을 수행할 수 있다.

또한 급변하는 부하에서 수동필터는 속응성에 문제가 있기 때문에 능동전력필터로만 전력 품질 개선을 하는 것이 더욱 유리하다.

그림 3.159는 능동전력필터의 기본 원리도를 나타낸다. 능동전력필터에서 부하전류 i_L에 포함된 고조파 전류를 제거하기 위해 보상전류 i_c를 주입하여 전원전류 i_s를 정현파로 복원한다.

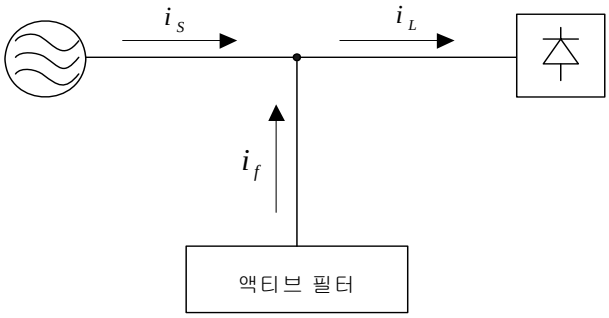


그림 3.159 능동전력필터의 원리

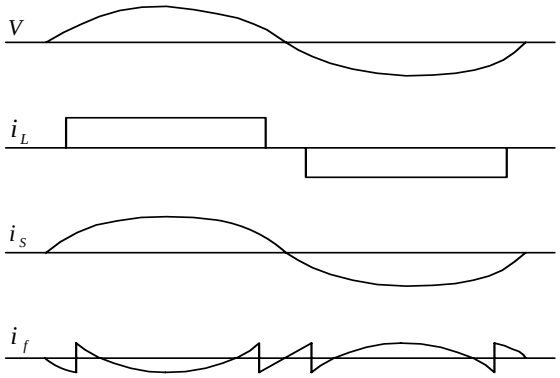


그림 3.160 각부의 파형

그림 3.160은 고조파 발생원으로서 3상 다이오드 정류회로를 가정했을 경우 한 상에 대한 각부의 파형을 나타낸다.

그림 3.161은 그림 3.159의 능동전력필터의 고조파에 관한 등가회로를 보여준다. 여기서 고조파 발생원은 전류원 I_{Lh}로 가정하고, 능동전력필터는 보상전류 I_c를 주입하는 전류원으로 가정한다.

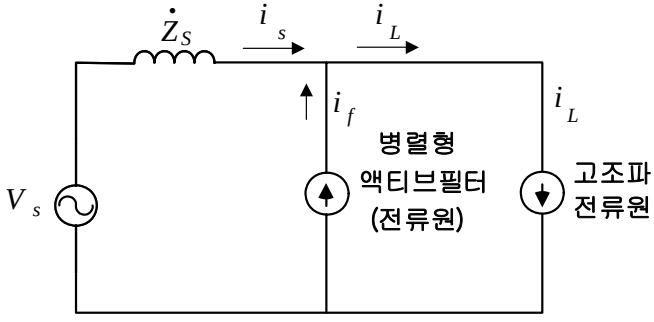


그림 3.161 능동전력필터의 고조파 등가회로

마. 순시 전력 이론

(1) 좌표변환

pq이론에서는 순시전압과 순시 전류의 양을 다루기 위해, 공간벡터(space vector)로써 전압과 전류의 양을 나타내며, 이 때 전원을 3상 3선식으로 보고 영상분 성분은 없는 것으로 한다. 공간벡터로서 나타낸 3상 순시전압과 순시전류의 벡터는 a, b, c상이 각각 120°씩 위상차를 가지고 있으며, 이 3상의 순시전압 v_a, v_b, v_c와 순시전류 i_a, i_b, i_c를 αβ상 즉, 2상 순시전압과 순시전류로 변환할 수 있다.

영상분을 포함하지 않는 a-b-c 좌표계의 3상 순시전압 v_a, v_b, v_c와 순시전류 i_a, i_b, i_c는 그림 3.162에서와 같이 αβ축상의 2상성분으로 전환되며 그 식은 다음과 같다.

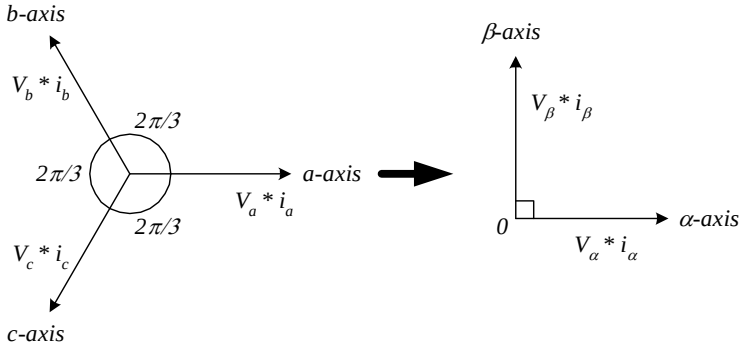


그림 3.162 $a\beta$ 좌표계

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{3-43}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3-44}$$

(2) 유효전력과 무효전력

일반적으로 3상회로의 순시전력 p는

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \tag{3-45}$$

로 부여되지만, αβ 좌표 상에서는 vα와 iα그리고 vβ와 iβ의 내적의 합이고 다음 식으로 나타내진다.

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = [v_\alpha \ v_\beta]\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{3-46}$$

전압원의 경우 (3-46)식의 p만으로는 순시전류 iα, iβ를 임의적으로 결정할 수 없다. 따라서 종래의 순시전력 p와 대등하게 다룰 수 있는 전기량(순시치)를 다음 식에서 정의한다.

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \tag{3-47}$$

이때 q의 성분은 vα와 Iβ 그리고 vβ와 iα의 외적의 합이 되고 식 (3-47)에서 음의 부호는 방향이 반대임을 나타낸다. 여기서 q의 값이라는 것은 p성분의 같은 평면상에 존재하는 값이 아니므로 일반적으로 말하는 무효전력과는 다른 값이 된다.

여기서 (3-46)식과 (3-47)식을 정리하면

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{3-48}$$

가 된다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} = v_\alpha^2 + v_\beta^2 \neq 0 \tag{3-49}$$

식(3-49)이 성립하므로, p와 q는 독립변수임을 알 수 있다. 따라서 다음 식(3-50)이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \tag{3-50}$$

전압원의 경우, (3-50)식을 이용해서 p와 q에서 순시전류 iα, iβ을 임의적으로 결정할 수 있다. 또한 식(3-43)에서 식(3-50)은 영상성분을 포함하지 않는 임의의 전압, 전류(순시치)에 대해서 성립한다.

(3) pq의 물리적 의미

(3-45)식과 (3-46)식에서 p의 각 항은 동상의 순시전압과 순시전류의 곱이므로 순시전력이다. 이것에 대해서 q의 각 항은 어떤 상의 순시전압과 다른 상의 순시전류의 곱이므로 에너지 (전력)로서 실체가 없는 전기량이다. 그래서 (3-43)식에 있어서 순시전류 i_α, i_β을 p와 q의 성분으로 분리하면 식(3-51)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} o \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \tag{3-51}$$

여기서 식(3-51)을 정리하면 다음과 같은 값을 얻는다.

αα상 순시유효전류 : $$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$$

αα상 순시무효전류 : $$i_{\alpha q} = \frac{-v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$$

β상 순시유효전류 : $$i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$$

β상 순시무효전류 : $$i_{\beta q} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$$

각 상의 순시유효전류와 순시무효전류는 p와 q에서 임의적으로 결정할 수 있다. 여기에서 α상의 순시전력을 p_α, β상의 순시전력을 p_β 라고 하면, 이것들은 각상의 순시유효전류와 순시무효전류를 사용해서 다음 식으로 유도된다.

$$\begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha i_\alpha \\ v_\beta i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha i_{\alpha q} \\ v_\beta i_{\beta q} \end{bmatrix} \tag{3-52}$$

또, 3상 (2상) 회로의 순시전력 p는

$$\begin{aligned} P &= P_\alpha + P_\beta \\ &= v_\alpha i_{\alpha p} + v_\beta i_{\beta p} + v_\alpha i_{\alpha q} + v_\beta i_{\beta q} \\ &= \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p + \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p + \frac{-v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q + \frac{v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \end{aligned} \tag{3-53}$$

가 된다.

여기에서 중요한 점은 식 (3-53)의 제 3항과 제 4항의 값이 서로 보수 관계이므로 합이 언제나 영이 되고, 다음의 식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= v_\alpha i_{\alpha p} + v_\beta i_{\beta p} \\ &\equiv P_{\alpha p} + p_{\beta p} \end{aligned} \tag{3-54}$$

$$\begin{aligned} 0 &= v_\alpha i_{\alpha q} + v_\beta i_{\beta q} \\ &\equiv P_{\alpha q} + p_{\beta q} \end{aligned} \tag{3-55}$$

단,

α상 순시유효전력 : $p_{\alpha p} = \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$

α상 순시무효전력 : $p_{\alpha q} = \frac{-v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$

β상 순시유효전류 : $p_{\beta p} = \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$

β상 순시무효전류 : $p_{\beta q} = \frac{v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$

각 상의 순시무효전력의 대수합이 늘 0이 되기 때문에, 순시무효전력이란 α상과 β상을 순환하고 있는 순시전력이라고 결론을 내릴 수 있다. 이것에 대해서 q는 각 상의 순시무효전력을 결정하는 3상회로의 중요한 전기적인 양이다.

(4) $p\,q$의 주파수성분과 무효전력, 고조파전류, 역상전류의 관계

식 (3-56)의 p, q의 직류성분과 교류성분을 $\overline{p}$, $\tilde{p}$, $\overline{q}$, $\tilde{q}$ 라고 하면.

$$\begin{aligned} p &= \overline{p} + \tilde{p} \\ q &= \overline{q} + \tilde{q} \end{aligned} \qquad (3\text{-}56)$$

이것들을 식 (3-51)에 대입하면,

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \overline{p} + \tilde{p} \\ \overline{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}57)$$

이 된다. i_α에 대해서 다시 나타내면

$$i_\alpha = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2+v_\beta^2}\overline{p} + \frac{-v_\beta}{v_\alpha^2+v_\beta^2}\overline{q} + \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2+v_\beta^2}\tilde{p} + \frac{-v_\beta}{v_\alpha^2+v_\beta^2}\tilde{q} \qquad (3\text{-}58)$$

이 된다. 식 (3-58)의 우변 제 1항은 기본파 유효성분 전류, 제 2항은 기본파 무효성분전류, 제 3항은 고조파 유효성분전류, 제 4항은 고조파 무효성분전류를 나타내고 있다. 특히, 일반적으로 고조파 전류의 순시치는 p의 교류성분 $\tilde{p}$에 의한 고조파 유효성분전류와 q의 교류성분 $\tilde{q}$에 의한 고조파 무효성분전류로 분리 할 수 있는 것을 나타낸다.

즉 이것은 유효성분에 기인하는 고조파 성분과 무효성분에 기인하는 고조파 성분이 같이 나타난다. 더욱이 q에 기인하는 전류성분 제 2항과 제 4항을 보상 대상으로 하는 능동전력필터는 유효성분에 기인하는 고조파는 존재하지 않고 무효성분에 기인하는 고조파 성분만을 포함하기 때문에 원칙적으로 위의 2가지 성분 보상시에는 에너지 저장요소를 필요하지 않는다.

바. 능동전력필터의 제어 알고리즘

능동전력필터의 주회로는 본 과제에서 개발한 전력변환장치를 사용하고, 회생동작이 정지한 후 정류기에서 전동차로 전력이 공급될 때 고조파와 무효전력을 보상하기 위해 능동전력필터 모드로 동작한다.

능동전력필터 제어는 보상할 목적에 따라 기본파 성분의 전류 또는 고조파 전류를 지령전류로 만들고, 지령전류에 의해 게이트 신호가 발생된다. 게이트 신호에 의해 발생된 보상전류를 계통에 주입하게 되면 무효전력과 고조파 전류는 저감된다.

기본적으로 3상 부하전류를 검출하여 α-β 변환을 거쳐 순시유효전력 p와 순시무효전력 q를 계산 한다.

$$\begin{pmatrix} i^{*}_{c\alpha} \\ i^{*}_{c\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^{2} + v_{\beta}^{2}} \begin{pmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{pmatrix} \tag{3-59}$$

그리고 식 (3-59)를 이용하여 레퍼런스 전류 $i^{*}_{c\alpha}$,와 $i^{*}_{c\beta}$을 계산하게 되고 다시 역 α-β 변환을 통해서 보상전류 i^{*}_{ca} , i^{*}_{cb}, i^{*}_{cc} 을 생성한다. 여기서 병렬 능동전력필터가 어떤 형태로 보상 할 것인가에 대해 4가지 경우가 있다.
여기서 그 4가지 경우에 대해 설명하면 다음과 같다.

$$p = \overline{p} + \tilde{p}$$
$$q = q + \tilde{q} \tag{3-60}$$

① 역률보상의 경우

$$\begin{pmatrix} i^*_{c\alpha} \\ i^*_{c\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{pmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \tilde{p} \end{pmatrix} \tag{3-61}$$

식 (3-60)에서 순시무효전력의 직류성분만 포함된다.

② 역률보상 & 무효 고조파성분 보상의 경우

$$\begin{pmatrix} i^*_{c\alpha} \\ i^*_{c\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{pmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ q \end{pmatrix} \tag{3-62}$$

식 (3-60)에서의 순시무효전력 직류성분과 교류성분이 모두 포함되는 경우이다.

③ 유효 & 무효 고조파성분 보상의 경우

$$\begin{pmatrix} i^*_{c\alpha} \\ i^*_{c\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{pmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{p} \\ q \end{pmatrix} \tag{3-63}$$

식 (3-60)에서의 순시유효전력의 교류성분과 순시무효전력의 교류성분이 포함되는 경우이고 유효전력성분이 존재하기 때문에 보상기의 에너지 저장 장치가 필요하게 된다.

④ 역률보상, 유효 & 무효 고조파 성분 보상의 경우

$$\begin{pmatrix} i^*_{c\alpha} \\ i^*_{c\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{pmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{p} \\ q \end{pmatrix} \tag{3-64}$$

식(3-60)에서의 순시유효전력의 교류성분과 순시무효전력의 직류성분 그리고 교류성분을 모두 포함하고 ③의 경우와 같이 에너지 저장 장치가 필요하게 된다.

능동전력필터는 임의의 고조파를 폭 넓게 보상할 수 있고, 보상되는 양을 순시적으로 가변 제어할 수 있기 때문에 항상 최적의 전력 품질을 유지 할 수 있다. 제안된 시스템이 능동전력필터로 동작하는 동안 인버터에서는 전철 부하에 의한 고조파 전류를 보상한다. 그림 3.163은 능동전력필터로 동작 시 전력흐름을 나타낸다.

그림 3.164는 본 연구에서 제안한 pq이론에 의한 능동전력필터의 제어 블록도를 나타내고 있다. 계통 측 전압과 전류를 검출하고 2상 정지좌표계로 변환하여 V_α, V_β V_α, V_β와 I_α, I_β로 변환하여 이들의 곱으로 순시 전력 p와 q를 구한다.

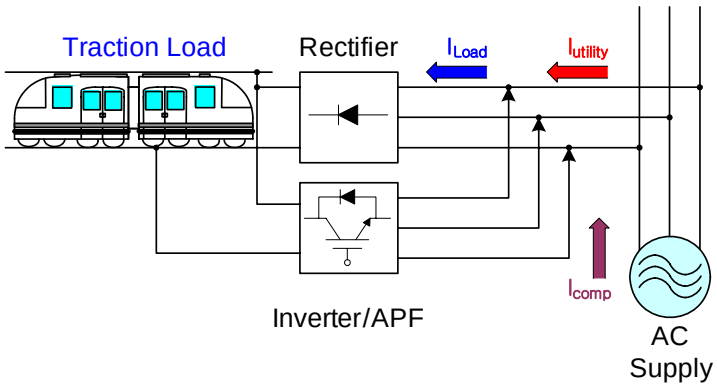


그림 3.163 제안된 시스템의 능동전력필터 동작

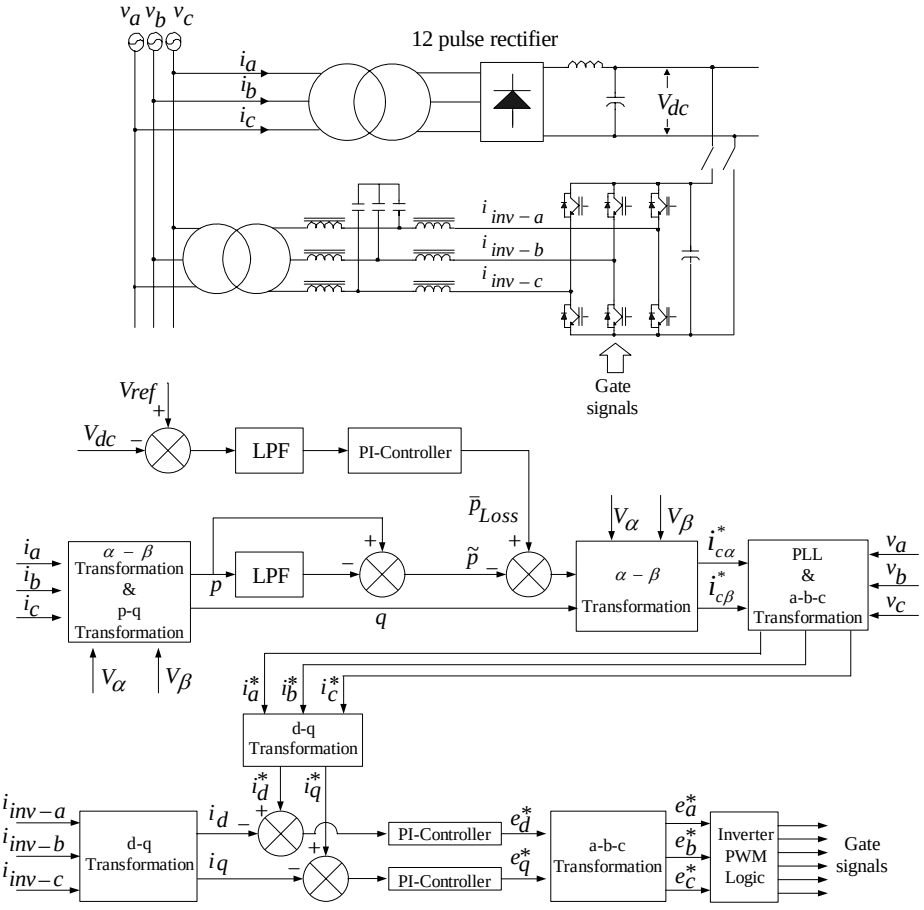


그림 3.164 능동전력필터의 제어 블록도

저역필터(low pass filter)를 통과한 $\tilde{p}$와 전압제어기를 통과한 $\bar{p}_{Loss}$의 차와 q 값의 합이 보상해 주어야할 값이기 때문에 이들의 합을 다시 역변환하여 3상 좌표계로 변환해 준다. 이때 전압제어기를 통과한 $\bar{p}_{Loss}$의 값은 유효전력의 값으로 더해주거나 빼주어야 하는 값이기 때문에 유효전력 p의 값에 관계된다. 위상검출기를 통한 PLL회로를 통해서 리액터와 변압기로 인한 위상지연을 보상해 준다. 최종적으로 실제 인버터 출력 전류 $i_{inv-a}, i_{inv-b}, i_{inv-c}$의 값을 $d-q$변환하여 i_d, i_q 의 값으로 나타낸다. 다시 3상 좌표계로 변환되어 전력변환장치의 구동회로에 지령치로 입력된다.

4. 전압강하 보상 기능

최근 산업이 급속히 발달함에 따라 정교하고 민감한 부하가 많이 등장하면서 고품질의 전력을 공급하는 문제가 크게 대두되고 있다. 사무실 같은 업무시설의 경우 컴퓨터와 사무자동화를 위한 각종 기기들이 많이 보급되어 있으며, 지하철과 같이 대전력을 사용하는 시스템에서도 고품질의 전력을 공급받아야 하는 전력변환 기기들이 사용되고 있다. 이러한 기기들은 모두 배전계통에서 전력을 공급받아 동작하는 반도체 스위칭 회로를 내장하고 있는데, 이들 스위칭 회로는 내부구조나 동작원리상 배전계통에서 발생하는 정전, 전압강하, 과도전압, 고조파 등과 같은 외부 외란에 대단히 민감하다.

따라서 이러한 외부 외란을 제거하지 않으면 관련 장비의 고장이나 오동작을 일으켜 생산 지연이나 조업중단과 같은 막대한 손실을 초래한다.

배전계통에서 발생되는 교란은 전력설비나 선로의 고장, 절연파괴, 선로의 스위칭, 캐패시터의 스위칭, 대용량 변압기나 모터의 에너지 공급, 그리고 가변속 구동장치, 정류기 등과 같은 비선형 부하의 인가에 기인한다.

이들 교란은 순간정전, 순간전압강하, 순간전압상승, 고조파, 플리커 현상 등을 야기하며 이들의 정의는 다음과 같다.

1) 정전(interruption)

정전은 장시간 정전과 단시간 정전으로 나누어진다. 장시간동안 일어난 정전은 수용가나 설비의 전압이 0으로 떨어져서 자동적으로 복구되지 않는 상태를 나타낸다. 국제 전기 표준회의에서 정의한 내용은 3분 동안 지속되는 정전을 장시간 정전이라고 규정하고 있으며 미국 전기전자공학회 에서는 3초 이상 또는 2분이상의 정전으로 규정하고 있다. 단시간 정전에는 선로에 발생된 문제가 해결되거나 또는 모선의 바이패스 스위치를 사용하여 자동적으로 전원공급이 되는 경우이다.

2) 순간전압강하 및 순간전압상승(voltage sag/swell)

전압강하는 한주기 내에서 길게는 2초에서 3초 동안 최저의 한도를 벗어나는 것을 의미하며 배전선로에서의 지락사고나 부하의 변화 또는 대용량의 전동기 기동시 발생하게 된다.

순간전압상승은 짧은 시간동안 그 최고한도를 벗어나는 것으로 부하의 급격한 감소나 중부하의 탈락으로 발생된다[28][29].

3) 고조파(harmonic)

전력계통에서의 전압, 전류 파형은 정현파를 표준으로 하고 있는데 전력용 반도체를 사용한 정류기 등의 전력변환기나 비선형 기기의 전력이 공급되면 이들 기기로부터 고조파가 발생하고 전원계통에 고조파 성분이 포함되게 된다. 최근에 전력전자 설비의 증가와 함께 그 용량이 커짐에 따라 고조파 함유율이 많아지고 이로 인해 통신선 유도장해 및 일반기기의 오동작 등의 문제점이 발생한다.

4) 플리커(flicker)

일반적으로 전압의 크기가 변동하게 되면 설비에 공급되는 전력의 크기도 변동하게 된다. 이러한 전압의 변화로 인해 기기의 영향을 미치게 된다. 따라서 전압크기 변화의 주파수가 1 ~10Hz로 사람의 뇌가 감지할 수 있는 현상을 플리커 현상이라고 한다.

가. 전압강하 방지 대책

미국은 NPL(National Power Laboratory)이 전력품질을 평가하기 위해 정의한 전원장해를 통계적으로 분석하였다. 이 보고에 의하면 미국 대도시에서 컴퓨터 및 사무용품 제조협회에서 설정한 한계를 벗어나는 사고는 연간 443건 정도이다.

그중 순간전압강하에 의해 발생하는 사고는 전체의 60%를 차지하고 서지로 인한 사고 발생률이 29%, 스파이크가 8%, 반면에 정전은 3% 정도인 것으로 나타나 있다. 따라서 순간전압강하와 서지에 의해 발생하는 사고가 89%로 이에 대한 대책이 시급함을 알 수 있다.

교란에 관계없이 부하에서 요구되는 전압을 공급할 수 있도록 고안되어 현재 가장 많이 사용중인 장비는 배터리와 전력변환기로 구성되어 있는 UPS (Uninterruptible Power Supply)와 SPS(Stand-by-Power Supply) 이다.

전압강하에 대한 방지대책은 영향을 받는 기기 자체의 개별대책과 공급 측에서의 대책으로 구분된다. 기기 개별대책은 예를 들면 커패시터의 용량을 증대하여 전

압유지 시간을 연장하는 방법이다. 이러한 경우 시스템 가격을 상승시키고, 한시적인 방법에 불과하여 UPS나 SPS의 사용을 들 수 있다.

이러한 설비는 전력회사가 공급하는 전원과 민감한 부하사이에 병렬로 연결되어 평상시에는 전력회사의 공급전원으로 직류에너지 저장요소인 배터리에 충전한다. 이렇게 충전된 에너지는 인버터를 통해 교류전력으로 바뀌게 되고 부하에 공급하게 된다.

직류 급전지하철 시스템의 경우, 계통 측 사고발생은 발생빈도는 적지만 역사 내 부하설비는 과부하로 인한 사고가 빈번히 일어난다. 이러한 역사 내 부하설비 사고를 초기에 방지하고자 UPS나 SPS와 같은 비상용 전원공급 장치를 설치한다.

그림 3.165는 UPS의 기본회로 구성을 나타낸다. 이 회로에서는 배터리와 인버터 시스템이 민감한 부하에 교류전력을 공급하고 전력회사의 공급선은 배터리를 연속적으로 충전하는 데만 사용된다. 만일 인버터와 배터리시스템이 고장이면 전력회사의 전력을 직접부하에 공급할 수 있도록 바이패스 스위치가 연결되어 있다.

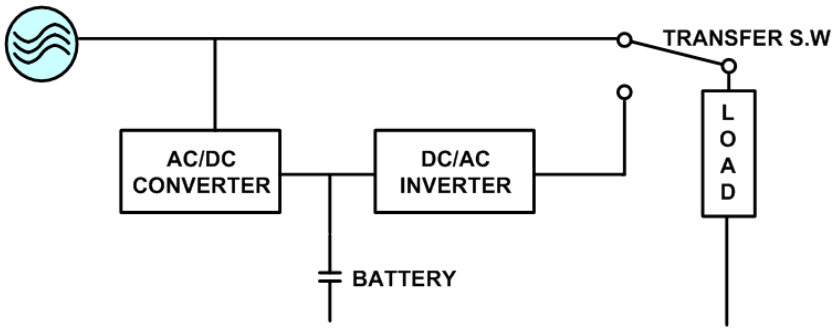


그림 3.165 UPS 시스템 블록도

이 시스템의 특징은 전력회사가 공급하는 전력과 UPS가 전기적으로 완전히 분리되어 있어 배전계통에서 발생하는 모든 장해에 대해 완전히 자유로운 전력이 부하에 공급된다. 그러나 이 시스템은 항상 정격으로 동작하는 전력변환장비를 요하므로 에너지 저장용량이 크고 동작하는 경우 발생하는 손실이 대단히 크다.

그림 3.166은 SPS의 기본구성을 나타낸다. SPS에서도 배터리와 인버터가 전력회사의 공급전력과 병렬로 연결되며, 통상 부하에서 필요한 전력은 전력회사의 공급선에 의해 직접 공급되고 전압강하 보상기는 대기 상태로 있다가 고장 시 반도체 스위치에 의해 선로를 분리하고 배터리와 인버터를 투입하여 전력을 공급하는 방

식이다.

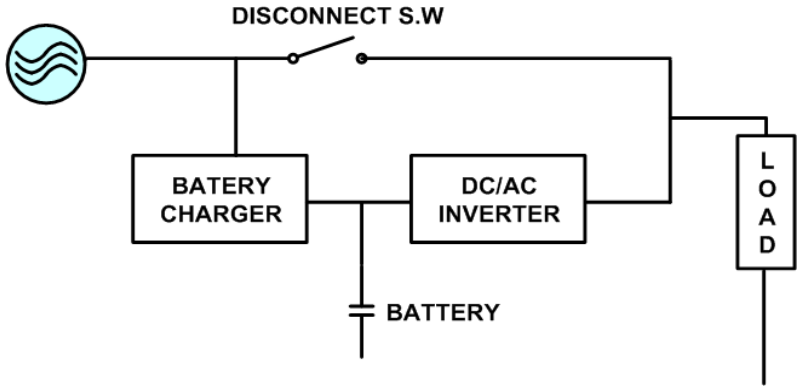


그림 3.166 SPS 시스템 블록도

만일 배전계통의 장애가 오랫동안 지속되면 차단기를 열고 배터리와 인버터에 의해 계속해서 부하전력을 공급한다. 그리고 계통의 장애가 제거되면, 차단기를 닫고 배터리와 인버터 시스템은 다시 대기상태로 되돌아간다. 이 경우 역시 전력변환기는 부하의 최대 정격에 맞게 설계되어야 한다.

SPS는 전원장애시만 동작하므로, 동작손실과 비용은 UPS에 비해 낮다. 그러나 이 장비의 단점은 투입 시 발생되는 과도현상과 고조파가 부하에 그대로 전달된다.

다음과 같이 전압강하보상은 비록 부하가 동작하는 동안 또는 전원장애의 경우의 차이는 있어도 궁극적으로 모든 부하의 정격에 해당하는 배터리와 인버터 정격이 요구된다. 따라서 별도의 UPS나 SPS의 경우 가격이 높고 설치 공간을 많이 필요로 하며 전압강하 보상장비가 아닌 비상용 전원의 기능을 갖는다.

서두에 언급했듯이 비상용 전원공급 장치는 역내 부하설비에 관련하여 비상용 전원으로 설치하게 된다. 하지만 직류 급전지하철 시스템의 계통 측 사고나 주 정류기 고장으로 인해 부하 측으로 원활한 전력공급이 이루어 지지 않는 경우에는 대전력을 소비하는 시스템이기 때문에 UPS나 SPS로 직류 급전지하철 시스템의 전력을 충분히 공급할 수 없다.

따라서 계통 측 사고발생 시 전원장애가 일어날 것을 대비하여 주 정류기와 별개로 변전소에 예비정류기를 설치한다. 이러한 예비정류기는 사고발생 시 바이패스 스위치에 의해 절환되어 부하 측 전력을 공급하게 된다. 이러한 시스템의 경우 공간이 한정된 변전소에 예비정류기를 설치하기 때문에 공간 활용도가 떨어지고 시

스템 구성비용이 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 계통 측 사고나 주 정류기 고장으로 인한 사고를 방지하여 현 시스템의 단점을 보완하는 새로운 시스템을 제안하였다.

나. 전압강하 보상 시스템

국내의 표준 직류 급전시스템은 특/고압 22.9kV의 일반 계통으로부터 수전한 교류전력을 전철 변전소 변압기에서 1200V로 강압한 후 12펄스 정류기에서 직류 1,500V로 변환하여 전차 선로를 통해 전동차로 직류 전력을 공급하는 방식이다. 다이오드 정류기는 직류 출력전압의 크기만을 제어하기 때문에 교류 입력전류에 여러 가지 악영향을 미치는 다량의 고조파를 포함하고 있으며, 부가적인 회로를 이용하여 이를 줄이는 데는 한계가 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 최근에 PWM컨버터에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 PWM컨버터를 사용하여 교류 입력 전원 측에 문제시 되는 고조파 및 무효전력을 보상하기 위한 능동전력필터로 사용하고, 전력의 흐름을 양방향으로 제어할 수 있기 때문에 회생에너지 발생 시에는 회생에너지를 계통 측으로 회생하는 회생인버터로 사용한다.

또한 주 정류기 고장이나 단선사고 발생 시에는 전력공급의 문제점을 해결하기 위해 PWM컨버터로 동작하여 계통에서 부하 측으로 전력을 공급한다.

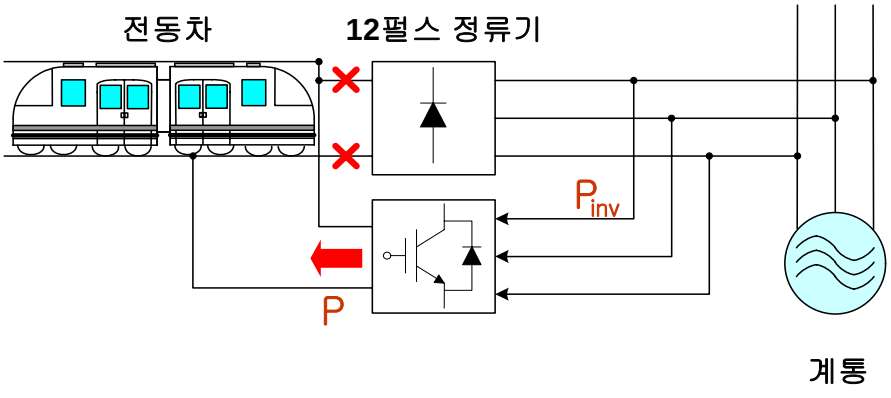


그림 3.167 전압강하 보상 시 전력흐름도

그림 3.167은 전압강하 모드 시 전력 흐름도를 나타낸다. 주 정류기의 고장으로

계통에서 전력을 공급받지 못하기 때문에 회생인버터를 PWM컨버터로 사용하여 부하 측 전력을 공급한다.

그림 3.168은 3상 전압원 PWM 컨버터의 전력회로도 이다. 여기서 E_a, E_b, E_c는 전원전압이며 V_a, V_b, V_c는 컨버터의 출력전압이며, i_a, i_b, i_c는 각상을 흐르는 상전류이다.

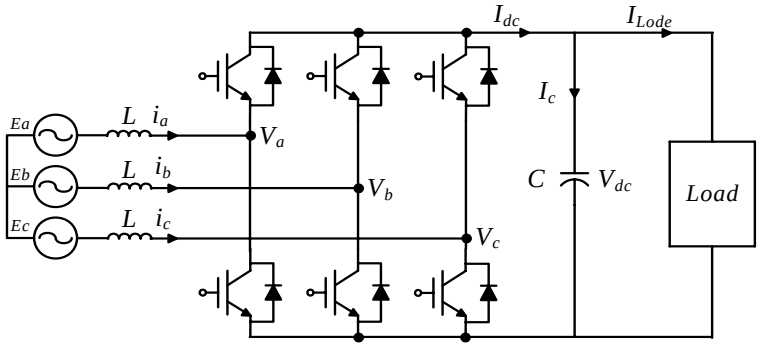


그림 3.168 전압원 PWM 컨버터 전력회로도

일반적으로 정류기의 제어목적은 DC링크 전압 일정제어, 단위역율 제어, 정류동작으로 구분된다.

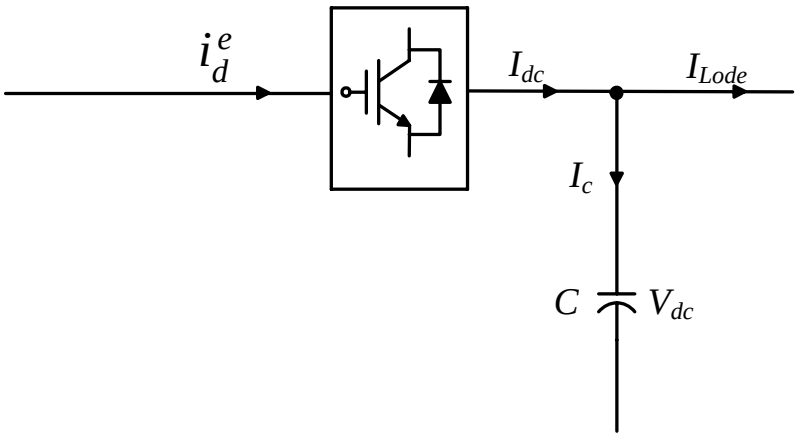


그림 3.169 DC링크 전압과 전류와의 관계도

그림 3.169는 DC링크에서 전류와 컨버터 앞단 전류와의 관계를 나타낸다. 그림에서 DC링크 전압을 제어하기 위해서는 DC링크로 공급 전류의 양을 조절해야 한

다. i_{load}는 부하로 흘러나가는 전류성분이고, DC링크의 전압과 관계되는 것은 i_c와 i_{dc} 성분 전류이다. i_c는 DC링크 커패시터로 흐르는 전류이며 DC링크 전압과 전류와의 관계식은 다음과 같다.

$$C\frac{dV_{dc}}{dt} = i_c = i_{dc} - i_{load} \tag{3-65}$$

DC링크 전압제어를 위해서는 i_{dc}량을 제어해야하고 i_{dc}를 제어하기 위해서는 i_d^e를 제어해야 한다. 일단 i_d^e가 결정이 되면 컨버터 입력 단 리액터에 걸리는 전압이 결정된다. 여기서 i_d^e는 3상 전류를 dq 동기좌표계로 변환 한 값이다.

$$v_l = jwLi^e_d \tag{3-66}$$

전원전압과 컨버터의 전압, 리액터에 걸리는 전압사이의 페이저 관계도에서 부터 만들어 주어야할 컨버터 전압이 결정된다.

$$V_r = E^e_d - jwLi^e_d \tag{3-67}$$

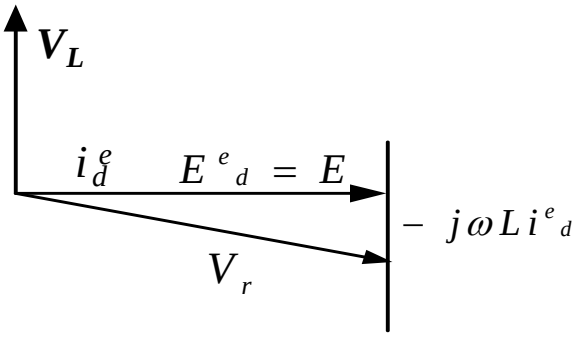


그림 3.170 전원전압, 컨버터 전압, 리액터
전압과 전류의 phasor도

그림 3.170에서 페이저도를 나타내고 있다. 입력 측 역률을 1로 제어하고 출력

측의 직류링크 전압을 일정하게 제어하기 위해서는 입력 선전류의 위상과 크기를 독립적으로 제어한다. 즉 단위 역률을 만족하기 위해 전원전압벡터와 선전류 벡터의 위상이 동위상이 되어야 한다.

다. 제어 알고리즘

(1) 좌표변환

그림 3.171은 그림 3.168에 있는 컨버터 한상에 대한 등가회로는 다음과 같다. 한상의 전원전압은 E_a로 나타내며 L은 입력리액터, V_a는 컨버터의 입력전압을 나타낸다. 우측의 I_{ac}는 전류원으로 표현할 때 등가회로를 나타낸다.

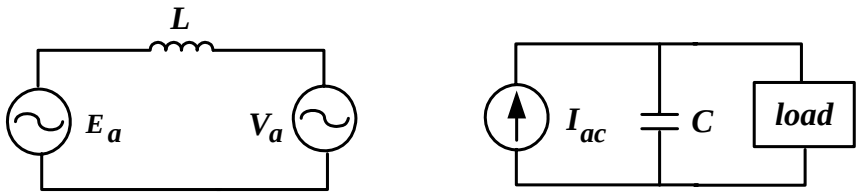


그림 3.171 PWM 컨버터 한상의 등가회로

각상의 전원전압 E_a, E_b, E_c 로 표현하고 120° 위상차를 갖는 주파수 60Hz의 평형 3상 정현파 전압원으로 가정할 경우

$$\begin{bmatrix} E_{a(t)} \\ E_{b(t)} \\ E_{c(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E\cos\omega t \\ E\cos(\omega t - 2\pi/3) \\ E\cos(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3\text{-}68)$$

그림 3.171로 부터 각 상 에 대한 상전류 미분방정식은 식(3-69)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L\frac{di_a}{dt} = E_a - V_a,$$
$$L\frac{di_b}{dt} = E_b - V_b,$$
$$L\frac{di_c}{dt} = E_c - V_c,$$
(3-69)

평형 3상 정현파 전압원으로 가정하면 각 상은 서로 120° 의 위상차를 갖고, 임피던스가 같아 각 상의 절대값이 항상 같다. 그리고 상전압은 정현파로 시간에 따라 변하지만, 3상 전압을 모두 더하면 시간에 따라 일정한 값으로 나타난다.
따라서 전원전압, 상전류, 컨버터 입력전압이 평형3상 정현파일 경우 식(3-70)의 조건을 만족하므로 복소평면의 하나의 공간벡터 해석으로 가능하다.

$$\begin{aligned} E_a(t) + E_b(t) + E_c(t) &= 0 \\ i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) &= 0 \\ V_a(t) + V_b(t) + V_c(t) &= 0 \end{aligned}$$
(3-70)

좌표변환을 이용하여 abc축 상에서 전류 방정식을 복소평면으로 변환하려면 동기 좌표계의 d축은 전원전압의 공간벡터와 일치하게 잡는다. 즉 동기 좌표계에서 전원 전압 공간벡터는 d축 성분은 0이 된다.
다음과 같은 동기 좌표계로의 변환행렬을 통해 상전류 방정식을 변환 시키면 다음과 같은 동기 좌표계 모델을 얻는다. 여기서 좌표식을 좌표면환 및 역변환 관계식을 유도해 보면 평형 3상일 경우 다음과 같은 식을 만족한다.

$$f_a(t) + f_b(t) + f_c(t) = 0$$
(3-71)

여기서 f는 전압, 전류 혹은 자속을 나타내고 아래첨자 a,b,c 는 3상을 나타낸다. 평형 3상일 경우 각 상은 120도의 위상차를 갖는다. 그림 3.172는 식(3-71)을 좌표축으로 나타낸다.

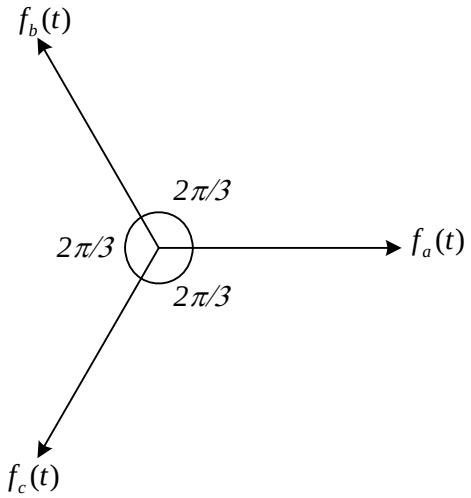


그림 3.172 평형 3상 좌표축

공간벡터 f_s^s 는 복소수 평면에서의 하나의 벡터로 표현될 수 있으며 이를 실수부와 허수부로 나타내어 $f_s^s = f_{ds}^s + jf_{qs}^s$라 놓고 전개해보면 식(3-72)와 같다. 여기서 s는 정지좌표계를 나타내며 d,q는 유효성분과 무효성분을 나타낸다.

$$f_s^s = f_{ds}^s + jf_{qs}^s \\ = (f_a + \frac{1}{2} f_b + \frac{1}{2} f_c) + j(\frac{\sqrt{3}}{2} f_b - \frac{\sqrt{3}}{2} f_c) \tag{3-72}$$

복소수로 표현된 양이 같기 위해서는 실수부와 허수부가 같아야 하므로 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$f_{ds}^s = f_a - \frac{1}{2} f_b - \frac{1}{2} f_c \tag{3-73}$$

$$f_{ds}^s = \frac{\sqrt{3}}{2} f_b - \frac{\sqrt{3}}{2} f_c \tag{3-74}$$

여기에서 구한 공간벡터를 행렬형태로 정리해 보면 식(3-75)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f^s_{ds} \\ f^s_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} \tag{3-75}$$

동기좌표계의 d축을 전압벡터로 설정하면 식(3-76)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v^e_{ds} \\ v^e_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v^s_{ds} \\ v^s_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_m\cos\omega t \\ V_m\sin\omega t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3-76}$$

식(3-76)에서 첨자 s,e 는 각각 정지좌표계와 동기좌표계를 의미한다.

그림 3.173에서와 같이 정지좌표계와 동기좌표계 상에 임의의 공간벡터 f_S가 주어져 있다고 가정을 하면

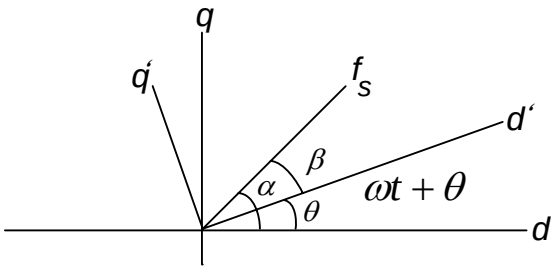


그림 3.173 정지(dq), 동기($d'q'$)
좌표계의 공간벡터

복소평면에서 하나의 벡터를 표시하기 위해서 극좌표계를 도입하고 f_s를 각기 다른 좌표계에서 표시를 한다. 즉 정지좌표계에서 표현된 f_s를 f^s_s라 하고 동기좌표계에서 표현된 f_s를 f^e_s 라고 하면, 좌표계가 달라도 벡터의 크기 $|f_s|$는 같으므로 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$f_s^s = f_{ds}^s + f_{qs}^s = |f_s| e^{j\alpha}$$
$$f_s^e = f_{ds}^e + f_{qs}^e = |f_s| e^{j\beta} \quad (3\text{-}77)$$

여기서 α, β, Θ 는 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$\Theta = \alpha - \beta \quad (3\text{-}78)$$

$e^{j\alpha} = e^{j(\Theta+\beta)} = e^{j\beta} \cdot e^{j\Theta}$ 이 성립한다. 즉, 정지좌표계에서 표시된 공간벡터와 동기좌표계에서 표시된 벡터사이의 관계는 두 좌표계 사이의 각 Θ로 표현이 된다.

서로 다른 좌표계에서 표현된 공간벡터들은 두 좌표계가 만들어 내는 각 Θ 만큼 회전을 시키면 같아진. 따라서 동기좌표계에서 공간벡터 f_s^e를 각기 다르게 표시하면 식(3-79)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_{ds}^e \\ f_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & \sin\Theta \\ -\sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ds}^s \\ f_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (3\text{-}79)$$

(2) 전류 제어기의 구성

DC링크 전압제어 및 정류동작을 위해서 i_d^e 전류를 제어해야 하고, 단위역율 제어를 위해서 $i_q^e = 0$으로 제어한다. 동기좌표계의 d축을 전원전압 벡터로 설정하였기 때문에 컨버터 입력은 다음과 같이 된다. 동기좌표계에서 상전류의 공간벡터가 전압벡터와 일치하지 않는 한 무효전력성분이 있게 된다. 무효전력 Q 성분은 다음과 같이 주어진다.

$$S = \frac{3}{2}[E_{dq}^e \cdot i_{dq}^{e*}] = \frac{3}{2}[(E_d^e + jE_q^e) \cdot (i_d^e + ji_q^e)] \quad (3\text{-}80)$$
$$Q = \frac{3}{2} E_d^e \cdot i_q^e$$

여기서 무효전력 성분 Q가 0이 되기 위한 조건은 i_q^e = 0 이다. 따라서 무효전력 성분을 제거하기 위해서 즉 전압벡터와 전류벡터를 동상으로 제어하기 위해 컨버터는 전류성분을 반드시 0으로 제어해야 한다. 따라서 PI 전류제어기 설계를 하면 컨버터의 전압은 다음과 같이 된다.

$$V_d^e = E_d^e + \omega L i_q^e - u_d \qquad (3\text{-}81)$$
$$V_q^e = E_q^e + \omega L i_d^e - u_q = -\omega L i_d^e - u_q$$

식(2.17)에서 u_d, u_q는 새로운 인가전압이고 $\omega L i_q^e$, $\omega L i_d^e$ 는 q축에서 d축, 그리고 d축에서 q축으로의 간섭분이다.
이러한 간섭분을 없애기 위해 간섭분의 크기만큼 미리 보상한다. 식(3-81)을 식(3-79), 식(3-78)에 대입하여 식(3-82)의 1차방정식을 얻는다.

$$\frac{di_d^e}{dt} = u_d, \quad \frac{di_q^e}{dt} = u_q \qquad (3\text{-}82)$$

전류 지령치가 i_d^*, i_q^* 라고 할 때 식(3-82)에 대입하면 PI제어기로 식(3-83)로 나타낼 수 있다.

$$u_d = K_p(i_d^* - i_d^e) + K_l \int_0^t (i_d^* - i_d^e)dt \qquad (3\text{-}83)$$
$$u_q = K_q(i_q^* - i_q^e) + K_l \int_0^t (i_q^* - i_q^e)dt$$

(3) 전압 제어기의 구성

식(3-83)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$E_d^e = -\omega L I_q^e + L\frac{dI_d^e}{dt} + V_d^e \qquad (3\text{-}84)$$

$$E_q^e = +\omega L I_d^e + L\frac{dI_q^e}{dt} + V_q^e \tag{3-85}$$

그림 3.171에서 보여준 출력 측 등가회로에 대한 미분방정식과 입력전력과 컨버터 출력의 관계식은 식(3-86)과 같이 표현된다.

$$C\frac{dV_{dc}}{dt} = I_c = I_{dc} - I_{lode}$$

$$P = V_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2}\left(E_d^e I_d^e + E_q^e I_q^e\right) \tag{3-86}$$

C는 DC링크 커패시터 값이고 I_{dc}는 DC링크 앞단에 흐르는 전류이고, I_c는 DC링크 커패시터로 흘러들어가는 전류를 나타내며, I_{load}는 부하전류를 나타낸다. 즉 DC링크 전압을 조절할 수 있는 것은 컨버터 출력전류에서 부하로 빠져 나가는 전류의 차이다. 식(3-86)과 같이 입력전력과 출력이 같다고 가정을 한다.

$I_q^e = 0$을 이용하면 다음과 같이 I_d^e 와 I_{dc}의 관계를 유도할 수 있다.

$$I_d^e = \frac{2}{3}\frac{V_{dc}}{E} I_{dc} \Rightarrow \frac{I_{dc}}{I_d^e} = \frac{3}{2}\frac{E}{V_{dc}} = K_{cm} \tag{3-87}$$

DC링크 전압을 컨버터 유효전류 I_d^e 로 조절할 수 있다는 것을 나타낸다. 따라서 앞서 전류제어기 부분에서 언급했듯이 DC링크전압을 일정하게 제어하기 위해서는 컨버터의 유효전류를 제어해야 한다. 또한 컨버터의 유효전류를 제어함으로써 전원 측에서 공급되는 입력전력을 제어할 수 있다.

전원 측에서 공급되는 입력전력이 부하에서 소비하는 출력 전력보다 클 경우에는 DC링크 전압이 상승하고, 반대의 경우에는 DC링크전압이 감소함으로 컨버터 입력을 제어함으로써 DC링크전압을 제어할 수 있다.

전류제어기의 속도는 전압제어기 속도에 비해 굉장히 빠르기 때문에 전류제어기의 전달함수를 1로 볼 수 있다. 따라서 다음과 같이 전압제어기를 구성할 수 있다.

부하전류 I_{load} 는 전압제어기로 PI 제어기를 사용하면 다음과 같은 전압 대 전압 지령치에 대한 전달함수를 구할 수 있다. 전압 오차분에 대한 전류 지령치 i_d^{e*}를 계산하면

$$I_d^{e*} = K_p(V_{dc}^* - V_{dc}) + K_p\int_0^t (V_{dc}^* - V_{dc})dt \tag{3-88}$$

여기서는 V_{dc}^* 는 DC링크전압 지령치다. 전류제어기의 밴드폭은 전압제어기보다 훨씬 넓기 때문에 전류 지령치 I_d^{e*}에 대한 컨버터의 유효전류 I_d^e = I_d^{e*} 가 된다. PI전압제어기의 전달함수를 $G_{(s)}$라 할 경우 전압 지령치에 대한 DC링크 전압의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{K_{cm}G_{(s)}}{SC + K_{cm}G_{(s)}} \tag{3-89}$$

부하전류 I_{load}에 대한 DC링크전압의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{V_{dc}}{I_{load}} = \frac{1}{SC + K_{cm}G_{(s)}} \tag{3-90}$$

따라서 컨버터의 전압제어기 블록선도를 그려보면 그림 3.174와 같다.

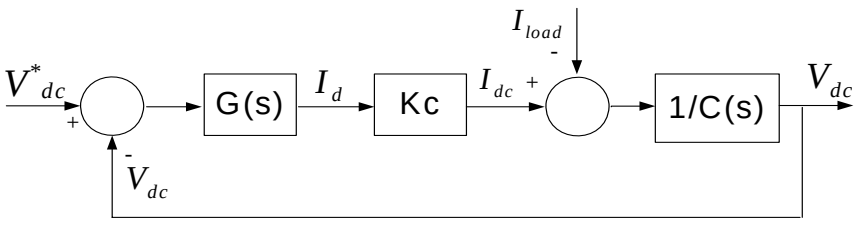


그림 3.174 전압제어기 블록선도

앞에서 표현한 정지좌표계에서 동기좌표계로 변환하고 전압제어기 및 전류제어기를 포함하는 전압강하 보상 제어 블록도는 그림 3.175와 같다.

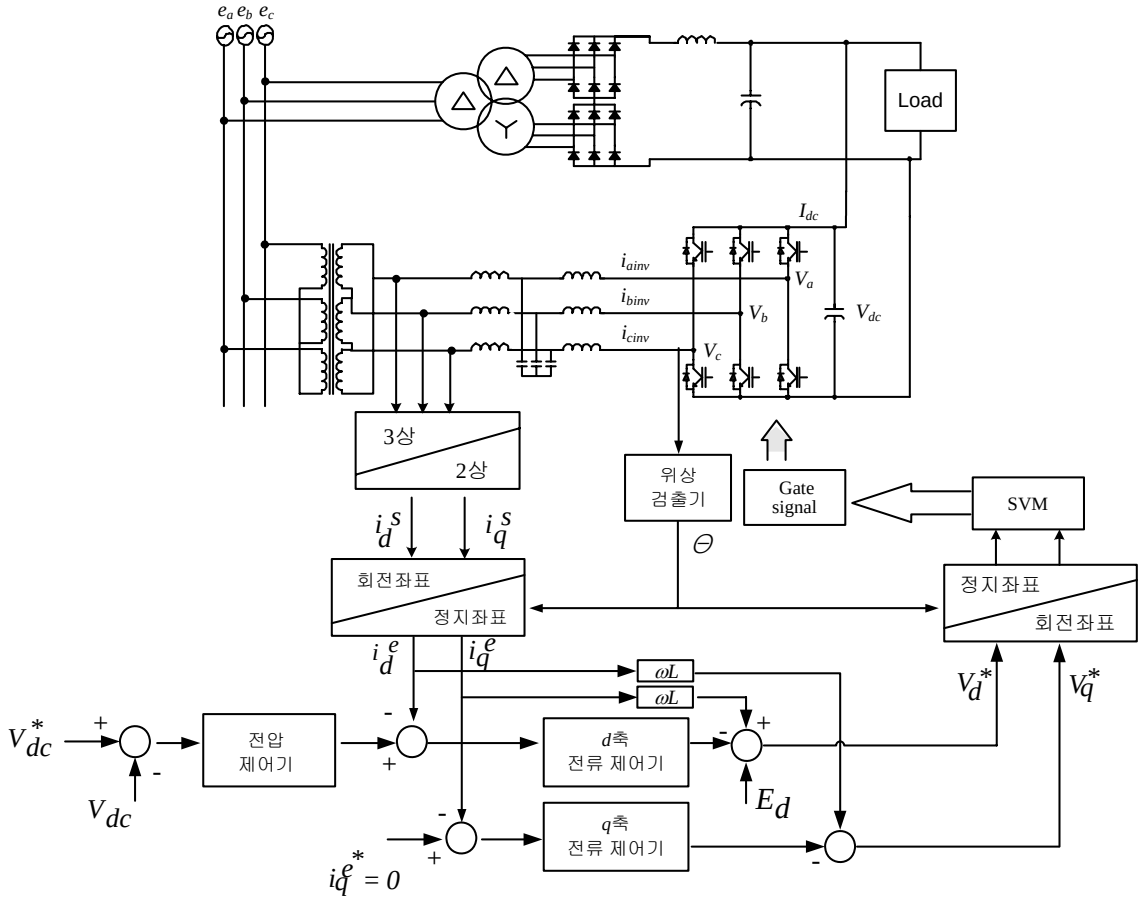


그림 3.175 전압강하 보상 제어 블록도

5. 시뮬레이션 결과

가. 기존의 직류전철 전력시스템

그림 3.176의 직류 전철 전력시스템 시뮬레이션은 지하철 7호선 수락산 변전소를 모델로 하였으며, 기존 12펄스 다이오드 정류기이다.

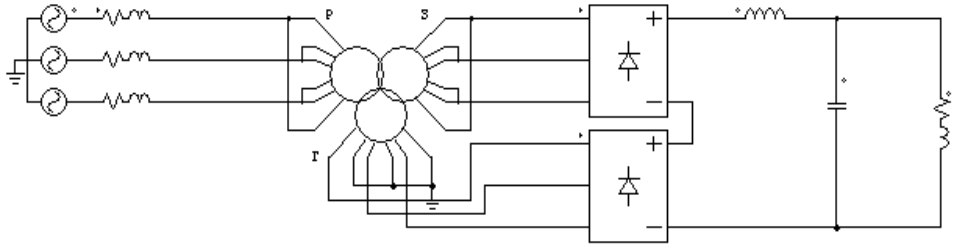


그림 3.176 기존 다이오드 정류기 급전 시스템

표 3.51은 직류 전철 전력시스템을 수행하기 위한 변전소(지하철 7호선 수락산) 전력시뮬레이션 데이터 및 파라미터를 나타내고 있다. 이 데이터는 “도시철도 에너지 사용 설비 진단용역”에 관한 연구 보고서(2003년)를 활용하였으며, 이 보고서의 시뮬레이션 결과 중 인버터 미 설치시의 case. 1에 해당한다.

표 3.51 수락산 변전소 전력시스템 파라미터

파 라 미 터	정 격
주 회 로	다이오드 정류기
정류기 공급전력(평균전력)	5735[kW]
정류기 평균전류	3828[A]
구동 평균 전압	1500[V]
차량 편성	8량 (2.5분 운전시격)

그림 3.177은 정류되어진 직류 가선 전압을 나타내고 있으며, 하단의 파형은 다이오드 정류기에 입력되고 있는 계통전류 파형을 나타내고 있다. 기존 다이오드 정류기에 입력되는 전류 파형이 왜곡되어짐을 파형을 통해 확인할 수 있다.

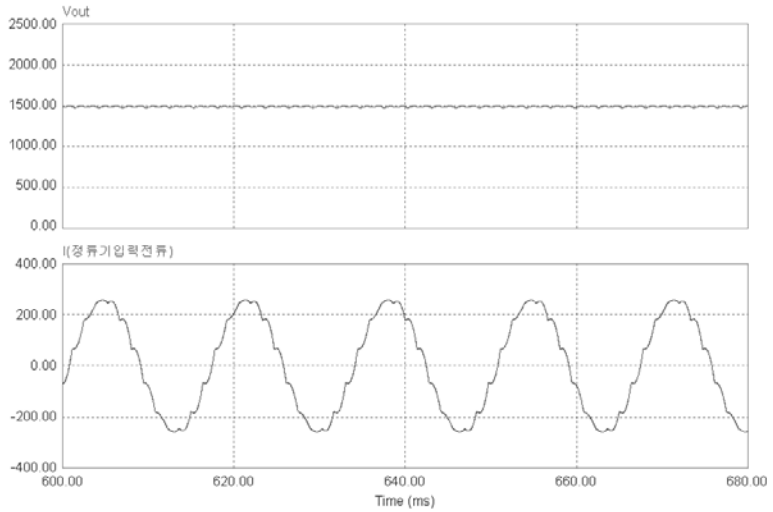


그림 3.177 기존 다이오드 정류기 급전 시스템

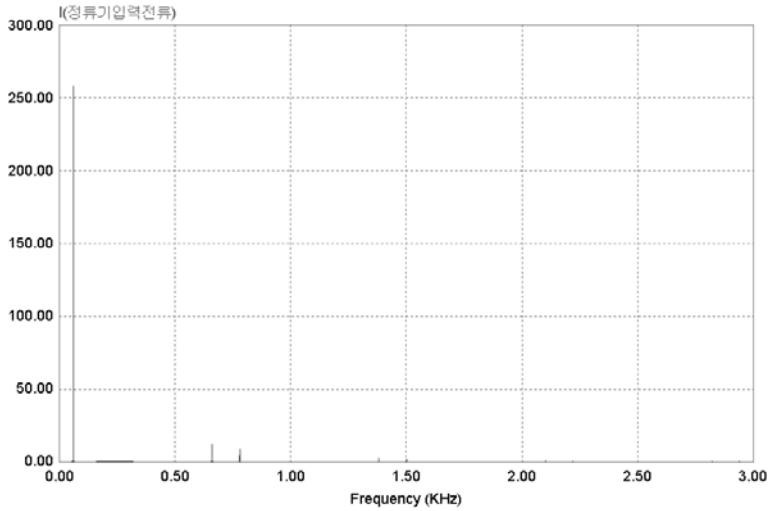


그림 3.178 기존 전력시스템 다이오드 정류기 입력전류 FFT 분석

그림 3.178은 그림 3.166의 입력전류 파형의 FFT분석 파형을 나타내고 있다. 입력전류의 고조파는 $n=12k\pm1(k=1,2,3...)$의 고조파 성분을 포함하여 11, 13차 고조파의 영향을 받고 있음을 그림 3.178의 3상 12펄스 다이오드 정류기 입력전류의 FFT 분석을 통하여 확인 할 수 있다.

나. 부산지하철 회생인버터

그림 3.179에서 위상제어 정류기 1개를 사용하고 정류기의 스위칭에 의한 고조파 성분을 저감하기 위해 사용하는 필터의 용량을 줄여야 한다. 즉 정류기를 다중화(Multiple Converter)하는 방식이다. 컨버터의 용량이 커질수록 6펄스 위상제어 정류기의 직·병렬 접속에 의한 다중화 방식을 택한다.

부산지하철 회생인버터 시뮬레이션에서는 회생동작이 가능하도록 역방향 사이리스터 12펄스 제어 정류기를 설치하여 DC전원의 잉여전력을 교류 전원측으로 회생하도록 하였다. 이러한 정류 모드와 인버터 모드로 동작하게 구현한 방식은 사이리스터 12펄스 제어 정류기를 역 병렬로 결선하여 α각에 의해 정류, 회생 두 가지 모두 가능한 구조로 되어 있다.

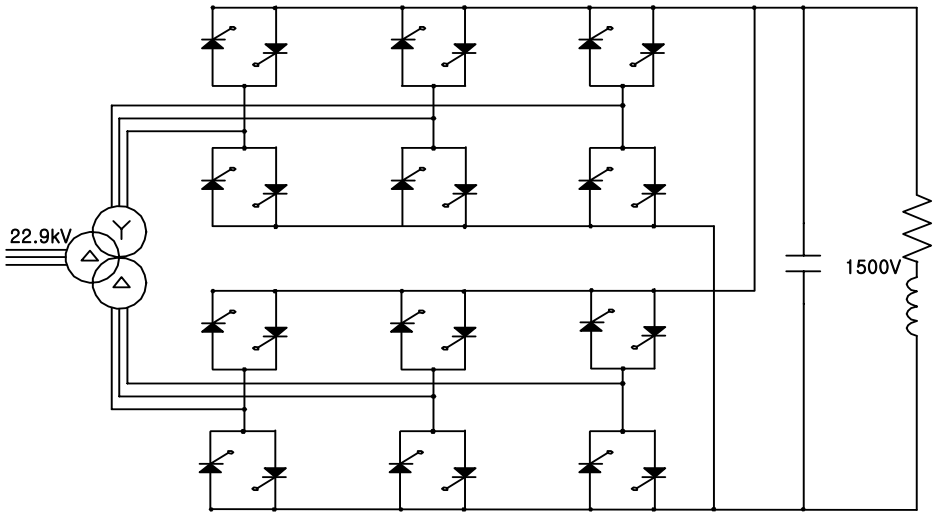


그림 3.179 부산지하철 변전소 급전시스템

그림 3.179에서 사이리스터 정류기를 보게 되면 좌측은 정류 회로가 되고, 우측 사이리스터 정류기는 인버터 모드로 동작한다.

이때, α각이 0~90° 사이이면 좌측의 정류부가 동작하여 전력을 DC라인이 급전하게 되고, α각이 90~180°가 되면 우측의 사이리스터 정류기가 동작하여 전원측으로 회생하게 된다.

그림 3.180은 제어부를 포함한 전체적인 시스템을 나타낸 것이다.

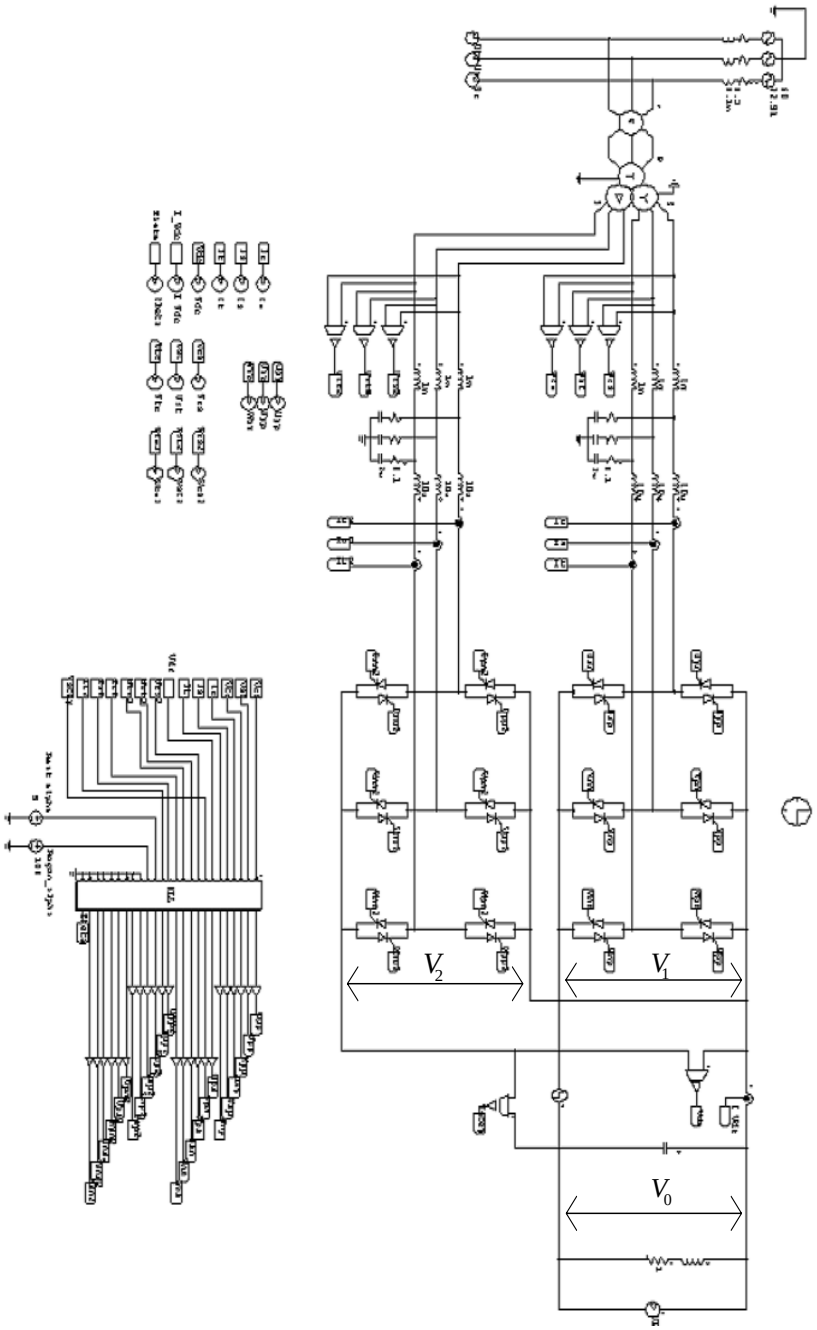


그림 3.180 제어부가 포함된 부산 지하철 급전시스템

(1) 부산지하철 전력시스템 시뮬레이션 결과 파형

컨버터의 용량이 커질수록 6펄스 위상제어 정류기의 직병렬 접속에 의한 다중화 방식을 채택하는 것이 유리할 경우가 많다. 그림 3.169에서 각각의 정류기에 의한 출력전압 V_1, V_2의 평균값은 동일하다. V_1, V_2는 각각 6펄스 형태이고 서로

30°의 위상차가 있으므로 두 전압의 합성전압인 V_o는 12펄스 형태이므로 위와 같은 형태의 정류기를 12펄스 위상제어 정류기라 한다.

V_1과 V_2간에 상호 30°의 위상차를 갖게 하기 위해 변압기의 2차측 결선을 각각 Y, △로 한다. 이러한 이유는 상전압과 선간전압의 위상은 상호 30° 차이가 나기 때문이다.

지연각 α를 0°로 하였을 경우 교류 전원 측 전류의 합성 과정을 살펴보면 변압기 2차측 Y, △의 선전류는 출력전류에 의해 결정되므로 그 크기는 부하전류와 같고 Y결선 변압기의 출력전류 i_{a1}의 위상이 i_{a2}에 30° 앞선다. 이것은 Y결선 선간전압에 대해 △결선 선간전압의 위상이 30° 뒤지기 때문이다.

1차측 a상의 I_A의 파형을 분석해보면 고조파는 $12k \pm 1$(k=1,2,3...)차 성분만 존재하여 최저차 11차 고조파가 된다. 부산지하철 급전시스템에는 $12k \pm 1$(k=1,2,3...)차 고조파 성분을 저감하기 위하여 수동필터를 설계하여 적용하였다.

그림 3.181은 부산지하철 급전시스템의 정류모드 동작 파형을 나타내고 있다. 12펄스 사이리스터 위상제어 정류기의 파형과 비교해 보면 수동 필터의 고조파 저감으로 인하여 입력전류의 왜곡이 없음을 확인할 수 있다.

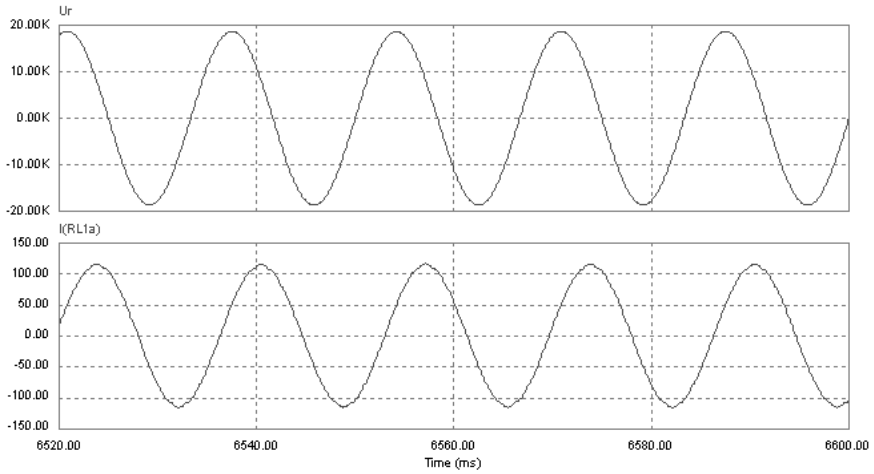


그림 3.181 정류 시 계통상전압과 전류 파형

그림 3.182는 정류모드 동작 시의 전압과 전류FFT분석 파형을 나타내고 있다. 수동 필터가 포함되지 않은 12펄스 사이리스터 위상제어 정류기의 파형과 비교하

면 11차와 13차 고조파가 저감되었음을 파형을 통해 확인할 수 있다.

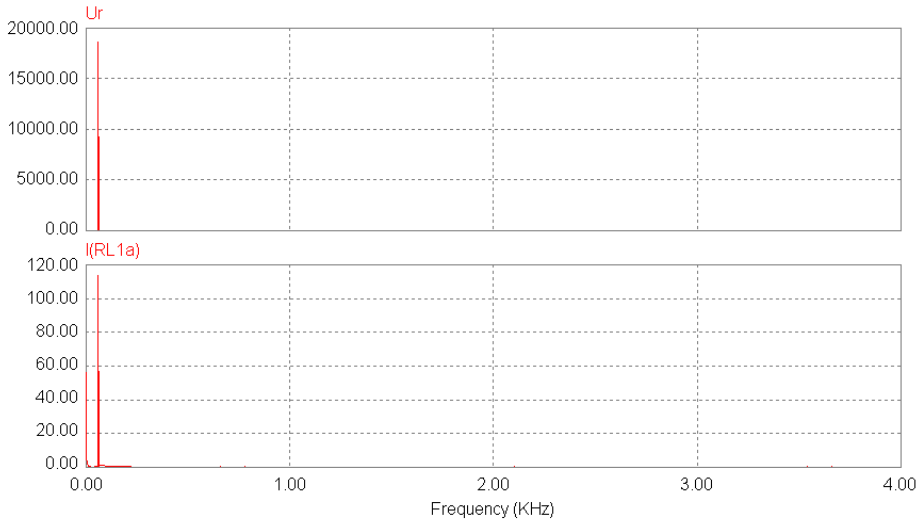


그림 3.182 정류 동작시 FFT출력

그림 3.183은 부산지하철 급전시스템의 회생모드 동작 시 전원 측 전압과 전류 파형을 나타내고 있다.

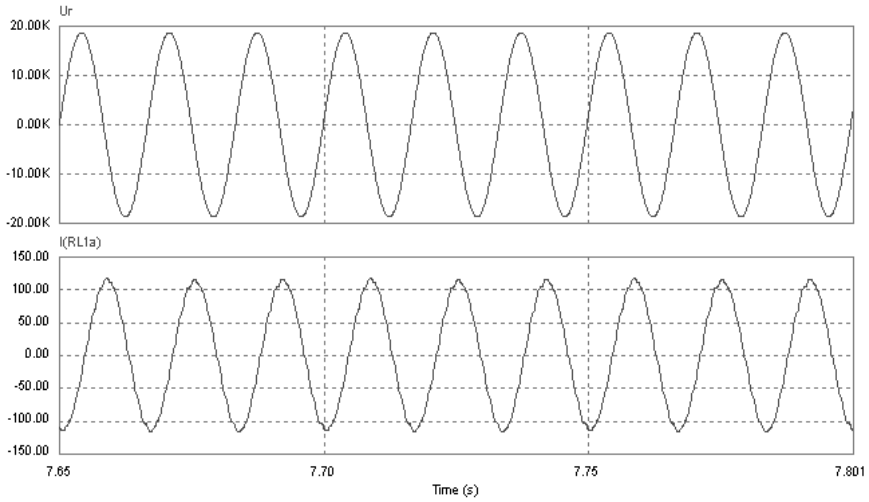


그림 3.183 회생 시 계통상전압과 전류 파형

그림 3.184는 부산지하철 급전시스템의 회생모드 동작 시의 전압과 전류의 FFT

분석파형을 나타내고 있다.

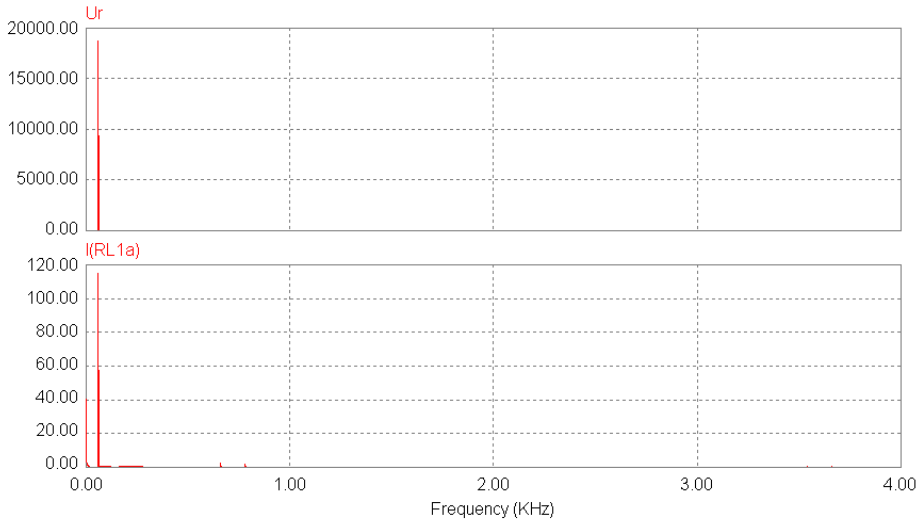


그림 3.184 회생 동작시 상전압과 전류 FFT출력

12펄스 위상제어 정류기에서는 교류 전원측의 고조파와 역률개선뿐 아니라 직류 출력측 파형도 개선된다. 출력전압의 리플 주파수는 전원전압 주파수의 12배이다. 6펄스 위상제어 정류회로에서의 2배이다. 따라서 직류 출력을 평활하게 하기 위한 필터의 크기와 용량도 비례하여 줄어든다.

앞에서 설명하였듯이 수동필터 방식은 구조가 간단하고 설치 및 유지보수가 비교적 용이하다는 이점이 있지만 전원임피던스에 의한 설계상의 어려움, 높은 정격, 공진에 의한 특성 주파수의 고조파 전류 증가, 고조파 전류 변화에 따른 성능 저하 등의 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 교류 급전시스템에 수동필터의 문제점 등을 보완하고 전력 품질 개선을 할 수 있는 능동전력필터를 적용하였다.

다. 회생인버터

시뮬레이션에 사용한 툴은 전력전자분야 전용으로 개발된 PSIM6.0 소프트웨어를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 소자는 이상적이고 각각의 파라미터 정격을 표 3.52에 나타내었다.

그림 3.185는 전체 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다. 실 시스템은 대용량이므로 실험실 조건에 맞는 3.7kW급 전력변환장치에 맞추어 시뮬레이션을 수행하였다. 현재 지하철급전 시스템의 정류회로는 12펄스 다이오드 정류기를 사용하고 있으므로 12펄스 정류기에 PWM 인버터를 추가로 설치하여 회생되어진 에너지를 계통에 공급할 수 있도록 구성하였다. 인버터는 DLL(Dynamic library link)블록을 이용하여 구성 하였으며 이것은 C 프로그램으로 코딩할 수 있기 때문에 수정 없이 적용 가능하다.

표 3.52 시뮬레이션 파라미터

종 류	정 격
12 펄스 다이오드 정류기	
입력전압	110 [Vrms]
출력전압	113 [V_{DC}]
변압기 결선	$\Delta-\Delta-Y$
PWM 인터버	
출력 LCL필터	70[mH], 0.1[nF], 50[uH]
출력 변압기	$\Delta-Y$
입력 커패시터	880[uF]
전류 제어주기	0.00025[s]
전압 제어주기	0.0025[s]
스위칭 주파수	4[kHz]

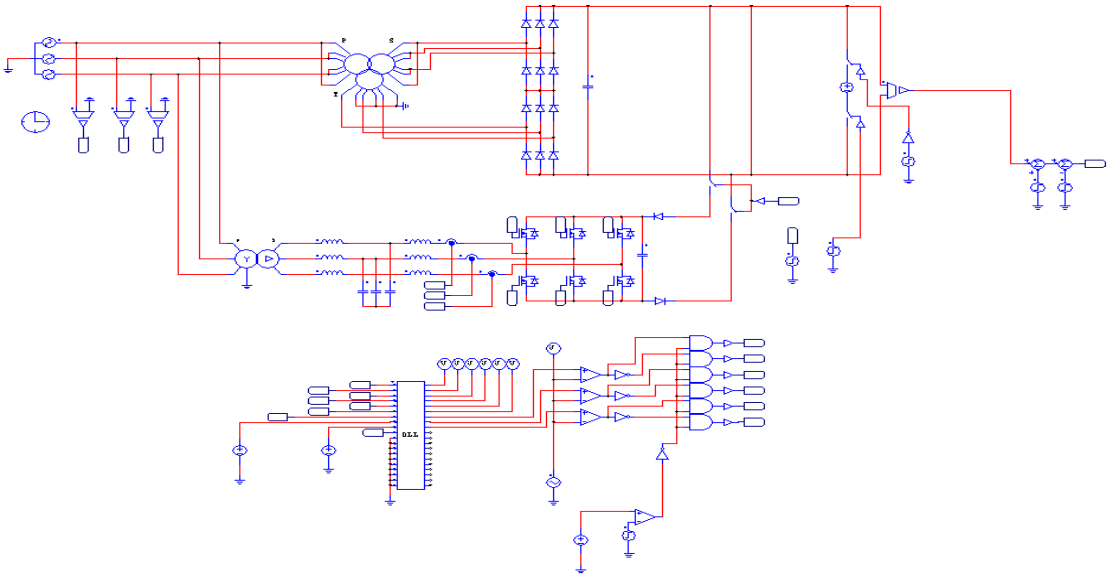


그림 3.185 회생인버터 회로도

시뮬레이션에서는 가선 전압이 150V 이상 되었을 경우를 고려하여 회생용 인버터로만 동작하게 하였다.

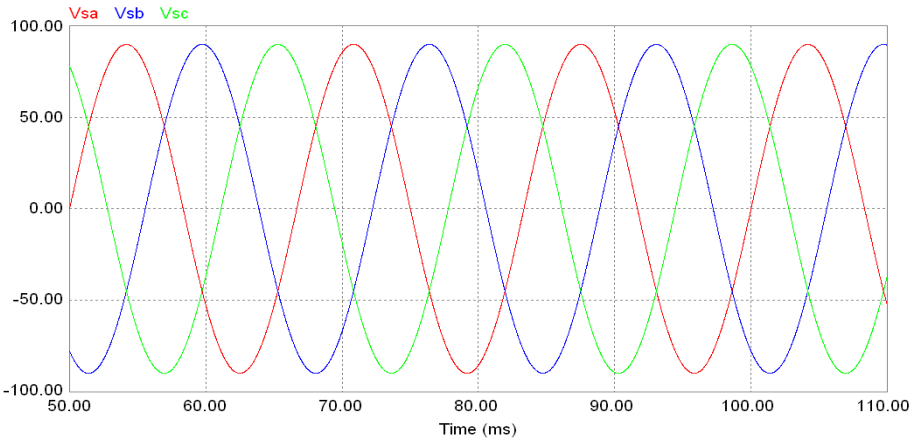


그림 3.186 계통 측 전압

그림 3.186은 계통 측 3상 전압을 보여준다. 시뮬레이션은 3상 평형 교류전압을 기준으로 하여 수행하였다.

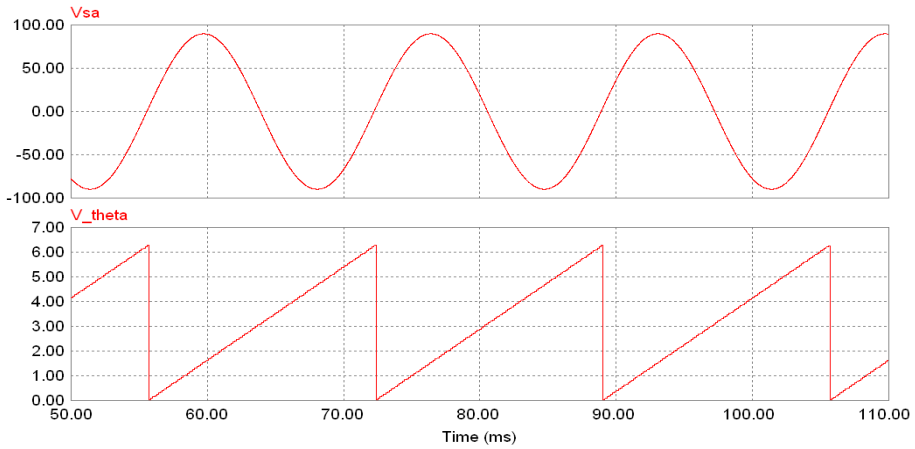


그림 3.187 계통 상 전압(V_{sa}) 및 추정 위상각(V_{Theta})

그림 3.187은 계통전압의 a상 전압과 그것을 추정하는 위상각을 나타내고 있다. 3상을 동기좌표계로 변환한 후 q축을 0으로 제어함으로써 동기화된 위상각을 얻을 수 있다.

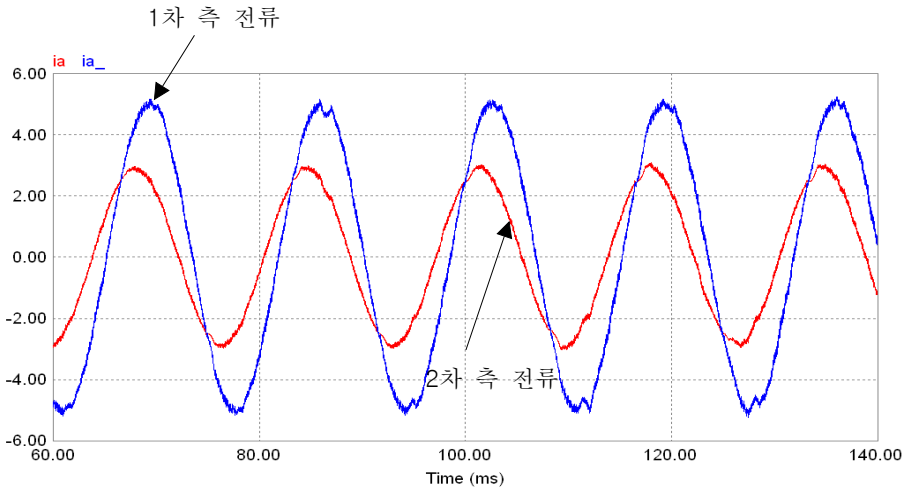


그림 3.188 PWM 인버터 출력변압기 1, 2차 측 전류(i_a)파형

그림 3.188은 PWM 인버터 출력변압기 1차측 및 2차측 전류(i_a)파형을 나타내고 있다. 변압기 권선 비에 따라 1차측과 2차측의 크기와 위상이 달라지는 것을 알 수 있다. 따라서 계통전압에 의해 추정된 위상각을 그대로 PWM 인버터 제어의 좌표변환에 이용하면 계통 쪽으로 공급되는 전류의 위상차가 계통 전압과 180°가 되지 않는다. 따라서 PWM 인버터의 출력변압기의 위상 지연만큼 계통에서 추정된 위상

각도 이동 시켜줘야 한다.

그 이유는 전압 검출을 계통에서 받기 때문이다. 따라서 추정된 위상각을 사용할 경우에 출력전류와 계통전압의 단위 역률 제어를 수행할 수 있다.

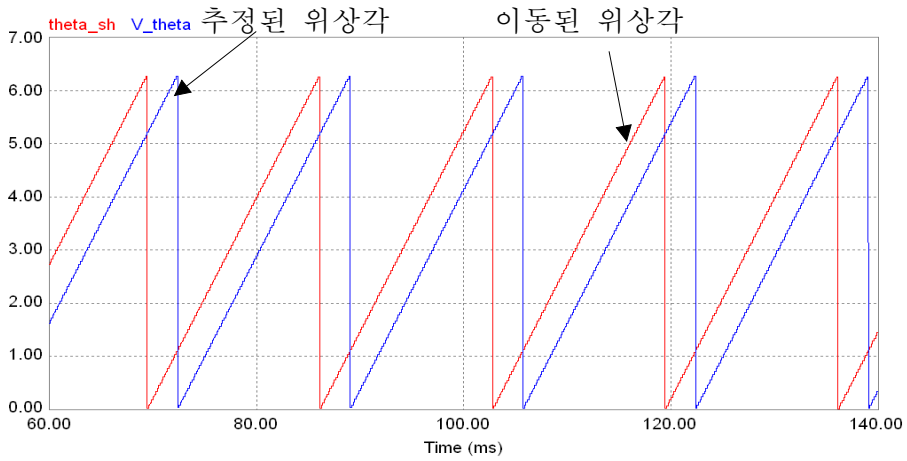


그림 3.189 추정 위상각(V_{Theta}) 및 이동된 위상각(V_{Theta_sh})

그림 3.189는 계통전압에 의해 추정된 위상각(VTheta)과 변압기의 위상 지연만큼 이동된 위상각(VTheta_sh)을 나타내고 있다. 위에서 언급한 것과 같이 회생전류가 계통 측 전압과 180。 위상차를 갖기 위한 위상각을 보여준다.

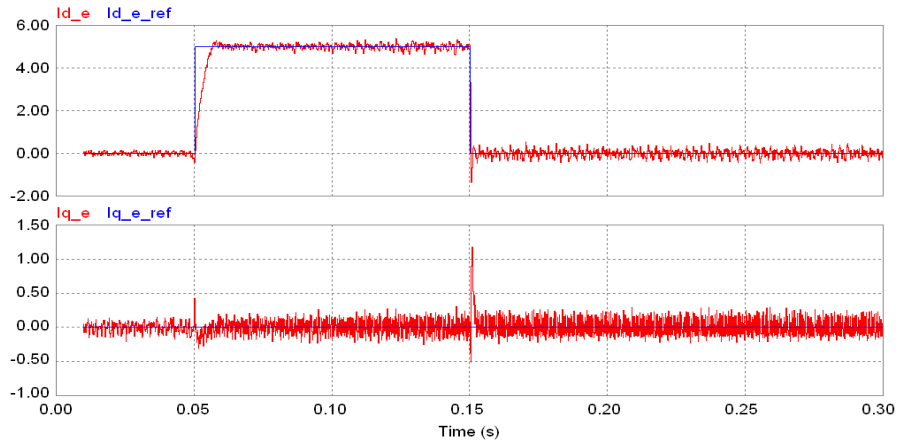


그림 3.190 PWM 인버터 출력전류 i_d^e, i_q^e 의 단위응답특성

그림 3.190은 PWM 인버터 출력전류 i_d^e, i_q^e의 단위응답을 나타내고 있다. 지령치에 속응성 있게 추종하는 것을 파형을 통해 확인할 수 있다. 이때 q축 전류는 0으로 제어됨으로써 유효성분만이 회생되어지는 것을 알 수 있다.

그림 3.191은 DC 가선 전압이 170V로 상승하였을 경우 회생용 인버터가 동작함으로써 3상의 회생전류를 발생시키는 것을 보여준다. 이때 0.05초부터 0.15초 사이가 회생동작 구간이고 나머지 구간에서 회생인버터는 동작하지 않는다.

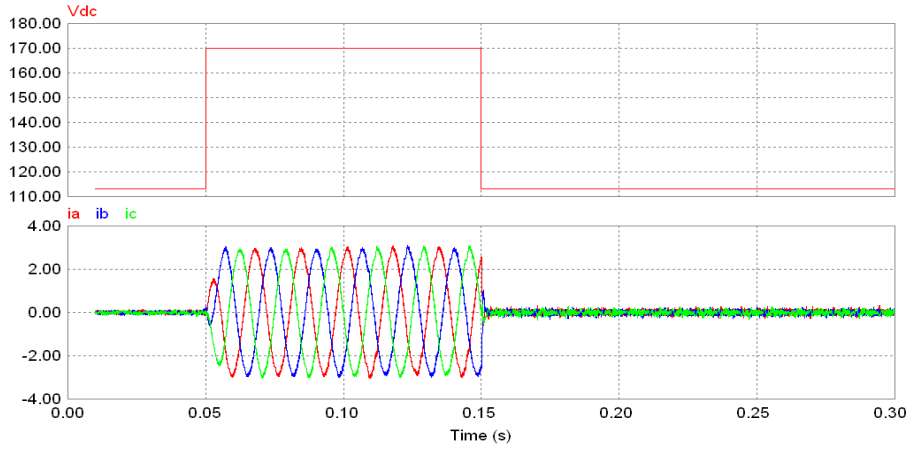


그림 3.191 DC 가선전압과 3상 회생전류

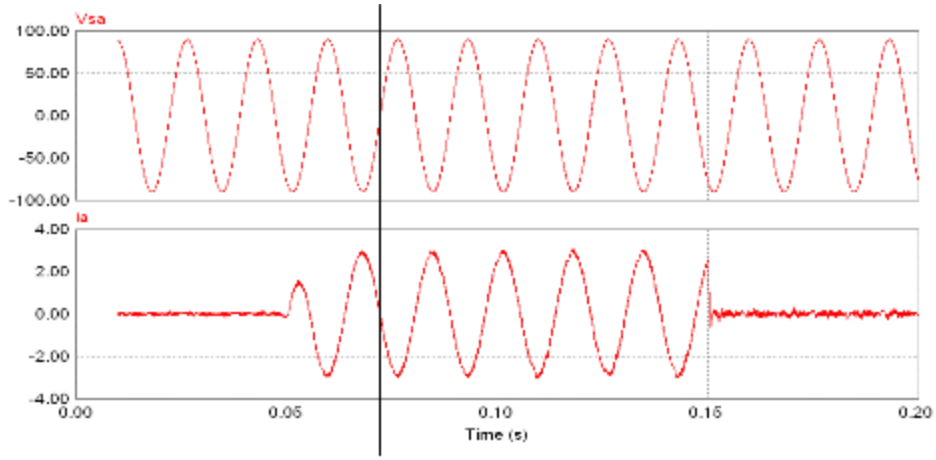


그림 3.192 a상 전압과 a상 회생전류

그림 3.192는 a상의 전압과 회생전류를 나타낸다. 회생전류와 계통전압의 위상차가 180° 이므로 인버터에서 계통으로 전력이 회생되고 있음을 확인할 수 있다.

라. 능동전력필터

그림 3.193은 능동전력필터 회로도이다. 회생인버터와 다른 점은 DC 링크의 전압을 검출 받는 회로가 없고 인버터의 DC 링크 전압단과 정류기의 출력단의 연결이 없다는 차이가 있다.

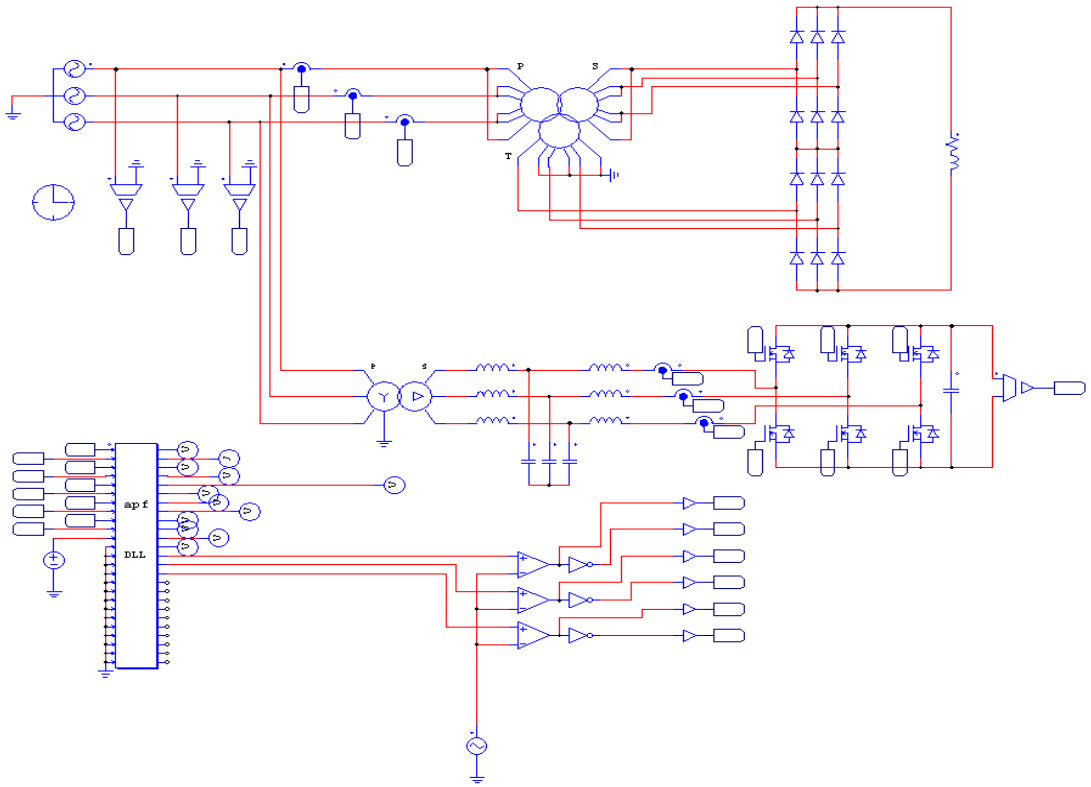


그림 3.193 능동전력필터 회로도

그림 3.194는 3상 전압을 2상 정지좌표계로 변환한 것을 보여준다 V_{α}와 V_{β}가 90° 위상차를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

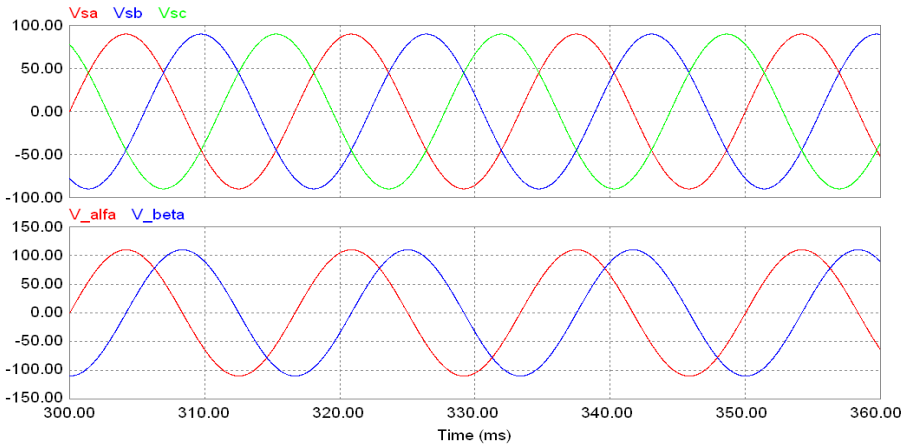


그림 3.194 3상 전압과 2상 정지좌표계 변환

그림 3.195는 계통 측 전류를 2상 정지좌표계로 변환한 것을 보여준다. 계통 측 전류는 12펄스 다이오드 정류기의 사용으로 왜곡된 것을 보여주고 있다. 2상 정지좌표계의 변환에서도 왜곡된 전류를 그대로 보여준다.

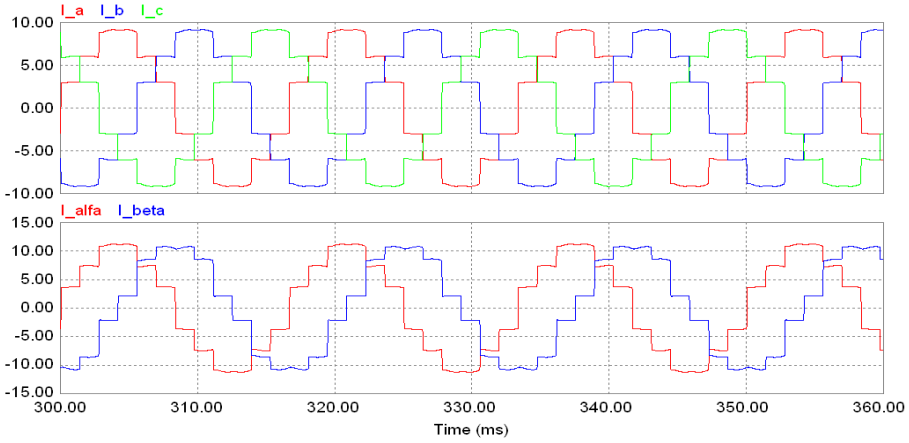


그림 3.195 3상 전류와 2상 정지 좌표계 변환

그림 3.196은 순시유효전력(p)과 순시무효전력(q)를 보여준다. 만약 왜곡되지 않은 3상 전압과 전류라면 순시유효전력은 순수한 DC 성분으로 표현되어야 하지만 다이오드 정류기와 유도성부하의 영향으로 순시유효전력은 그림 3.196에서 보이는 것과 같은 모습으로 표현이 된다.

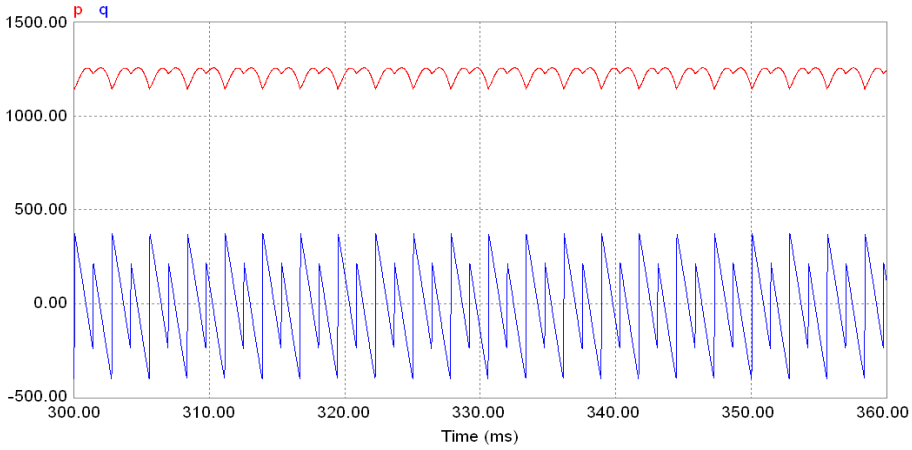


그림 3.196 순시유효전력(p)와 순시무효전력(q)

그림 3.197은 그림 3.196에서 보인 순시유효전력(p)을 저역필터(low pass filter)를 통과시켜 얻은 직류성분과 고조파성분이다. 직류성분을 제외한 고조파성분은 왜곡된 전류에서의 고조파 성분이므로 보상해 주어야 한다. 이때 역률을 1로 제어하기 위해 무효전력을 보상해 주어야 하기 때문에 순시무효전력(q)는 전체를 보상해 주어야 한다.

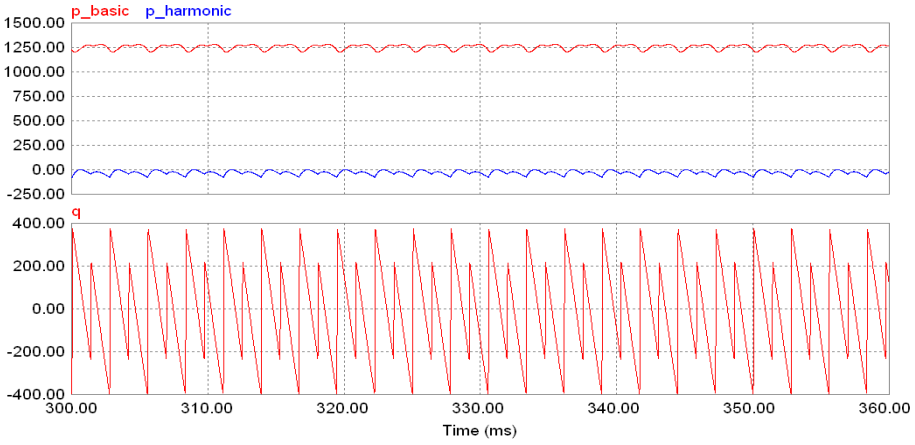


그림 3.197 순시유효전력의 두 가지 성분과 순시무효전력

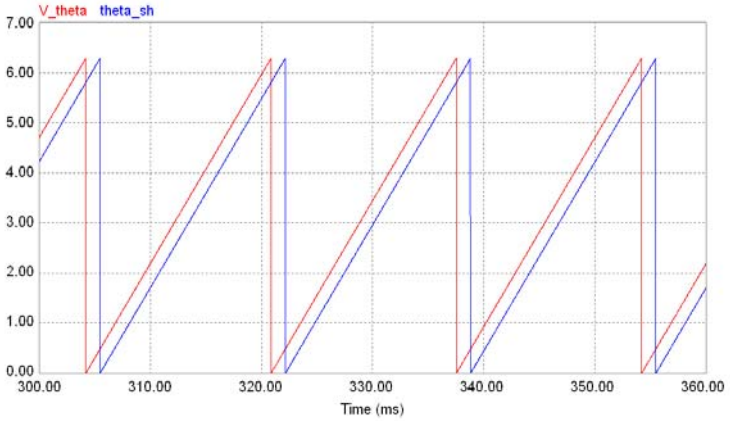


그림 3.198 추정 위상각(V_{Theta}) 및 이동된 위상각(V_{Theta_sh})

그림 3.198은 회생인버터와 같이 변압기의 사용으로 인한 위상차를 보상해주기 위해 PLL을 사용하여 얻은 위상각을 보여준다.

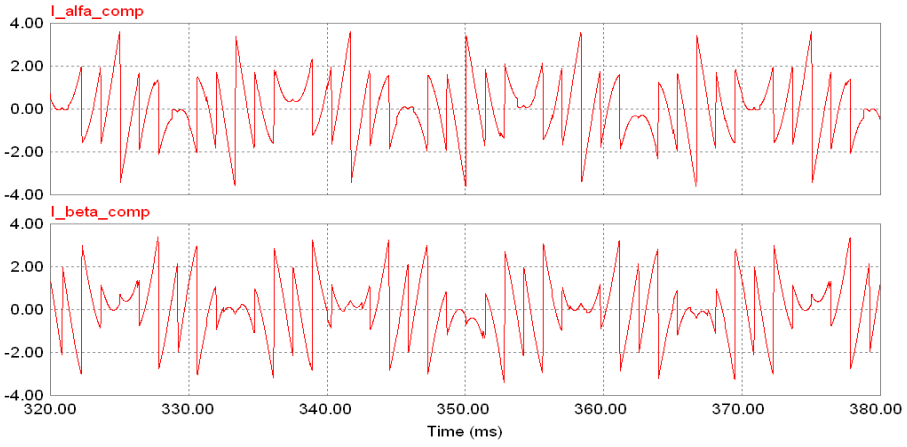


그림 3.199 2상 정지좌표계로 표현된 보상파형

그림 3.199는 보상파형이다. 순시유효전력의 고조파와 순시무효전력을 모두 포함하는 보상 파형으로써 역류보상 및 유효와 무효성분의 고조파 성분을 모두 보상하는 경우가 된다.

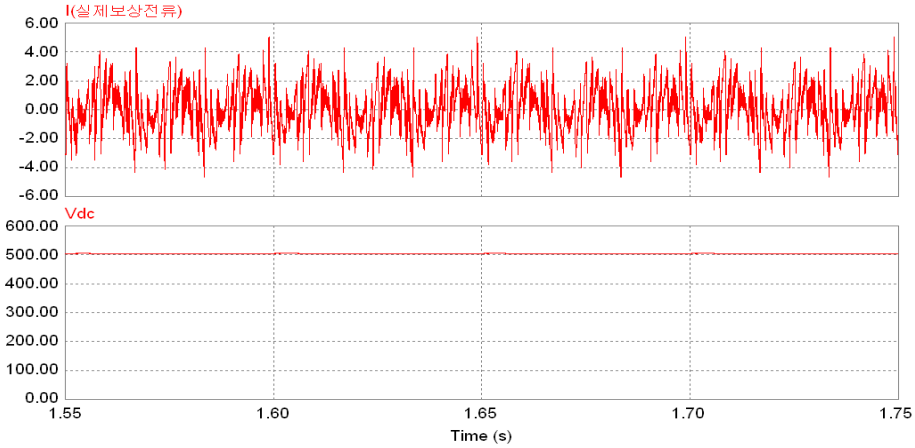


그림 3.200 보상전류와 DC가선전압

그림 3.200은 인버터 출력단에서 변압기를 거쳐 계통 측으로 출력되는 보상전류와 인버터 DC 링크의 전압을 보여준다. DC 링크단의 전압이 일정하게 유지됨으로써 안정적인 보상전류를 만들어 주는 것을 확인할 수 있다.

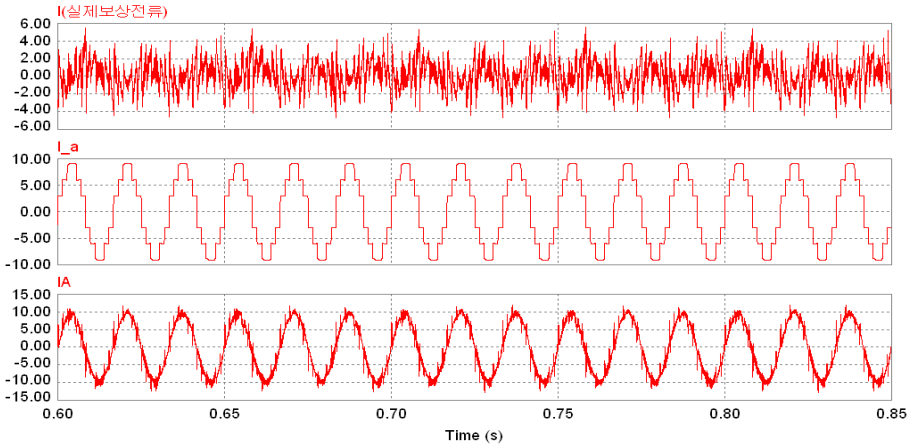


그림 3.201 보상전류와 계통 측 전류, 부하측 전류

그림 3.201에서 왜곡된 부하 측 전류가 보상전류에 의해 고조파가 저감되어 계통 측 전류는 정현파에 가깝게 보상됨을 보여주고 있다.

라. 능동전력필터 기능이 추가된 회생인버터

그림 3.202는 능동전력필터 기능이 추가된 회생인버터 직류 급전시스템을 나타낸

다. 기준 전압보다 직류가선 전압이 상승하게 되면 회생인버터로 동작하고 기준 전압으로 동작 시 능동전력필터로 동작하게 된다.

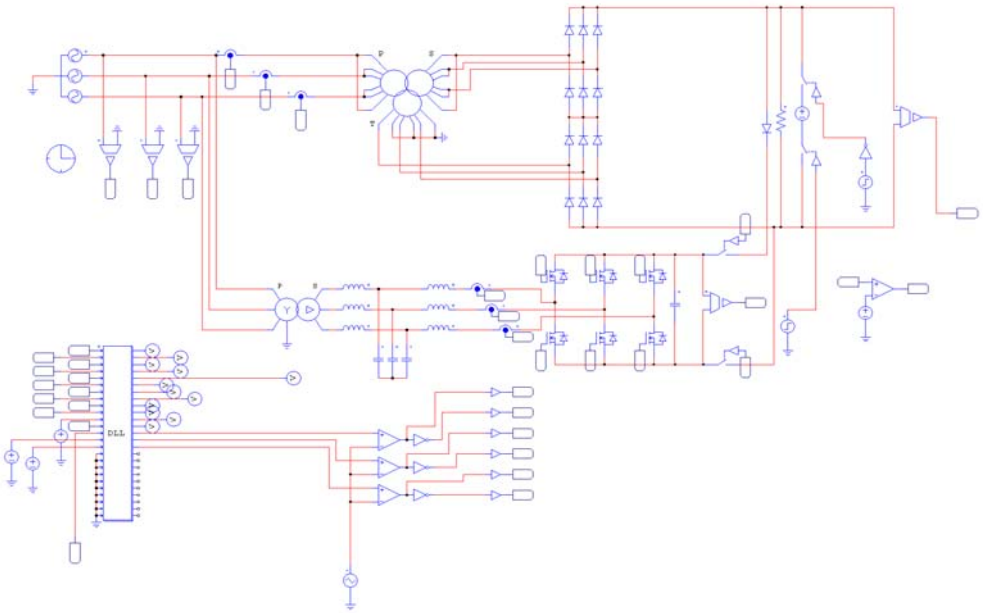


그림 3.202 능동전력필터 기능이 추가된 회생인버터 회로도

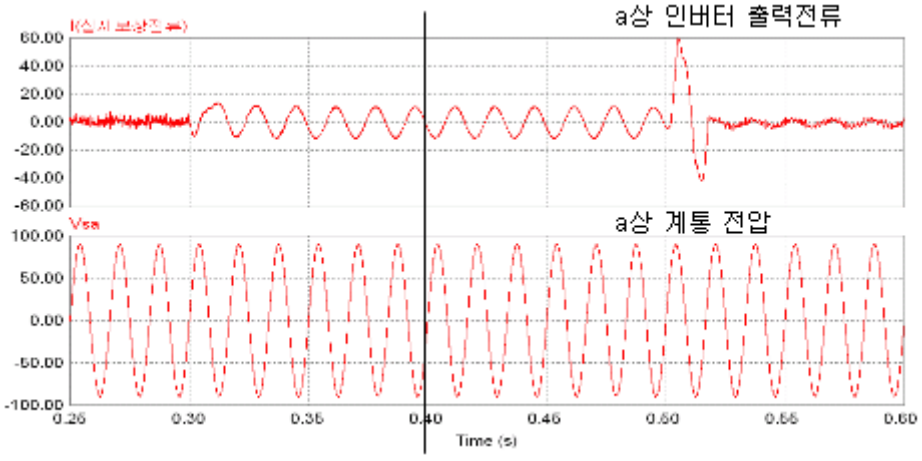


그림 3.203 인버터 출력전류와 계통 전압

그림 3.203은 변압기를 통과한 계통에 유입되는 인버터 출력전류를 보여준다. 0.3초 이전에는 능동전력필터로 동작하다가 0.3초 이후에 회생인버터로 동작함을 보여준다. 이때 회생되어지는 전류는 계통전압과 180°위상차를 가지는 것을 보여준다.

0.5초 이후에는 능동전력필터로 동작하는 것을 보여준다. 이때 앞단과 뒷단의 파형의 차이가 나는데 이는 직류 가선단의 전압을 일정하게 유지하기 위한 과도상태이기 때문에 출력전류에서 차이를 나타나게 된다.

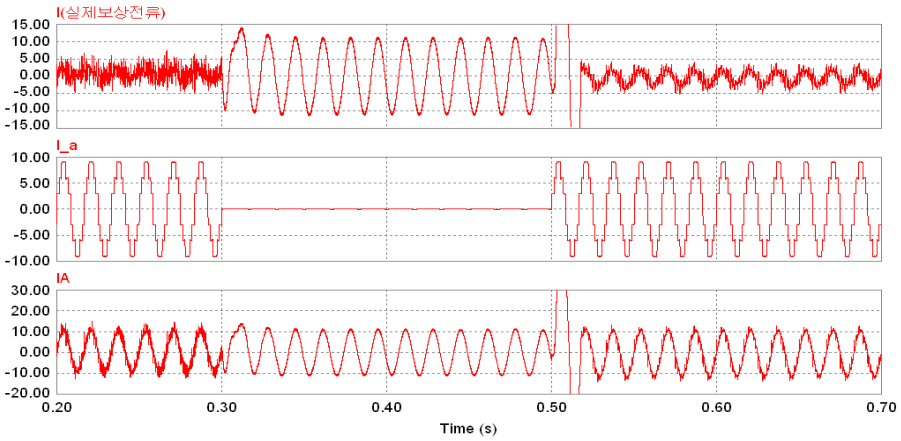


그림 3.204 인버터 출력전류, 부하 측 전류, 계통 측 전류

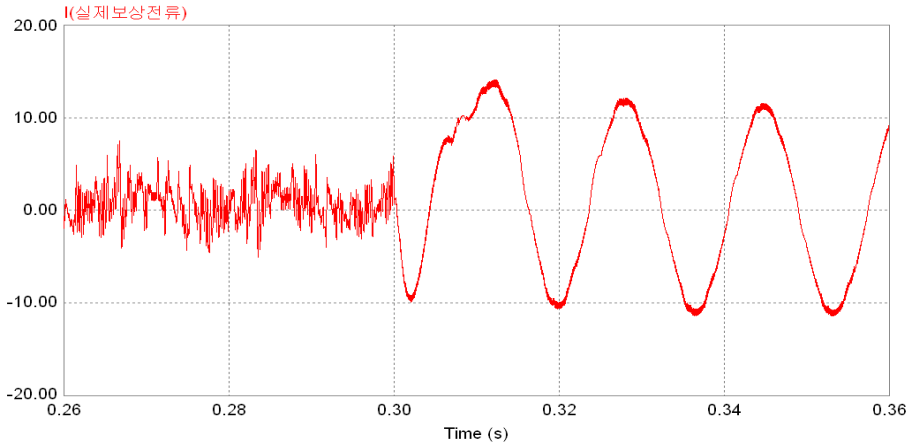


그림 3.205 능동전력필터와 회생인버터 동작에서의
인버터 출력전류

그림 3.204에서 부하 측 전류를 보면 회생 동작 시 직류 가선전압이 상승되기 때문에 계통 측에서 정류기로 전류는 흐르지 않는 것을 보여준다. 또한 능동전력필터로 동작 시 계통 측의 왜곡된 전류가 보상전류에 의해 정현파에 가깝게 보상되어지는 것을 보여준다.

그림 3.205에서는 능동전력필터동작에서 회생인버터로 동작 변화 시 인버터의 출력 전류를 확대한 파형이다. 모드 전환 시 위상각이 변화되고 제어기가 변화되기 때문에 약간의 과도 상태가 발생되어 지는 것을 볼 수 있다.

바. 전압강하 보상

본 논문에서는 DC링크와 연결되어진 스위치에 의해 사고모의를 수행하여 회생인버터로 전압강하 보상 기능을 수행하도록 하였다.

계통의 단선 사고나 주 정류기의 고장으로 인한 부하 측의 원활한 전력공급이 이루어 지지 않을 경우, 회생인버터 시스템은 전압강하 보상 모드로 동작하여 부하 측에 전원을 공급하게 된다. 그림 3.206은 사고모의를 하는 스위치의 On/Off 제어 파형과 가선전압을 나타낸다.

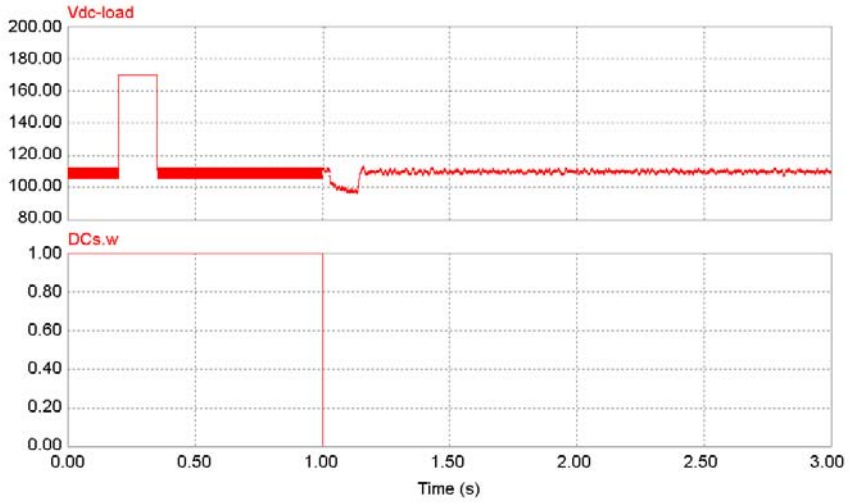
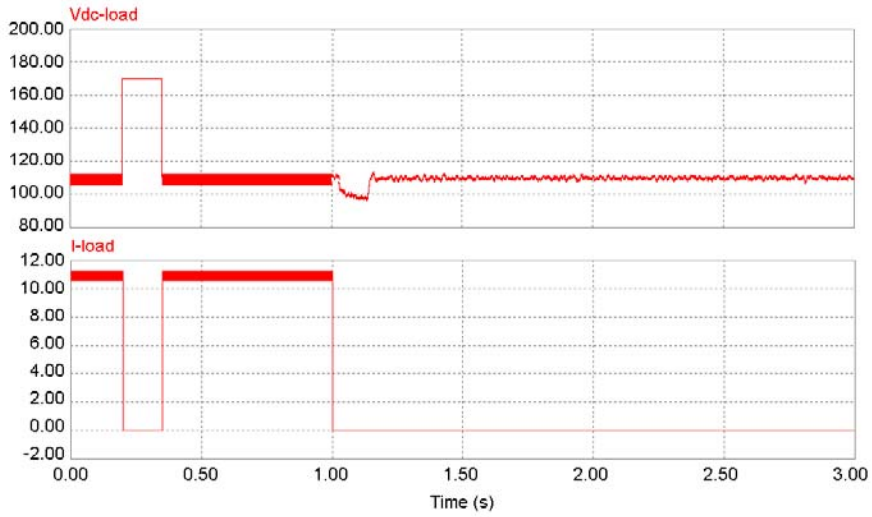


그림 3.206 전압강하 보상모드 시 각 부 파형

사고모의 시점을 전후로 1초 이전까지는 능동전력필터 모드와 회생인버터 구간을 확인할 수 있다. 1초 이후에 사고모의 스위치는 Off로 동작하여 부하전력공급은 계통 측에서 공급받지 못하게 되어 회생인버터는 전압강하보상 모드로 동작한다. 따라서 1초 이후에도 회생인버터를 통하여 부하 측 전력을 공급하기 때문에 가선전압이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

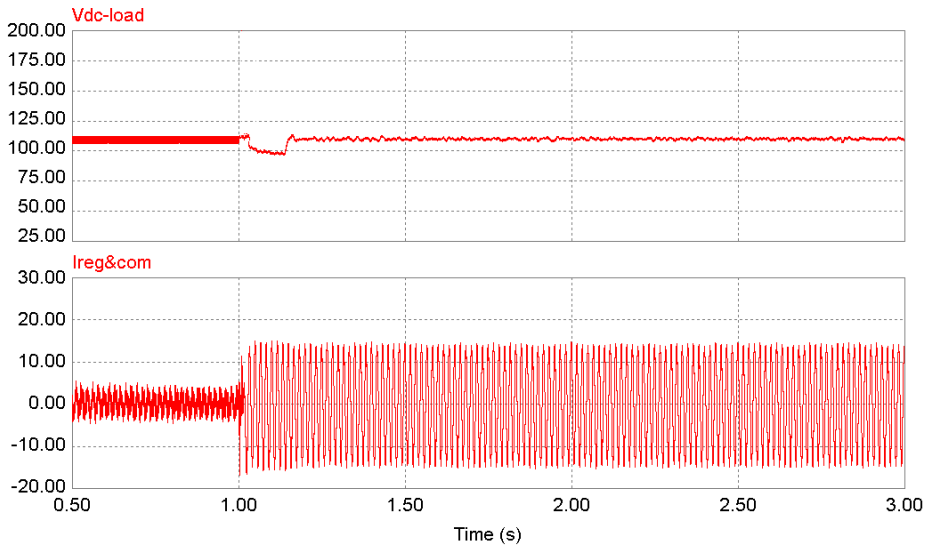


(a) 가선전압 (b) 주 정류기 부하전류

그림 3.207 전압강하 보상모드 시 각 부 파형

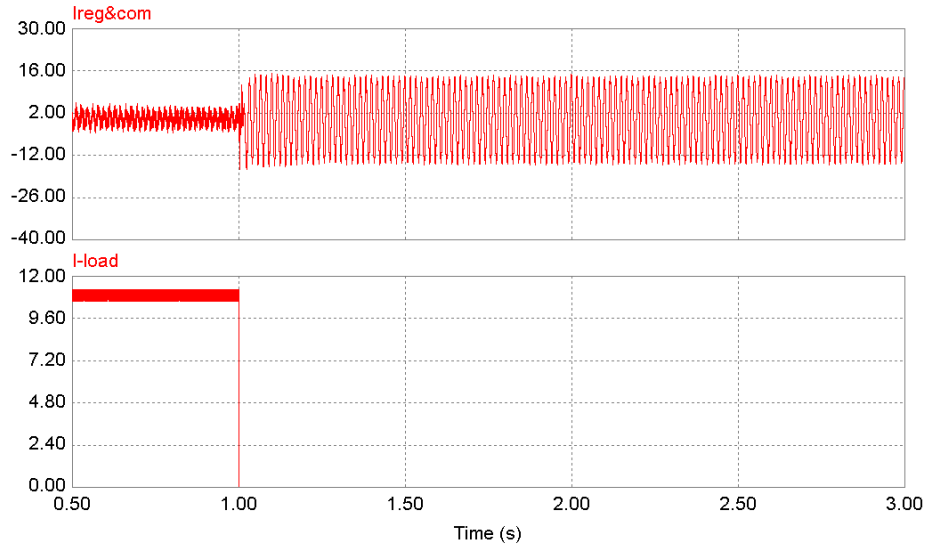
그림 3.207은 계통 측 사고모의 시 가선전압과 주 정류기 부하전류 파형을 나타낸다. DC 측 스위치의 off 로 인해 계통에서 전력공급이 불가능하기 때문에 계통에서 공급받는 부하 측 전류는 0으로 나타난다. 가선전압은 1초 이후부터 회생인버터가 전압보상모드로 동작하기 때문에 일정전압으로 유지된다.

그림 3.208은 전압강하 보상 모드 시 가선전압과 회생인버터 출력파형을 나타낸다. 회생인버터는 1초 이전에는 능동전력필터 모드로 동작하여 계통 측 고조파를 보상하지만 1초 이후부터 전압강하 보상모드로 동작하여 부하 측 전력을 공급한다.



(a) 가선전압 (b) 회생인버터 출력전류

그림 3.208 전압강하 보상모드 시 각 부 파형



(a) 회생인버터 출력전류 (b) 주 정류기 측 전류

그림 3.209 전압강하 보상모드 시 각 부 파형

그림 3.209는 주 정류기와 회생인버터 출력 전류파형을 나타낸다. 1초 이후부터

단선사고 및 주 정류기 사고를 모의하였기 때문에 주 정류기 측 전류파형은 사고 모의 시점부터 0으로 나타난다. 이에 반해 회생인버터 출력 전류파형은 사고모의 시점부터 부하 측으로 전력을 공급한다. 따라서 회생인버터 사용하여 안정된 전력을 부하에 공급할 수 있다.

6. 실험 결과

가. 회생 인버터 축소 모델 시스템

(1) PWM 인버터 축소모델 시스템 사양

본 보고서에서는 실 시스템 축소 모델로 설계하여 회생동작이 가능한 시스템의 성능 및 구현에 관하여 실험 하였다. 시스템에 대한 설계 사양은 다음 표 3.53과 같다.

표 3.53 회생용 인버터 축소모델 사양

정류 용량	5kVA
회생 용량	3kVA
스위칭 주파수	2kHz
허용 전류(MAX)	12A
허용 전압(MAX)	350V
계통 연계 리액터	7mH
12펄스 정류 전압(무부하)	120V

직류 가선 전압 제어도 1,500[V]의 10분의 1인 150[V]로 제어 하였고, 전류는 100분의 1로 제어하여 각각의 인버터는 1.5kVA 출력하도록 시스템을 구성하였다.

정류시 실 용량은 회생용량에 약 4배정도이지만, 회생 동작시에는 정류 동작이 되지 않으므로 본 논문에서는 회생 동작만 검증하기 위해 정류 용량은 순환전류가 생길시 허용 가능한 용량 5kVA로 선정하였다.

(2) PWM 인버터 축소모델 시스템 구성

그림 3.210은 3kVA 병렬 PWM컨버터의 전체 시스템을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 철도 차량 시스템의 축소 모델이므로 정류부와 제안된 회생부 두 시스템을 갖고 있다.

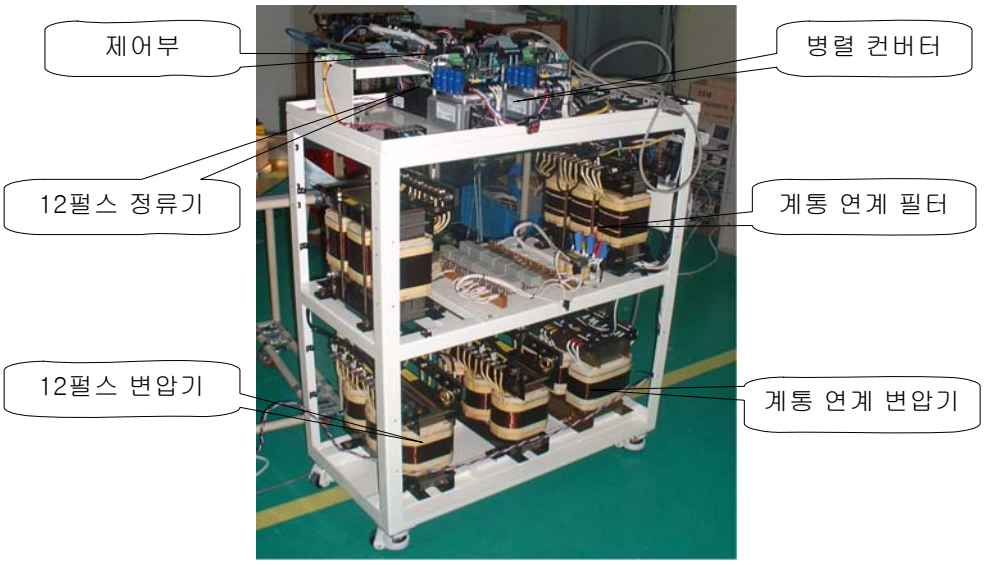


그림 3.210 실험에 사용된 3kVA PWM 인버터

마이크로프로세서부는 전체 시스템의 두뇌에 해당하는 부분으로 전압제어, 전류제어, 입출력제어 등을 담당한다. 이를 위해 각종 입력 데이터 및 측정 데이터를 바탕으로 많은 연산을 수행하고 연산결과에 따라 컨버터에 제어신호를 보내거나, 제어에 필요한 내부적인 시간을 계산하거나 시스템의 제어상태를 외부로 출력하기도 한다. 이와 같은 내부적인 연산처리는 대부분 부동 소숫점 연산이며 또한 매우 고속의 처리를 요구하므로 본 시스템에서는 이러한 충분한 성능을 가지는 Texas Instrument사의 32비트 DSP소자인 TMS320VC33을 사용하였다. 그러나, 이 소자는 부동 소숫점 연산과 연산 속도는 우수하지만, 주변 I/O를 컨트롤하기에 적합하지 않은 프로세서이다.

이에 주변 I/O컨트롤에 용의한 Motorora사의 16비트 DSP소장인 DSP56F807를 이용함으로서 문제를 해결하였다. 그림 3.211은 이 두 DSP소자간의 통신을 나타내는 블록도이다.

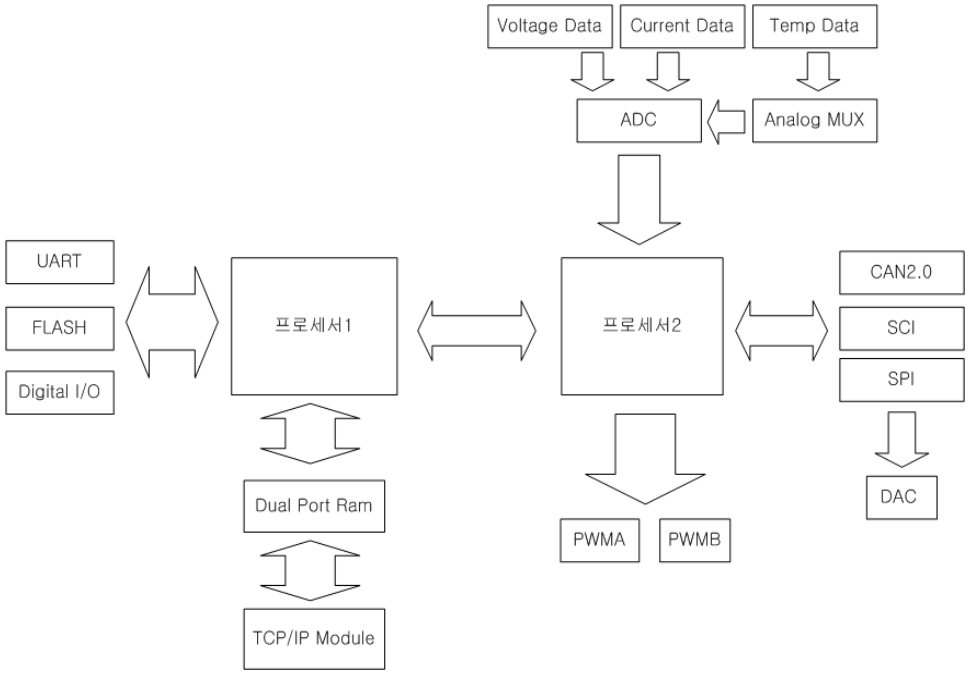
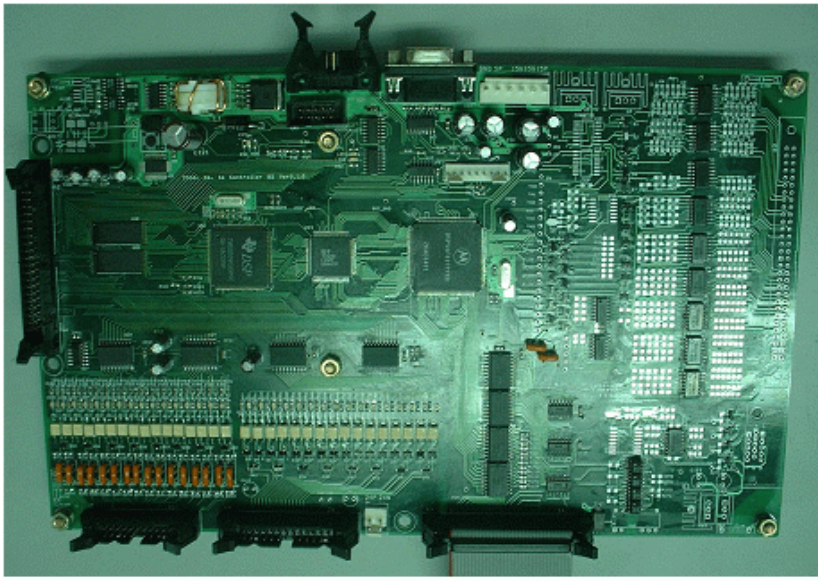


그림 3.211 실험에 사용된 제어부 블록도

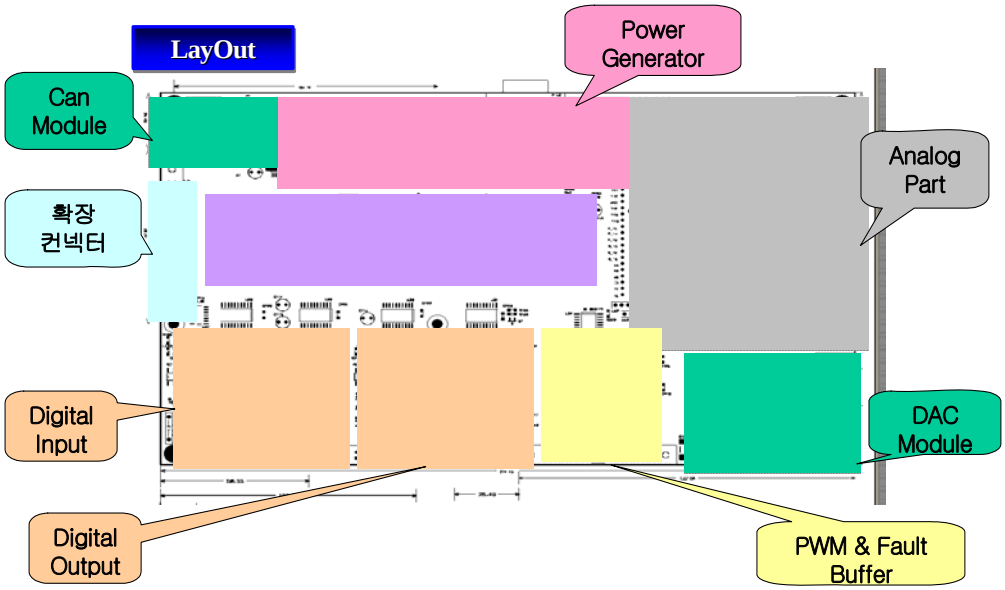
마이크로프로세서와 전력변환부 사이에 동작지령이나 검출 신호등을 상호 전달하고, 제어기가 외부에 상태를 표시하거나 외부에서 제어기에게 각종 지시를 내릴 수 있는 입출력 기능을 수행하는 부분이다. 각종 출력 전류 및 계통 전압, 직류 가선 전압 및 시스템 내부온도와 전력 변환을 위한 PWM(Pulse Width Modulation) 등과 같은 인터페이스가 필요하게 된다.

이와 같은 일을 연산만 전담하는 프로세서가 수행하기 어려우므로 이런 역할에 우수한 프로세서인 DSP56F807을 사용하여 인터페이스를 제어하게 된다. 그리고, 그 정보를 Dual-Port RAM을 이용하여 연산 프로세서와 정보를 교환하는 구조를 취함으로서 프로그램 탑재를 용의하게 하였다.

그림 3.212(a)는 위 조건에 부합하게 설계되어진 4층 기판의 제어보드이고, 그림 3.212(b)는 제이기의 주변 인터페이스를 나타낸다.



(a) 실험에 사용된 PWM 인버터 제어기



(b) 실험에 사용된 PWM 인버터 제어기의 주변 인터페이스

그림 3.212 3KVA PWM 인버터 제어부 세트 및 구성도

그림 3.213은 제어보드와 주변 I/O장치들과의 인터페이스 되어 있는 모습이다. 병렬 컨버터부는 전력 변환부이고, 릴레이부는 모든 시스템의 결선을 결정하는 물리 스위치 부이다. 인터페이스부는 외부로부터 입력되는 모든 아날로그 신호들을 종합하여 제어보드로 넘겨주는 역할을 한다.



그림 3.213 3kVA PWM 인버터 제어부 주변 결선

위 그림 3.213과 같은 제어기의 제어에 의해서 변환된 전력은 계통에 직접 전달되어 회생에너지로 사용될 수 없다. 그 이유는 계통과 컨버터는 서로 전압원으로 동작을 하게 되므로 전압원과 전압원 사이에는 전류 제한을 하기 위한 수동 소자가 필요 하다.

전류 제한 수동 소자로는 대표적으로 저항과 리액터가 있다. 저항은 전류 제한분을 열로 손실하게 되므로 리액터를 사용하여 효율을 최대화 하였다.

그림 3.214(a)는 전류 제한을 하기 위한 계통 연계 리액터이다. 리액터 부하만 사용하여 회생동작을 하여도 회생 동작이 가능하나 컨버터 출력으로 인한 심한 고조파가 유입되게 된다. 이를 제거하기 위하여 중간에 Capacitance를 추가하여 고조파 발생을 저감하였다.



(a) 실험에 사용한 PWM 인버터 출력 LCL필터



(b) 실험에 사용한 PWM 인버터 입력 및 출력 변압기

그림 3.214 실험에 사용한 3KVA PWM 인버터 입출력 변압기

그림 3.214(b)는 계통 전원이 컨버터 출력보다 높게 되면 회생동작이 어려워 지므로 전원의 전압보다 컨버터의 출력을 변압기를 이용하여 전압을 높여 제어를 용의하게 하였다. 또한, 철도 시스템과 같은 구조를 유지하기 위하여 12펄스 정류 변압기도 그림 3.214(b)와 같이 사용하여 축소 모형화 했다.

나. 회생인버터

그림 3.215는 Digital/Analog Converter를 통해서 본 계통 측 3상 전압 파형을 보여준다. 입력전압이 3상 평형상태로 공급되는 것을 볼 수 있다.

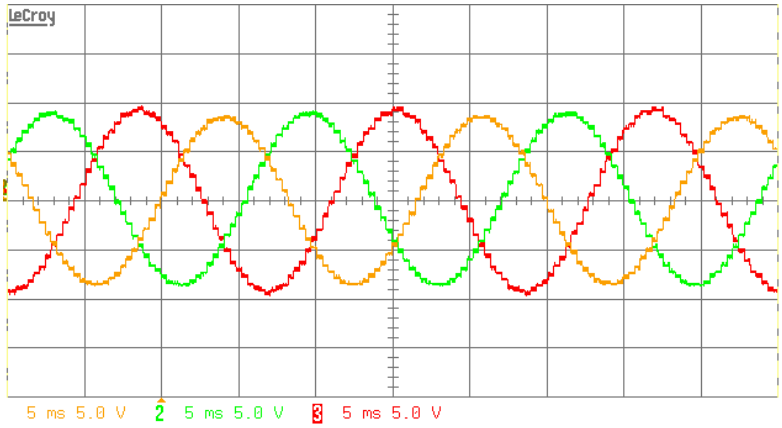


그림 3.215 D/A를 통한 3상 전압

(5V/div , 5ms/div)

그림 3.216은 Digital/Analog Converter를 통해서 3상 전압을 2상 정지좌표계로 변환한 파형을 보여준다.

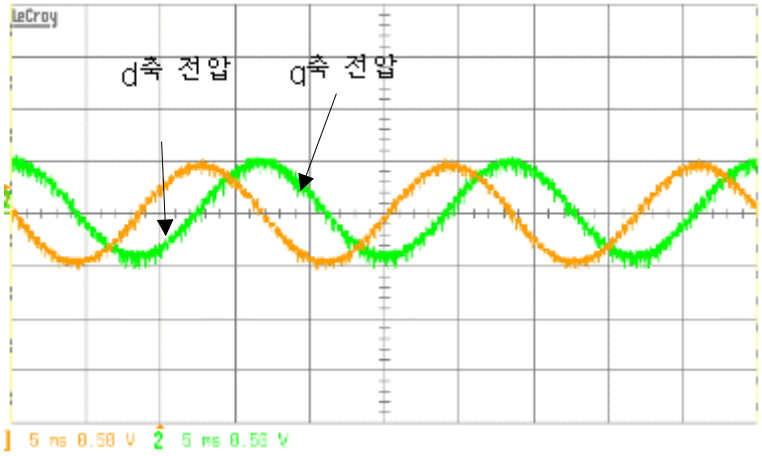


그림 3.216 D/A를 통한 2상 정지좌표계 변환

(0.5V/div , 5ms/div)

그림 3.217은 2상 정지좌표계를 2상 동기좌표계로 변환한 파형이다. 평형 3상 전압이므로 q축 전압이 0인 것을 확인할 수 있다. 또한 정현파의 유입으로 AC성분이 없는 DC에 가까운 형태로 표현된다.

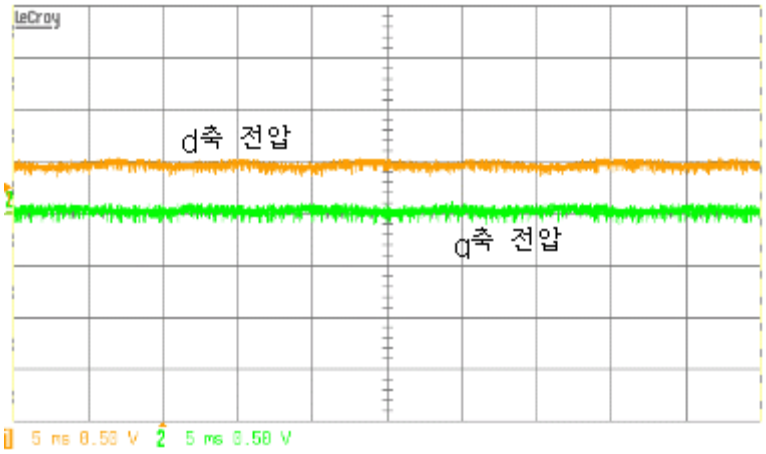


그림 3.217 2상 동기 좌표계 변환 (0.5V/div , 5ms/div)

그림 3.218은 PLL을 이용하여 위상각을 검출한 파형이다. d축 전압의 영점과 일치함을 확인할 수 있다. 실제 Digital PLL에서 q축 전압을 0으로 제어함으로써 그에 해당하는 위상각을 얻게 된다.

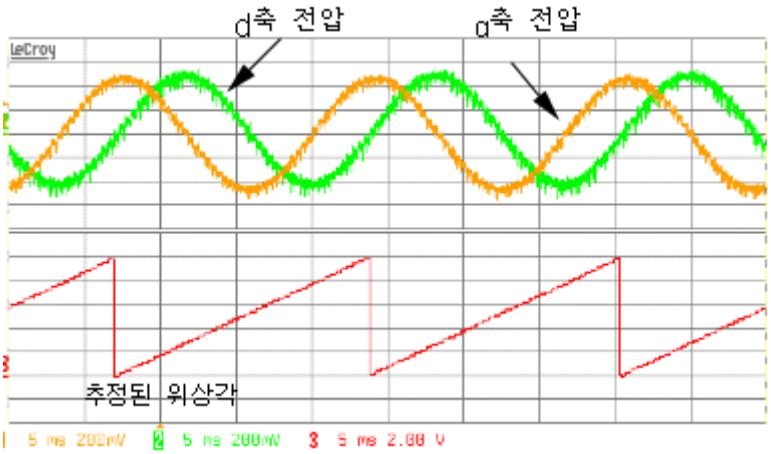


그림 3.218 위상각 추정 (200mV/div , 2V/div , 5ms/div)

그림 3.219는 변압기와 인덕터의 사용으로 인한 위상 지연을 보상하기 위해 이동되어진 위상각을 나타낸다.

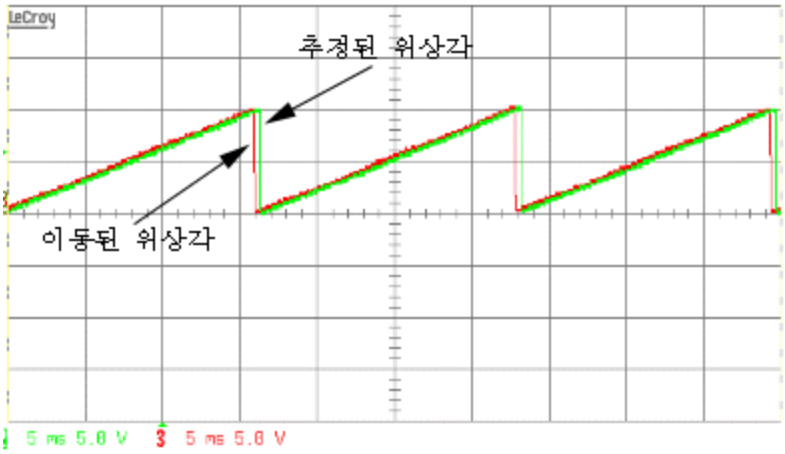


그림 3.219 추정된 위상각과 이동된 위상각

(5V/div , 5ms/div)

그림 3.220은 a상 계통전압과 a상 회생전류를 나타낸다. 전압과 전류의 위상차가 180° 나는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 회생전력이 계통 측으로 회생되고 있음을 확인할 수 있다.

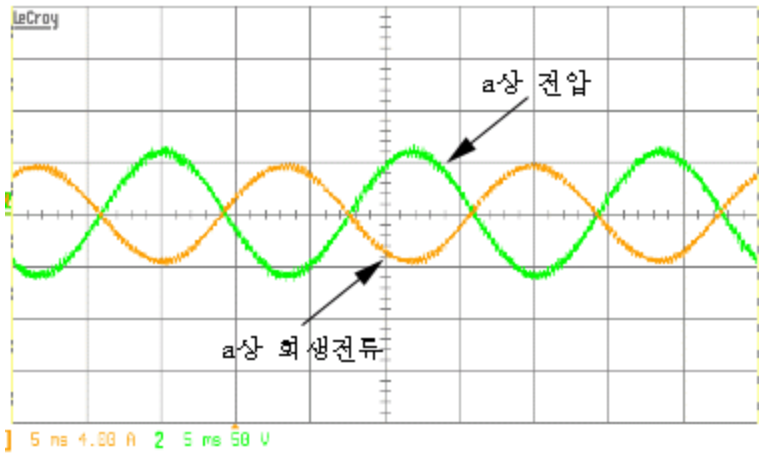


그림 3.220 a 상 계통전압과 a상 회생전류

(4A/div , 50V/div , 5ms/div)

그림 3.221은 DC링크 전압과 a상 회생전류를 나타낸다. 결과적으로 회생제동으로 인한 DC전압상승 시 전압제어를 함으로써 DC전압은 일정하게 유지됨과 동시에 계통으로 DC전압 증가분의 에너지를 계통으로 공급함으로 에너지 절약의 효과를

낼 수 있다.

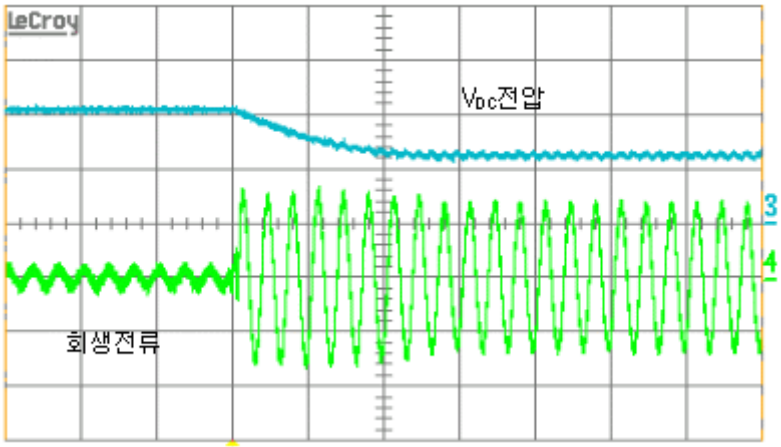


그림 3.221 V_{dc} 및 a상 회생전류

(2A /div, 100V/div, 10ms/div)

다. 능동전력필터

그림 3.222는 12펄스 다이오드 정류기의 사용으로 왜곡되어진 전류파형을 나타낸다. 12펄스 다이오드 정류기의 영향으로 11고조파와 13고조파의 함유량이 가장 크다. 또한 실험 시 저항부하를 사용하였으므로 전류의 왜곡됨을 확인할 수 있다.

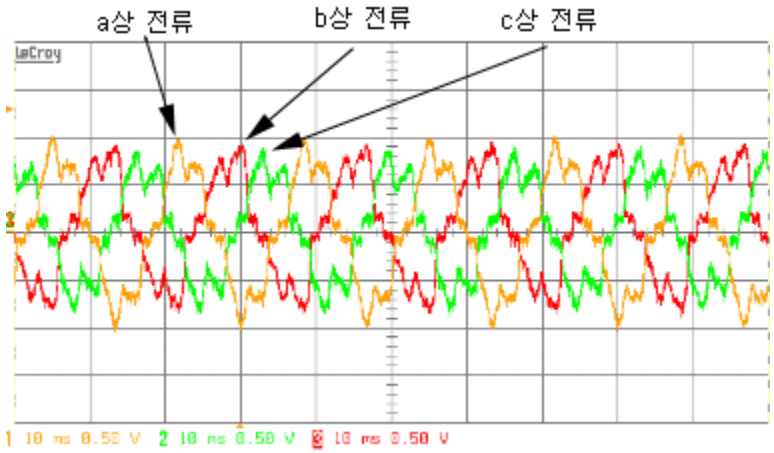


그림 3.222 D/A를 통한 계통 측 전류파형

(0.5V/div , 10ms/div)

그림 3.223은 왜곡되어진 전류파형을 정지좌표계로 변환한 파형을 보여준다. 90도 위상차를 가지고 있지만 파형의 왜곡이 심하게 일어난 것을 볼 수 있다.

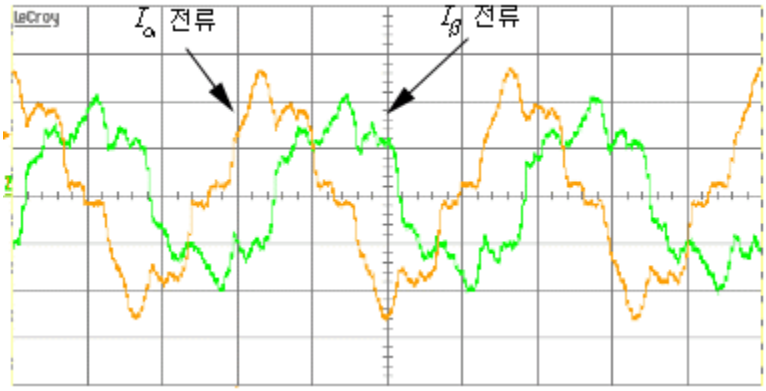


그림 3.223 2상 정지좌표계로 변환된 전류파형

(1V/div , 5ms/div)

그림 3.224는 $p-q$이론을 바탕으로 순시유효전력을 얻고 이를 저역필터를 이용하여 기본파성분과 고조파성분으로 나타내었다.

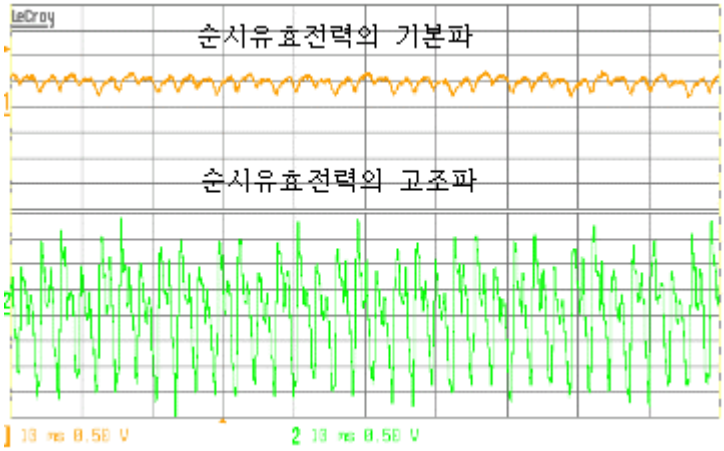


그림 3.224 순시유효전력의 기본파와 고조파

(0.5V/div , 10ms/div)

그림 3.225는 순시유효전력의 고조파 성분과 순시무효전력을 보여준다. 역률보상 및 고조파 보상을 위해서는 그림에서 보이는 것과 같이 두 가지 성분으로 보상전류 파형을 만들어야 한다.

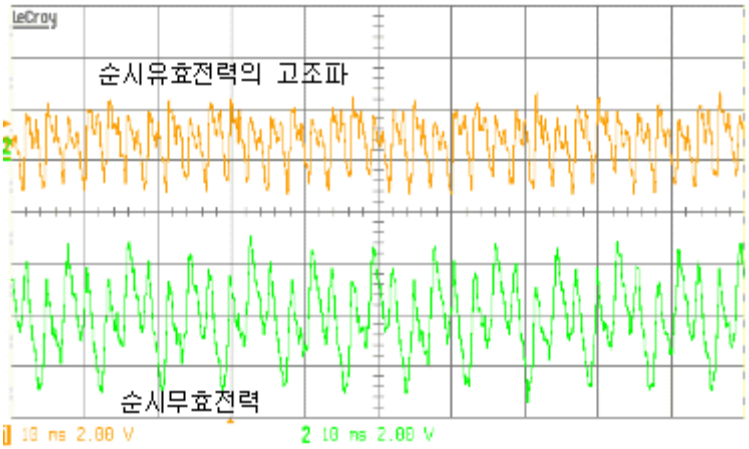


그림 3.225 순시유효전력의 고조파와 순시무효전력

(2V/div , 10ms/div)

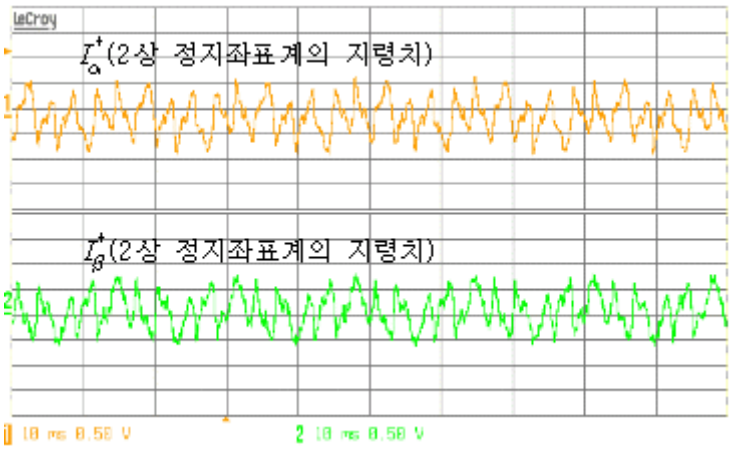


그림 3.226 2상 정지좌표계로 표현된 보상전류 지령치

(0.5V/div , 10ms/div)

그림 3.226은 그림 3.225에서 나타난 순시유효전력의 고조파 성분과 순시무효전력을 이용하여 2상 정지좌표계로 변환한 파형이다.

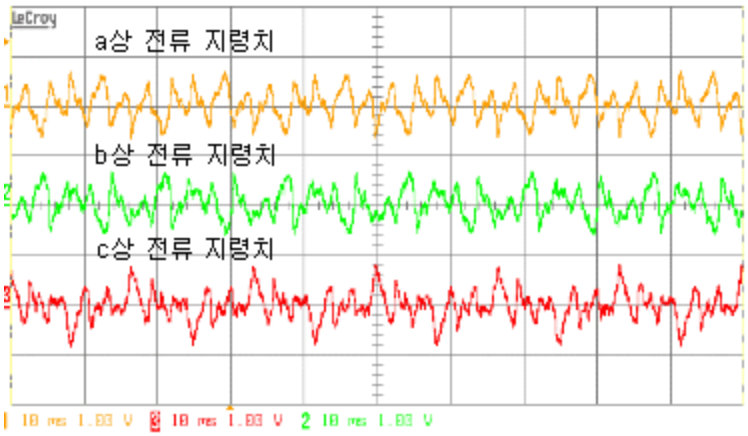


그림 3.227 3상의 보상전류 지령치

(1V/div , 10ms/div)

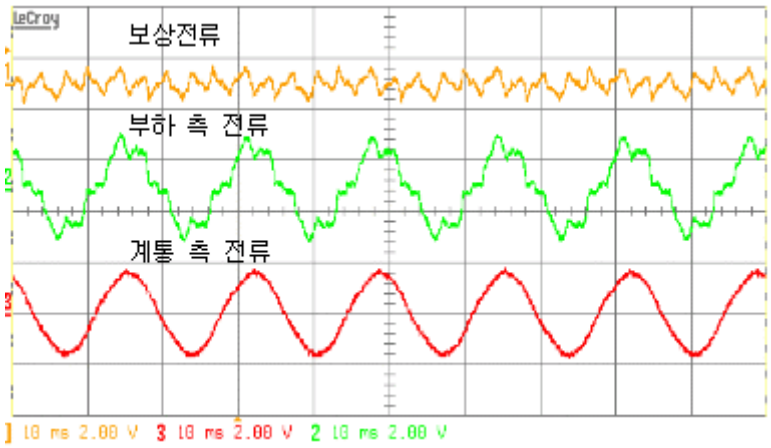


그림 3.228 D/A를 통한 보상전류 및 부하 측 전류,

계통전류

(2V/div , 10ms/div)

그림 3.227은 그림 3.226의 2상 정지좌표계를 3상 정지좌표계로 표현한 것이다. 즉 그림 3.227의 3가지 파형은 각각 a상, b상, c상의 보상전류 지령치가 된다. 또한 이들은 각 상의 고조파와 무효전력의 합이 된다.

그림 3.228은 D/A를 통한 각 부 파형이다. 첫 번째 파형은 a상 전류의 보상전류 지령치가 된다. 이는 두 번째 보이는 계통 측 전류의 고조파 성분과 무효전력 성분의 합이 된다. 즉 두 파형의 합은 아래에 보이는 정현파의 전류로써 나타나게 된

다. 이때 정현파에 가깝게 나타나는 것은 저역필터의 차단주파수와 저역필터의 종류에 따라서 특성이 틀리게 나타나게 된다.

라. 전압강하 보상

전압강하 보상모드 실험 시 DC측 스위치를 off 시켜 계통에서 주 정류기를 통해 부하 측으로 전력공급이 이루어지지 않게 모의 하였다.

그림 3.229는 스위치 off시에 가선전압과 부하전류파형을 나타낸다. 가선전압은 계통 측에서 전력공급이 이루어지지 않기 때문에 전압과 전류의 파형이 0으로 나타나는 것을 알 수 있다.

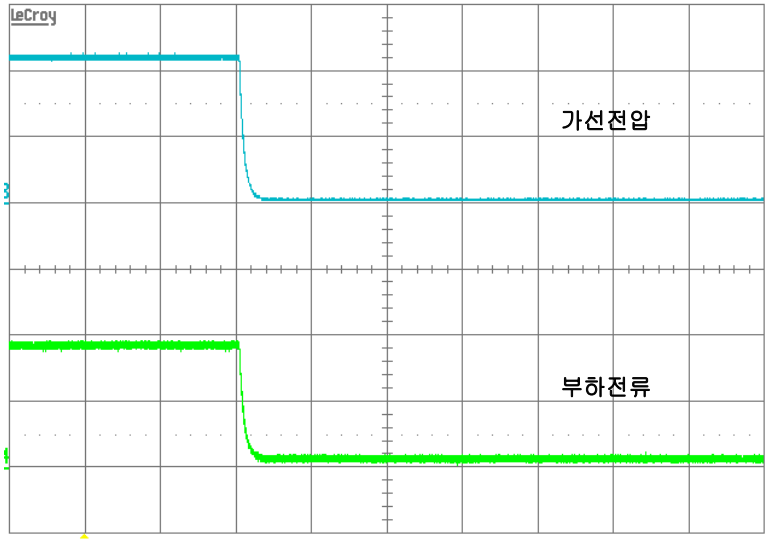
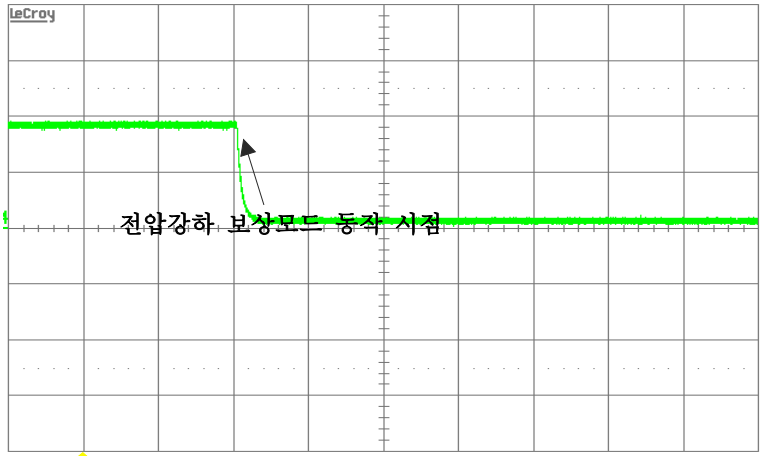
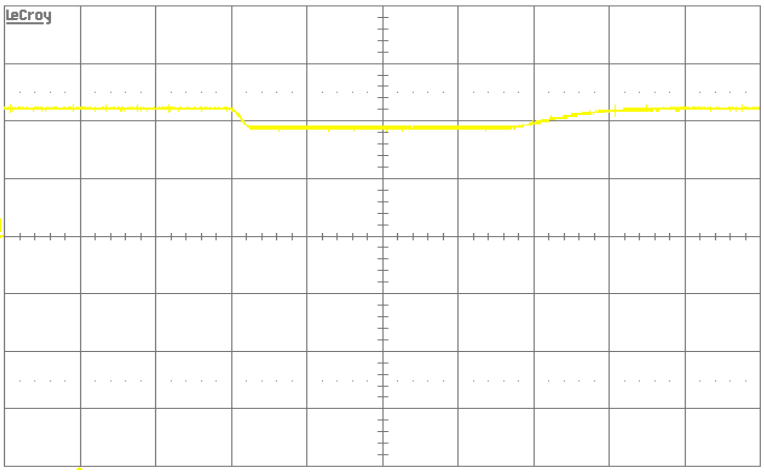


그림 3.229 스위치 Off시 DC측 전압, 전류

(50V/div , 2A/div, 5s/div)



(a) 전압강하 보상 모드로 동작하지 않는 경우 가선전압



(b) 전압강하 보상 모드로 동작할 경우 가선전압

그림 3.230 가선전압 파형 (50V/div,5s/div)

그림 3.230은 보상전/후 가선전압 파형을 나타낸다. 상단에 나타낸 가선전압 파형은 회생인버터가 전압강하보상모드로 동작하지 않을 때 전압파형이다. 그리고 하단에 보이는 파형이 전압강하 보상모드로 동작하여 회생인버터에 의해서 전력을 공급받는 가선전압파형을 나타낸다.

제 5 절 회생용 인버터 개발

1. 회생용 인버터 시작품 제작 및 성능시험

직류를 전원으로 하는 전철시스템에서 전동차의 제동 및 경사구간 주행시 발생하는 직류 회생전력을 3상 교류 전력으로 변환하여 교류모선 측으로 공급하며, 교류모선의 고조파 제거및 무효전력 보상이 가능한 직류 전력회생용 전력변환 장치를 실제 현장 설치가 가능한 용량으로 제작하였으며, 성능 시험을 위한 시험장치를 제작하여 시험을 하였다.

가. 직류 회생 제동용 전력 변환 장치 제작 시방

- DC 허용 최고 전압 : 2000V DC
- 회생제동전압 조정 범위 : 1650 ~ 1850V DC
- AC 출력전압 조정 범위 : 3Ø 800 ~ 1000V AC
- AC 정격 전류 : 500A (250A / 1대 x 2대)
- AC 단시간 전류 : 800A(60초)
- AC 정격 용량 : 1.5 MVA (750 kVA / 1대 x 2대)
- 효율 : 98 % (정격 출력시)
- 동작 온도 : 0 ~ 40℃
- 동작 방식 : IGBT PWM 방식
- 냉각 방식 : 수냉식
- 병렬 연계 운전 : 가능
- 크기 : W 1,600mm x H 2,200mm x D 600mm

나. 기본 설계 용량 및 성능 선정

설계 기본 용량을 선정하기 위하여 현재 설치 운영되고 있는 지하철 노선의 회생량을 분석하여 가장 적합한 용량을 선정한다. 1,500V 직류 전압을 사용하는 전동차 시스템에서 하강 경사로 주행이나 감속 운행 시 발생되는 잉여분의 전력을 회생 전력변환 장치를 사용하여 교류모선으로 회생하여 직류 가선 전압의 상승을 억

제하고 에너지를 절약하는데 있다. 전철구간에서 회생전력의 재사용을 위한 에너지 회생 시스템을 개발하고자 전철구간의 노선 구배도, 차량 운행시 가선전압 변동, 사용 전력량의 분석 및 에너지 회생율을 분석한 결과 약 500~750 kVA용량의 전력 변환기를 개발하여 각 구간의 상황에 따라 1대에서 4대 까지 구분 설치하는 것이 경제성에 있어서 적합하다.

직류 전력 회생장치가 설치되는 변전소의 용량이 각 변전소 별로 다르고 변전소의 전력 회생률 또한 각 구간의 구배 정도에 따라 다르기 때문에 모든 변전소에 동일 용량의 전력 변환기를 설치하기는 어렵다.

본 연구에서 최종 목표는 IGBT를 사용한 최대용량 750kVA급 전력 변환장치 2대로 구성된 전력 변환기이며, DSP 제어기를 사용해 저고조파의 전력 회생기능 갖는 전력 변환기를 개발 설치, 현장 적용에 있다. 회생 장치의 전체 구성은 크게 직류전원을 입력 전압으로 사용하는 병렬 컨버터, 이 컨버터 출력의 고조파 억제를 위한 LCL 필터부와 필터 출력을 계통과 연계하는 계통연계 변압기로 구성되어 있다. 또한 이 병렬 PWM컨버터를 제어기와 인터페이스 시키는 인터페이스부와 전체 시퀀스와 각종 제어 신호를 관장하는 제어기로 구성되어 있다.

다. 제어기 설계 제작

제어부는 전체 시스템을 제어하는 부분으로서 출력 전압 제어와 교류모선과의 위상제어 등을 위해 각종 입력 데이터 및 출력 데이터를 바탕으로 연산을 수행하고 연산 결과에 따라 컨버터에 제어 신호를 출력해야 한다. 또한 제어에 필요한 내부적인 시간을 계산하거나 시스템의 제어상태를 외부로 입력하기도 한다. 이와 같은 내부적인 연산처리는 대부분 소수점 연산을 필요하고 고속의 처리를 요구하므로 프로세서가 이러한 기능들이 있는 것을 선정한다. 회생제동 인버터 제어기는 32Bit의 DSP(Digital Signal Processor)보드(TMS320VC33-150), 16Bit C167 Control보드, 제어기와 IGBT에 전원을 공급해주는 POWER보드, VSI(IGBT)부로 크게 나눌 수 있다.

(1) 제어기 블럭도

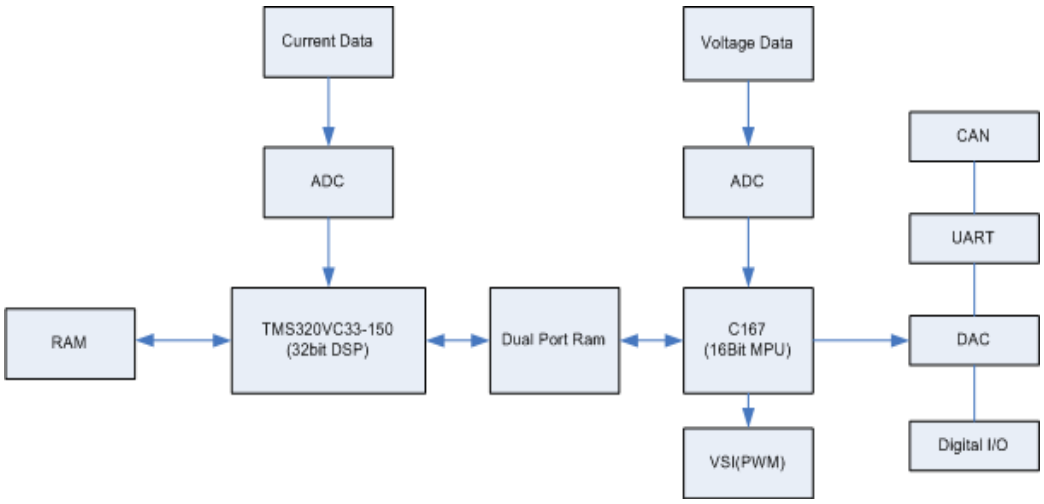


그림 3.231 제어기 구성도



그림 3.232 제어기 사진

그림 3.231에 제어기 구성도를 나타내었다. 제어기는 제어에 필요한 알고리즘을 처리하는 TMS320C33과 외부 I/O 시퀀스를 담당하는 C167(MPU)와 계통 전압, 계

통전류, 시스템 온도 등 아날로그 신호를 입력 받는 아날로그 회로부와 주변 입출력 신호를 제어하는 I/O 부와 두 프로세서간 데이터를 공유하는 DPRAM과 모니터링을 위한 통신 회로로 구성되어 있으며, 그림 3.232에 제작된 제어기의 사진을 나타내었다.

표 3.54 회생 PWM컨버터 제어기의 Input/Output 항목

구분		수량	사용내역	비 고
Analog Input	계통연결전압	3	Vrs, Vst, Vtr	위상 동기용
	계통 전류A	3	Ir, Is, It	계통고조파제거 및 무효전력보상용
	Vdc 라인 전압	1	Vdc	
	AC 출력전압	3	Vrs, Vst, Vtr	
	온도 센서	6	IGBT 방렬판 온도	
Digital Input	유저 입력 신호	4	Fault Reset, Run,/Stop, Emergency, Mode	버튼에 의한 입력
	상태 및 Fault 확인	3	CB, 리액터온도상승 냉각수 Level등	동작상태 유무
Digital Output	Display 용	3	Run Lamp, Stop Lamp, Fault Lamp,	육안으로 동작 상태 관측 가능
	7 Segment표시	1	동작 상태 및 Fault 표시	
	제어용	4	MC, Fan,Pump,DC Link	시스템 제어
통신 포트	RS 232	1	MMI 와의 통신	파라미터 조작
	CAN	1	타 컨버터와의 통신	
	LAN(TCP/IP)	1	PC 네트워크	OPTION

표 3.55 회생 병렬 PWM컨버터 제어기의 7 Segment표시

LED 표시	내 용	LED 표시	내 용
E=10	지락 과전류	E=31	UNIT 2 - S2상 IGBT 에러
E=11	DC-LINK 과전압	E=32	UNIT 3 - T1상 IGBT 에러
E=12	능동형필터 과전류	E=33	UNIT 3 - T2상 IGBT 에러
E=13	UNIT 1,2 전류편차 과다	E=36	DC-LINK 전압편차 상승
E=14	UNIT 2,3 전류편차 과다	E=37	하드웨어 에러
E=16	인버터 전류편차 과다	E=40	CB 피드백 에러(운전중)
E=17	인버터 과전류	E=41	CB 피드백 에러(프리차지중)
E=18	DC-쵸퍼 과전류	E=42	비상정지 버튼 누름
E=19	UNIT 1 - R1상 IGBT 방열판 과열	E=43	피드백 에러
E=20	UNIT 1 - R2상 IGBT 방열판 과열	E=44	리액터 과열
E=21	UNIT 2 - S1상 IGBT 방열판 과열	E=45	수동모드로 전환(운전중)
E=22	UNIT 2 - S2상 IGBT 방열판 과열	E=46	프리차지 OFF (프리차지중)
E=23	UNIT 3 - T1상 IGBT 방열판 과열	E=47	DC-쵸퍼 과부하
E=24	UNIT 3 - T2상 IGBT 방열판 과열	E=48	DC-쵸퍼 에러
E=27	UNIT 1,2,3 IGBT 과열	E=49	냉각수 부족
E=28	UNIT 1 - R1상 IGBT 에러	E=50	DSP 런타임 에러
E=29	UNIT 1 - R2상 IGBT 에러	E=53	스위치 조작순서 에러
E=30	UNIT 2 - S1상 IGBT 에러	E=56	연동 자동정지

표 3.54에 제어기에 필요한 항목을 열거하였다. 또한 제어기는 아날로그 입력부에서는 계통의 전압, 전류를 처리할 수 있는 회로와 시스템 운전을 위한 디지털 입력, 제어기 내부의 제어 상태를 표시하는 디지털 출력부와 파라미터 조작이나 컴퓨터와의 통신을 위한 통신회로부로 구성된다.

표 3.55는 회생 인버터 제어기의 에러 코드 표이다.

(2) CPU 와 메모리 부

메모리 부분은 프로그램을 저장하며 파라미터와 필요 데이터를 백업하는데 사용한다. DSP(TMS320VC33)와 C167은 DPR(Dual Port Ram)이라는 소자를 사용하여 서로의 데이터를 공유함으로써 각 소자의 기능을 최대한 발휘할 수 있도록 구성되어 졌다. 제어에 필요한 내부적인 시간을 계산하거나 시스템의 제어상태를 외부로 출력한다. 이와 같은 내부적인 연산처리는 대부분 부동소수점 연산이 필요하고 고속의 처리를 요구하므로 본 연구에서는 충분한 성능을 가지는 Texas Instrument사의 32비트 TMS320VC33을 사용한다. 연산을 제외한 외부와의 인터페이스 부분은 처리 속도가 빠르고, 주변 I/O를 많이 내장한 INFINION사의 16비트 C167을 사용하여 연산처리를 제외한 주변 입출력 소자의 사용을 최소화 한다.

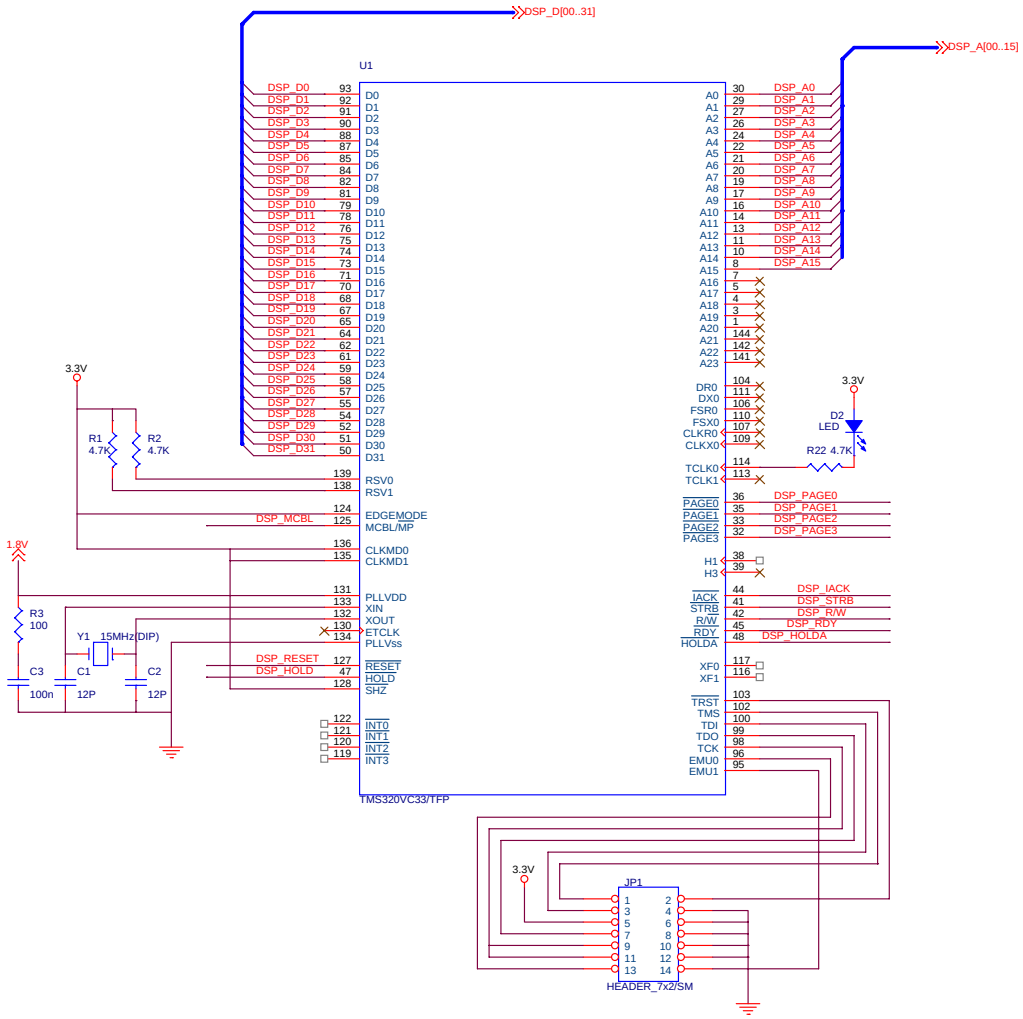


그림 3.233 TMS320VC33 회로도

직류전력 회생용 컨버터의 전력제어를 위해서는 실시간으로 직류전압, 교류전압, 교류전류를 검출해서 이를 좌표변환을 통하여 전력을 계산하고 PI제어 알고리즘으로 처리한다. 여기에서는 곱셈, 나눗셈, 삼각함수 등의 많은 부동소수점 연산을 필요로 한다.

그림 3.233에 본 시스템에서 사용하고 있는 제어용 CPU(TMS320VC33)의 회로도를 표시하였다. 이 소자의 특징 및 주요 기능을 살펴보게 되면 다음과 같다. 명령 및 데이터는 32비트, 어드레스는 24비트(16M Word)이고, 120MHz의 CPU 클럭으로 약 16.6ns의 평균 명령처리 시간을 갖는다. 명령 처리능력은 60MIPS(Million instruction per second), 연산능력은 120MFLOPS(Million floating-point operation per second)

이다. 40/32비트 부동소수점 및 32비트의 정수에 대한 곱셈을 하드웨어적으로 고속 처리할 수 있고, 8개의 40비트 레지스터를 포함하여 총 28개의 레지스터를 내장하고 있다. 또한 32워드의 명령 캐쉬를 내장하고 있으며, 마이크로컴퓨터 모드에서는 부트로더의 기능을 사용할 수 있다. 그리고 2개의 32비트 타이머 및 8/16/24/32비트의 전송이 가능한 1개의 직렬포트를 내장하고 있어서 타이머 인터럽트, 직렬통신 인터럽트 및 4개의 외부 하드웨어 인터럽트를 처리할 수 있다. 또한 TMS320VC33은 정수 및 부동소수점수에 대한 산술연산과 논리연산이 가능하고, 2개의 명령을 병렬 처리할 수 있다. 명령의 오퍼랜드는 2개 또는 3개로 구성되고 블록 반복처리 기능 및 32비트 비트 이동 기능이 있다. 나눗셈을 수행하려면 상수의 나눗셈은 미리 역수를 메모리 변수로 저장하여 두었다가 필요할 경우 이를 곱하는 방법으로 처리하고, 변수의 경우에는 별도의 역수를 취하는 서브루틴을 작성하여 두고 이를 이용한 계산 결과를 곱하는 방법으로 처리한다. 삼각함수, 역삼각함수, 제곱근 등의 수학함수도 덧셈, 곱셈만으로 서브루틴을 작성하여 사용하였다.

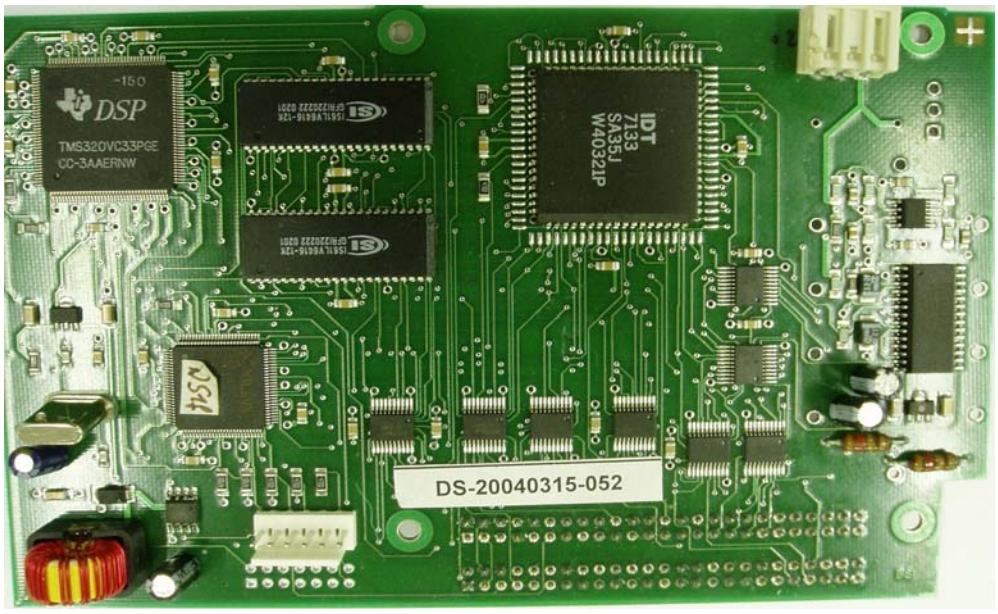


그림 3.234 DSP보드 사진

DSP TMS320VC33-150의 제원

◆ High-Performance Floating-Point Digital Signal Processor (DSP):

- 13-ns Instruction Cycle Time

- 150 Million Floating-Point Operations Per Second (MFLOPS)

- 75 Million Instructions Per Second (MIPS)

◆ 34K × 32-Bit (1.1-Mbit) On-Chip Words of Dual-Access Static Random-Access Memory (SRAM) Configured in 2 × 16K Plus 2 × 1K Blocks to Improve Internal Performance

◆ x5 Phase-Locked Loop (PLL) Clock Generator

◆ Very Low Power: < 200 mW @ 150 MFLOPS

◆ 32-Bit High-Performance CPU

◆ 16-/32-Bit Integer and 32-/40-Bit Floating - Point Operations

◆ Four Internally Decoded Page Strobes to Simplify Interface to I/O and Memory Devices

◆ Boot-Program Loader

◆ EDGEMODE Selectable External Interrupts

◆ 32-Bit Instruction Word, 24-Bit Addresses

◆ Eight Extended-Precision Registers

◆ On-Chip Memory-Mapped Peripherals:

◆ One Serial Port

◆ Two 32-Bit Timers

◆ Direct Memory Access (DMA)

◆ Coprocessor for Concurrent I/O and CPU Operation

◆ Fabricated Using the 0.18-µm (leff-Effective Gate Length) TImeline. Technology by Texas Instruments (TI)

◆ 144-Pin Low-Profile Quad Flat pack (LQFP) (PGE Suffix)

◆ Two Address Generators With Eight Auxiliary Registers and Two Auxiliary Register Arithmetic Units (ARAUs)

◆ Two Low-Power Modes

◆ Two- and Three-Operand Instructions

◆ Parallel Arithmetic/Logic Unit (ALU) and Multiplier Execution in a Single Cycle

◆ Block-Repeat Capability

◆ Zero-Overhead Loops With Single-Cycle Branches

◆ Conditional Calls and Returns

◆ Inter locked Instructions for Multiprocessing Support

◆ Bus-Control Registers Configure Strobe-Control Wait - State Generation

◆ 1.8-V (Core) and 3.3-V (I/O) Supply Voltages

◆ On-Chip Scan-Based Emulation Logic, IEEE Std 1149.1† (JTAG)

그림 3.235에 주변 I/O입출력 및 PWM Signal을 담당하고 있는 Infineon 사의 C167의 회로도를 나타내었다. 특징 및 주요 기능을 살펴보면 다음과 같다. 명령 및 데이터는 16비트, 어드레스는 16비트이고, 33MHz의 CPU 클럭으로 약 80ns의 평균 명령 처리 시간을 갖는다. 명령 처리능력은 80MIPS(Million instruction per second)이다. 16비트의 정수에 대한 곱셈을 하드웨어적으로 고속 처리할 수 있고, 각 I/O의 기능 및 레지스터들이 완전히 나누어져 있어 각 기능에 대한 개발을 분담할 수 있고, 디버깅 또한 용의하여 개발 속도가 빠르다.

C167보드는 16비트의고속의 MCU(Micro Control Unit)을 사용하였으며, 고조파제거의 알고리즘을 제외한 거의 모든 일들은 여기에서 수행되어진다.
중요한 PWM을 이용한 IGBT(VSI)제어, 외부 오동작체크, 돌발 상황에 대한 보호 동작, 프로그램 업데이트, 외부기기(PC)와 연결 및 통신을 통한 모니터링 및 프로그램 업데이트 등을 수행한다.

또한, Boot-Loader기능을 추가하여 현장에서 232통신으로 자유롭게 프로그램을 업데이트 시킬 수 있으며, 각 파라메타를 조정하여 현장상태에 맞게 세팅할 수 있다.

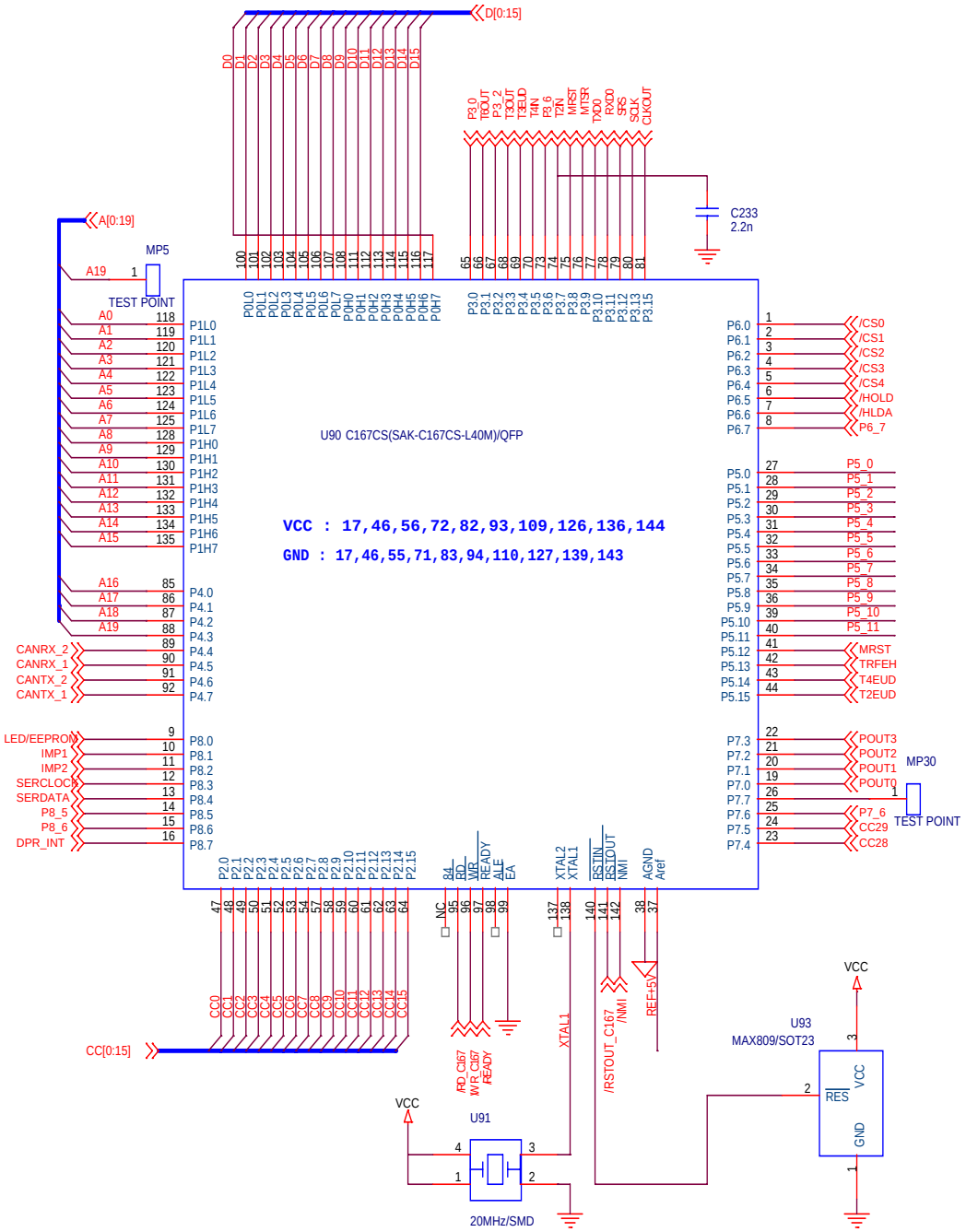


그림 3.235 C167의 회로도

C-167CS 제원

◆ High Performance 16-bit CPU with 4-Stage Pipeline

- 80/60ns Instruction Cycle Time at 25/33MHz CPU Clock
- 400/303ns Multiplication (16´ 16bit), 800/606ns Division (32/16bit)

- Enhanced Boolean Bit Manipulation Facilities

- Additional Instructions to Support HLL and Operating Systems

- Register-Based Design with Multiple Variable Register Banks

- Single-Cycle Context Switching Support

- 16 MBytes Total Linear Address Space for Code and Data

- 1024 Bytes On-Chip Special Function Register Area

◆ 16-Priority-Level Interrupt System with 56 Sources, Sample-Ratedown to 40/30ns

◆ 8-Channel Interrupt-Driven Single-Cycle Data Transfer Facilities via Peripheral Event Controller (PEC)

◆ Clock Generation via on-chip PLL (factors 1:1.5/2/2.5/3/4/5), via prescaler or via direct clock input

◆ On-Chip Memory Modules

- 3 KBytes On-Chip Internal RAM (IRAM)

- 8 KBytes On-Chip Extension RAM (XRAM)

- 32 KBytes On-Chip Program Mask ROM

◆ On-Chip Peripheral Modules

- 24-Channel 10-bit A/D Converter with Programmable Conversion Time down to 7.8µs

- Two 16-Channel Capture/Compare Units

- 4-Channel PWM Unit

- Two Multi-Functional General Purpose Timer Units with 5 Timers

- Two Serial Channels (Synchronous/Asynchronous and High-Speed-Synchronous)

- Two On-Chip CAN Interfaces (Rev. 2.0B active) with 2 ´ 15 Message Objects (Full CAN/Basic CAN), can work on one bus with30 objects

- On-Chip Real Time Clock

◆ Up to 16MBytes External Address Space for Code and Data

- Programmable External Bus Characteristics for Different Address Ranges

- Multiplexed or Demultiplexed External Address/Data Buses with 8-Bit or 16-Bit Data Bus Width

- Five Programmable Chip-Select Signals

- Hold- and Hold-Acknowledge Bus Arbitration Support

◆ Idle, Sleep, and Power Down Modes with Flexible Power Management

◆ Programmable Watchdog Timer and Oscillator Watchdog

◆ Up to 111 General Purpose I/O Lines, partly with Selectable Input Thresholds and Hysteresis

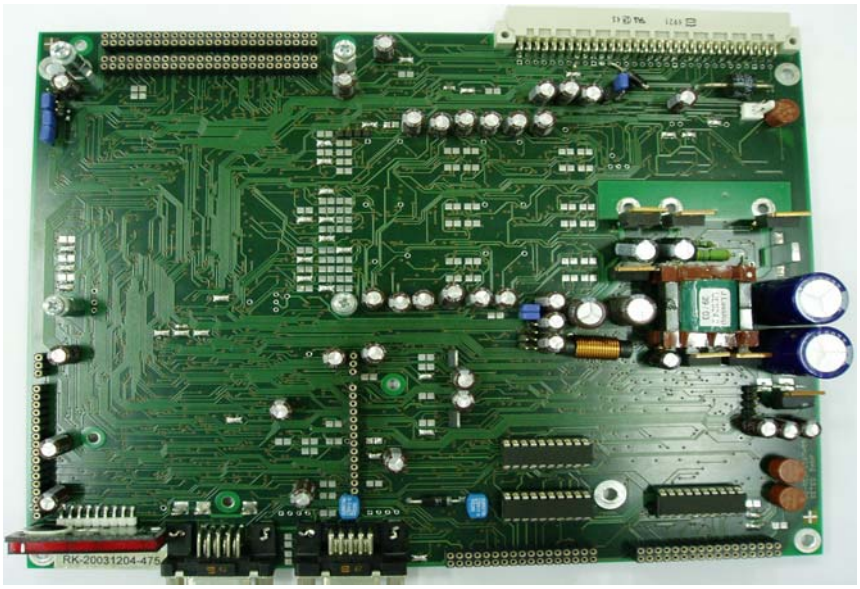


그림 3.236 Control 보드(C-167) 전면 사진

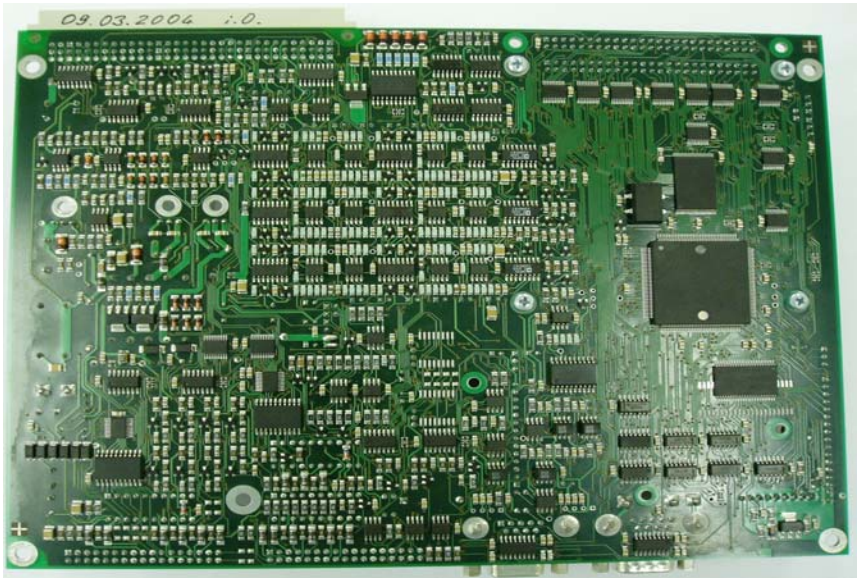


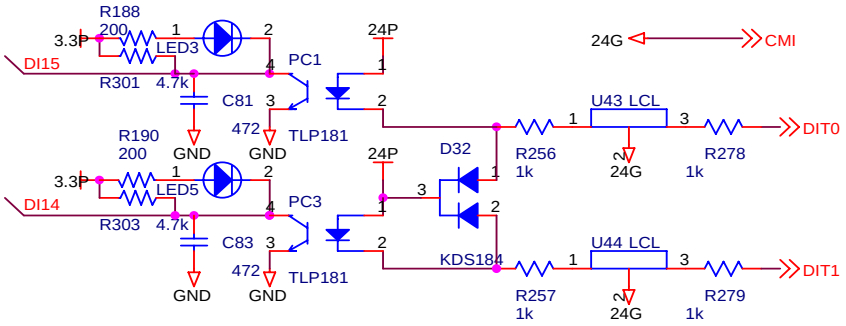
그림 3.237 Control 보드(C-167) 후면 사진

(3) Digital Input/Output 부

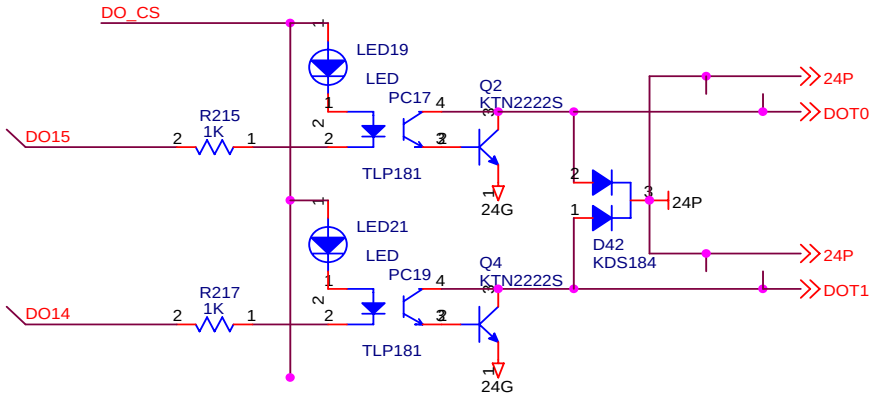
Digital 입출력에 이용하며 제어기 외부와의 입출력은 제어기 보호를 위해 절연을 하였다. 입력부와 출력부를 분리하고 CPU와의 인터페이스 시 CPU 소자를 보호하기 위해 직접적인 회로연결보다 버퍼를 거쳐 입출력되도록 하였다. 운전 정지, 비상상황 등 외부 입력으로 사용하고 운전 정지 비상상황 디스플레이, 시스템 연결 등 외부 제어 신호로 이용한다.

외부에서 기동 및 정지 등의 입력 신호와 외부회로로의 신호 전달시 외부 입출력 신호들은 절연을 위하여 포토커플러를 사용하였으며, 출력은 릴레이를 사용하여 a, b 접점 신호가 둘 다 출력되게 설계하였으며 각각 16채널씩 사용하도록 설계 하였다.

그림 3.238에 디지털 입출력 회로를 나타내었다. 포토커플러 1차측이 on(Active Low) 되면 절연된 2차측 상태가 High에서 Low 로 변한다. 이를 CPU가 검출하여 외부 신호를 인식하게 된다.



(a) 디지털 입력 회로



(b) 디지털 출력 회로

그림 3.238 디지털 입출력 회로

(4) 통신 회로부

그림 3.239는 RS232 통신과 그림 3.229는 CAN 통신 회로도를 표시하였다. 외부의 메모리나 PC와의 통신을 위하여 사용할 수 있게 설계되어 있으며, 모니터링 및 파라미터 변경을 위하여 RS232를 통하여 사용할 수 있으며, 프로그램 변경 및 백업 데이터 또한 통신으로 PC상태에서 모니터링 할 수 있다.

(가) SCI (RS232)사양

PC와의 통신용이므로 내부적으로 5V를 사용할 수 있도록 설계하였으며 서로의 전송속도를 사용자가 선택사용 할 수 있도록 자동모드가 프로그램 되어있다.

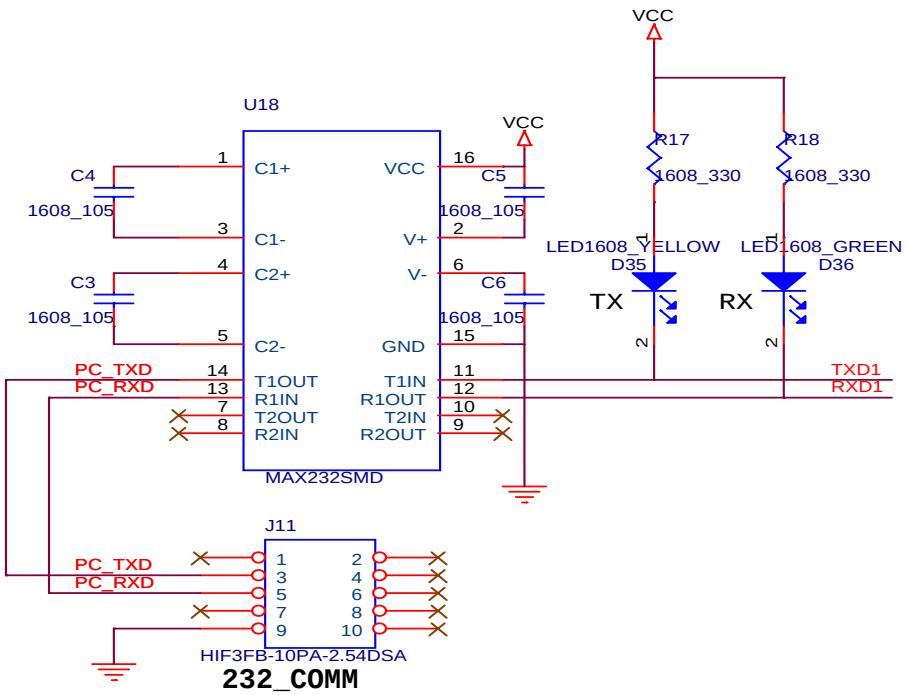


그림 3.239 RS 232 통신회로

(나) CAN 사양

여러 대의 컨버터가 동작시 어느 한쪽으로의 전력이 편중되는 것을 막기 위해서 서로간의 데이터를 주고 받아 전력이 편중되는 것을 막아야 하며 컨버터간 데이터 전송에 부가적인 회로 추가 없이 C167의 기능을 이용한다. 통신선과 제어기 사이는 외란의 원인이 되므로 절연하고 고전류 시스템하에서의 통신이므로 통신 속도

를 느리게 설정하여 CAN2.0 포맷에 맞추어 서로간의 송수신이 가능하도록 프로토콜을 일치시킨다.

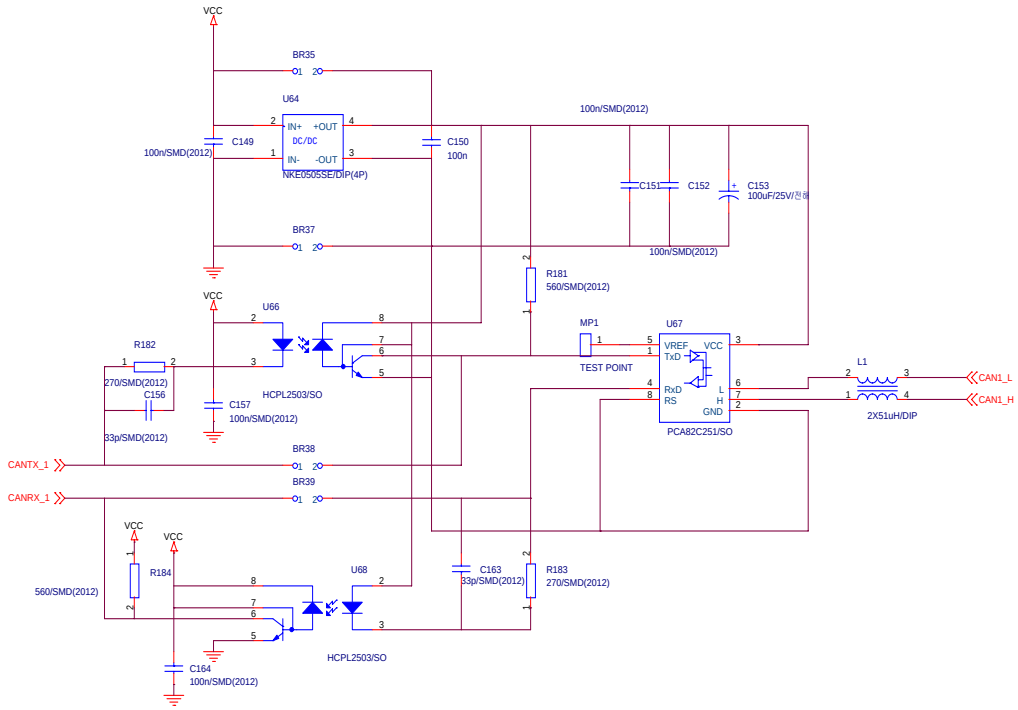


그림 3.240 CAN 통신회로

(5) 아날로그 처리부

제어보드에 사용된 센서는 직류 모선 전압 검출용 센서, 3상 교류 모선 전압, 정류기 전류 검출용 센서, 컨버터 출력 전류 검출용 센서, 변압기, 판넬 내부의 온도를 감지하는 센서가 필요하다. 입력 및 출력 전압, 전류, 전력량 등을 확인할 수 있도록 해야 한다. 교류전압 센서로는 PT(Potential transformer)를 사용하였으며, 전류센서로는 홀 CT 센서를 사용하여 검출하였다. 처리할 아날로그 항목이 많기 때문에 Analog MUX를 사용하여 A/D 채널을 확보하였다. 그림 3.241에 직류 모선 전압 검출 회로와 계통연계를 위한 계통측 교류 전압과 교류 전류 검출회로를 나타내었다.

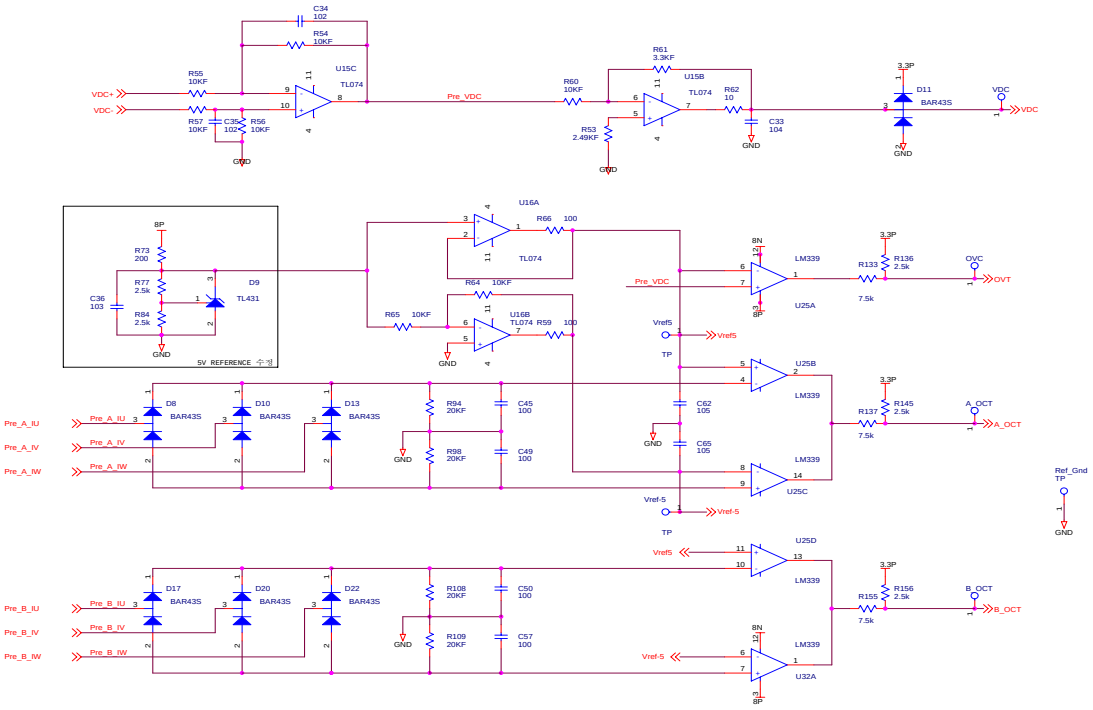


그림 3.241 아날로그 회로부

직류 모선 전압 검출 센서로부터 받은 절연된 전압을 받아 CPU AD 채널에 입력하려면 OP Amp를 사용하여 레벨을 A/D 입력의 전기적 사양에 맞추어 제어에 사용한다. 또한 직류 모선 전압의 레벨을 검출하여 과전압 발생 등을 검출하여 보호기능 제어에 사용한다. 3상 교류 모선 전압, 전류 등을 검출하여 정류한 후 OP Amp 를 사용하여 레벨 변환을 거친 후 AD 입력으로 사용하며 과전압 인가시 CPU가 소손되기 때문에 게인 설정에 유의하여 설계하였다.

(6) PWM 동작설명

u_{DC}를 주어진 시간까지 일정하게 하기에 충분한 용량의 콘덴서 C를 사용해야 한다. S_1, S_2 뿐만 아니라 S_3, S_4 간에 Short circuit을 방지하기 위하여 각각은 역으로 즉, 동작시간이 1.2μs에 비하여 작아도 IGBT의 전기적인 특성인 턴온지연시간, 상승시간, 턴오프지연시간과 Fall time을 고려하여 동작하여야만 한다.

이 스위치 순서는 표3.56에 나타내었다.

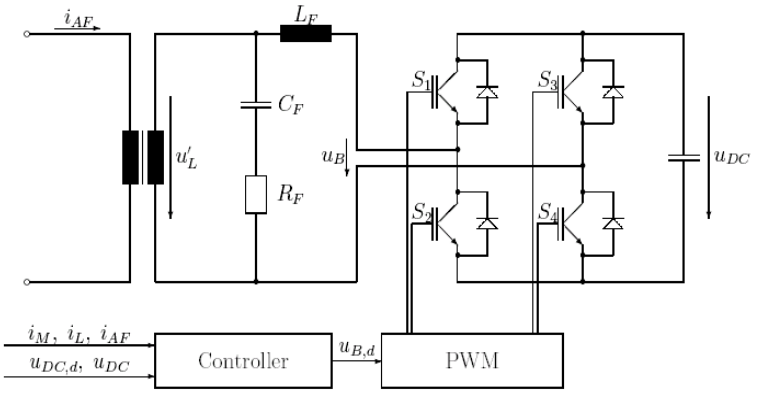


그림 3.242 PWM 제어의 구조

표 3.56 허용 가능한 스위칭 동작과 전압 u_B 와의 관계

상태	S_1	S_2	S_3	S_4	U_B
Z_1	0	1	0	1	0
Z_2	0	1	1	0	$-U_{DC}$
Z_3	1	0	1	0	0
Z_4	1	0	0	1	U_{DC}

따라서 주어진 전압 u_{DC}에 의하여 각각 $\{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\}$와 그에 맞는 시간 $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$가 된 PWM 신호가 된다.

전압의 PWM 주기가 일정하다면 이 일정한 주기라고 가정하면 전압 u_B는

$$\overline{u_B} = \frac{t_4 - t_2}{T_{PWM}} \times u_{DC}$$

로 쓸 수 있다. 일반적으로 t_4나 t_2를 영(Zero) 전위로 고정하면 다른 주기는 계산이 가능해진다.

라. 파워회로 설계 제작

(1) 파워 회로

전력 변환기는 3상 컨버터 두 대가 병렬로 DC전압을 공유하고 있으며 이를 구동시키기 위한 게이트 드라이버와 검출회로, 제어 및 보호 회로로 구성된다.

검출회로는 시스템의 제어와 보호를 목적으로 시스템의 현재 상태 즉, 3상의 전압 및 전류를 그리고 DC LINK 전압을 검출한다. 제어기는 검출된 신호들을 적절한 신호처리와 연산 과정을 통하여 게이트 드라이버의 스위칭 신호를 발생하는데 이용한다. 그림 3.243에 파워회로 구성을 나타내었으며 전력 계통과 컨버터의 절연을 목적으로 3상 변압기를 결선하여 계통연계를 하며, 컨버터의 출력 스위칭에 따른 고조파 성분을 제거하기 위해 직렬로 리액터를 연결하였으며, 또한 교류 캐패시터와 저항을 Delta 결선으로 연결하였다.

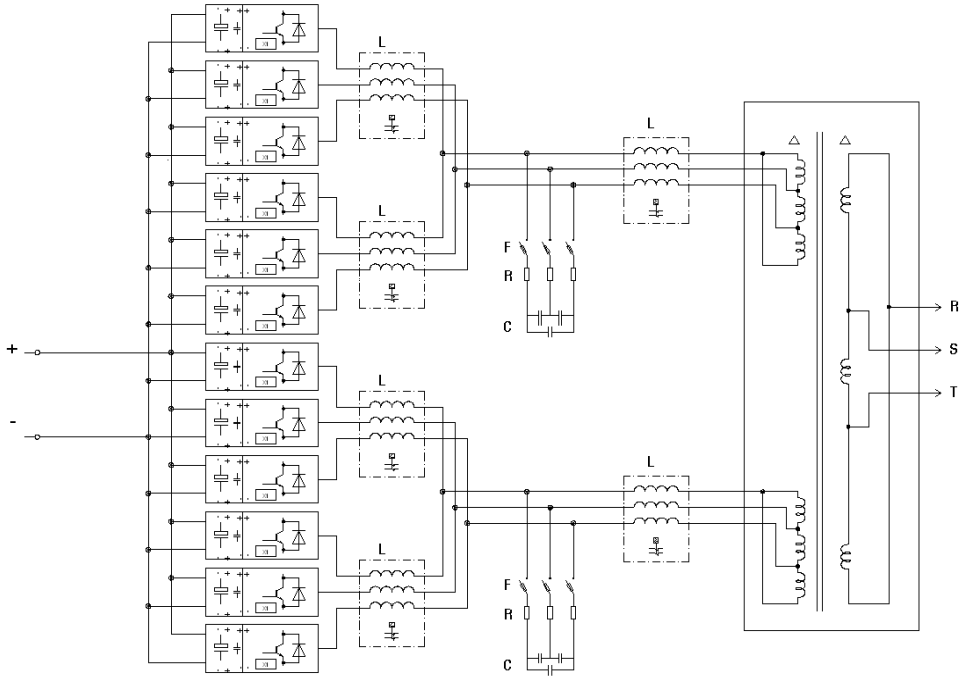


그림 3.243 파워회로 구성도

교류계통과의 전력 평형을 유지하기 위해서 적은 용량의 캐패시터가 필요하다. 이

캐패시터의 용량은 현 교류 계통에서 쓰이고 있는 진상용 교류 캐패시터에 비하면 매우 작다. 또한 실제 장치를 제어하는데 있어서 직류 캐패시터의 용량이 너무 작으면 이는 곧 컨버터 출력파형에 리플성분을 초래하게 되어 이를 이용한 d-q변환 성분이 정상상태에서도 일정 직류 성분이 아닌 직류 성분에 저차 리플성분이 포함되어 제어기의 정확한 동작을 방해하게 된다. 반대로 직류 캐패시터의 용량이 너무 크면 전력 변환기의 응답이 느려지는 단점이 있다. 따라서 직류 캐패시터의 용량은 전체 전력 변환기의 용량과 제어기의 동작 시간을 감안하여 적절한 설계가 필요하다. 컨버터의 초기 구동을 위해 캐패시터에 전압을 미리 충전해야 하는데 이를 위해서 DC측 +Line에 직렬로 저항을 삽입하여 초기 충전시에 흐를 수 있는 과전류를 제한한다. 직류 전압의 레벨을 측정 감시하여 이와 병렬로 연결되어 있는 DC측 주차단기를 단락시킴으로써 정상 동작시에 직류 캐패시터를 완전 충전시킨다.

현장설치가 가능한 실제 용량으로 시스템을 설계, 제작하여 에너지 회생과 역률 개선 및 고조파 분석등의 성능을 확인한다. 성능시험에 사용할 컨버터 시스템은 IGBT를 사용한 전력 회로, DSP를 사용하여 전력제어를 담당하는 제어회로, 제어회로와 외부 표시 회로 사이의 신호를 연계하는 인터페이스의 3부분과 제어전원으로 구성된다.

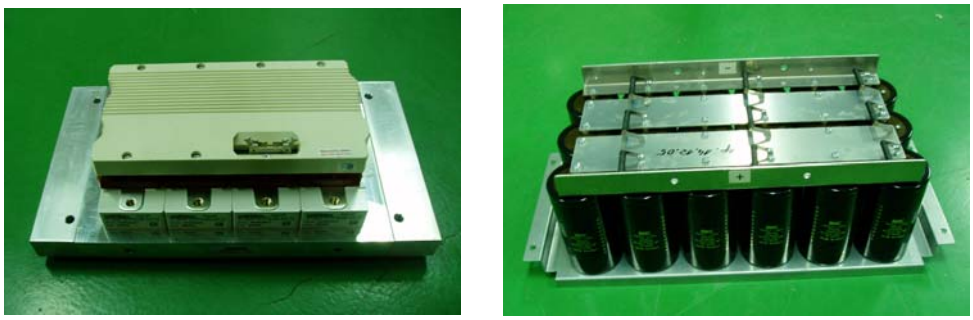
(가) 병렬 PWM 컨버터

그림 3.244에 병렬 PWM 컨버터의 제작된 실물 사진을 표시하였다. 주회로 방식은 IGBT 이중 컨버터를 적용하여 병렬 운전 모드로 사용하였다. 제어방식은 PWM 스위칭 방식을 채용하였으며 캐리어 주파수는 회생모드시 1[kHz], APF 모드시 3[kHz]로 스위칭한다. 입력 전원은 직류전압 1500~1850[V]이고 병렬 PWM 컨버터의 출력용량은 750[kVA], 60[Hz], AC출력전압은 1000[V] 출력전류는 250[A]로 제작하였다.

IGBT의 전압 전류 정격은 3kV 400A이며, 주회로 캐패시터는 1500uF × 6, 2.4kV를 병렬 조합하여 사용하며, IGBT와 주회로 캐패시터의 실물 사진을 각각 그림 3.245 로 보였으며, 조립 된 모듈의 사진을 각각 그림 3.246에 나타내었다.



그림 3.244 병렬 PWM 컨버터 실물 사진



(a) IGBT (b)Capacitor

그림 3.245 IGBT 및 Capacitor 사진



그림 3.246 조립된 IGBT모듈 및 Capacitor모듈 사진

(나) 파워 및 PWM 인터페이스 보드

파워 및 PWM 인터페이스 보드는 제어기와 전력회로 사이에 동작지령이나 검출 신호 등을 상호 전달하고, 외부에 시스템의 동작 상태를 표시하거나 외부에서 각종 지시를 내릴 수 있는 입출력 기능을 수행하는 부분이다.

제어기에는 각종 IC의 동작을 위한 3.3V, 5V, 센서와 AD컨버터를 위한 ±15V, IGBT를 위한 +24Vdc 전원이 필요하다.

이러한 제어 전원은 외부의 SMPS로부터 공급되는 +24V를 이용하여 적절한 전원으로 변환한 뒤 제어기에 공급하게 된다.

파워 및 PWM 인터페이스 보드는 PWM Signal을 컨트롤보드에서 입력받아 IGBT가 제대로 동작할 수 있도록 하여주는 드라이버 보드이다. 그림 3.247에 파워 및 PWM 인터페이스 보드의 회로 구성을 나타내었다. 이 보드는 제어기에서 보내는 PWM 신호를 게이트 드라이브와 PWM 컨버터 파워회로에 제어신호를 전달하며 노이즈의 영향을 받지 않도록 절연한다. PWM 신호 및 컨버터 암단락 폴트 신호는 게이트 드라이브로 연결되는데 PWM 신호는 Active Low 일 때 동작한다.

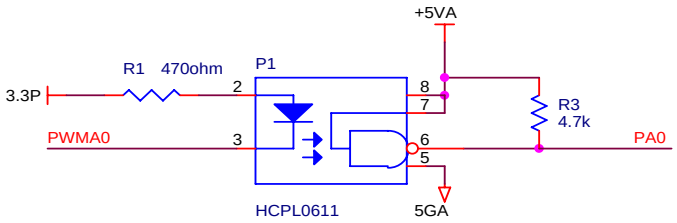


그림 3.247 파워 및 PWM 인터페이스 보드 회로도

인터페이스 보드의 사진은 그림 3.248과 그림 3.249에 나타나 있다. 이 보드의 기능은 병렬 PWM 컨버터를 제어기와 연결할 수 있도록 하며 PWM 신호를 포토커플러를 사용하여 절연된 신호를 병렬 PWM 컨버터에 공급하도록 설계되었다. IGBT를 구동하기 위한 게이팅 신호는 C167(컨트롤러 보드)에서 발생되어 파워 및 PWM 인터페이스 보드를 통하여 IGBT 게이트 드라이브에 전달된다.

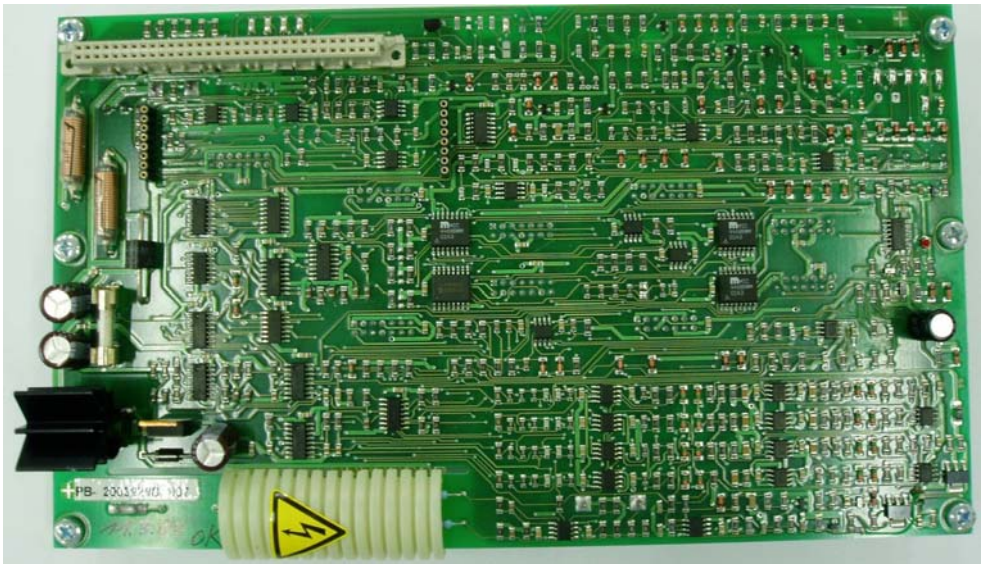


그림 3.248 파워 및 PWM 인터페이스 보드(전면)

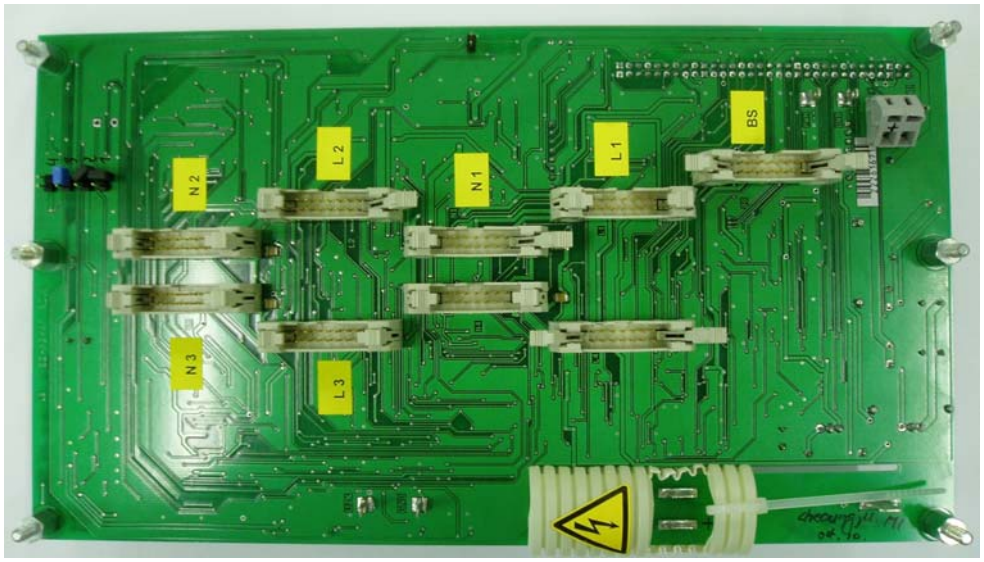


그림 3.249 파워 및 PWM 인터페이스 보드(후면)

(다) IGBT 냉각 방식

전력제어용 반도체 Switching 소자로부터 필연적으로 발생되는 열의 발산을 위해 그 냉각방식을 냉각효과가 우수하고 소음이 적은 수냉식 Heatsink방식을 채택하였다.

그림 3.250에 수냉식 Heatsink방식 열교환 과정을 그림 3.251에 냉각 장치의 구성기기인 펌프와 실외기 사진을 나타내었다.

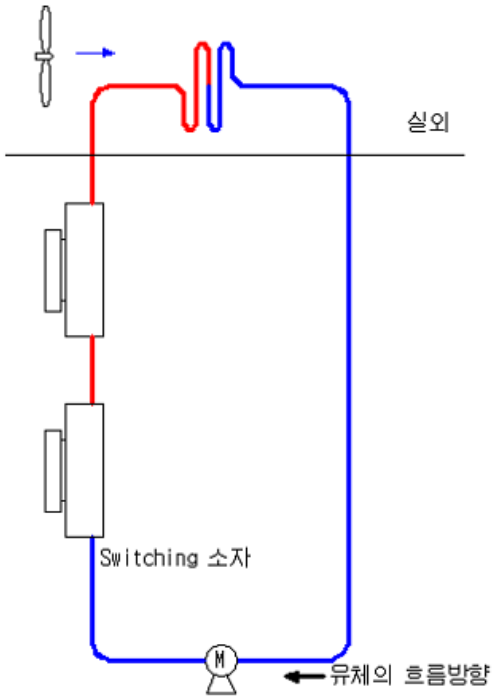


그림 3.250 수냉식 열교환 과정

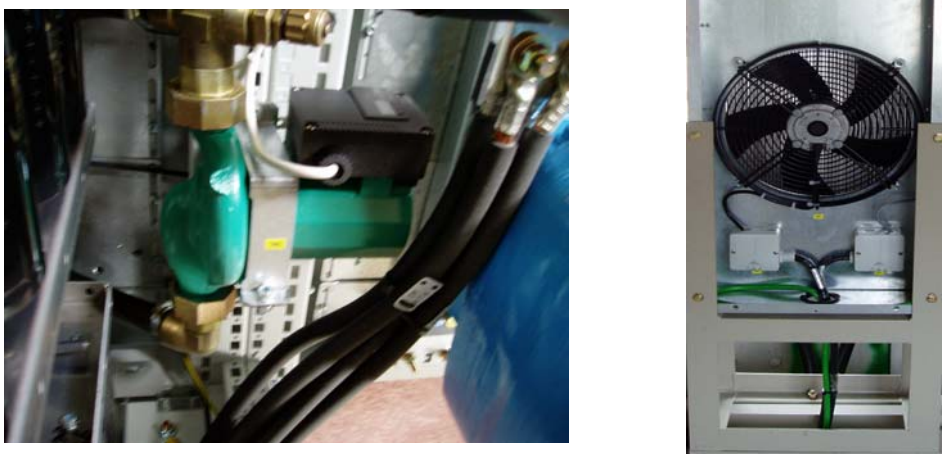


그림 3.251 펌프와 실외기 사진

◆ 수냉식 Heatsink방식 장점

① 공기에 비해 비열이 큰 유체를 Heatsink에 통과시키는 방식으로, 실내공기와의 열 교환을 통한 강제 풍냉식 냉각방법에 비해 냉각효과가 크다.

② 칠러를 외부에 설치하여 별도의 냉각 설비를 필요로 하지 않는다.
③ 강제 풍냉식 냉각방식에 비해 소음이 월등히 작아 설비를 실내에 설치하는 경우에 적당하다.
④ 분진 등에 의한 설비의 오염을 막을 수 있어, 도체부 등의 2차 오염을 막아 접촉 불량 등에 의한 설비고장을 줄일 수 있다.
⑤ 실내에 별도의 냉각장치를 두지 않으므로 설치 공간 확보가 용이하다.
⑥ Heatsink의 크기를 소형화할 수 있으므로 유지보수가 공간 확보에 유리하며, 설비의 크기를 소형화할 수 있다.
⑦ 별도의 급배기 설비를 두지 않으므로 실내를 쾌적하게 유지할 수 있으므로 현장근무자의 근무환경 및 설비운용에도 유리하다.

(2) LCL 필터

PWM 컨버터의 1~3[kHz]의 스위칭 주파수에 따른 스위칭 고조파 전류는 동일 계통전원에 접속된 회로에 EMI로 인해 민감한 타 부하나 장비의 전원장애를 일으키는 요인이 되고 있으며 특히 정격이 수십 kVA에서 수백 kVA의 시스템 설계 시에는 스위칭 고조파 전류에 의한 THD가 매우 중요하게 고려되는 사항이다. 따라서 기존 PWM 컨버터의 교류 입력측 인덕턴스에 의한 승압 동작 및 전원전류를 정현파화 하는 기본적인 목적이외에 부가적으로 스위칭 고조파 전류를 억제하여 전류의 THD를 효과적으로 줄여 전원품질을 향상시키고자 최근에는 전원과 인덕터 사이에 필터를 추가적으로 설치하여 PWM 컨버터 입력단을 LCR 필터로 구성하고 있다. 그러나 인덕터에 흐르는 전원전류가 전원전압과 동상으로 제어되는 기존의 PWM 컨버터에서 LC 필터가 추가 설치될 때 캐패시터로 흐르는 무효전류의 영향으로 전원전류가 진상이 되고 경우에 따라서는 공진 현상이 발생할 수 있는 문제점이 있다. 전원전류가 진상이 되는 문제를 억제하기 위해 전원전류를 직접 검출하여 이로부터 단위역률 제어를 하거나 캐패시터에 흐르는 무효전류를 검출하고 이를 능동필터의 경우처럼 전원측에 반대방향으로 주입하여 단위역률 제어를 하는 방법들이 있다. 그림 3.252에 LCL 필터 회로도를 나타내었다.

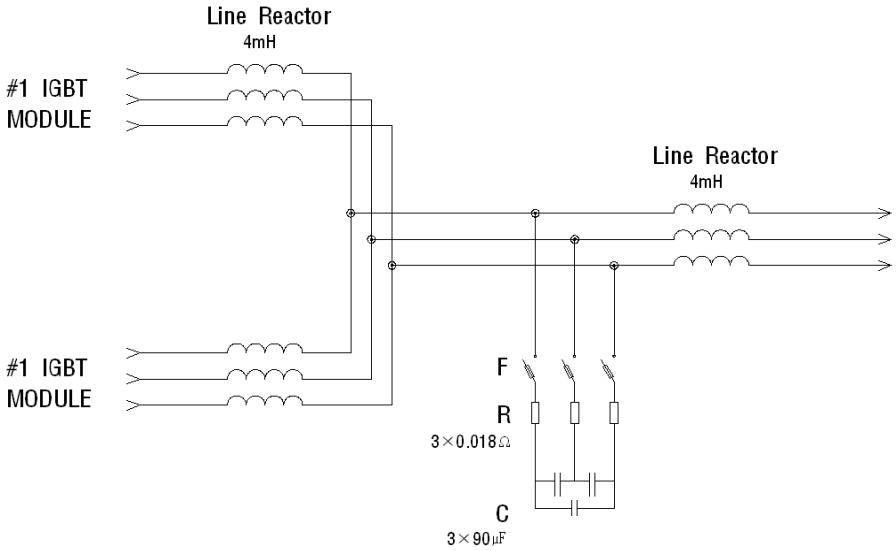


그림 3.252 LCL 필터 회로도

제어기법에 관한 연구에 앞서 근본적으로 전원전류의 진상문제와 공진 문제를 해결하고 제어가 적절히 되기 위한 가장 경제적이고 효과적인 방법은 최적의 필터를 설계하는 것이다. 불행히도 대부분의 선행 연구들은 앞서 언급한 바와 같이 제어기법에 관한 것이 주를 이루며 LCL 필터의 직접적인 설계에 대해서는 연구가 거의 이루어지지 않았다. 그의 이유는 PWM 컨버터의 교류 입력측 고조파 및 전류제어 특성은 컨버터의 파라미터들이 상호 복합적으로 작용하여 적정 값을 설계하는데 어려움이 있어서 종래에는 경험적인 방법에 의존하여 설계하고 이에 따르는 오차는 제어기로써 극복하고자 하였기 때문이다. 그러나 이상적으로 LC 필터에 의해 커패시터측이 스위칭 고조파전류만 억제하고 기본파전류에 대해서는 크기나 위상의 영향을 미치지 않는다면 설계사양을 만족하는 범위 내에서 PWM 컨버터의 기본적인 동작인 직류 출력전압 제어와 단위역률 제어 이외에 스위칭 고조파 전류 억제도 가능하다.



(a)Resistor & Capacitor　　b)Reactor

그림 3.253 LCL 필터 사진

(3) 계통 연계용 변압기

계통 연계용 변압기는 회생인버터에서 출력되는 3상 AC1000V를 계통연계 전압인 22.9kV로 승압 하는 목적으로 사용되며 그림 3.254에 회로 구성을 나타내었다.

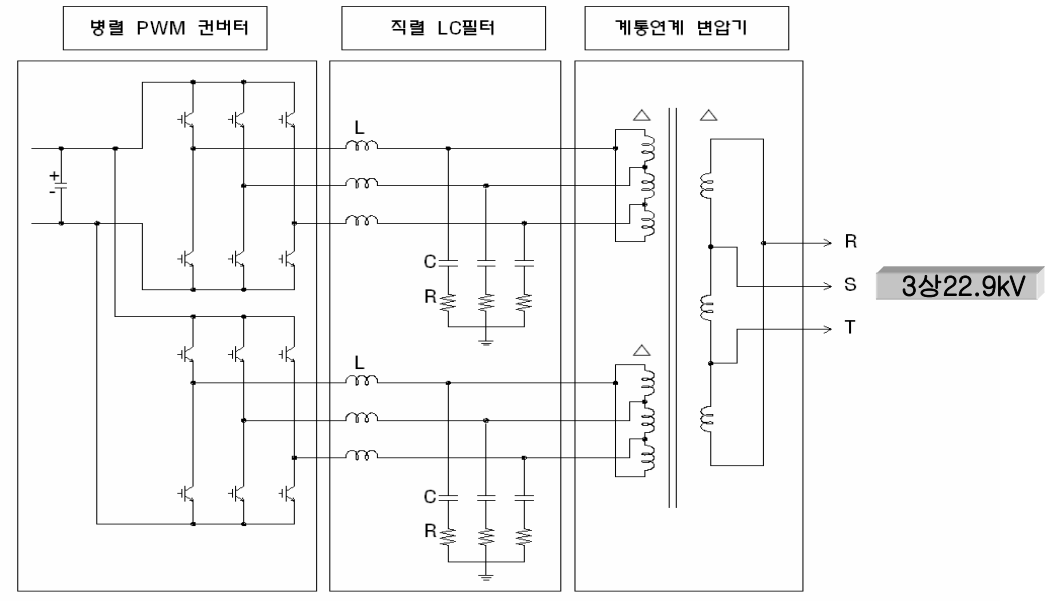


그림 3.254 계통 연계용 변압기 회로 구성

변압기 철심은 투자율이 좋고, 히스테리시스 손실이 적은 양질의 냉간 압연 방향성

규소 강판을 사용하여 철손이나 여자 전류가 적도록 제작하여야 한다. 권선은 양질의 전기동을 사용하여 제작하고, 변압기는 컨버터와 결합하여 사용할 때의 규정한 용량을 가져야 하고, 컨버터에서 발생되는 고조파로 인한 권선의 전력 손실 및 그로 인한 온도 상승에 대하여 특별한 고려를 하여야 한다. 컨버터와 결합시의 전압변동, 최대 단락전류, 교류측 및 직류측 고조파, 전압과 전류의 왜형률 등을 고려하여 제작하여야 한다. 고압 권선은 변압기의 자체 내압에 견디는 절연강도를 가져야 하고 전기적으로 부분 방전 등이 없어야 하며 충격 전압에 대한 전기적 기계적 강도에 견디도록 해야 한다. 고압 권선은 운전중 생기는 부하 변동으로 인한 온도 및 진동으로 야기되는 열팽창과 수축에 변형되지 않도록 제작해야 한다. 권선의 지지 및 권선과 철심간에는 탄성체의 스페이서를 넣어 고정하여 철심의 자기 왜형 진동이 권선에 전달되는 것을 방지하며, 권선에서 발생되는 소음을 절감시킬 수 있는 구조이어야 한다.

변압기의 2차 결선 방식을 그림 3.255와 같이 직렬연결 방식으로 적용시 대용량인 1.5MVA급 변압기 제작이 어려워지고 2대를 조합 사용하여야 하므로 경제성이 저하되므로 단일 Delta결선으로 제작하여 22.9kV 교류계통과 연계가 필요하다. 결선방식에 대한 비교를 표 3.57에 나타내었다.

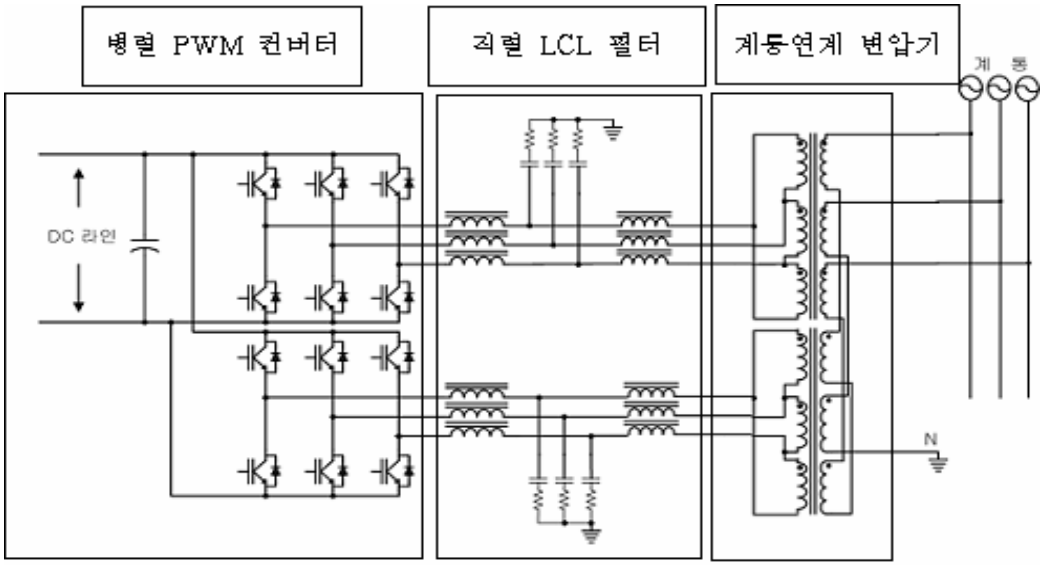


그림 3.255 2차년도 계통 연계용 변압기 회로 구성

표 3.57 계통 연계용 변압기 회로 구성 비교

구 분	2차 보고서 구성	3차보고서 구성
변압기 수량	2대	1대
변압기 결선 방식	1차 : D(인버터 입력) 2차 : Y (2대 직렬 접속)	1차 : D(인버터 입력) 2차 : D(인버터 입력) 3차 : D
크기 및 경제성	변압기 2대 구성으로 불리	최적
결선의 복잡성	2차 권선 직렬 연결로 복잡	간단
1대 고장시	동작 불가	나머지 1대 정상 동작

마. 시험장치의 구성

(1) DC 공급 장치의 제작

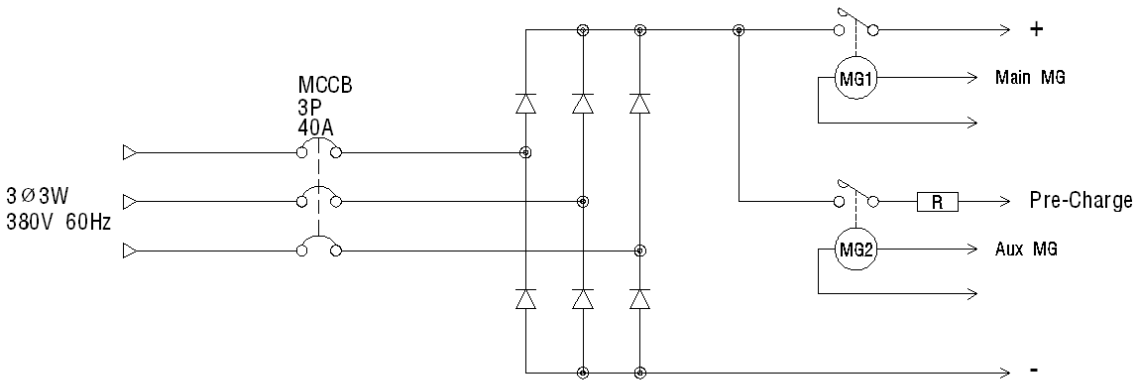


그림 3.256 DC 공급 장치의 구성

(가) 정류기 : 실리콘 Diode 6EA를 사용하여 3상 전파 정류기로 그림 3.256과 같이 구성하였으며 전류 용량은 30A로 구성하였다.

(나) 입력전압 : 3Ø 3W 380V 60Hz

(다) 출력전압 : DC 515V

(라) Pre-charge가 가능하게 MG1을 설치 회생 인버터와 연동 동작이 가능하게 구성하였다.

(2) 계통 연계 변압기의 제작

(가) 일반 상용전원과의 계통연계 시험이 가능하게 출력전압은 3Ø 3W 380V로 구성하고, 부하시험이 가능한 10kVA의 용량으로 선정 제작하였다.

(나) 입력전압 : 3Ø 3W 380V 60Hz

(다) 출력전압 : DC 515V

(라) 결선 방식 : △/△

(마) 형식 : 건식 자냉식.

(3) 부하 설비의 제작

(가) 부하 시험장치는 회생 인버터에 연결 시험을 하기 위하여 제작하였으며 5kW 저항기 2대로 구성하여 각각 저항기에 스위치를 부착 부하 변동 시험이 가능

(나) 입력전압 : 3Ø 3W 380V 60Hz

(다) 정격부하 : 5kW X 2 (총 10kW)

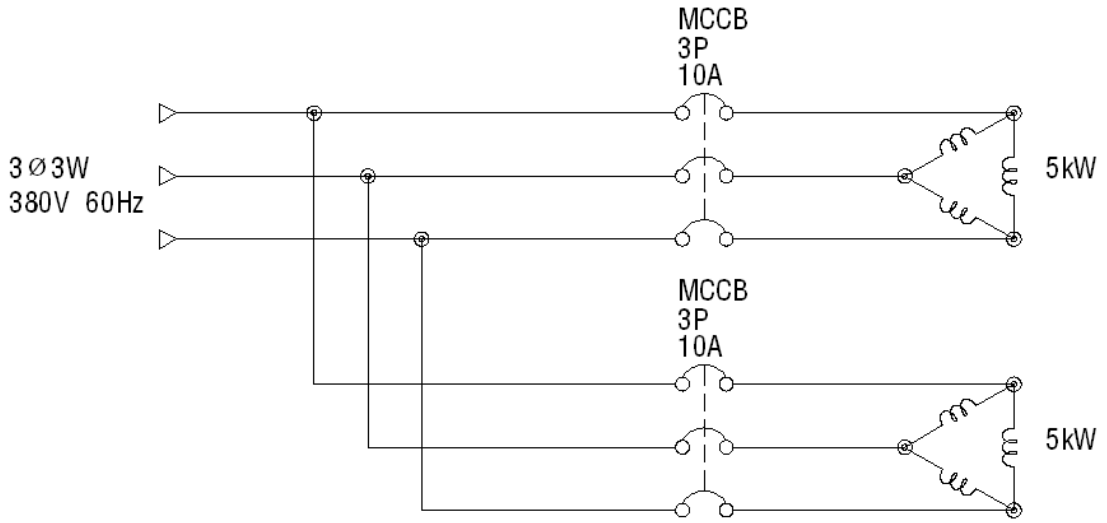


그림 3.257 부하 설비의 구성

바. 회생 인버터 부하시험

(1) 목적

(가) 회생 인버터 동작시험은 직류 입력 전압 변동 시에 회생 인버터의 교류 출력전압 변동 사항을 확인하여 회생동작 성능을 확인 한다.

(나) 부하 변동 시 (10kW,5kW,0kW)의 전압/전류의 변동 사항을 확인한다.

(2) 시험 회로의 구성 및 방법

(가) 시험회로는 그림 3.258과 같이 구성하며, DC전압을 가변하기 위하여 입력단에 AC 3상 전압 조정기를 사용하여 구성하였다.

(나) 회생 인버터의 내부 설정치

- 회생 개시 전압 : 480V
- 회생 중지 전압 :450V
- AC 출력전압 : 3Ø 380V 60Hz

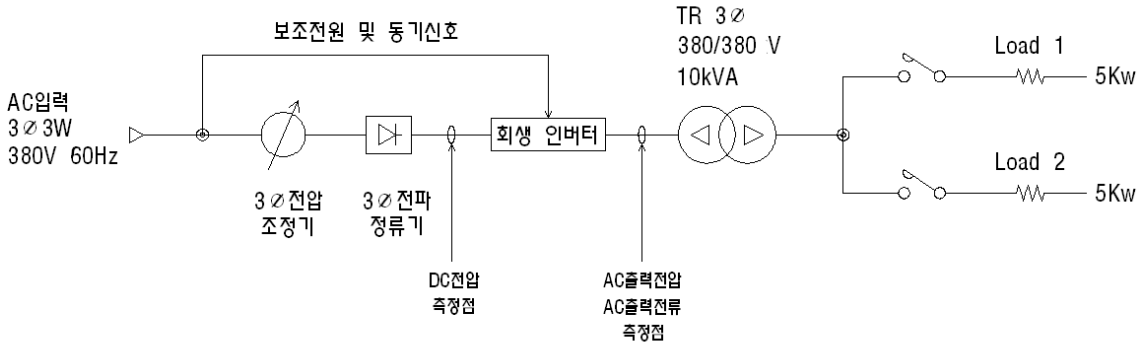


그림 3.258 부하 시험회로 구성

(다) 시험 방법

- AC 입력전원 3Ø 380V를 인가하고 전압 확인후 회생 인버터의 보조전원 S/W를 ON한다.
- 3Ø전압 조정기로 3Ø전파 정류기의 직류 출력전압이 400V가 되게 조정한다.

- 회생 인버터의 Pre-charge S/W를 조작하여 Pre-charge 완료 Lamp 점등을 확인한다.
- 회생 인버터의 RUN S/W를 조작하여 RUN Lamp 점등을 확인한다.
- 3Ø 전압 조정기로 3Ø 전파 정류기의 직류 출력전압이 480V 되도록 서서히 상승시킨다.
- 회생 인버터가 동작하여 출력전압이 380V가 되는지를 확인후 Load1과 Load2를 투입한다.
- 3Ø 전압 조정기로 3Ø 전파 정류기의 직류 출력 전압이 450V 되도록 서서히 하강시킴으로 회생인버터의 동작이 정지되는지를 확인한다.
- 측정된 DC 전압과 AC출력 전압 및 출력전류의 DATA를 취득후 시험을 종료한다.

(3) 시험 결과

그림 3.259는 회생 인버터의 부하시험 측정 데이터이다.

(가) 회생 인버터가 Pre-charge되어 있는 상태에서 회생 인버터는 DC 전압이 480V이상시 동작 되는데 3Ø 전압 조정기로 3Ø 전파 정류기의 직류 출력전압이 480V이상이 되도록 서서히 상승시켜서 그림에서 보는 바와 같이 구분선 ①에서 DC 전압이 480V이상이 걸리게 되므로 이때부터 회생 인버터가 출력을 내보내게 된다.

(나) ①-②구간을 보면 회생 인버터가 동작 개시 DC전압(480VDC)이상에서 정상적으로 동작 하고 있음을 알 수 있다.

(다) 구분선 ②는 Load1(5KW) 저항 부하를 투입시킨 지점이다. 회생인버터의 출력 RMS전류가 아주 정상적으로 작동하고 있음을 알 수 있다.

(라) 구분선 ③은 Load1(5KW) 저항 부하를 투입되어져 있는 상황에서 Load2(5kW)를 추가로 투입 시킨 지점이다. 회생 인버터의 출력이 ②-③구간의 2배의 전류가 흐르는 것을 볼 수 있다.

(마) 구분선 ④는 3Ø 전압 조정기로 3Ø 전파 정류기의 직류 출력전압이 450V 이하가 되도록 서서히 감소시켜서 그림에서 보는 바와 같이 구분선 ④에서 DC 전압이 450V이하가 걸리게 되므로 이때부터 회생 인버터의 출력이 멈추게 된다.

위의 결과를 볼 때 회생 인버터 동작은 직류 입력에 회생 인버터 동작 개시 전압(480Vdc) 이상에서 동작 되어지고 회생 인버터 동작중지 전압(450Vdc)에서 동작이 중지되어 아주 정상적으로 동작됨을 알 수 있다.

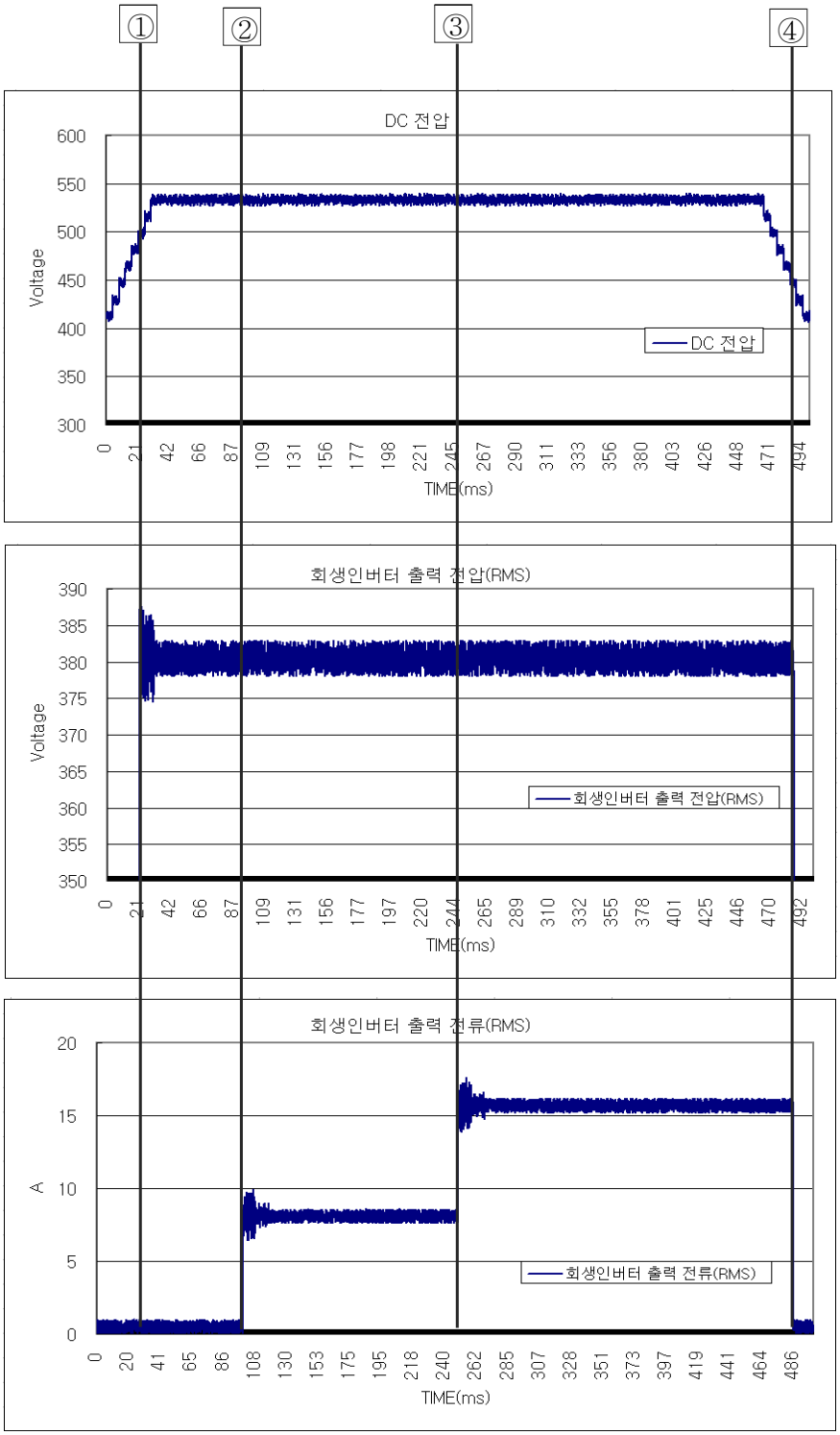


그림 3.259 회생인버터 부하시험 측정 결과

사. 회생 인버터 계통 연계 시험

(1) 목적

(가) 회생 인버터 동작개시에 계통 전원과의 위상을 측정 비교하여 안정성을 확인한다.

(나) 회생되는 전류 및 전력을 측정한다.

(2) 시험 회로의 구성 및 방법

(가) 시험회로는 그림 3.260과 같이 구성하며, DC전압을 가변하기 위하여 입력단에 AC 3상 전압 조정기를 사용하여 구성하였다.

(나) 회생 인버터의 내부 설정치

- 회생 개시 전압 : 480V
- 회생 중지 전압 :450V
- AC 출력전압 : 3Ø 380V 60Hz

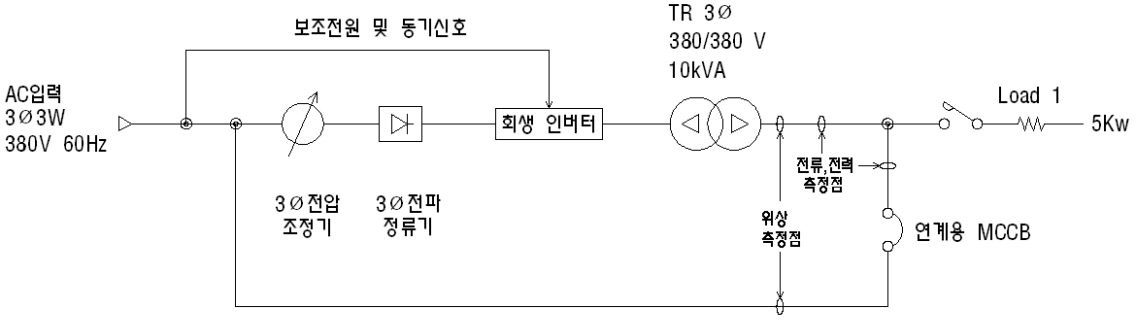


그림 3.260 계통 연계 시험회로 구성

(다) 시험 방법

- AC 입력전원 3Ø 380V를 인가하고 전압 확인 후 회생 인버터의 보조전원 S/W를 ON한다.
- 3Ø전압 조정기로 3Ø전파 정류기의 직류 출력전압이 400V가 되게 조정한다.
- 회생 인버터의 Pre-charge S/W를 조작하여 Pre-charge 완료 Lamp 점등

을 확인한다.

- 회생 인버터의 RUN S/W를 조작하여 RUN Lamp 점등을 확인한다.
- 3Ø 전압 조정기로 3Ø 전파 정류기의 직류 출력전압이 480V 되도록 서서히 상승시킨다.
- 회로 인버터가 동작하여 출력전압이 380V가 되는지를 확인후 연계용 MCCB를 투입한다. 연계용 MCCB 투입 전/후의 전압 위상을 측정한다.
- Load1 5kW를 투입하고 각 Point의 전류 및 전력을 측정한다.
- 3Ø 전압 조정기로 직류 출력 전압을 회생제동 정지 전압(DC 450V) 이하로 하강 시켰다가 다시 서서히 회생제동 개시 전압(DC 480V)으로 상승시키고 각 Point의 전류 및 전력을 측정한다.
- 각 측정 DATA를 취득후 시험을 종료한다.

(3) 시험 결과

그림 3.261은 회생 인버터 계통 연계 시험 측정 결과이다.

(가) 회생 인버터가 Pre-charge되어 있는 상태에서 회생 인버터는 DC 전압이 480V이상시 동작 되는데 3Ø 전압 조정기로 3Ø 전파 정류기의 직류 출력전압이 480V이상이 되도록 서서히 상승시켜서 그림에서 보는 바와 같이 구분선 ①에서 DC 전압이 480V이상이 걸리게 되므로 이때부터 회생 인버터가 출력을 내보내게 된다.

(나) ① 구간을 보면 회생 인버터가 동작 개시 DC전압(480Vdc)이상에서 동작되어 지고 동작 될 때 계통 전압과의 위상이 정확 하게 일치하는지 볼수 있다.

(다) 회생 인버터의 출력 전압이 계통의 전압과 위상을 맞추는 방법은 계통 전원으로부터 계통 전압의 위상 동기신호를 받아와 이 신호를 기준으로 계통 전압과 회생 인버터 전압의 위상의 동기를 일치시키는 방법을 사용하였다.

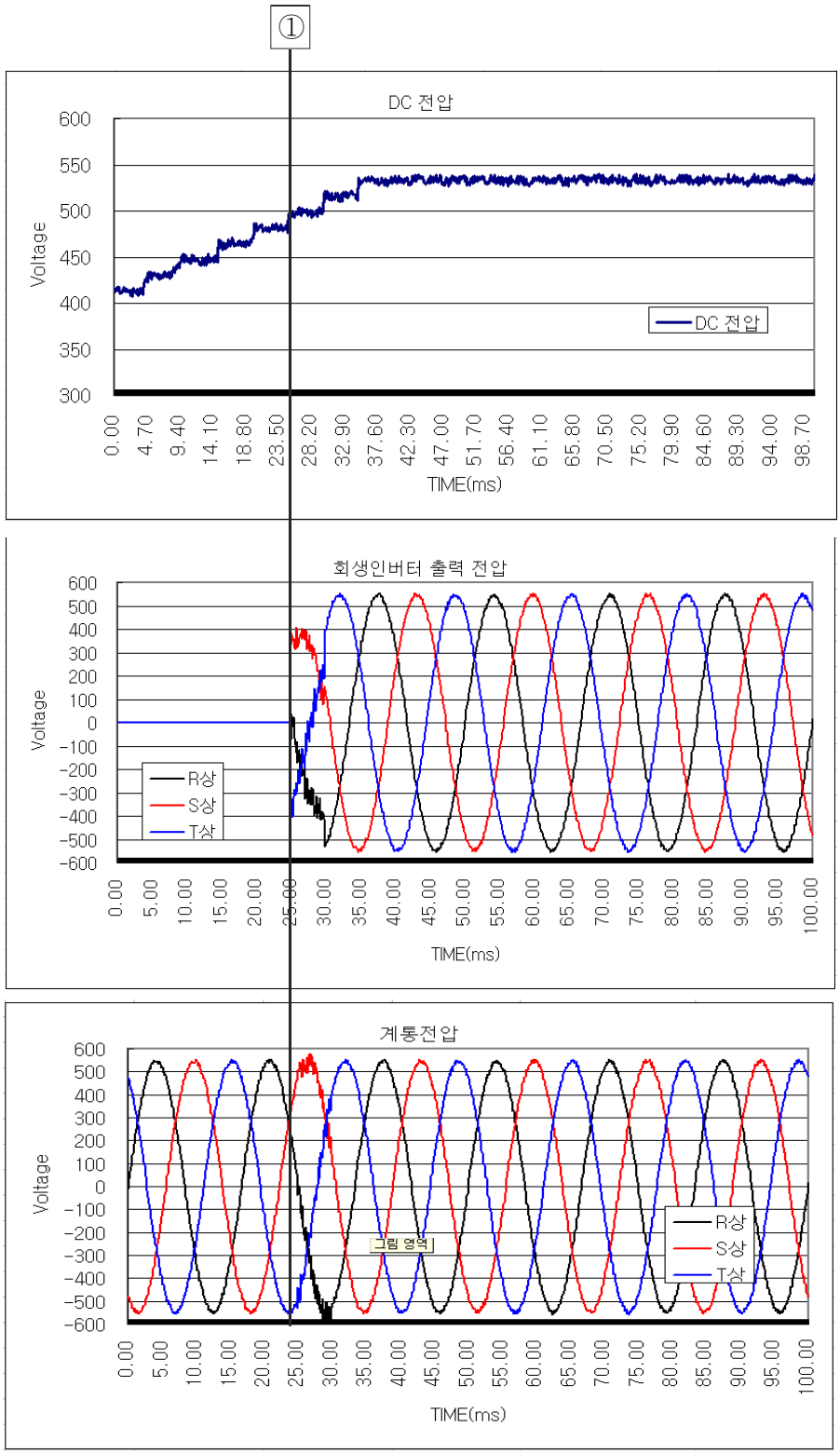


그림 3.261 회생 인버터 계통 연계 시험 측정 결과

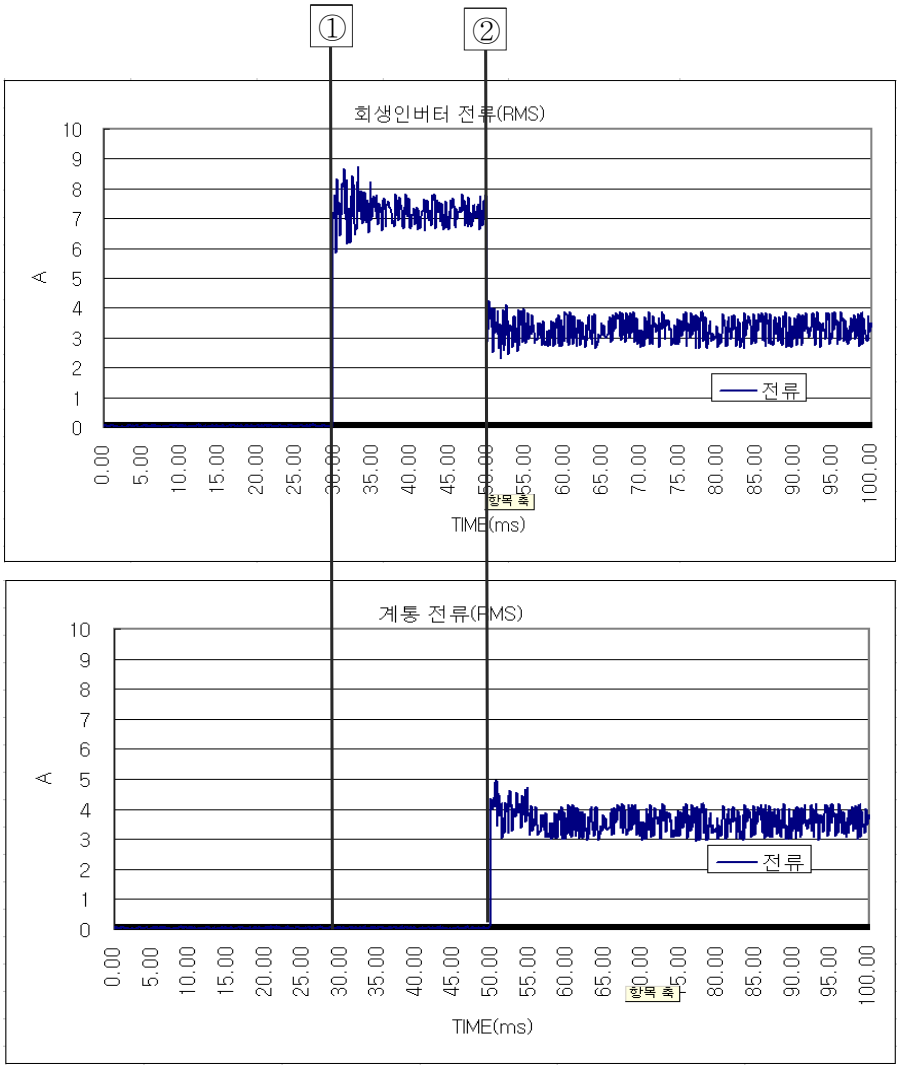


그림 3.262 회생 인버터 계통 연계시 전류 측정 결과

그림 3.251은 회생 인버터 계통 연계시 전류 측정 결과이다.

(가) 회생 인버터가 Pre-charge되어 있는 상태에서 회생 인버터는 DC 전압이 480V이상시 동작 되는데 3Ø 전압 조정기로 3Ø 전파 정류기의 직류 출력전압이 480V이상이 되도록 서서히 상승시켜서 회생 인버터가 출력을 내보낼 수 있도록 한다..

(나) ① 구간에서 Load1 5kW를 투입하고 회생 인버터가 내는 전류을 측정하였다.

(다) ②구간에서 Load1 인 투입되어 있는 상태에서 연계용 MCCB를 투입하여 회생 인버터의 출력 전류와 계통의 출력 전류를 측정하여 나온 결과이다.

(라) 전류 측정 결과 회생 인버터와 계통 전류가 부하 전류의 48%와 52%의 출력을 내는걸 알 수 있다.

(바) 전력 측정 결과도 전류와 마찬가지로 아래 그림 3.256과 같이 나타났다.

아. 회생 인버터 고조파 제거 시험

(1) 목적

(가) 회생 개시 전압보다 DC입력전압이 낮은 경우에 AC전원측의 고조파 필터로 동작시의 고조파 제거 성능을 확인한다.

(나) 제거되는 고조파의 량을 측정한다.

(2) 시험 회로의 구성 및 방법

(가) 시험회로는 그림 3.252와 같이 구성하며, 고조파 발생원으로 SCR을 위상제어하는 전자식 기동기와 Motor를 사용하였다.

(나) 회생 인버터의 내부 설정치

- 회생 개시 전압 : 480V
- 회생 중지 전압 :450V
- AC 출력전압 : 3Ø 380V 60Hz
- 보상 고조파 : 3,5,7,9차
- 무효전력 보상 : 없음.

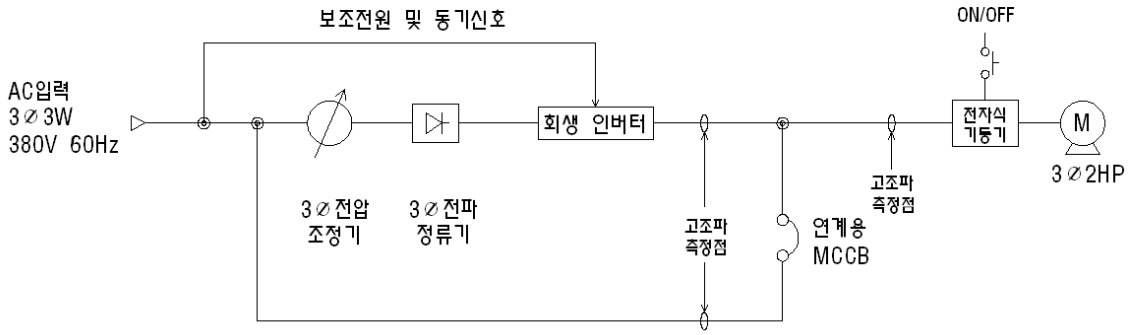


그림 3.263 고조파 제거 시험회로 구성

(다) 시험 방법

- AC 입력전원 3Ø 380V를 인가하고 전압 확인후 회생 인버터의 보조전원 S/W를 ON한다.
- 3Ø전압 조정기로 3Ø전파 정류기의 직류 출력전압이 400V가 되게 조정한다.
- 회생 인버터의 Pre-charge S/W를 조작하여 Pre-charge 완료 Lamp 점등을 확인한다.
- 회생 인버터의 RUN S/W를 조작하여 RUN Lamp 점등을 확인한다.
- 계통 연계용 MCCB를 투입하고 전자식 기동의 기동 S/W를 ON 하여 전동기 기동시의 각 고조파를 측정한다.
- 각 측정 DATA를 취득후 시험을 종료한다.

(3) 시험 결과

그림 3.253은 회생 인버터의 고조파 제거 시험 측정 데이터이다.

(가) 회생 인버터가 Pre-charge되어 있는 상태에서 회생 인버터는 DC 전압이 동작 개시전압(480V)이하시에 고조파 저감 설비로 동작 하므로 DC전압을 480V 이상으로 올라가지 않도록 한다

(나) ①구간은 계통 연계 MCCB를 투입하고 전자식 기동의 기동 S/W를 ON한 지점이다.

(다) 부하전류를 보면 다량의 고조파를 함유 하고 있다는 것을 알 수 있다. 회생 인버터는 DC전압이 동작 개시전압 보다 작을 시에 고조파 저감 설비로 사용되어 지기 때문에 회생 인버터로써의 동작이 아닌 고조파 저감 설비로 동작한다. 부하측에서 발생하는 고조파를 감지하여 부하에서 발생되어지는 고조파 전류에 대한 보상 고조파 전류를 회생 인버터에서 출력 하게 되어 그림3.264에서와 같이 구분선 ①이후에 회생 인버터는 부하에서 발생하는 고조파 전류에 대한 보상 고조파 전류를 출력한다.

(라) 계통 전류는 부하 측에서 발생되어지는 고조파를 회생 인버터가 제거 하므로 계통 전류는 고조파전류가 제거된 양질의 전력 품질을 가지게 된다.

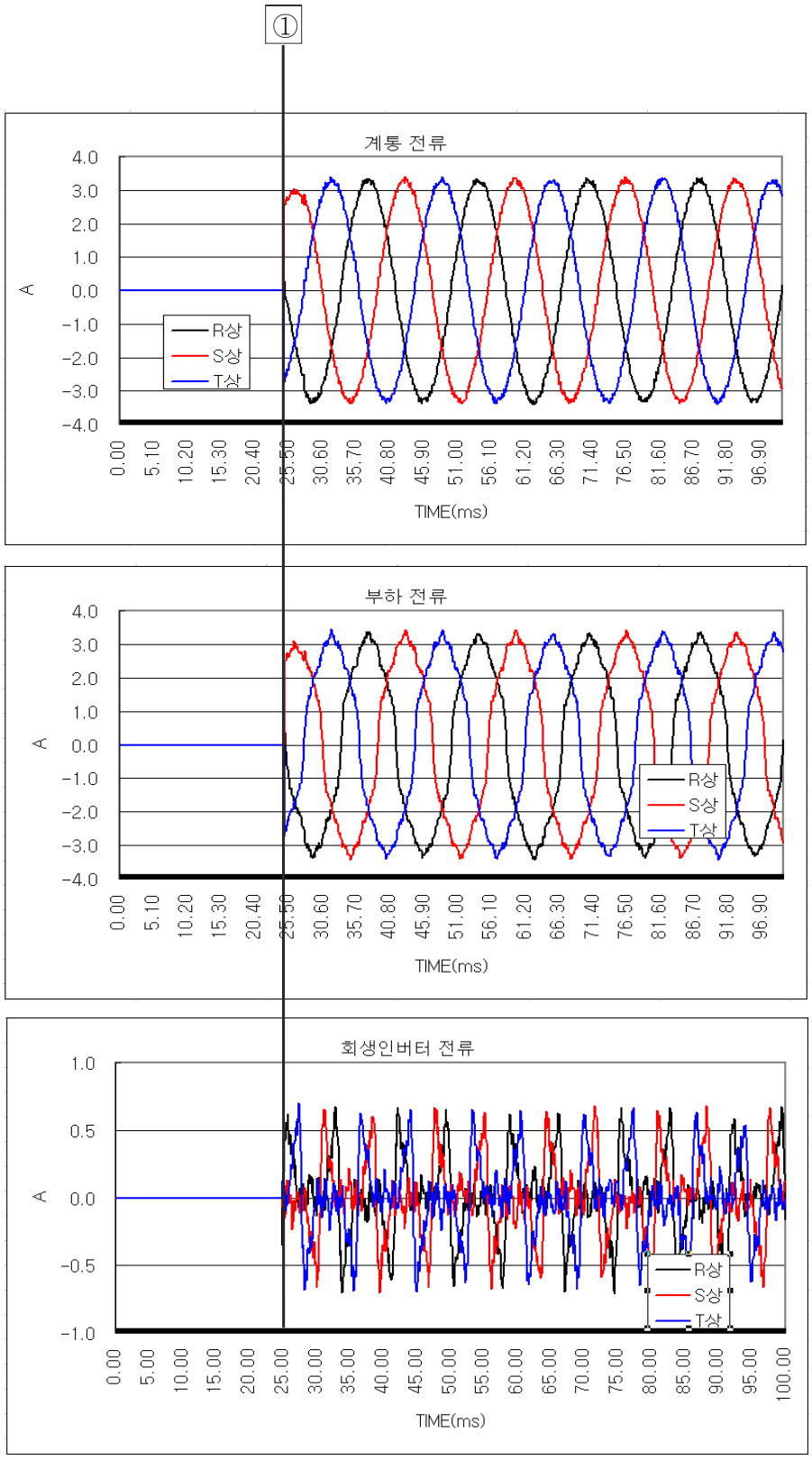


그림 3.264 회생 인버터의 고조파 제거 시험 측정 결과

위의 결과를 볼 때 회생 인버터는 회생 인버터 동작을 안할시 고조파 저감 설비로 활용 될 수 있어 아주 우수할 동작 효율을 얻을 수 있다.

자. 회생 인버터 무효전력 보상 시험

(1) 목적

(가) 회생 개시 전압보다 DC입력전압이 낮은 경우에 AC전원 측의 무효전력 보상 동작시의 무효전력 제거 성능을 확인한다.

(나) 제거되는 무효전력의 량을 측정한다.

(2) 시험 회로의 구성 및 방법

(가) 시험회로는 그림 3.265와 같이 구성하며, 지상 무효전력 발생원으로 Shunt Reactor를 설치 시험 하였다.

(나) 회생 인버터의 내부 설정치

- 회생 개시 전압 : 480V
- 회생 중지 전압 :450V
- AC 출력전압 : 3Ø 380V 60Hz
- 보상 고조파 : 없음
- 무효전력 보상 : 있음

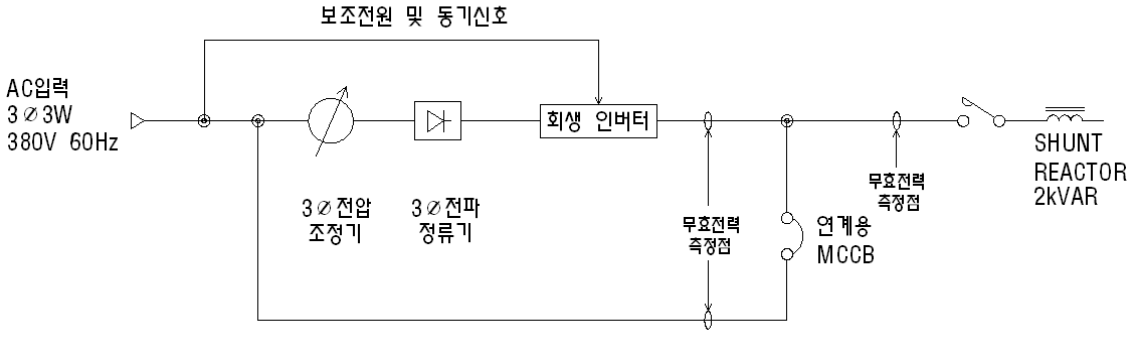


그림 3.265 무효전력 보상 시험회로 구성

(다) 시험 방법

- AC 입력전원 3Ø 380V를 인가하고 전압 확인 후 회생 인버터의 보조전원 S/W를 ON한다.
- 3Ø전압 조정기로 3Ø전파 정류기의 직류 출력전압이 400V가 되게 조정한다.
- 회생 인버터의 Pre-charge S/W를 조작하여 Pre-charge 완료 Lamp 점등을 확인한다.
- 회생 인버터의 RUN S/W를 조작하여 RUN Lamp 점등을 확인한다.
- 계통 연계용 MCCB를 투입하고 Shunt Reactor S/W를 ON 시켜 각각의 무효전력을 측정한다.
- 각 측정 DATA를 취득후 시험을 종료한다.

(3) 시험 결과

그림 3.266은 회생 인버터의 무효전력 보상 시험 측정 데이터이다.

(가) 회생 인버터가 Pre-charge되어 있는 상태에서 회생 인버터는 DC 전압이 동작 개시전압(480V)이하 시에 무효전력 보상 설비로 동작 하므로 DC전압을 480V 이상으로 올라가지 않도록 한다

(나) ①구간은 계통 연계 MCCB를 투입하고 Shunt Reactor S/W를 ON한 지점이다.

(다) 부하전류를 보면 거의 대부분이 무효전력임을 알 수 있다. 회생 인버터는 DC전압이 동작 개시전압 보다 작을 시에 무효전력 보상 설비로도 사용 되어 지기 때문에 이때에는 회생 인버터로써의 동작이 아닌 무효전력 보상 설비로 동작 되어진다. 부하 측에서 발생하는 무효전력을 감지하여 부하에서 발생되어지는 무효전력을 회생 인버터에서 보상하게 되어 그림에서와 같이 구분선 ①이후에 회생 인버터는 부하에서 발생하는 무효전력을 보상하게 된다.

(라) 계통 전력은 부하 측에서 발생되어지는 무효전력을 회생 인버터가 제거 해주므로 계통의 전력은 그림 3.267에서 보는 바와 같이 무효전력이 측정되지 않는다. 위의 결과를 볼 때 회생 인버터는 회생 인버터 동작을 안할시 무효전력 보상 설비로 활용 될 수 있어 에너지 및 경비 절감에 아주 우수한 효과를 얻을 수 있다.

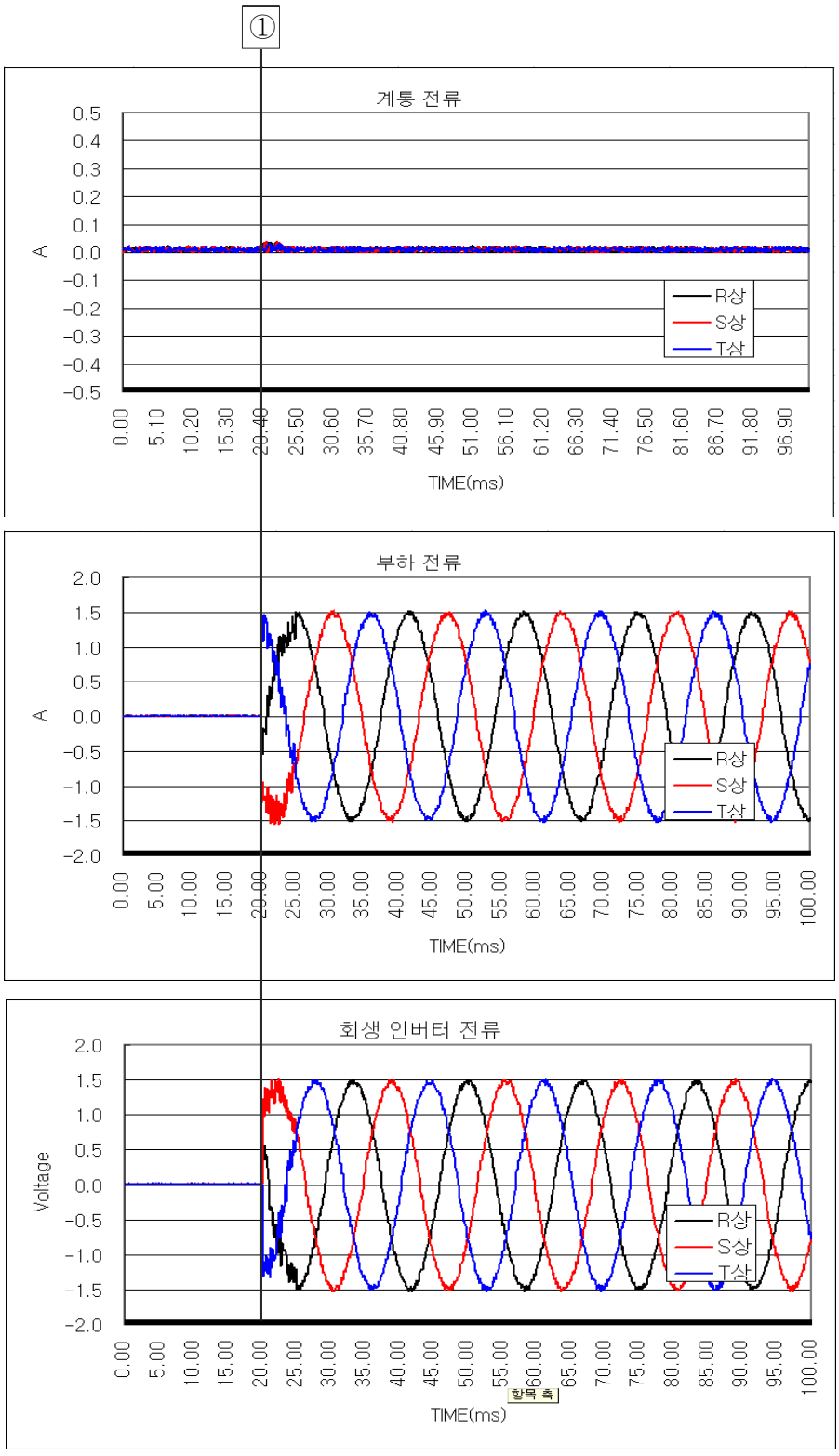


그림 3.266 회생 인버터의 무효전력 보상 시험 측정 결과

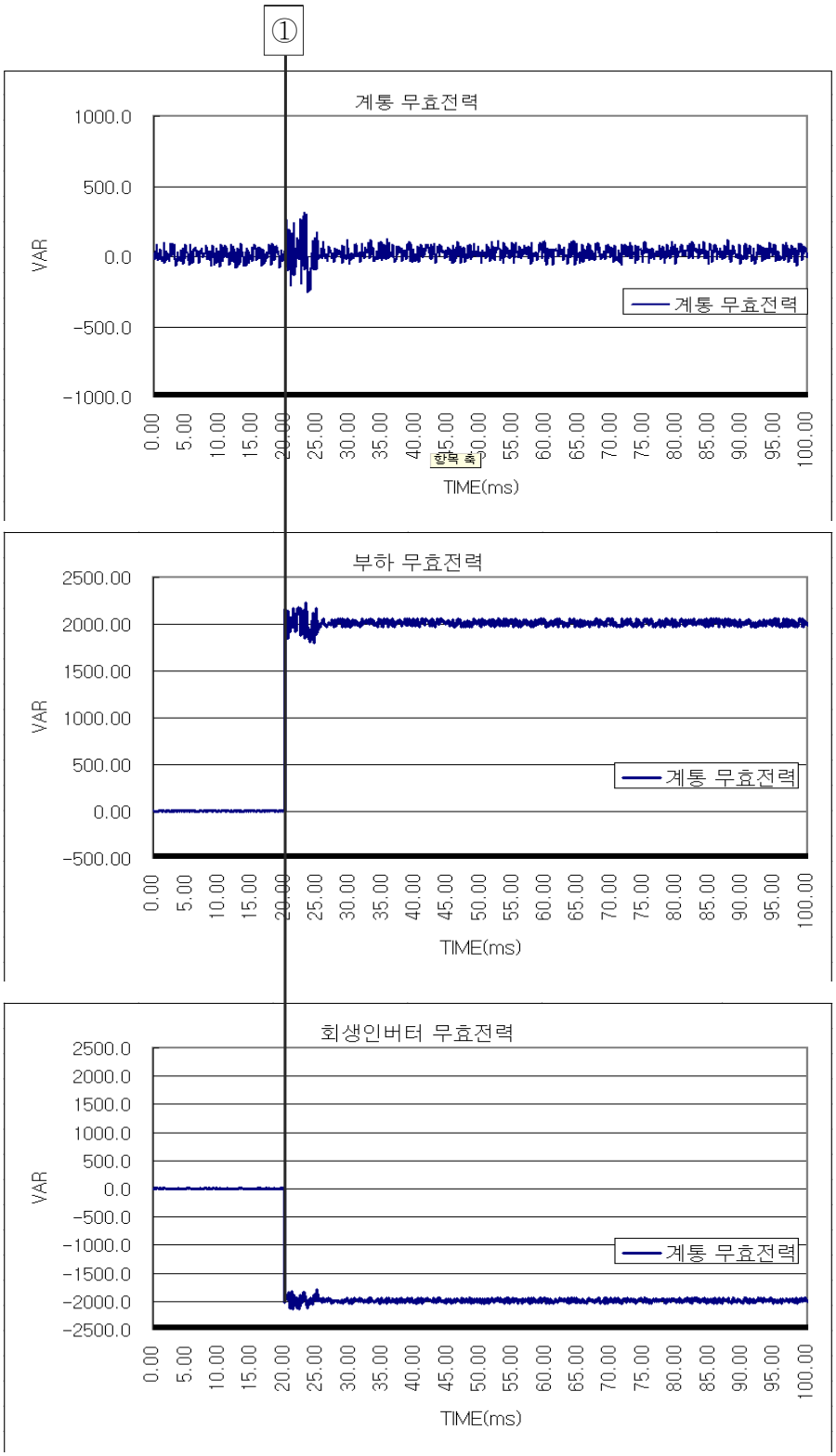


그림 3.267 회생 인버터의 무효전력 보상 시험 측정 결과

2. 기본 성능 시험

DC1500V, 1.5MVA 회생 인버터의 기본 성능 시험은 실현장 설치에 대비하여, 기본 성능 시험에 중점을 두었으며, 신뢰성을 높이기 위하여 성능 시험을 실시하였다.

가. 시험장치의 구성

(1) 시험 장치의 구성

제작한 회생인버터를 실 사용되는 현장의 조건으로 성능시험을 실시하기 위하여 그림 3.268과 같이 회생인버터 시험설비를 제작 하여 회생인버터의 성능은 시험 하였다.

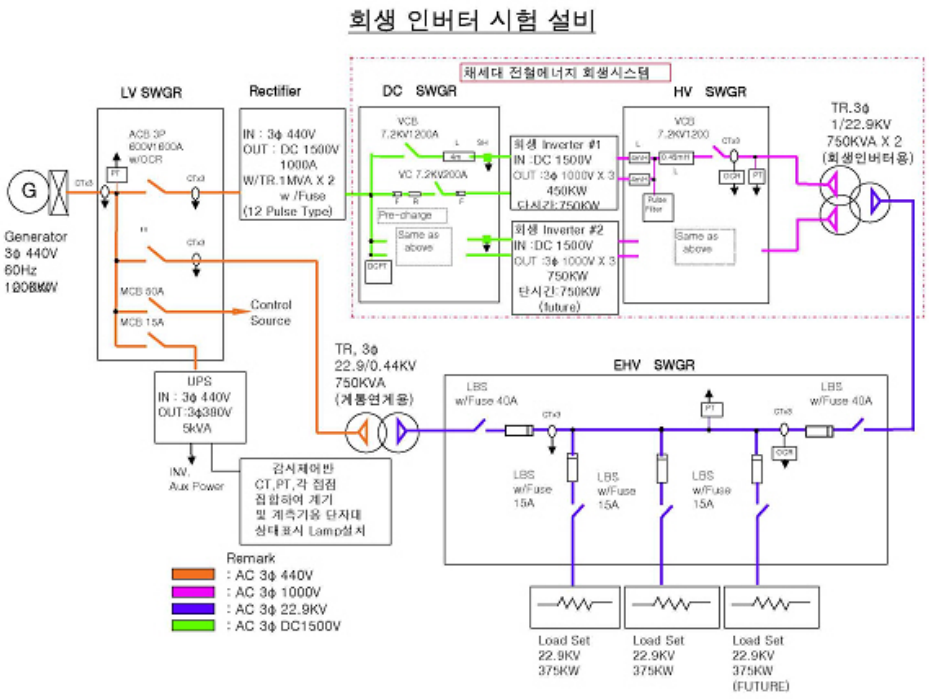


그림 3.268 회생인버터 시험설비 구성도

(2) LV SWGR 반

LV SWGR반 3상 440V계통에 연결된 정류기와 계통연계 TR용 두가지로 구성되어있다.

◎ 정류기반 개폐장치

정류기반 계폐시키는 장치로 사양은 아래 표 3.58과 같고 설치 사진은 그림 3.269와 같다.



그림 3.269 정류기반 설치 사진

표 3.58 정류기반 개폐장치 사양

품 명	규 격	MODEL TYPE	제작사
ACB	600V 1600A,3P 고정형 전동조작 DC 110V OCRQN	VABS 16-16-3F	비츠로
MCCB	3P 50AF 50AT	ABS 53b	LS산전
PT	440/110V 1.0CL 50VA		경보
CT	1150V 1600/5A 40VA 1.0치		경보
V-METER	110x110 1.5CL, 0~1500V	WA-V2 또는 W11-VA	경보 또는 대연
A-METER	110x110 1.5CL, 0~600A	WA-A2 또는 W11-AA	경보 또는 대연

◎계통연계 TR 개폐장치

계통연계 TR 계폐시키는 장치로 사양은 아래 표 3.59와 같고 설치 사진은 그림 3.270과 같다.

표 3.59 계통 연계 TR 개폐장치 사양

품 명	규 격	MODEL TYPE	제작사
ACB	600V 1600A,3P 고정형 전동조작 DC 110V OCRQN	VABS 16-16-3F	비츠로
MCCB	3P 50AF 50AT	ABS 53b	LS산전
PT	440/110V 1.0CL 50VA		경보
CT	1150V 1600/5A 40VA 1.0치		경보
V-METER	110x110 1.5CL, 0~1500V	WA-V2 또는 W11-VA	경보 또는 대연
A-METER	110x110 1.5CL, 0~600A	WA-A2 또는 W11-AA	경보 또는 대연



그림 3.270 계통 연계 TR 개폐장치 설치 사진

(3) DC 공급 장치

(가) 정류기 : 실리콘 Diode를 사용하여 3상 전파 정류기로 그림 3.271과 같이 구성하였으며 전류 용량은 1,000A로 구성하였다.

(나) 정류기 반 사양 : 표 3.60은 정류기 반 사양이다.



그림 3.271 정류기반 설치 사진

표 3.60 정류기 사양 및 특성

구 분		특 성
일반특징	냉 각 방 식	강제 풍냉식
	사 용 정 격	100% 연속사용
	정 류 방 식	SILICON DIODE 전파정류방식
	효 율	85% 이상
	측 정 조 건	입력정격, 전부하,
입력	상 수	3Φ 3W
	정 격 전 압	440VAC
	전압 변동 범위	± 10%
	정 격 주 파 수	60Hz±5%
출력	정 격 전 압	1800V DC
	전 압 안 정 도	----------
	정 격 용 량	1000A
	부동충전 전압범위	----------
	균등충전 전압범위	----------
	맥 동 율 (Ripple)	3% 이내
	과 부 하 내 량	110% 10분
	전 류 제 한	----------
	AUTOMATIC EQUALIZE CHARGING MODE	----------
종합특성	절 연 저 항	DC 500V 절연저항계로 측정 50Mohm 이상이어야 한다. (제어 및 반도체 회로 제외)
	절 연 내 압	10,000V의 교류전압으로 1분간 인가시 이상이 없어야 한다. 단, 최저내압은 AC 1500V로 한다. (제어 및 반도체회로 제외)
	온 도 상 승	본 기기의 정상 운전상태에서 각부의 온도상승은 온도계법으로 다음과 같다. 트랜스 및 리액터류 : 120 DEG 이하 전력 반도체소자 : 80 DEG 이하

(4) DC SWGR 반

정류기에서 정류된 DC전압을 회생 인버터와 개폐시키는 장치이다.



그림 3.272 DC SWGR 설치 사진.

(가) 정격 입력 전원 : DC 1.5 KV

(나) 정격 절연 전압 :

(다) 주모선 허용 전류 : 1000A (MAIN 차단기 정격전류)

(라) BUS SIZE : 10t x 60.

(5) HV SWGR 반

HV SWGR반 3상 1000V계통에 연결된 1/22.9kV 회생인버터용 TR의 스위치 기어로 회생인버터의 출력을 개폐 시키는 역할을 한다.

사양은 아래 표 3.61과 같고 설치 사진은 그림 3.273, 3.274와 같다.



그림 3.273 HV SWGR 반 설치 사진



그림 3.274 HV SWGR반 개폐장치 사진

표 3.61 HV SWGR반 개폐장치 사양

품 명	규 격	MODEL/ TYPE	제작사
VCB	7.2KV 630A 12.5KA,MOTOR SPRING DC 110V, 고정형	VVBN-6613 M	비츠로
VCB	7.2KV 1200A 20KA,MOTOR SPRING DC 110V, 고정형	VVBN-6120 M	비츠로
VC	7.2KV 200A 4KA 순식셋 DC 110V, 고정형	KVS-322E	비츠로
VCB	7.2KV 1200A 20KA,MOTOR SPRING DC 110V, 고정형	VVBN-6120 M	비츠로
DC V-METER	110x110 1.5CL, 0~2000V	WA-V2 또는 W11-VA	경보 또는 대연
DC A-METER	110x110 1.5CL, 0~1000A	WA-A2 또는 W11-AA	경보 또는 대연

(6) EHV SWGR 반

EHV SWGR반 3상 22900V계통에 연결된 3개의 저항기 뱅크와 계통 연계용 TR의 스위치 기어로 회생인버터의 부하와 계통 연계를 개폐 시키는 역할을 한다.

사양은 아래 표 3.62와 같고 설치 사진은 그림 3.275와 같다.

표 3.62 EHV SWGR반 사양

품 명	규 격	MODEL/ TYPE	제작사
AISS	25.8KV 200A, 전동조작 AC 220V	KAS-A-A	비츠로
POWER FUSE	24KV 1A 40KA	LFL-20J-1	LS산전
GPT	22.9KV/√3/110V/√3/190V/3 1.0치/3.0P 100/200VA	DPI-203NT	동우
CT	25.8KV 40/5A 40VA 75IN	DCI-201A	동우
V-METER	110x110 1.5CL, 0~1500V	WA-V2 또는 W11-VA	경보 또는 대연
A-METER	110x110 1.5CL, 0~600A	WA-A2 또는 W11-AA	경보 또는 대연
Vo-METER	110x110 1.5CL, 0~1500V	WA-V2 또는 W11-VA	경보 또는 대연





그림 3.275 EHV SWGR 사진.

(7) 저항기반

저항기반은 회생인버터의 용량시험을 위하여 저항기 부하를 만들어 회생인버터의 출력용량을 시험하기 위하여 제작하였다.

저항기 사양은 표 3.63과 같고 저항기와 저항기 냉각팬 사진은 그림3.276이고 저항기반 설치 사진은 그림 3.277과 같다

표 3.63 저항기 사양

용량	375kW
정격 전압	AC 3상 22,900V
정격 전류	9.45A
저항값	1398.426Ω
수량	2
냉각 방식	강제 풍냉식



그림 3.276 저항기와 냉각 FAN 사진



그림 3.277 저항기반 설치 사진

(8) 변압기

회생인버터 시험 설비에는 총 4개의 변압기가 설치된다. DC정류기반에서 사용하는 전압 666V을 위해 440/666V 1,000kVA Δ-Δ 변압기 1개와 440/666V 1,000kVA Δ-Y 변압기 1개 회생인버터 출력용으로 1000x2/22900V Δx2 -Δ 1개 또한 계통연계를 위한 22,900/440V Δ-Δ 1개가 설치되었다.

각 변압기 사양과 특성은 표 3.64와 3.65에 각각 나타내었다.

표 3.64 변압기 사양

NO	Rated kVA	Voltage(V)	Connection
TR-1	3P 1000	440-666	Δ-Δ
TR-2	3P 1000	440-666	Δ-Y
TR-3	3P 1500	1000X2-22900	ΔX2-Δ
TR-4	3P 750	22900-440	Δ-Δ



그림 3.278 TR1 설치 사진



그림 3.279 TR2 설치 사진



그림 3.280 TR3 설치 사진



그림 3.281 TR4 설치 사진

표 3.65 변압기 특성

DESCRIPTION		TR-1	TR-2	TR-3	TR-4
Phase		3	3	3	3
Frequency(Hz)		60	60	60	60
Rated kVA		1,000	1,000	1,500	750
Pri. voltage(V)		440	440	1000x2	22,900
Sec. voltage(V)		666	666	22,900	440
Cooling method		유입자냉식	유입자냉식	유입자냉식	유입자냉식
Tap changing		-	-	N.L.T.C	N.L.T.C
Vector group		Dd0	Yd1	Dd0d0	Dd0
Connection	Pri	DELTA	DELTA	DELTAx2	DELTA
	Sec	DELTA	STAR	DELTA	DELTA
Rating		Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Set of Transformer		1	1	1	1

나. 회생 인버터 부하시험

(1) 목적

(가) 회생 인버터 동작시험은 직류 입력 전압 변동 시에 회생 인버터의 교류 출력전압 변동 사항을 확인하여 회생동작 성능을 확인 한다.

(나) 부하 변동 시 (375kW,700kW)의 전압/전류/전력량 등의 변동 사항을 확인한다.

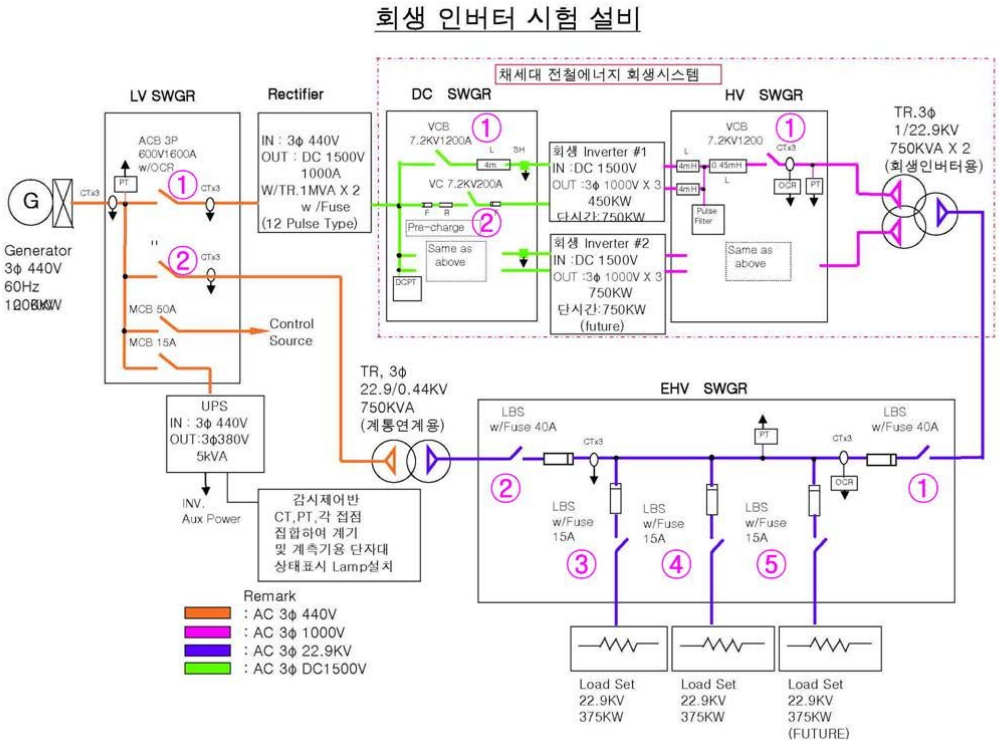


그림 3.282 회생인버터 시험설비 구성도

(2) 시험 회로의 구성 및 방법

(가) 시험회로는 그림 3.282와 같이 구성하며, DC전압은 1600V로 하여 회생인버터가 준비되면 동작되도록 설정하였다.

(나) 회생 인버터 출력전압 : 3Ø 1000V 60Hz

(다) 시험 방법

- 시험설비의 LV SWGR반의 ①을 on, EHV SWGR반의 ①과 ②을 on 시킨다.

- AC 입력전원 3Ø 380V를 인가하고 전압 확인 후 회생 인버터의 보조전원 S/W를 ON한다.

- 회생 인버터의 RUN S/W를 ON시킨다. RUN스위치를 ON시키면 DC SWGR반의 ②가 On되고 회생인버터의 컨덴서 뱅크에 DC를 충전시킨다. 충전시키다가 회생인버터의 컨덴서 뱅크의 DC-Link전압이 1500V가 되면 DC SWGR반의 ①이 off되고 DC SWGR반의 ②이 on되어 Pre-charge가 완료되어 회생인버터의 동작이 준비 되게 된다. 준비가 완료 되면 DC전압

에 따라 동작을 시작한다.

- 회생 인버터가 동작하여 출력전압이 1000V가 되는지를 확인 후 EHV SWGR반의 ③과 ④를 투입한다.

- 회생 인버터의 AC출력 전압 및 출력전류의 DATA를 취득 후 시험을 종료한다.

(3) 시험 결과

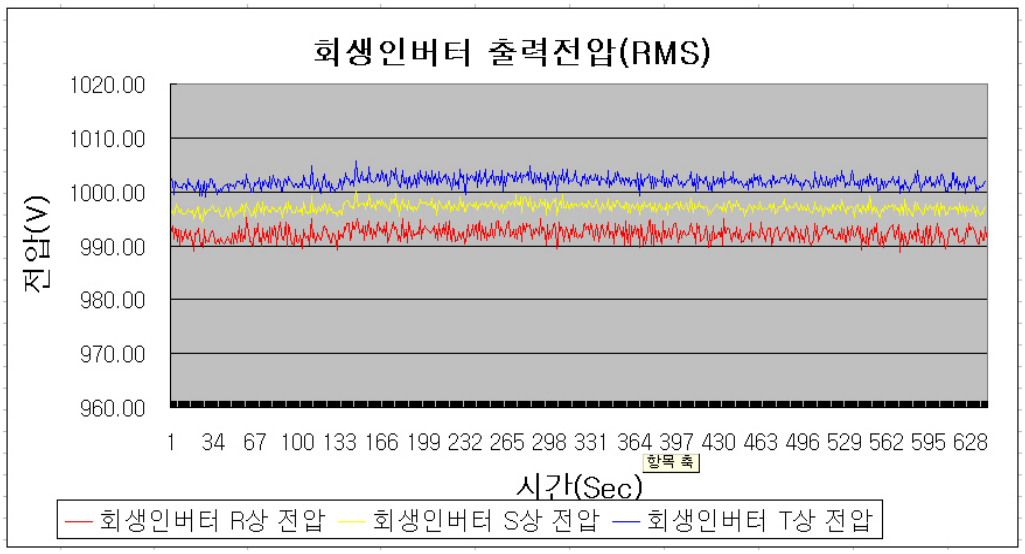


그림 3.283 부하시험회생인버터 출력전압

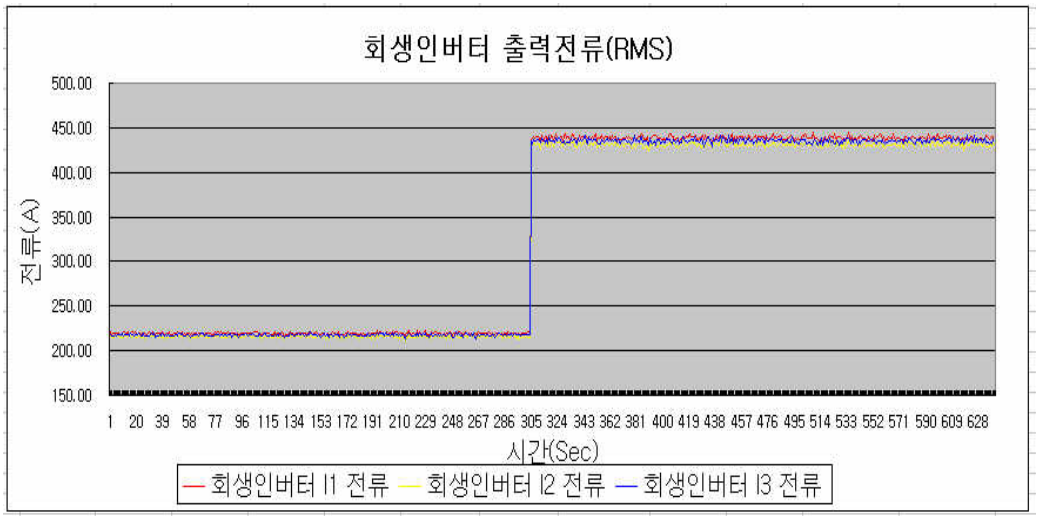


그림 3.284 부하시험 회생인버터 출력전류

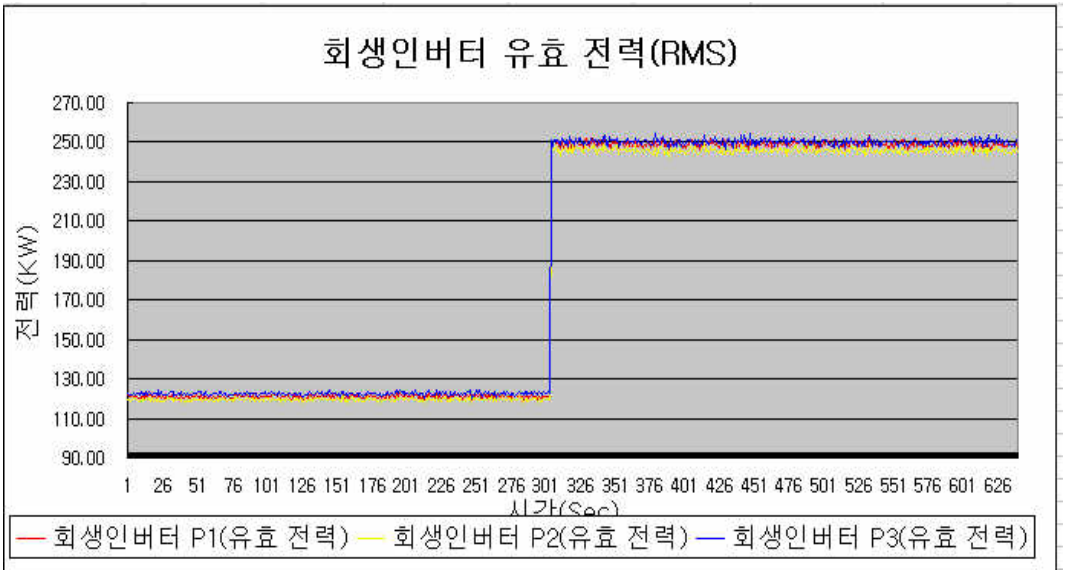


그림 3.285 부하시험 회생인버터 유효전력

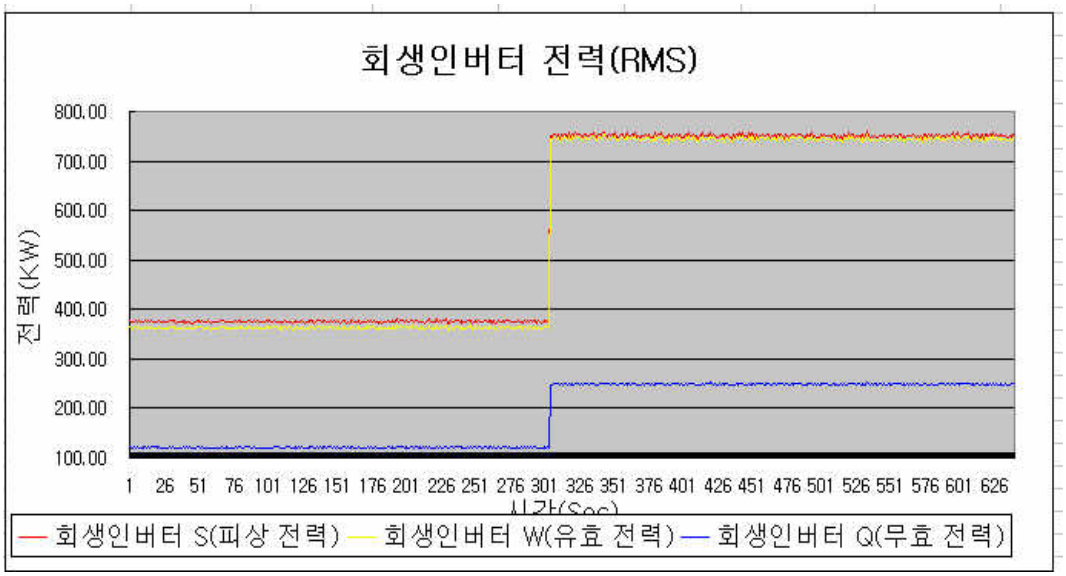


그림 3.286 부하시험 회생인버터 전력

위의 그림들은 회생 인버터의 부하시험 측정 데이터이다.

(가) EHV SWGR 반의 ③을 on 해놓고 회생 인버터를 동작시켜서 그림에서 보는 바와 같이 375kW의 부하 저항기를 투입하여 회생인버터의 출력값을 측정하였다.(1-300 구간)

(나) EHV SWGR 반의 ③은 계속 on되어 있는 상태에서 EHV SWGR 반의 ④

을 on시켜서 추가적으로 375kW의 부하 저항기를 투입하여 750kW의 부하 시험을 실시하였다(300-600).

위의 결과를 볼때 회생 인버터 출력 용량은 부하 저항기를 750kW 투입했을때 IGBT 정격 전류 용량인 490A 에 근접한 450A까지 출력을 내는 것을 볼 수 있었다. 아래 표 3.66은 375kW 부하 저항기를 연결했을때 회생 인버터 출력 시험 결과이다.

표 3.66 375kW 부하저항기 투입시 측정값

	전압(V)			전류(A)			피상전력	유효전력	무효전력	역률
	U1	U2	U3	I1	I2	I3	(KVA)	(KW)	(KVAR)	
평균	992	997	1001	219	215	217	375.6	363.0	96.1	0.9665
최소	988	994	998	210	212	213	370.2	357.4	94.2	0.9651
최대	995	1000	1005	222	218	221	380.5	368.1	98.4	0.9678

위 표에서 보는 봐와 같이 전압은 U1, U2, U3 의 값이 거의 변화가 없이 전압이 안정적으로 나왔으면 375KW 부하를 넣었을때 유효전력량의 평균값은 363.0kW이고, 최소값은 357kW, 최대값은 368kW로 측정 되었다.

역률은 평균값은 0.9665, 최소값은 0.9651, 최대값은 0.9678로 측정되었다.

다. 회생 인버터 계통 연계 및 효율 시험

(1) 목적

(가) 회생 인버터 동작개시에 계통 전원과의 연계시 전력량을 측정 비교하여 안정성을 확인한다.

(나) 회생되는 전류 및 전력을 측정한다.

(2) 시험 회로의 구성 및 방법

(가) 시험회로는 “회생인버터 부하시험”과 같이 구성하며, DC전압은 1600V로 하여 회생인버터가 준비되면 동작되도록 설정하였다.

(나) 회생 인버터 출력전압 : 3Ø 1000V 60Hz

(다) 시험 방법

- 시험설비의 LV SWGR반의 ①을 on, EHV SWGR반의 ①과 ②를 on 시킨다.
- AC 입력전원 3Ø 380V를 인가하고 전압 확인 후 회생 인버터의 보조전원 S/W를 ON한다.
- 회생 인버터의 RUN S/W를 ON시킨다. RUN스위치를 ON시키면 DC SWGR반의 ②가 On되고 회생인버터의 컨덴서 뱅크에 DC를 충전시킨다. 충전시키다가 회생인버터의 컨덴서 뱅크의 DC-Link전압이 1500V가 되면 DC SWGR반의 ①이 off되고 DC SWGR반의 ②가 on되어 Pre-charge가 완료되어 회생인버터의 동작이 준비 되게 된다. 준비가 완료 되면 DC전압에 따라 동작을 시작한다.
- 회생 인버터가 동작하여 출력전압이 1000V가 되는지를 확인후 출력 값을 150kW로 모니터 프로그램에서 조정한 후에 LV SWGR반의 ②(LV2)을 투입한다.
- 발전기와 LV1과 회생 인버터, LV2의 AC출력 전압 및 출력전류 등의 DATA를 취득 후 시험을 종료한다.

(3) 시험 결과

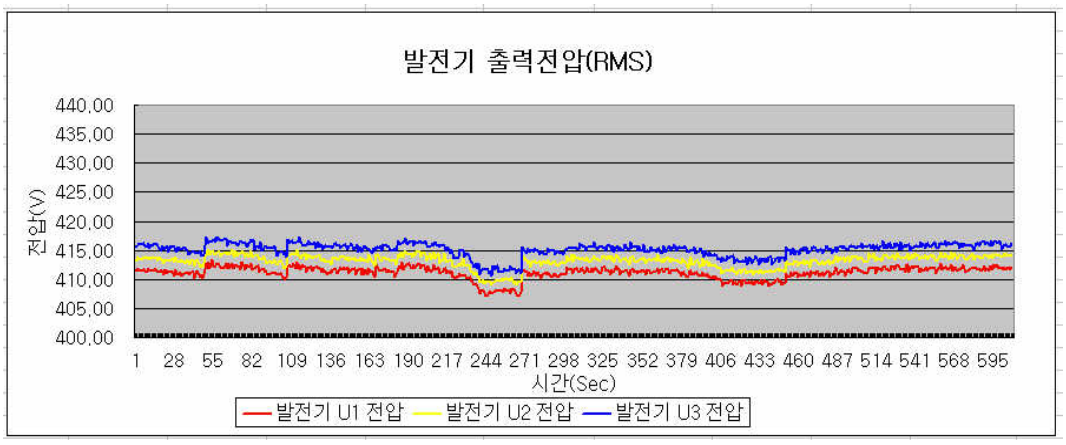


그림 3.287 계통연계 효율시험 발전기 출력전압

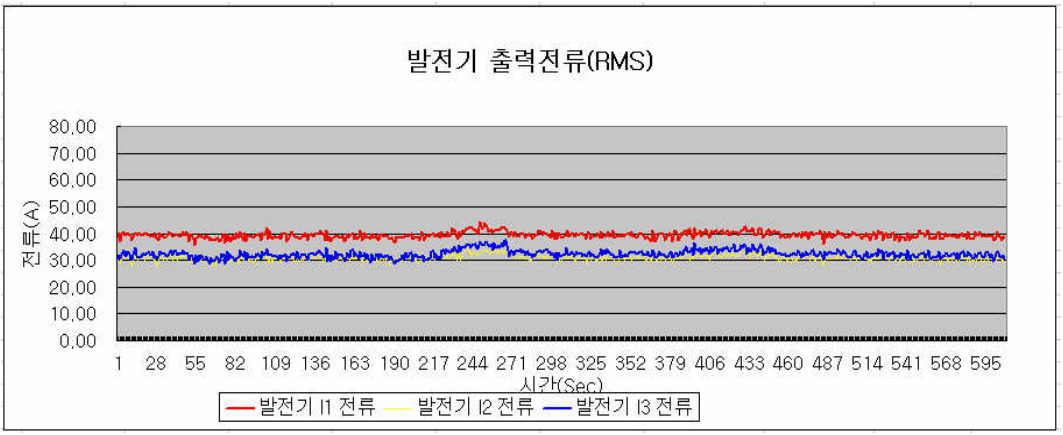


그림 3.288 계통연계 효율시험 발전기 출력전류

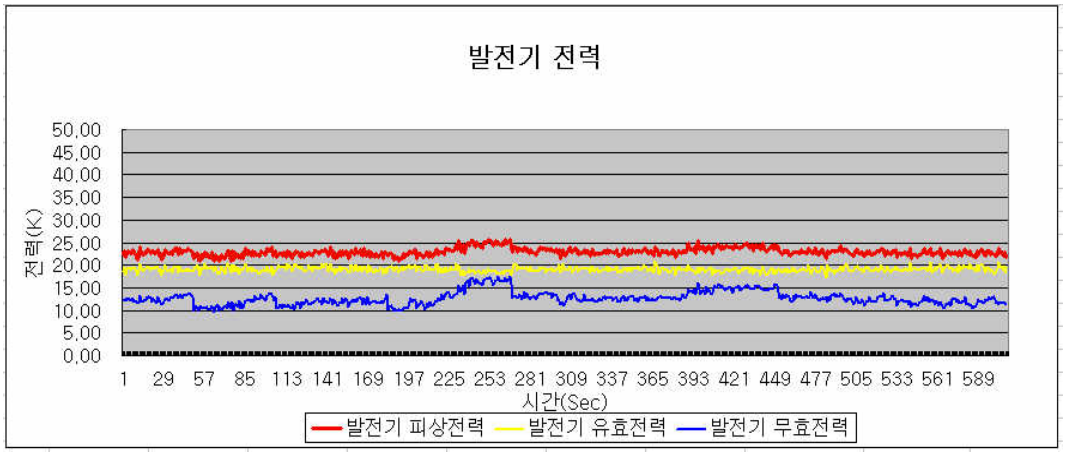


그림 3.289 계통연계 효율시험 발전기 전력

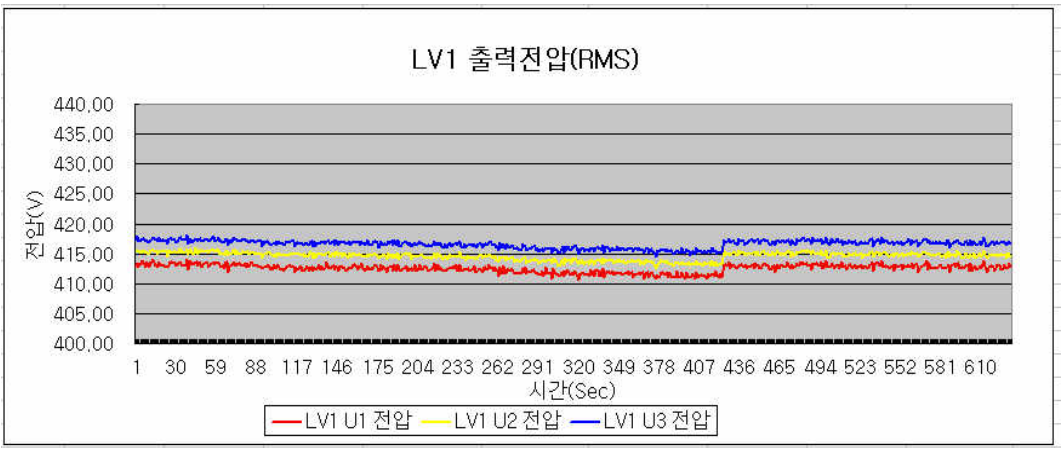


그림 3.290 계통연계 효율시험 LV1 출력전압

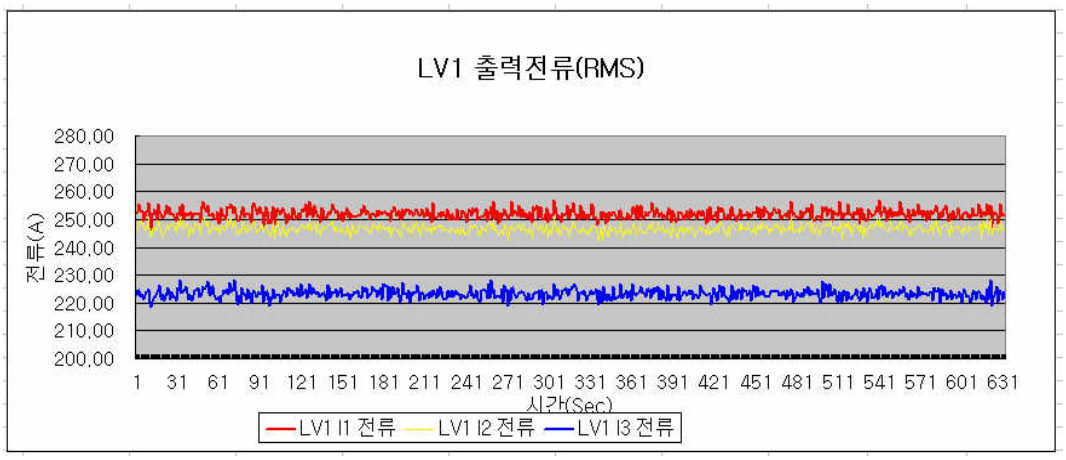


그림 3.291 계통연계 효율시험 LV1 출력전류

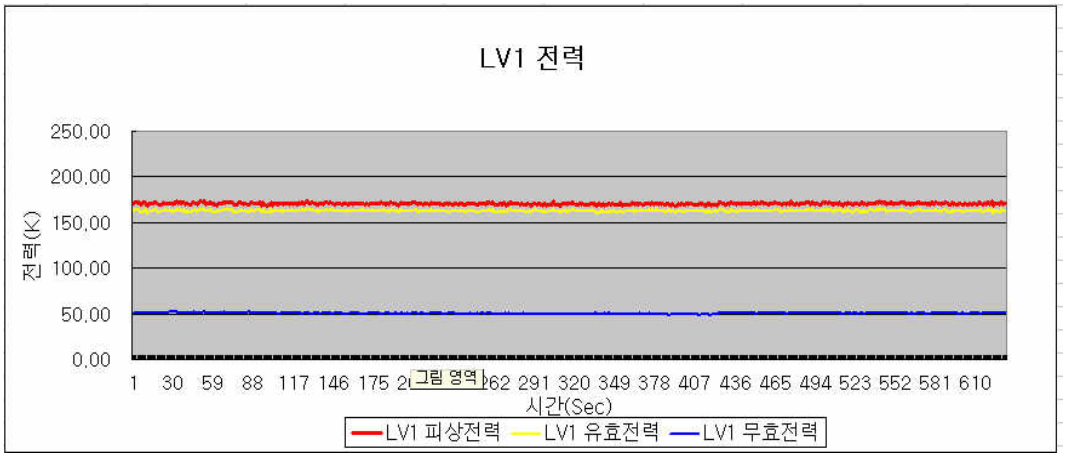


그림 3.292 계통연계 효율시험 LV1 전력

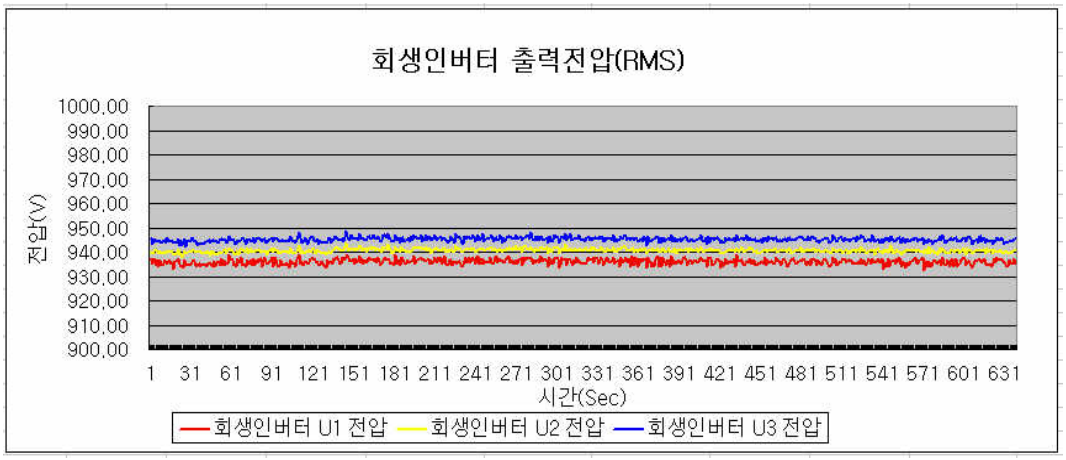


그림 3.293 계통연계 효율시험 LV1 회생인버터 출력전압

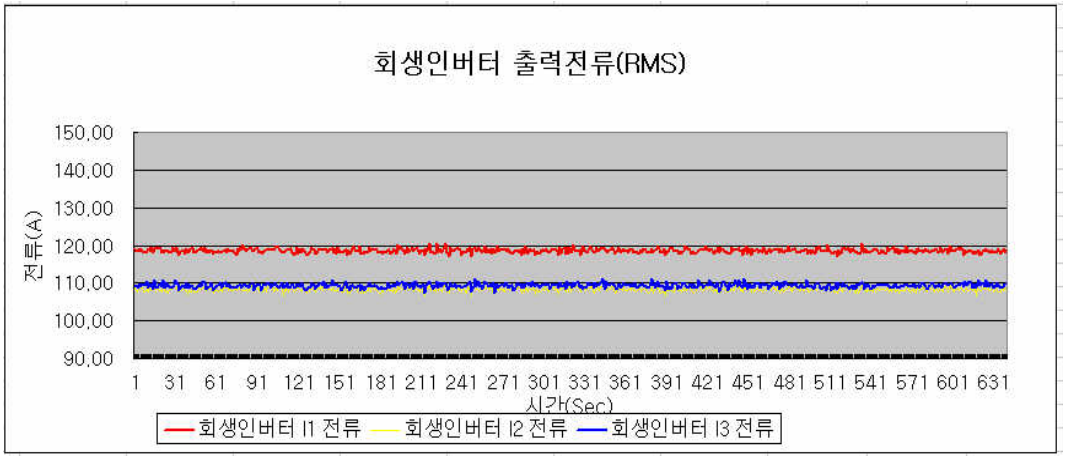


그림 3.294 계통연계 효율시험 LV1 회생인버터 출력전류

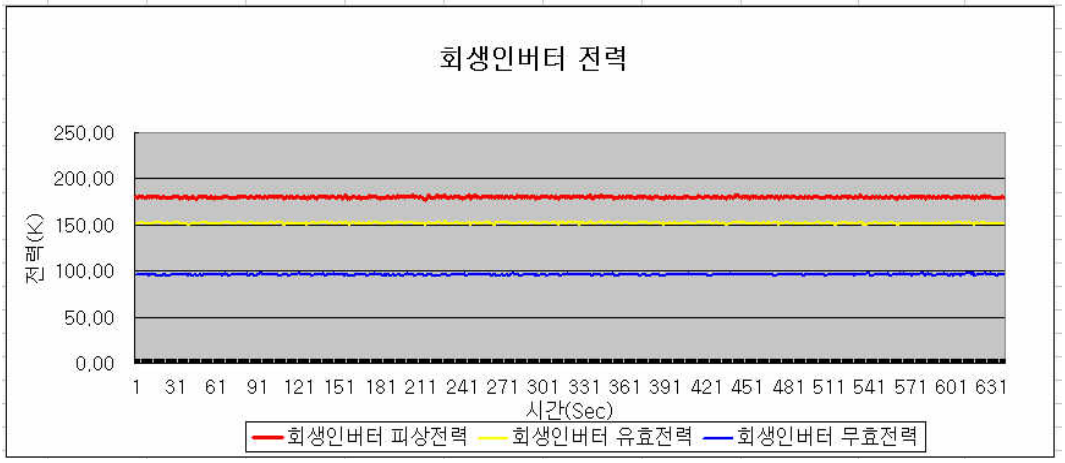


그림 3.295 계통연계 효율시험 LV1 회생인버터 전력

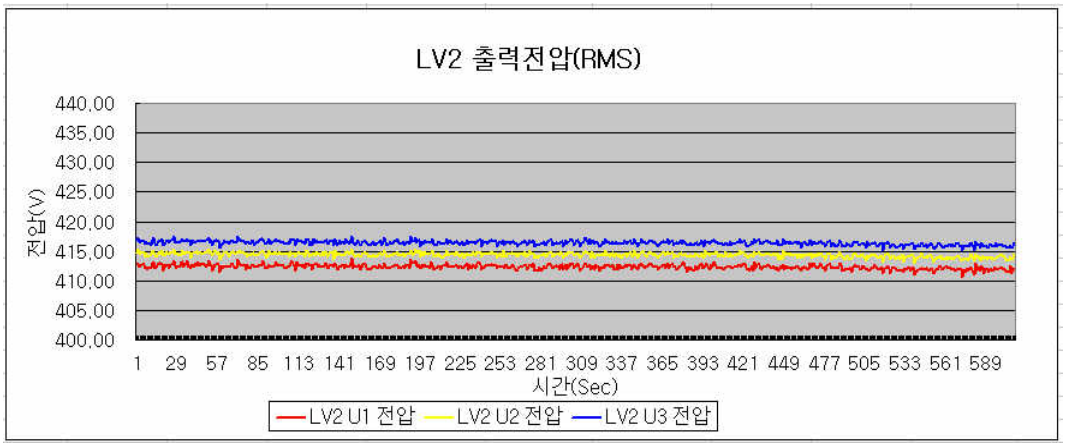


그림 3.296 계통연계 효율시험 LV2 출력전압

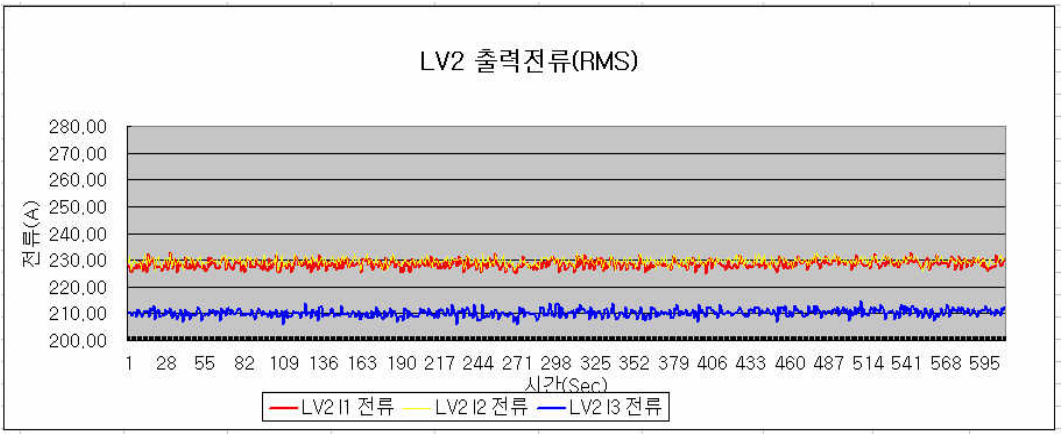


그림 3.297 계통연계 효율시험 LV2 출력전류

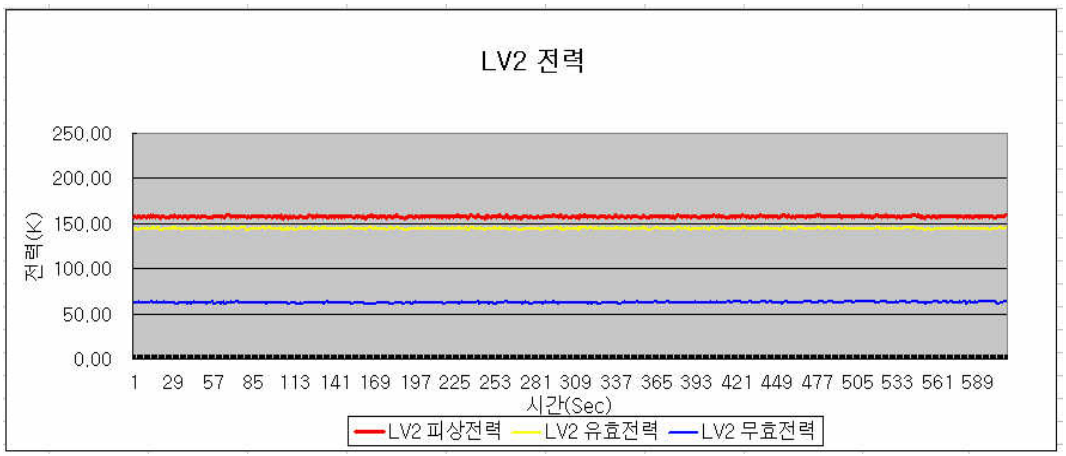


그림 3.298 계통연계 효율시험 LV2 전력

위의 그림들은 회생 인버터의 계통연계 및 효율 시험 측정 데이터이다.

(가) 회생 인버터의 출력 전압이 계통의 전압과 위상을 맞추는 방법은 계통 전원으로부터 계통 전압의 위상 동기신호를 받아와 이 신호를 기준으로 계통 전압과 회생 인버터 전압의 위상의 동기를 일치시키는 방법을 사용하였다.

(나) 회생 인버터가 동작하여 출력전압이 1000V가 되는지를 확인후 출력 값을 150kW로 모니터 프로그램에서 조정한 후에 LV SWGR반의 ②(LV2)을 투입하여 계통연계와 회생인버터의 효율을 측정하였다.(1-300 구간)

(다) 발전기의 출력은 LV1에서 정류기와 회생인버터에서 소비하는 전력량에서 계통연계되어 회생되는 전력량인 LV2의 전력량을 뺀만큼만 공급해주면 되므로 발전기의 전력량과 LV1의 전력량, LV2의 전력량을 측정 계산하여 회생인버터의 효

율을 계산한다.

위의 결과를 볼 때 회생 인버터 계통연계 효율은 계통에서 총사용하는 유효전력량은 LV1의 162.0kW이고 회생되어진 유효전력량은 LV2의 144.7kW이다. 발전기, 회생인버터, LV1, LV2의 각각의 전력량을 표 3.67에 나타내었다.

표 3.67 계통연계 효율시험 측정값

		평균	최소	최대
발전기	유효전력(kW)	19.0	17.2	20.7
	무효전력(kvar)	12.7	9.5	20.8
	피상전력(kVA)	22.9	20.8	25.6
LV1	유효전력(kW)	161.5	159.5	166.0
	무효전력(kvar)	50.5	48.5	52.4
	피상전력(kVA)	170.5	167.5	173.6
회생 인버터	유효전력(kW)	152.0	149.5	155.0
	무효전력(kvar)	96.2	94.2	98.6
	피상전력(kVA)	179.9	177.1	182.1
LV2	유효전력(kW)	146.2	142.5	147.1
	무효전력(kvar)	62.6	60.1	65.3
	피상전력(kVA)	157.6	155.6	159.5

위 표에서 보는 봐와 같이 유효전력은 발전기, LV1, 회생인버터, LV2에서 유효전력량은 평균값은 각각 19.0kW, 162.0kW, 152.0kW, 144.7kW이고, 최소값은 17.2kW, 159.5kW, 149.5kW, 142.5kW이고 최대값은 20.7kW, 166.0kW, 155.0kW, 147.1kW로 측정되었다.

회생인버터 효율은 정류기와 회생인버터에서 소비하는 전력인 LV1의 전력량에서 회생되어지는 전력량인 LV2의 전력량을 가지고 계산되므로 회생인버터의 효율은 약 90.5%의 우수한 효율을 가진다.

라. 회생 인버터 고조파 제거 시험

(1) 목적

(가) 회생 개시 전압보다 DC입력전압이 낮은 경우에 AC전원측의 고조파 필터로 동작시의 고조파 제거 성능을 확인한다.

(나) 제거되는 고조파의 량을 측정한다.

(2) 시험 회로의 구성 및 방법

(가) 시험회로는 “회생인버터 부하시험”과 같이 구성하며, 회생인버터 시험설비 자체에 정류기 등에서 발생하는 고조파를 제거 하였다.

(나) 회생 인버터의 내부 설정치

- 회생 인버터 출력전압 : 3Ø 1000V 60Hz
- 보상 고조파 : 3,5,7,9차

(다) 시험 방법

- 시험설비의 LV SWGR반의 ①을 on, EHV SWGR반의 ①과 ②를 on 시킨다.
- AC 입력전원 3Ø 380V를 인가하고 전압 확인 후 회생 인버터의 보조전원 S/W를 ON한다.
- 회생 인버터의 RUN S/W를 ON시킨다. RUN스위치를 ON시키면 DC SWGR반의 ②가 On되고 회생인버터의 컨덴서 뱅크에 DC를 충전시킨다. 충전시키다가 회생인버터의 컨덴서 뱅크의 DC-Link전압이 1500V가 되면 DC SWGR반의 ①이 off되고 DC SWGR반의 ②이 on되어 Pre-charge가 완료되어 회생인버터의 동작이 준비 되게 된다. 준비가 완료 되면 DC전압에 따라 동작을 시작한다.
- 회생 인버터가 동작하여 출력전압이 1000V가 되는지를 확인후 출력 값을 150kW로 모니터 프로그램에서 조정한다.
- 발전기에서 고조파 저감 기능이 켰을때와 껐을때의 DATA를 취득 후 시험을 종료한다.

(3) 시험 결과

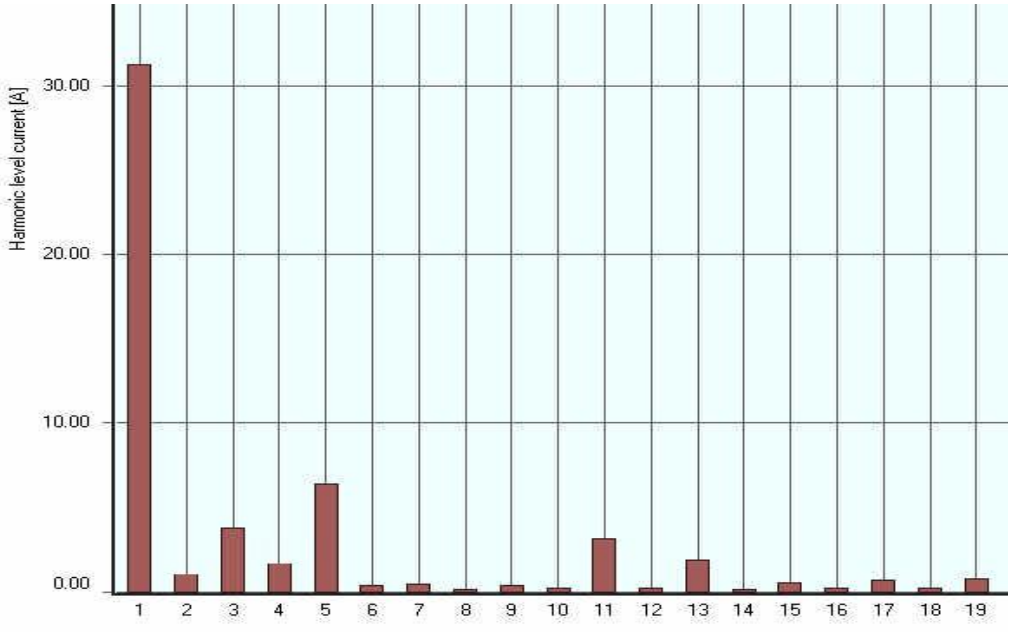


그림 3.299 고조파 저감시험 고조파저감설비 동작 전

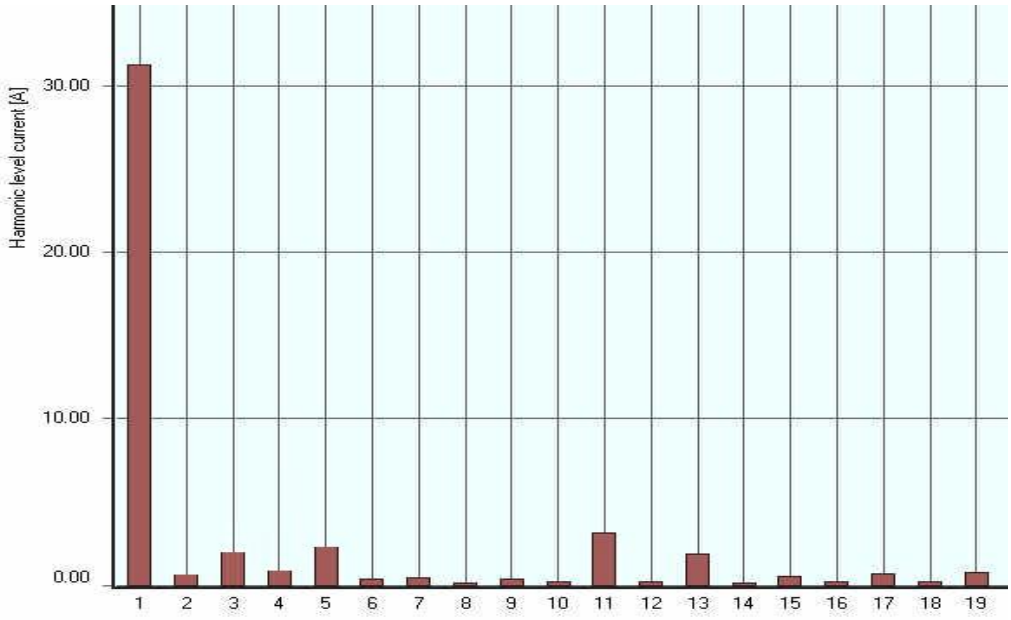


그림 3.300 고조파 저감시험 고조파저감설비 동작 후

(가) 회생 인버터가 Pre-charge되어 있는 상태에서 회생 인버터는 DC 전압이 동작 개시전압 이하 시에 고조파 저감 설비로 동작 하므로 DC전압을 동작개시 전압 이상으로 올라가지 않도록 한다.

(나) 고조파 저감 설비로 동작되기 전을 보면 3차와 5차 고조파를 함유하고 있

다는 것을 알 수 있다. 회생 인버터는 DC전압이 동작 개시전압 보다 작을 시에 고조파 저감 설비로 사용 되어 지기 때문에 이때에는 회생 인버터로써의 동작이 아닌 고조파 저감 설비로 동작 되어 진다. 부하 측에서 발생하는 고조파를 감지하여 부하에서 발생되어지는 고조파 전류에 대한 보상 고조파 전류를 회생 인버터에서 출력 하게 되어 고조파 저감설비로 동작했을시 회생 인버터는 부하에서 발생하는 고조파 전류에 대한 보상 고조파 전류를 출력한다.

(다) 계통 전류는 부하 측에서 발생되어지는 고조파를 회생 인버터가 제거 해주므로 계통 전류는 고조파전류가 제거된 양질의 전력 품질을 가지게 된다.

위의 결과를 볼 때 회생 인버터는 회생 인버터 동작을 안할 시 고조파 저감 설비로 활용 될 수 있어 아주 우수할 동작 효율을 얻을 수 있다.

마. 회생 인버터 무효전력 보상 시험

(1) 목적

(가) 회생 개시 전압보다 DC입력전압이 낮은 경우에 AC전원 측의 무효전력 보상 동작시의 무효전력 제거 성능을 확인한다.

(나) 제거되는 무효전력의 량을 측정한다.

(2) 시험 회로의 구성 및 방법

(가) 시험회로는 “회생인버터 부하시험”과 같이 구성하며, 회생인버터 시험설비 자체에 정류기 등에서 발생하는 고조파를 제거 하였다.

(나) 회생 인버터의 내부 설정치

- 회생 인버터 출력전압 : 3Ø 1000V 60Hz
- 무효전력 보상 기능

(다) 시험 방법

- 시험설비의 LV SWGR반의 ①을 on, EHV SWGR반의 ①과 ②을 on 시킨다.
- AC 입력전원 3Ø 380V를 인가하고 전압 확인 후 회생 인버터의 보조전원 S/W를 ON한다.
- 회생 인버터의 RUN S/W를 ON시킨다. RUN스위치를 ON시키면 DC

SWGR반의 ②가 On되고 회생인버터의 컨덴서 뱅크에 DC를 충전시킨다. 충전시키다가 회생인버터의 컨덴서 뱅크의 DC-Link전압이 1500V가 되면 DC SWGR반의 ①이 off되고 DC SWGR반의 ②이 on되어 Pre-charge가 완료되어 회생인버터의 동작이 준비 되게 된다. 준비가 완료 되면 DC전압에 따라 동작을 시작한다.

- 회생 인버터가 동작하여 출력전압이 1000V가 되는지를 확인후 출력 값을 150kW로 모니터 프로그램에서 조정한다.
- 발전기에서 고조파 저감 기능이 켰을 때와 껐을 때의 DATA를 취득 후 시험을 종료한다.

(3) 시험 결과

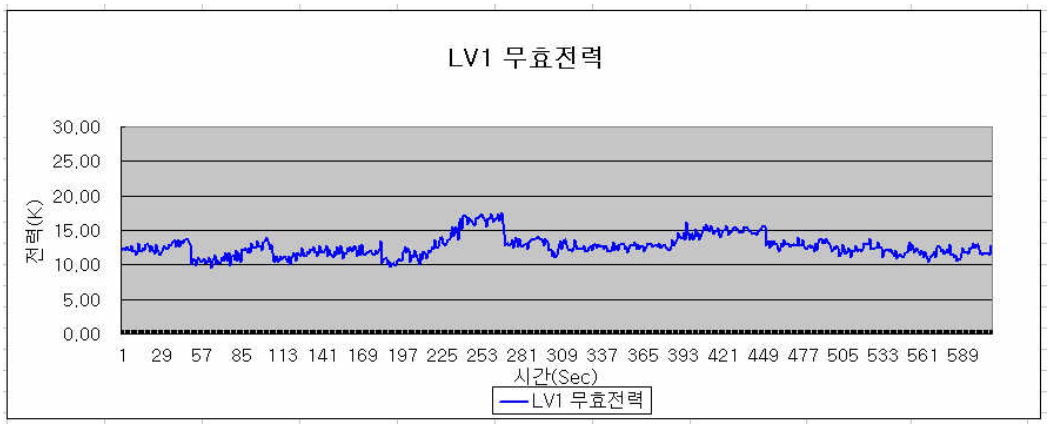


그림 3.301 LV1(부하측) 무효전력

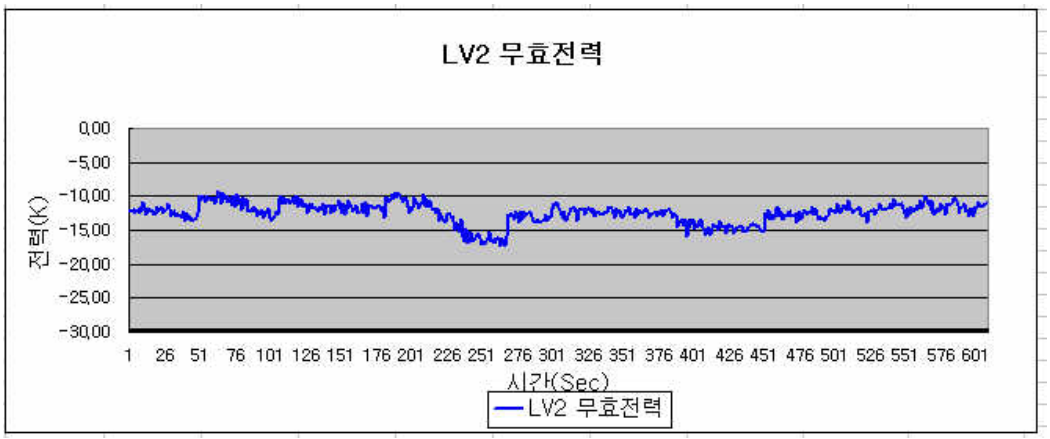


그림 3.302 LV2(회생인버터 출력) 무효전력

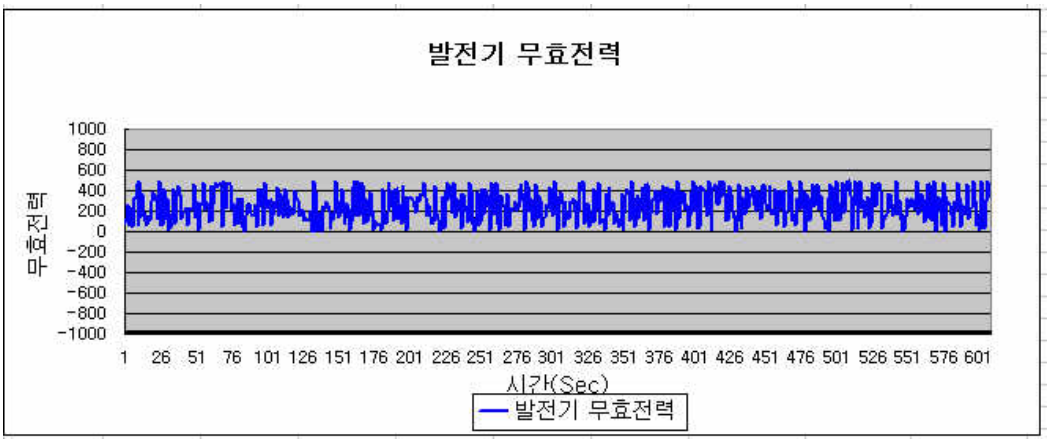


그림 3.303 발전기(전원) 무효전력

(가) 회생 인버터가 Pre-charge되어 있는 상태에서 회생 인버터는 DC 전압이 동작 개시전압 이하 시에 무효전력 보상 설비로 동작 하므로 DC전압을 동작개시 전압 이상으로 올라가지 않도록 한다.

(나) 무효전력 보상 설비로 동작되기 전 부하전류를 보면 거의 대부분이 무효전력임을 알 수 있다. 회생 인버터는 DC전압이 동작 개시전압 보다 작을 시에 무효전력 보상 설비로 사용 되어 지기 때문에 이때에는 회생 인버터로써의 동작이 아닌 무효전력 보상 설비로 동작 되어 진다. 부하 측에서 발생하는 무효전력을 감지하여 부하에서 발생되어지는 무효전력에 대한 진상이면 리액터 전류를 지상이면 콘데서 전류를 회생 인버터에서 출력 하게 되어 무효전력을 보상 설비로 동작한다.

(다) 계통 전류는 부하 측에서 발생되어지는 무효전력을 회생 인버터가 제거 해주므로 계통 전류는 무효전력이 제거된 양질의 전력 품질을 가지게 된다.

위의 결과를 볼 때 회생 인버터는 회생 인버터 동작을 안 할시 무효전력 보상 설비로 활용 될 수 있어 아주 우수할 동작 효율을 얻을 수 있다.

무효전력 보상전(LV1), 무효전력 보상후(발전기)의 무효전력과 역률은 표 3.68에 나타내었다.

표 3.68 무효전력 보상시험 무효전력 보상전후 측정자료

	보상전(LV1)			보상후(발전기)		
	최소	평균	최대	최소	평균	최대
무효전력 (KVAR)	208	22.9	25.6	0.045	0.246	0.632
역률	0.72	0.83	0.89	0.996	0.998	0.999

제 6 절 실계통 적용

1. 공인인증 시험

가. 공인인증시험 절차서

제작된 1.5MVA 회생용 인버터를 공인인증기관에 의한 인증시험을 수행하기 위해 다음과 같은 시험 절차서를 작성하였다. 본 시험은 KS, IEEE, ANSI, NEMA 등을 기본으로 작성되었으며 공인인증기관과의 협의 후 본 과제기간에 인증시험을 수행한다. 다음은 시험 절차서 본문내용이다.

1. 적용범위

이 절차서는 당사에서 생산되는 완제품의 품질보증을 위한 제반 최종검사 절차 및 방법에 대하여 적용한다.

2. 적용규격

규 격	번 호	적용규격		비 고
		유	무	
KS		○		
IEEE		○		
ANSI		○		
NEMA		○		
기술사양서		○		최종승인

✋ 검사항목의 적용규격은 구매자에 의해서 승인된 기술사양서를 우선으로 하고 명시되지 않은 사항은 상기 규격 중에서 최신판을 적용하고 기타 사항은 제작자 표준으로 한다.

3. 검사항목

검 사 항 목
외관구조
과부하 내량
직류입력전압 동작 특성
출력전압 및 주파수 안정도
출력전압 조정범위
온도상승
소 음
종합효율
출력 파형왜율
경보회로 동작(온도 상승)
절연저항, 절연내압
출력전압 과도변동 및 회복속도
지시계기 시험
외함도장
기 타

외 관 구 조	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	육안, 줄자, 마이크로 메타, 도장색 견본
적용규격 및 기준치	기술 사양서

검 사 절 차

1. 외관구조검사

1) 외 함
2) 전면 운용판넬, 지시계기판넬
3) 주회로부품
4) 반도체 소자
5) 배 선
6) 개폐기, 스위치
7) 퓨우즈
8) 입, 출력단자.

9) 프린트 기판 10) 기 타

과 부 하 내 량	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	교류전류계
적용규격 및 기준치	정격출력 부하의 120% 10분간 연속운전

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.
2. 출력 과부하 경보회로 설정치 해제 또는 경보회로를 장비로부터 분리한다.
3. 정격 교류입력전압 및 교류출력전압, 주파수를 규정된 출력 부하율로 설정하고 규정된 시간으로 연속
   운전한다.
4. 장비의 운전시간 동안 다음사항을 확인한다.
   1) 장비의 정상운전 상태
   2) 이상음 발생유무
   3) 각 부품의 손상 여부
   4) 지시계기 동작 및 정상운전 표시상태
5. 출력 과부하 보호회로 설정치를 설정하고 이상유무를 확인한다.

직류입력전압 동작특성	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	PHOTO CORDER
적용규격 및 기준치	회생제동 개시전압 : 1650V ,정지 전압 :1600V ± 2%이내

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.

2. 경보 및 보호회로의 설정치 설정 및 동작상태 정상유지

3. 다음과 같은 시험조건에서 OSCILLO GRAPH로 측정하여 산출한다.

1) DC 입력 전압을 가변시켜 회생제동인버터의 동작 및 정지 전압을 측정

· 규정된 교류 입력 전압 범위

· 규정된 직류 입력 전압 범위

4. 장비의 정상운전 상태 및 운용 판넬의 표시기능을 확인한다.

출력전압 및 주파수 안정도	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	교류전압계, 직류전압계, 주파수 카운터
적용규격 및 기준치	출력 전압안정도 : ± 2%이내, 출력 주파수안정도 : ± 0.5%이내

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.

2. 정격 교류입력전압, 정격 직류입력전압, 출력부하를 100% 정격 교류전압 및 주파수를 설정한다.

3. 다음의 시험조건에서 출력전압, 출력주파수를 측정 기록한다.

4. 산출

1) $\text{출력전압안정도}(\%) = \frac{\text{출력전압(측정)} - \text{출력전압(설정)}}{\text{출력전압설정}} X100$

2) 출력 주파수안정도 (Hz) = 출력주파수 (측정) - 출력주파수 (설정)

각 시험조건에서 출력전압 및 주파수 변동 최대치를 기준으로 산출한다.

출 력 전 압 조 정 범 위	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	교류전압계
적용규격 및 기준치	출력전압조정범위 : ± 5%

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.
2. 출력전압 이상경보 설정치 해제, 또는 경보 회로를 장비로 부터 분리한다.
3. 정격 교류입력전압, 정격 직류전압, 출력 부하율 50% 상태에서 정격 출력전압 및 주파수를 정격으로 설정한다.
4. 출력전압 설정용 PC를 접속 조작하여 출력전압의 설정 가능한 범위를 측정 기록한다.

· AC전원에 동기운전하는 경우 시험이 불가능하므로 시험항목에서 제외한다.

온 도 상 승	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	표면온도계, 봉온도계, 온도기록계
적용규격 및 기준치	변압기류 : 140 deg이하, 반도체소자류 : 80 deg이하

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.
2. 정격 교류입력전압, 정격직류전압, 출력부하율 100% 정격교류 출력전압 및 주파수를 설정하여 8시간 이상 연속운전 시킨다.
3. 장비의 각 부품의 온도와 주위온도를 0.5 - 1시간 간격으로 측정 기록하여 각 부품온도가 포화상태(온도상승 변화가 시간당 1℃이하)에 도달하였을 때 최종온도를 측정한다.
4. 산출

온도상승치 (deg) = 최종온도 (℃) - 주위온도 (℃)

5. 장비의 운전시간 동안 다음 사항을 확인한다.

1) 지시계기 동작 및 정상운전 표시상태

2) 주회로 부품단자 접속부 과열상태

3) 주회로 배선 포박부 과열여부

4) 제어회로 배선 포박부 과열여부

5) 각 부품의 과열여부

6) 소음 및 광음 발생 유무

7) 헌팅 및 발진, 기타 불안정 상태 유무

소 음	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	소음 측정기
적용규격 및 기준치	70 dBA 이하 (전방 : 1.5 m, 높이 : 1.5 m 에서 측정시)

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.

2. 다음의 시험조건에서 소음을 측정 기록한다.

1) 출력부하 100%

2) 규정된 교류입력 전압범위

3) 규정된 직류 출력 전압범위 (부동 또는 균등 충전전압)

4) 장비소음과 주위소음의 차이가 10 dB 이상일 것.

3. 장비로부터 규정된 거리, 규정된 높이와 전면에서 측정 기록한다.

4. 3항과 동일한 위치에서 장비의 운전을 정지하고 주위소음 (암소음)을 측정한다.

5. 산 출

1) 장비소음과 주위소음의 차이가 10 dB 미만일 경우 아래표와 간이 보청하여 기록한다.

장비소음과 암소음의 차이 (dB)	3	4	5	6	7	8	9	10이상
보정치(dB)	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0

2) 소음계의 측정범위는 다음과 같다.

○ A : 60 dB 미만 ○ B : 60 dB - 80 dB 미만 ○ C : 85 dB 이상

종 합 효 율	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	교류 전류계, 직류 전류계
적용규격 및 기준치	85 % 이상

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.

2. 정격 교류입력전압, 정격 직류전압, 출력부하율 100% 정격교류 출력전압 및 주파수를 설정하고 측정

기록한다.

3. 산 출 1) 종합효율 (%) = $\frac{\text{정격교류출력용량}(W)}{\text{교류입력용량}(W)} X\ 100$

⇨ 정격교류출력용량(W) = 출력용량 (VA) x 부하역율

⇨ 직류입력용량(W) = 전류계지시치 (A) x 전압계지시치 (V)

출력파형 의율	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	파형의율계
적용규격 및 기준치	5 % 이하

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.
2. 정격교류 입력전압, 정격직류전압, 출력부하율 100% 정격교류 출력전압 및 주파수를 설정한다.
3. 다음의 시험조건에서 출력 파형의율을 측정 기록한다.
   1) 안정된 출력부하변동 (부하율 : 0-25-50-100%)
   2) 규정된 교류입력전압 범위내에서 변동
   3) 각 시험조건에서 출력 파형의율을 측정하고 최대치를 산출한다.

경 보 회 로 동 작(온도 상승)	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	적외선 온도계

검 사 절 차

1. 냉각수 온도 : 80 deg이상 운전 정지 및 경보
2. 리액터 온도 : 120deg 이상 경보 140deg 이상 경보 및 운전 정지

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.
2. 냉각수 온도 경보

   냉각용 FAN의 동작을 차단기를 OFF하여 정지 시키고,적정의 직류 입력전압을 인가 운전시켜 온도경보 설정치에서 경보 동작상태 및 장비의 운전 상태를 확인하고 경보동작 상태와 경보설정치를 기록한다.

   1) 출력부하

2) 경보동작 상태와 경보설정치

절연저항 및 절연내압	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	절연저항 : MEGGER (DC 500V) 절연내압 : 내압시험기 (AC 0-5KV 3KVA)
적용규격 및 기준치	절연저항 : 전기회로와 대지간 5M ohm 이상 절연내압 : 전기회로와 대지간 AC 60Hz 1.5KV 1분간 인가시 이상없음

검 사 절 차

1. 온도상승 시험 직후 시험구성 회로를 분리한다.
   (입력전원회로, 출력부하회로)
2. 반도체소자, 콘덴서류 및 EMI FILTER류 제외
3. 프린트기판 분리
4. 절연저항
   1) 입력단자와 대지간 MEGGER (DC 500V)로 1분간 인가하여 절연저항을 측정 기록한다.
   2) 출력단자와 대지간 MEGGER (DC 500V)로 1분간 인가하여 절연저항을 측정 기록한다.
5. 절연내압
   1) 입력단자와 대지간 내압시험기로 0 V에서 서서히 증가하여 규정된 내전압을 1 분간 인가하여 각 부품 및 회로 배선의 절연 파괴여부 및 섬광여부를 확인한다.
   2) 출력단자와 대지간, 시험방법 동일함.
6. 시험 구성회로를 연결하고 분리된 회로삽입, 단락회로를 해제하고 장비를 정상 운전 시킨다.

출력전압 과도변동 및 회복속도 측정			
관 련 장 비			
검 사 분 류		검사방법	
사용계기 및 설비	PHOTO CORDER		
적용규격 및 기준치	과도변동 : 정격의 50% - 100%, 100% - 50% 변환시 ± 5%이내 회복속도 : 20 ms이내 (± 2% 이내)		

검 사 절 차

1. 장비를 정상운전 시킨다.
2. 경보 및 보호회로의 설정치 설정 및 동작상태를 정상유지
3. 다음과 같은 시험조건에서 OSCILLO GRAPH로 측정하여 산출한다.

   부하급변

   · 규정된 급격한 부하변동

   · 규정된 교류입력전압 범위

4. 장비의 정상운전상태 및 전면 운용판넬의 표시기능을 확인한다.

외 함 도 장	
관 련 장 비	회생인버터
사용계기 및 설비	도장색상 견본철, 육안
적용규격 및 기준치	기술 사양서

검 사 절 차

1. 외함도장은 기술사양서에 상당하는 색상이 되었는지를 확인한다.
2. 외함은 불순물을 완전히 제거한후 (도장전에 탈지, 재청, 피막등) 방청도료로 2회이상 사상도장 2회 이상 도장한다.

3. 도장상태 (틈, 먼지, 변색, 얼룩, 흘러내림)는 양호한가를 확인한다.

4. 표면도장의 채도 및 광택, 균등여부를 확인한다.

5. 표면도장의 밀착 및 경보상태 확인

나. 공인인증시험 성적서

공인인증시험성적서는 그림 3.304와 3.305와 같다.



시 험 성 적 서

공인시험기관

발송번호 : 2008RS00399호 (2008.01.14)

신청자 : 시엔에이전기(주)

주 소 : 경기도 안양시 동안구 관양동 799 안양메가밸리 322

426-170
경기도 안산시 상록구 사1동 1271-19
한 국 전 기 연 구 원 장
TEL : (031) 8040-4114
FAX : (031) 8040-4499
홈페이지 : http://www.keri.re.kr

접수 No. TRA08S00001 (2008.01.02)

No	품 명	규 격	수 량	단위	종합판정
1	INVERTER	DC 1500 V/AC 3Φ 900-1000 V 60 Hz 3Φ 1500 kVA	1	대	참고시험

한국전기연구원 "참고시험" 검표 부착

이 하 여 백

수 용 가 명	시엔에이전기(주)*****
비 고	본 제품은 관련규격이 없어 제시된 시방에 의해서 시험한 "참고시험" 임

※ 시험결과 별첨
※ 시험결과는 시험을 실시한 제품에 한함.
※ 본 성적서의 복사본은 무효임

한국전기연구원

"한국전기연구원의 확인 및 KERI 로고가 없는 용지를 사용한 사본은 무효임."

작성	박정수
승인 (기술책임자)	이기택

KERI

DF-E-21/03/06

1 / 2

그림 3.304 인증시험성적서 (1/2)

시 험 결 과

▣ 접수번호 TRA08S00001
▣ 시험기간 2008.01.03 ~ 2008.01.08
▣ 품 명 INVERTER
▣ 시험방법 별첨시방
▣ 정 격 DC 1500 V/AC 3Φ 900-1000 V 60 Hz 3Φ 1500 kVA
▣ 수량/단위 1 대
▣ 형 식 회생용인버터
▣ 제 번 CNA-703
▣ 제 조 자 시엔에이전기(주)
▣ 시 험 자 박정수

▣ 시 험 결 과

No.	시 험 항 목	시 험 기 준	결과
1	구조 및 외관검사	시방에 적합할 것	양
2	Sequence 시험	주회로 및 제어회로의 각 기기는 Sequence에 따라 정상동작할 것	양
3	정격출력시험	출력정격전압의 -10 %, +10 % 범위이내에서 정격출력시험시 이상이 없을 것	양
4	출력전압안정도시험	정격출력시 출력전압안정도는 ±2 % 이내일 것	+ 0.79
5	출력주파수안정도시험	정격출력시 출력주파수안정도는 ±0.5 % 이내일 것	+ 0.46
6	온도상승시험	정격출력으로 연속운전시 변압기류는 140 K, 반도체소자류는 80 K 이하일 것	47.7/33.3
7	효율시험	정격입출력시 종합효율은 85 % 이상일 것	97.3
8	경보회로동작시험	냉각수온도 80 K 이상시 운전정지 및 경보, 리액터온도 120 K 이상시 경보, 140 K 이상시 운전이 정지될 것	양
9	절연저항측정시험	주회로와 외함 간 : DC 1 000 V 절연저항계로 10 MΩ 이상일 것	양
		제어회로와 외함 간 : DC 500 V 절연저항계로 5 MΩ 이상일 것	양
10	상용주파내전압시험	주회로와 외함 간 : AC 60 Hz 3.5 kV를 1분간 견딜 것	양
	00	제어회로와 외함 간 : AC 60 Hz 1.5 kV를 1분간 견딜 것	양
종 합 판 정			참고시험
비고	- 본 제품은 관련규격이 없어 제시된 시방에 의해서 시험한 "참고시험" 임		

한국전기연구원

그림 3.305 인증시험성적서 (2/2)

2. 실계통 적용 시험 방안

개발한 회생용 인버터는 직류급전모선의 잉여 회생전력을 교류 전력으로 변환하여 타 계통으로 전달하는 시스템으로서, 상호 연관된 성질이 다른 계통을 연결하는 역할을 하게 된다. 이러한 이유로 두 계통간의 인터페이스와 동작신뢰도가 무척 중요하며, 개발품의 신뢰성을 검증하기 위해서는 실계통 적용 시험이 가장 좋은 방법일 것이다.

본 연구에서는 개발한 회생용 인버터의 실계통 적용 시험을 위하여 부산교통공사의 노포차량기지내 시험선로에 적용하기로 하였으며, 시험선로에 개발품의 부설 및 적용 조건은 다음에서 상술한다.

가. 현장적용 개소 선정

개발품인 회생용 인버터를 실계통에 적용하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하는 선로가 필요하다.

- 영업운전에 지장을 주지 않고 시험할 수 있을 것.
- 시험구간내 별도의 직류 1600V 급전이 가능할 것.
- 본선구간과 시험구간이 전기적으로 분리될 것.
- 인버터 및 기타 시험장비의 설치장소가 충분할 것.
- 필요시 시험용 전동차의 투입이 가능할 것.
- 전동차의 속도를 시험에 적절하게 조절 가능할 것.
- 최대의 회생을 발생할 수 있도록 선로가 적정할 것.

부산교통공사의 노포차량기지는 1.6km의 시운전선을 보유하고 있어 80km/h까지 차량운행이 가능하고 기지내 주박선과 구별하여 직류급전이 가능하기 때문에 회생용 인버터를 시험하기에는 최적의 조건을 갖고 있으며, 위와 같은 조건을 모두 충족시킨다. 또한, 부산교통공사는 사이리스터 위상제어방식의 더블컨버터를 계통에 적용하여 이미 잉여 회생전력을 사용하고 있으므로 회생전력의 재활용에 상당한 노하우와 긍정적인 의견을 가지고 있다.

나. 현장적용을 위한 계통

회생용 인버터의 현장적용은 부산교통공사의 노포기지내 시험선로계통에 연결하게 되며, 상세 부설 계통의 단면도는 그림 3.306과 같다.

그림 3.306에서 보듯이 회생용 인버터가 설치되는 계통에는 예비용 사이리스터 컨버터(C2)가 급전을 담당하게 된다. 이 컨버터는 싱글 컨버터로서 본 실계통 적용 시험을 위하여 사용하므로 고속도차단기를 부설하여 사용한다. 이 컨버터는 노포기지내의 시험선로에 직류 1,600V의 전력을 공급하게 된다.

사이리스터 컨버터를 통하여 급전되는 시험선로에 본 연구에서 개발한 회생용 인버터를 적용하게 되고, 인버터에서 받아들인 회생전력은 교류로 변환되어 저항기로 구성된 부하에서 소비하게 된다. 이때, 회생용 인버터 출력의 추종을 위한 발전기도 설치된다.

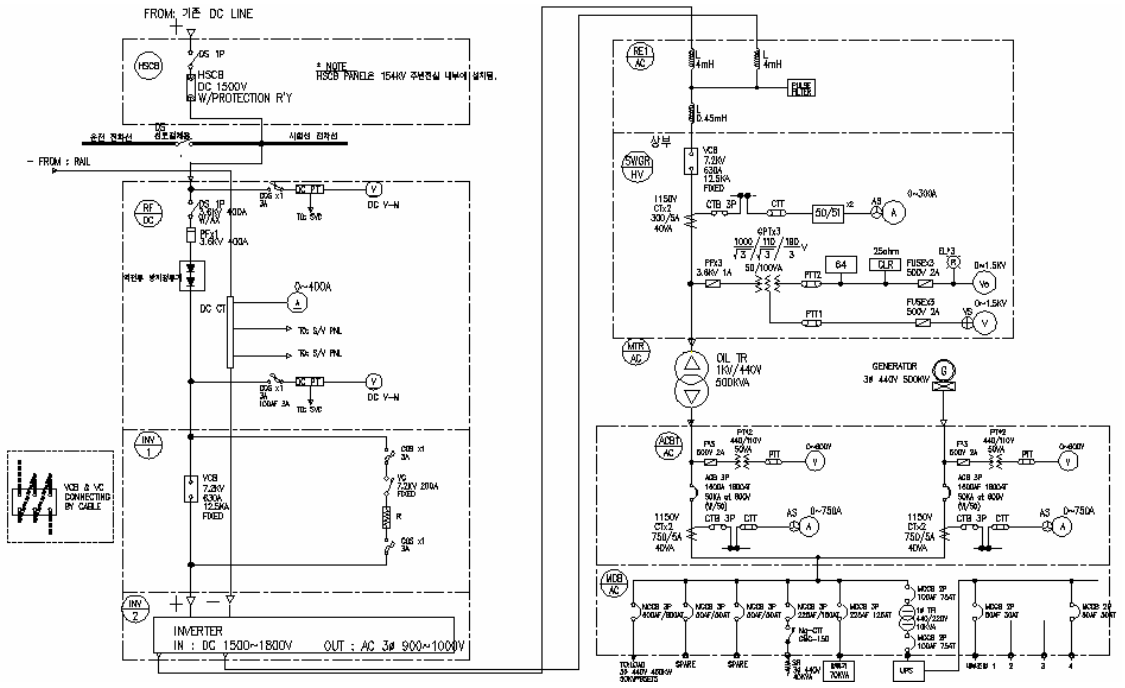


그림 3.306 회생용 인버터의 실계통 적용 단선도

다. 회생용 인버터의 현장 부설

앞서 기술한 회생용 인버터의 현장적용을 위한 계통의 현장 부설은 다음 그림 3.307과 같이 회생용 인버터 및 각종 스위치기어를 부설할 콘테이너, 부하셋 및 발전기 등으로 이루어진다.

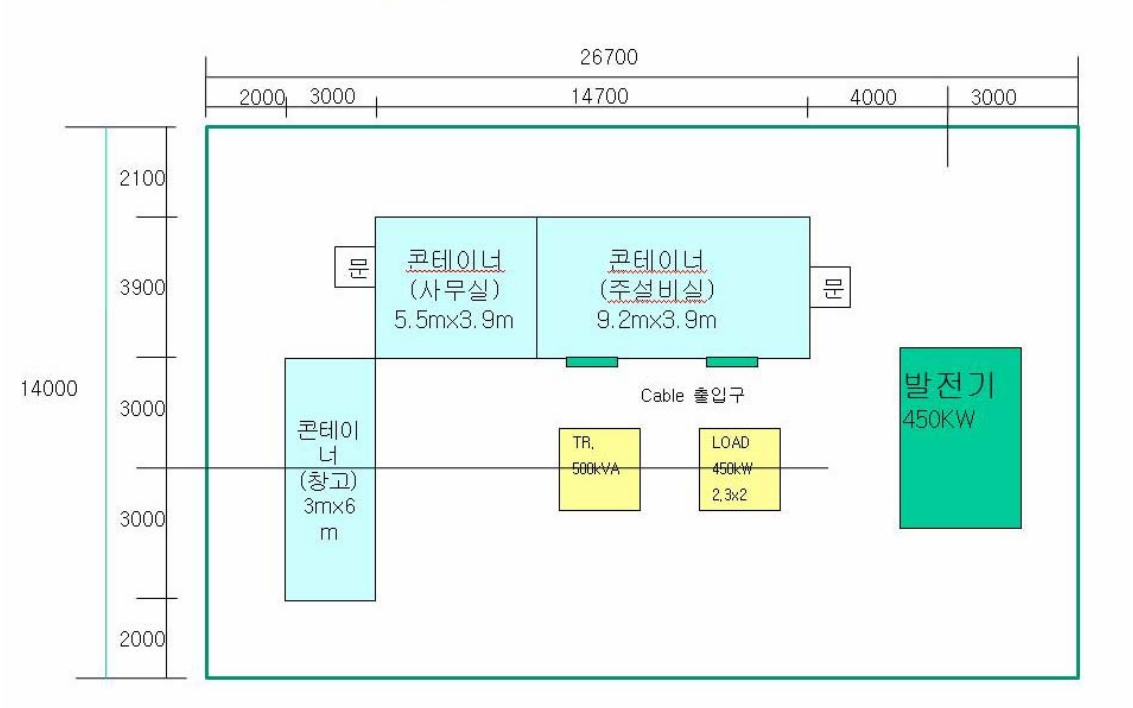


그림 3.307 회생용 인버터 설비 배치도

그림 3.308은 주설비실의 장치배치도를 나타내며 예비용 정류지, DC 인입역저지반, VC반, 인버터반, 리액터반, VCB반, ACB반 및 MCB반으로 배치되며, 그림 3.309는 제어실의 장치배치도를 나타내며 제어감시반과 사무실 공간으로 활용된다.

그림 3.310과 311은 주설비 배전반과 부하설비의 전후면도를 보이고 있다.

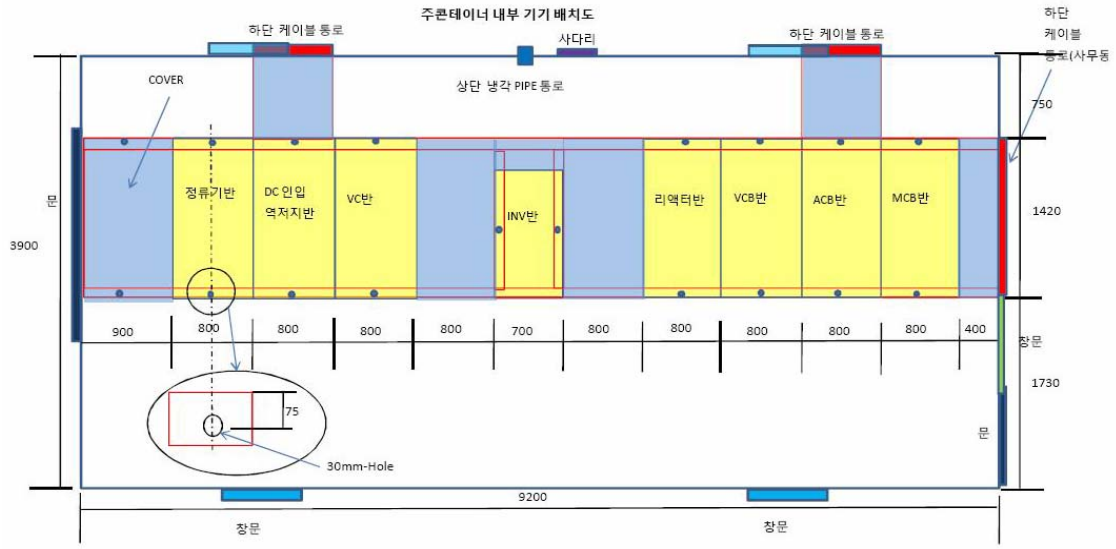


그림 3.308 주 설비실 장치배치도

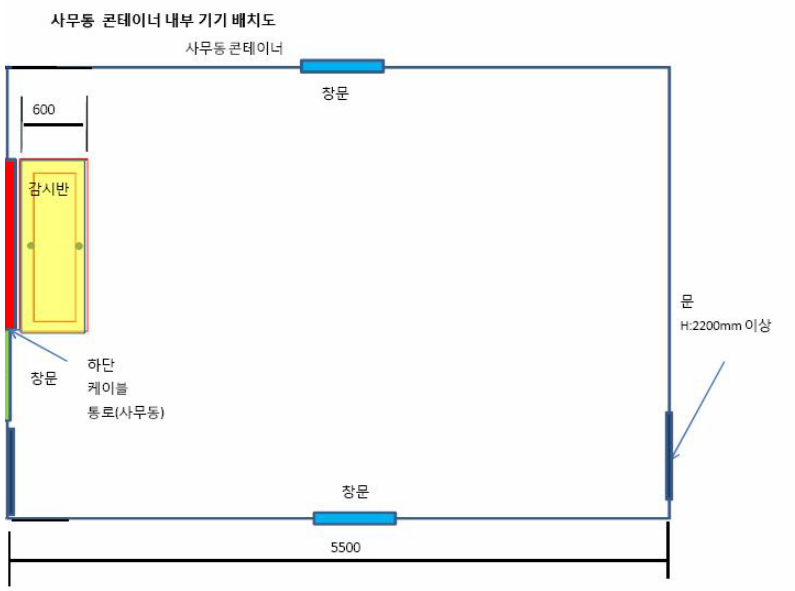


그림 3.309 제어실 장치배치도

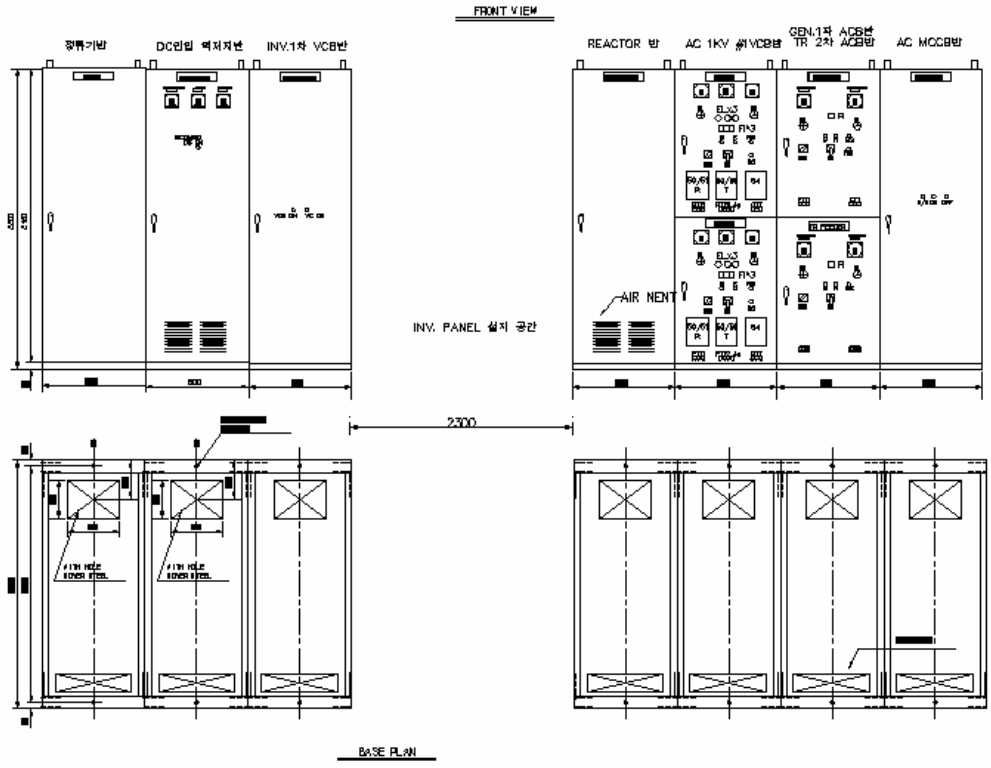


그림 3.310 주설비 배전반 전후면도

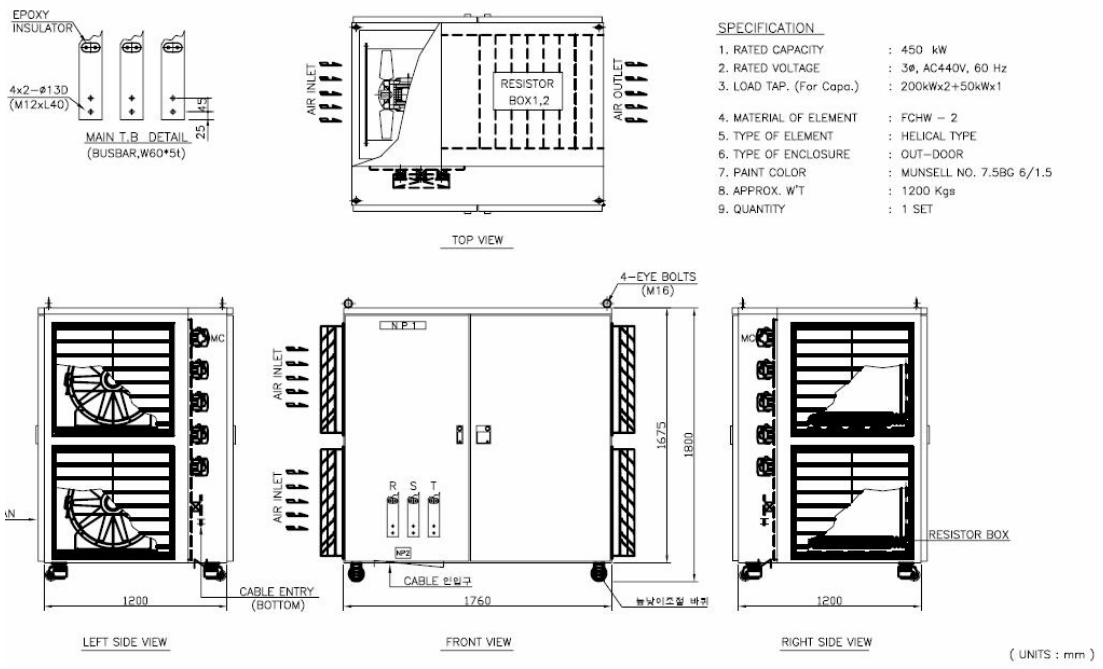


그림 3.311 부하설비 전후면도

3. 실계통 적용 시험 계획

현장에 부설한 회생용 인버터의 계통 적합성 및 신뢰성을 검토하기 위하여 실증시험을 계획하였다. 실계통 시험계획은 회생용 인버터를 포함하여 모든 설비별로 단계적인 시험계획을 검토하였다.

가. 성능 시험 계획

회생용 인버터의 실계통 시험은 기존의 노포기지 시험선로에 인버터 시스템을 신설한 형태로서, 시험시 발생할 수 있는 돌발적인 사고에 적극 대응하기 위하여 단계별 성능확인 절차와 시험절차로 구분하여 계획하였다. 상세한 성능확인/시험 항목은 다음 표 3.69와 같다.

시험 계획중 1단계는 개발한 회생용 인버터와 부산교통공사의 싸리이스터 컨버터의 성능 확인 단계이다. 특히, 부산교통공사는 사이리스터 컨버터를 사용하므로 전차선 전압 특성을 미리 검토할 필요가 있다.

또, 2단계는 부설한 시스템에 대한 성능 확인 및 신뢰성 검토 단계이다. 시험선로에 부설한 직류고속도차단기, 회생용 인버터, 부하설비 등의 유기적인 동작아 정

상적인지를 판단하기 위한 시험 단계이다. 이에 따라 회생용 인버터 가압시험, 무부하 시험 및 부하시험을 시행한다.

마지막으로 최종 단계인 3단계는 2단계를 통해 정상 동작이 확인된 상태에서 회생용 인버터 시스템의 최적 제어점을 찾고 신뢰도를 높이기 위한 단계로서, 전압변동시험과 연속동작시험이 계획되었다. 전압변동시험은 회생용 인버터의 동작여부를 판단하는 동작개시전압을 변화시키면서 해당 급전시스템에서 가장 적합한 동작개시전압을 찾는 시험이며, 연속동작시험은 회생용 인버터의 지속적인 운전으로 기기의 신뢰성을 검토하기 위한 것이다.

표 3.69 시험계획

단계	시험명	시험방법	장소
1 단계	공장시험	회생용 인버터 정상동작시험 (교류발전기/정류기 이용)	용 인 시험소
		가선전압변동에 따른 동작시험	
	컨버터 시험	무부하 상태의 사이리스터 컨버터 전기적 특성 시험	노포기지
	전동차 출력 특성 시험	전동차 견인 및 회생에 따른 전차선 전압 및 전류의 변동 특성 평가 시험 전동차 정상 운전 상태에서의 컨버터 전기적 특성 시험	
2 단계	회생용 인버터 가압시험	회생용 인버터 시험설비의 가압 시험 및 각종 개폐장치의 재폐로를 통한 성능시험	노포기지
	무부하시험	차량운전이 없는 상태에서 인버터 동작시험 (회생개시 전압 조정)	
	부하시험	시운전선에 실제 차량을 투입하여 회생용 인버터 특성시험	
3 단계	전압변동시험	가선전압의 변동/인버터 출력개시전압 변동 등의 시험	노포기지
	연속동작시험	차량 운행을 지속적으로 모의하여 인버터의 성능 시험	

나. 시험 절차

현장 적용 시험은 기술한바와 같이 부산교통공사의 노포차량기지내 시험선로에서 이루어지며, 시험선로의 개략적인 계통 구성은 아래 그림과 같다. 모든 시험은 다음과 같은 공통된 절차를 통하여 시행된다.

ⅰ. 급전구간 분리 : 기지내 급전구간 분리란 회생용 인버터를 시험하는 시험선로만 예비용 컨버터(C2)로 급전하고, 나머지 모든 선로의 급전을 차단하는 것을 의미한다. 노포기지의 선로는 그림 3.301과 같이 다수가 포설되어 있으며, 회생용 인버터의 시험을 위한 시험선로 급전은 361차단기가 공급하는 선로중 30, 40 단로기는 CLOSE 상태, 50번 단로기는 OPEN 상태로 하여 계통을 분리한 후, 별도의 차단기를 투입하여 시험선 계통을 연결하게 된다.

ⅱ. 주시험 : 주시험이란 표 3.69에 명시한 각각의 시험들을 의미한다.

ⅲ. 시험선 분리 : ⅰ)에서 분리한 시험선로외의 여타 선로를 ⅰ)에서와 반대로 단로기를 조작 하고 361 차단기를 투입하여 모든 기지 선로를 급전하는 것을 의미한다.

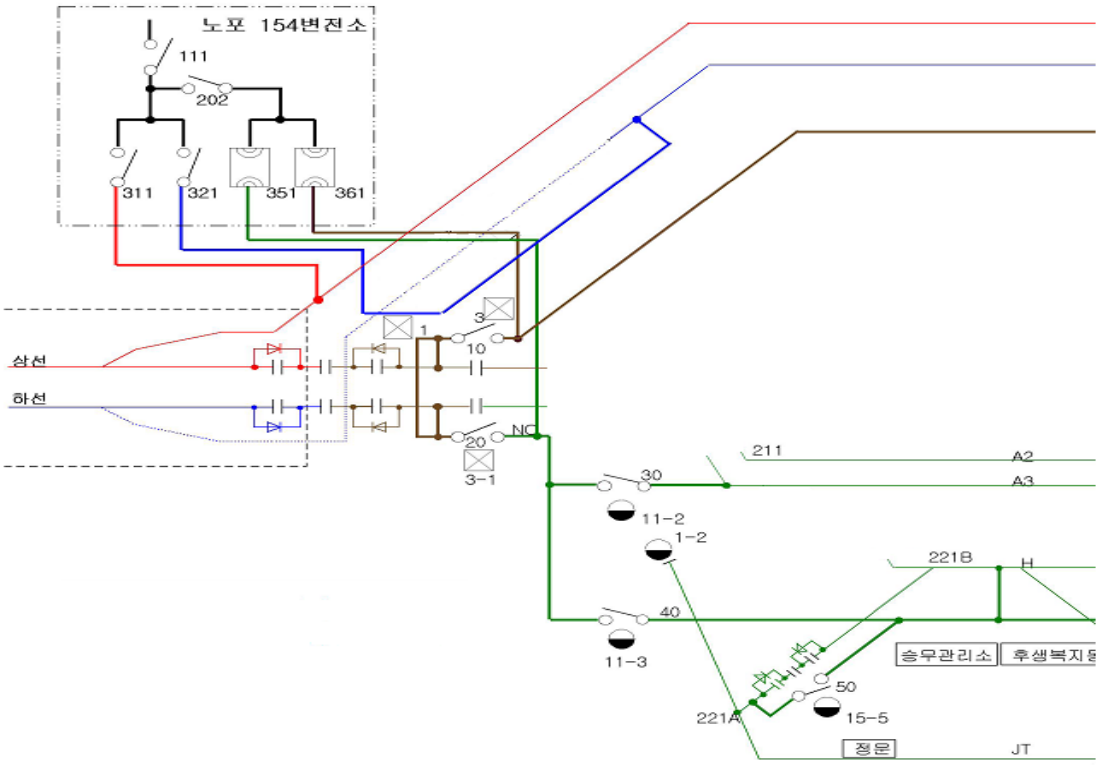


그림 3.312 노포차량기지 급전도

전체적인 시험 절차는 위와 같이 크게 3단계로 구분되며, 그 중 본 시험 절차인 ii) 주시험 단계는 다음에서 상술한다.

1) 컨버터 시험

본 시험은 개발품 '회생용 인버터'의 실계통 적용 시험을 위하여 노포변전소의 C2 컨버터의 동작 특성 분석을 위한 것으로서 그림 3.313과 같이 C2 컨버터의 입력부와 출력부에 각각 전압 및 전류 센서를 설치하여 계측한다. 시험 절차는 표 3.70과 같다.

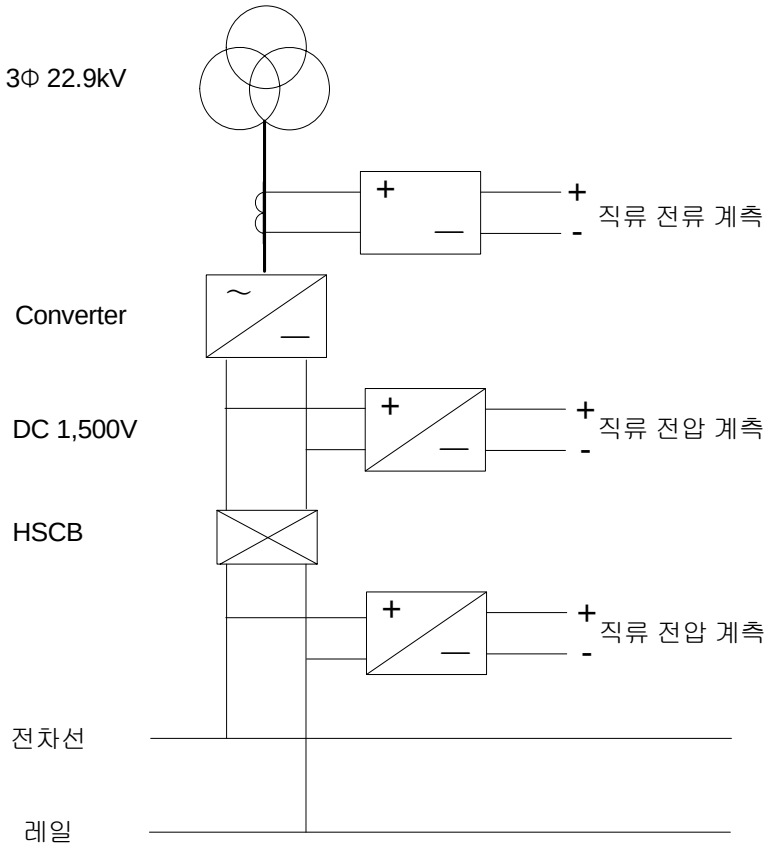


그림 3.313 측정단선도 (컨버터 시험)

표 3.70 컨버터 시험 절차

항 목	절차
① 계통 분리	시험선로의 급전을 별도로 분리
② 계측기 설치	콘버터 교/직류측 계측기 설치
③ 콘버터 투입	콘버터 직류 급전
④ 데이터 수집	투입 과도상태 및 정상상태 전압 및 전류 등 데이터 수집
⑤ 콘버터 차단	콘버터 급전 차단
⑥ 계측기 철거	계측 종료 및 기기 철거
⑦ 계통 연결	계통의 원상태 복귀

2)인버터 시험

본 시험은 회생용 인버터의 현장 설치 공사완료 후 회생인버터를 단독으로 구비한 발전기와 정류기를 이용하여 운전하며 그 특성을 파악하기 위한 시험으로서, 그림 3.314와 같은 시험 조건으로 표 3.71과 같은 절차를 통하여 시행한다.

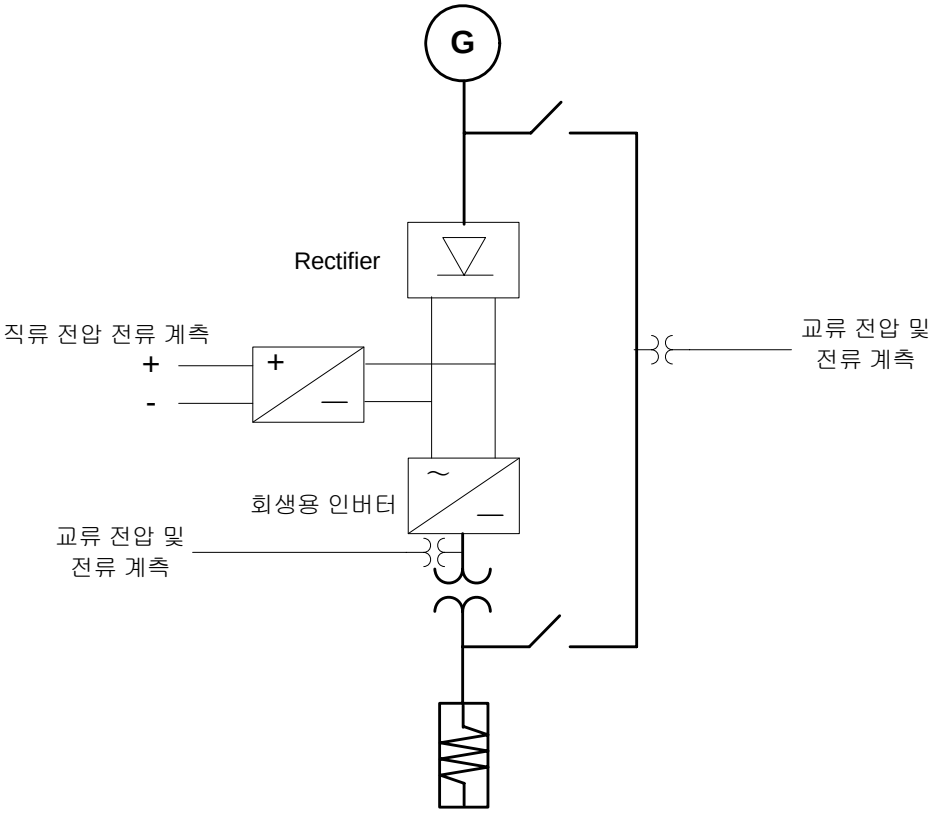


그림 3.314 측정단선도 (인버터 시험)

표 3.71 인버터 시험 절차

항 목	절 차
① 시험계통 구성	자체 발전기/정류기, 인버터를 계통으로 구성
② 계측기 설치	인버터 입/출력측에 계측기 설치
③ 가압	발전기 가동 및 정류기, 인버터 가압
④ 인버터 가동	회생운전 모드 및 능동전력필터 모드 가동
⑤ 데이터 수집	인버터 가동시 계측
⑥ 계측기 철거	계측 종료 및 기기 철거
⑦ 단전	인버터, 정류기 차단 / 발전기 정지

3) 무부하시험

회생용 인버터의 현장 설치 공사완료 후 결선된 C2 컨버터와 회생인버터의 안정적인 동작특성을 확인하기 위하여, 시험선로에 전동차의 투입 없이 무부하 상태에서 회생 인버터를 가동하며 상태를 분석하기 위한 시험으로서, 그림 3.315의 측정계획도와 같이 노포기지변전소의 컨버터(C2)로 시험선로를 급전하고, 회생용 인버터를 투입한 후에 무부하 상태의 전차선 전압을 기준으로 회생을 시도한다. 이때, 컨버터와 회생용 인버터의 특성을 분석한다. 무부하 시험의 절차는 표 3.72와 같다.

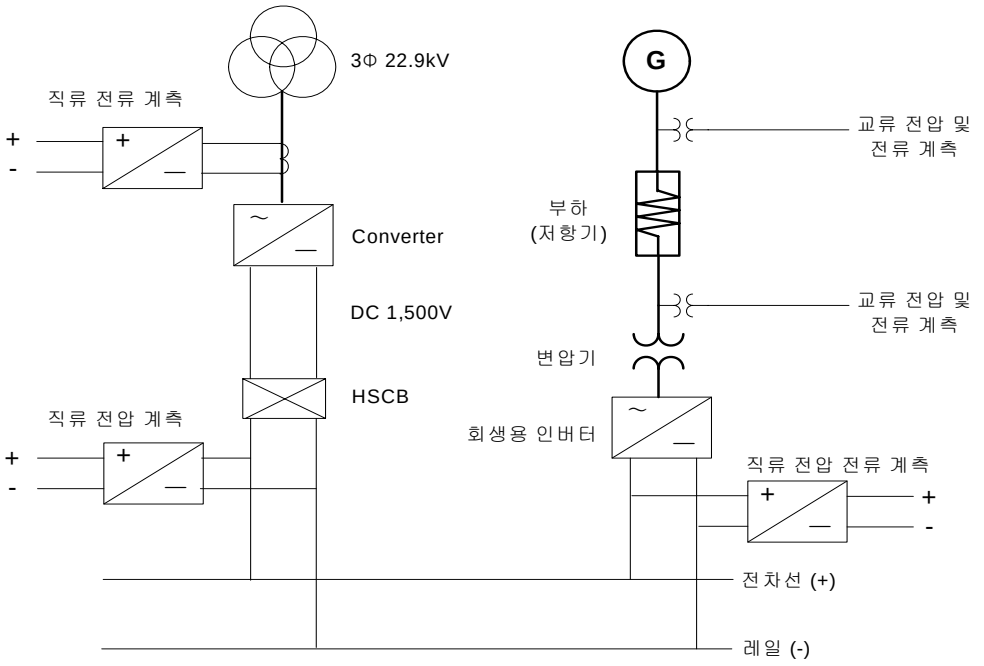


그림 3.315 측정단선도 (무부하 시험)

표 3.72 무부하 시험 절차

항 목	절 차
① 계통 분리	시험선로의 급전을 별도로 분리
② 계측기 설치	콘버터/인버터의 교/직류측 계측기 설치
③ 콘버터 투입	C2 콘버터 직류 급전
④ 계통 점검	콘버터/전차선 전압상태 확인
⑤ 인버터 가압	회생인버터 계통 투입 및 상태 점검
⑥ 인버터 회생모드 운전	전차선 전압에 대응한 회생인버터의 회생모드 운전
⑦ 데이터 수집	컨버터/인버터 측 각종 데이터 수집
⑧ 인버터 정지	인버터 운전 중지
⑨ 계측기 철거	설치한 계측기 철거
⑩ 급전 중단	콘버터(C2)의 급전 중단
⑪ 계통 복구	단로기 조작으로 기지 급전계통의 원상복귀 및 상태 파악, 시험 종료

4) 부하시험

노포기지 시험선의 컨버터(C2)와 회생인버터의 안정적인 동작특성을 확인하기 위하여, 시험선로에 전동차를 투입하여 부하 상태에서 회생 인버터를 가동하며 상태를 분석하는 부하시험은 그림 3.316의 측정계획도와 같이 노포기지변전소의 컨버터(C2)로 시험선로를 급전하고, 회생용 인버터를 투입한 후에 전동차를 시험선에 투입하여 전동차 운행중 발생하는 회생 전력을 변환하여 저항기 부하로 소모시킨다. 이때, 각종 전기량을 계측한다. 상세한 시험 절차는 표 3.73과 같다.

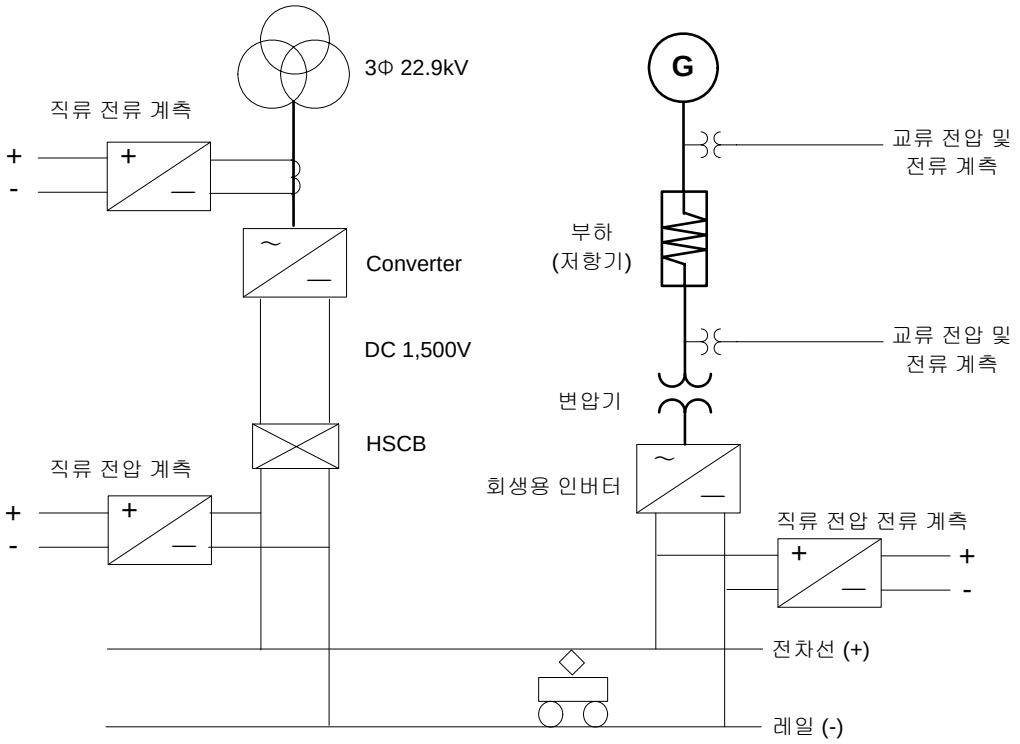


그림 3.316 측정단선도 (부하시험)

표 3.73 부하 시험 절차

항 목	절 차
① 계통 분리	시험선로의 급전을 별도로 분리
② 계측기 설치	콘버터 교/직류측 계측기 설치
③ 콘버터 투입	C2 콘버터 직류 급전
④ 계통 점검	콘버터/전차선 전압상태 확인
⑤ 인버터 가압	회생인버터 계통 투입 및 상태 점검
⑥ 전동차 투입	전동차의 시험선로 투입 및 가선 전압 확인
⑦ 전동차 운행/ 인버터 가동/ 입출력 계측	전동차 20km/h 역행 및 회생제동
	전동차 40km/h 역행 및 회생제동
	전동차 50km/h 역행 및 회생제동
	전동차 60km/h 역행 및 회생제동
⑧ 인버터 정지	인버터 운전 중지
⑨ 전동차 출차	시험선로에서 전동차를 출차 혹은 전원 cut-off

⑩ 급전 중단	콘버터(C2)의 급전 중단
⑪ 계통 복구	단로기 조작으로 기지 급전계통의 원상복귀 및 상태 파악, 시험 종료

5) 전압변동 시험

본 시험은 회생용 인버터의 동작개시 전압을 변동시켜가며, 인버터의 동작특성을 검토하여 해당 계통에서 최적의 개시전압을 찾기 위한 시험이다. 시험은 그림 3.316의 부하시험과 동일한 계통 조건에서, 시행하며, 상세 절차는 다음 표 3.74와 같다. 대부분의 단계는 부하시험과 동일 하지만 전동차가 선로 최고 속도로 운행할 때 회생용 인버터의 동작개시전압을 가선전압이 허용되는 범위 내에서 단계별로 변경하면서 인버터의 동작 특성을 검토한다.

표 3.74 전압변동 시험 절차

항 목	절 차
① 계통 분리	시험선로의 급전을 별도로 분리
② 계측기 설치	콘버터 교/직류측 계측기 설치
③ 콘버터 투입	C2 콘버터 직류 급전
④ 계통 점검	콘버터/전차선 전압상태 확인
⑤ 인버터 가압	회생인버터 계통 투입 및 상태 점검
⑥ 전동차 투입	전동차의 시험선로 투입 및 가선 전압 확인
⑦ 전동차 운행/ 인버터 가동 입출력 계측	전동차 역행 및 회생제동 운행 지속, 인버터 회생모드 운전 및 계측
⑧ 동작개시전압 변경	회생인버터의 동작개시전압 변경 및 ⑦ 반복
	가선전압의 허용 범위 내에서 ⑧ 반복
⑨ 인버터 정지	인버터 운전 중지
⑩ 전동차 출차	시험선로에서 전동차를 출차 혹은 전원 cut-off

⑪ 급전 중단	콘버터(C2)의 급전 중단
⑫ 계통 복구	단로기 조작으로 기지 급전계통의 원상복귀 및 상태 파악, 시험 종료

6) 연속동작 시험

본 시험은 노포기지 시험선 컨버터(C2)의 급전과 전동차의 시험선로 운행중 회생인버터의 회생모드 운전을 시행한다. 즉, 회생용 인버터의 신뢰성을 판단하기 위하여 전동차의 지속적인 시험선로 운행으로 발생되는 회생전력을 주기적으로 재생하는 반복 시험을 수행한다.

시험은 그림 3.316의 부하시험과 동일한 계통 조건에서, 전동차의 반복적인 시험선로 주행 중 인버터의 연속 출력 특성을 계측/분석한다. 상세한 시험 절차는 표 3.75와 같다.

표 3.75 연속동작 시험 절차

항 목	절 차
① 계통 분리	시험선로의 급전을 별도로 분리
② 계측기 설치	콘버터 교/직류측 계측기 설치
③ 콘버터 투입	C2 콘버터 직류 급전
④ 계통 점검	콘버터/전차선 전압상태 확인
⑤ 인버터 가압	회생인버터 계통 투입 및 상태 점검
⑥ 전동차 투입	전동차의 시험선로 투입 및 가선 전압 확인
⑦ 전동차 운행/ 인버터 가동 입출력 계측	전동차 역행 및 회생제동 운행 지속, 인버터 회생모드 운전 및 계측
⑧ 인버터 정지	인버터 운전 중지
⑨ 전동차 출차	시험선로에서 전동차를 출차 혹은 전원 cut-off

⑩ 급전 중단	콘버터(C2)의 급전 중단
⑪ 계통 복구	단로기 조작으로 기지 급전계통의 원상복귀 및 상태 파악, 시험 종료

4. 실계통 시험결과

기술한 바와 같은 시험 항목과 제시한 각 시험의 절차에 따라 수행한 시험결과를 기술한다. 먼저, 표 3.69의 시험 항목중 1단계 및 2단계의 무부하 시험은 노포기지에 부설한 회생용 인버터 시스템의 정상동작을 확인하는 단계로서 직접적인 측정데이터의 기록은 하지 않고 계통의 상태만을 확인하는 절차를 밟았다. 따라서 다음에서는 부하시험, 전압변동시험 및 연속동작 시험에 대한 결과를 상술하기로 한다. 단, 회생모드 운전을 위해 부산교통공사의 더블컨버터 특성을 먼저 살펴보기로 한다.

가. 사이리스터 컨버터 특성 검토

개발한 회생용 인버터의 현장 적용 시험은 부산교통공사의 노포차량기지에서 시행되며, 현장시험의 원활한 진행을 위해서 현장시험 실시 이전에 부산교통공사의 더블컨버터의 동작특성을 검토하기 위하여 동래변전분소에서 계측을 실시하였다.

더블컨버터의 계측은 2시간 동안 더블컨버터 출력측에 전압 및 전류 센서를 그림 3.313과 같이 설치하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 2시간의 측정 결과는 더블컨버터 출력측을 기준으로 양의 전류일 때의 컨버터 특성과 음의 전류일 때의 인버터 특성으로 나누어 정리하였다. 먼저, 컨버터의 특성의 전압 및 전류 파형은 그림 3.317과 같다. 일정 시격의 전동차 운행 특성으로 전류 크기는 반복적인 형태를 보이며, 그림의 각 전압 전류는 연속적인 시간에 따른 값이 아니고 더블컨버터의 출력 전류가 양의 값을 보일 때의 순차적인 값들이다. 이때의 전압 및 전류의 평균, 최대, 최소값은 표 3.76과 같다. 더블컨버터에서 견인 전력을 공급할 때의 전압은 평균 1,615[V]이며, 부산교통공사에서는 1,600[V]로 가선전압을 유지하고 있음을

알 수 있다. 또한, 공급 전력은 평균 1MW에서 최대 8MW로 측정되었다.

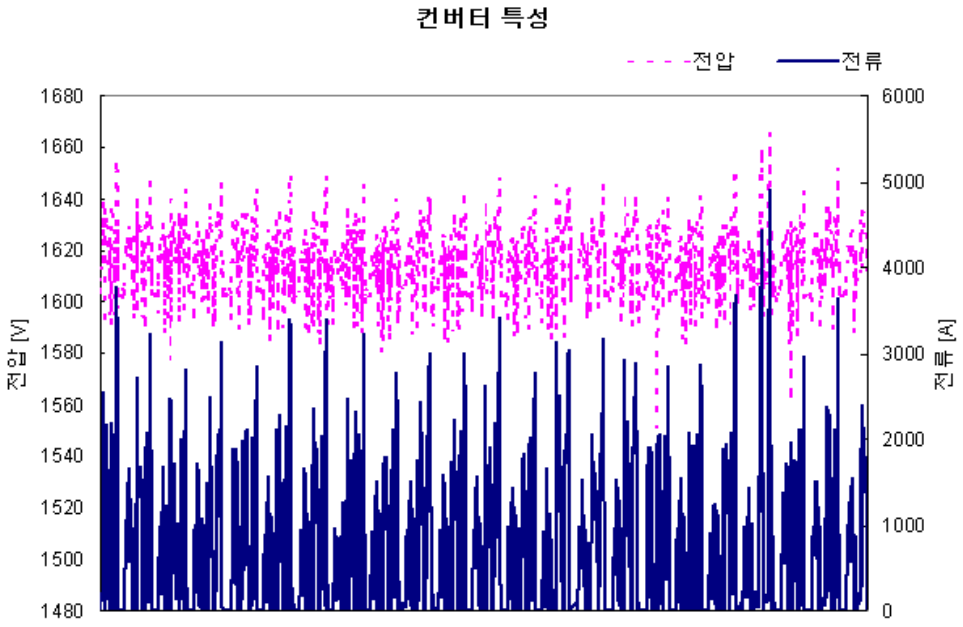


그림 3.317 컨버터 전압 전류 특성

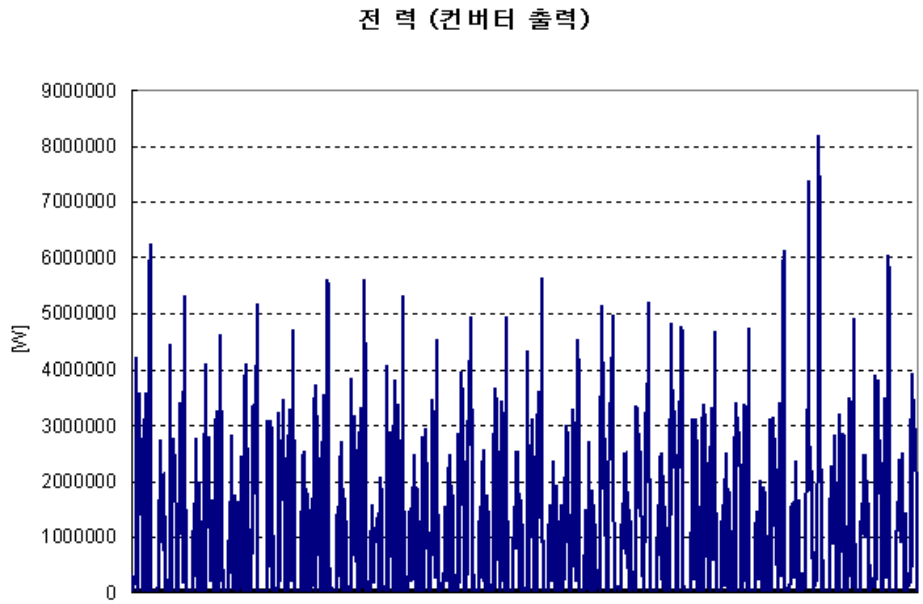


그림 3.318 컨버터 출력 특성

표 3.76 컨버터 측정 결과

구 분	전압[V]	전류[A]	전력[W]
평 균	1,615.87	710	1,155,593
최 대	1,665.59	4,918	8,210,053
최 소	1,550.95	0	40

부산교통공사의 더블 컨버터중 회생전력을 상위 계통으로 전달하는 인버터의 특성은 다음 그림 3.319 및 3.320과 같다. 더블 컨버터중 인버터는 전동차의 회생전력으로 직류급전모선에서 발생한 전력을 회수하게 된다. 그림 3.319도 연속적인 측정값중 급전모선에서 음의 전류가 발생한 경우의 순차적 데이터를 도식화한 것이다. 그림 3.319에서 보듯이 전류는 모두 음의 값을 가지고 있으며, 이것은 인버터를 통하여 상위 계통으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 이때에도 더블 컨버터는 전압제어를 하기 때문에 평균 전압 1,604[V]를 유지하게 된다. 사이리스터 위상제어 더블 컨버터의 특성상 인버터 동작시에 상승된 모선전압을 낮추려 제어하기 때문에 견인전력을 공급할 때 보다 더 낮은 평균전압을 보임을 알 수 있다.

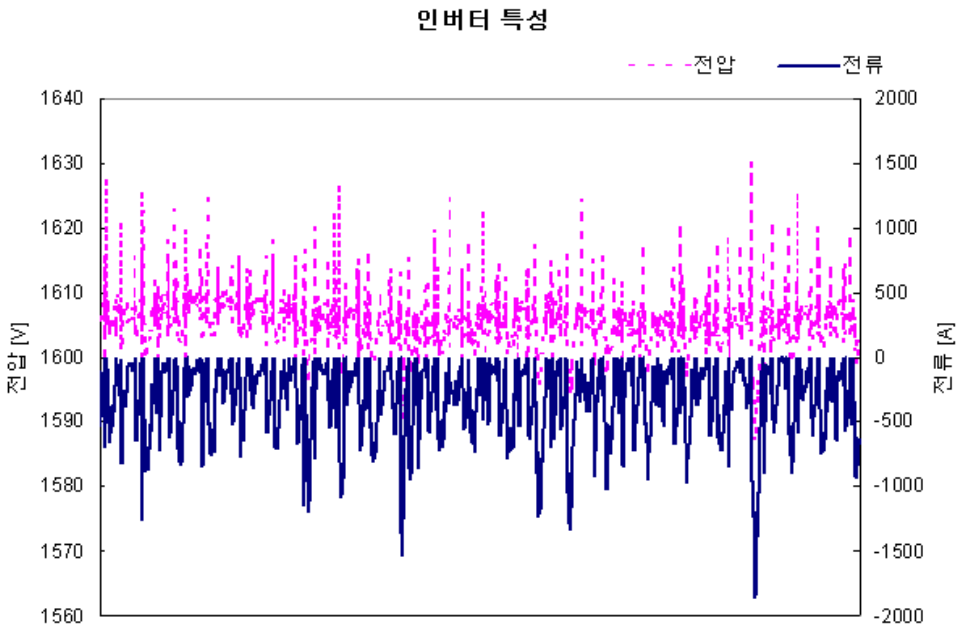


그림 3.319 인버터 전압 전류 특성

표 3.77 인버터 측정 결과

구 분	전압[V]	전류[A]	전력[W]
평 균	1604.98	-324.8	-519,348
최 대	1630.23	0	-40
최 소	1587.05	-1861.4	-29,47,204

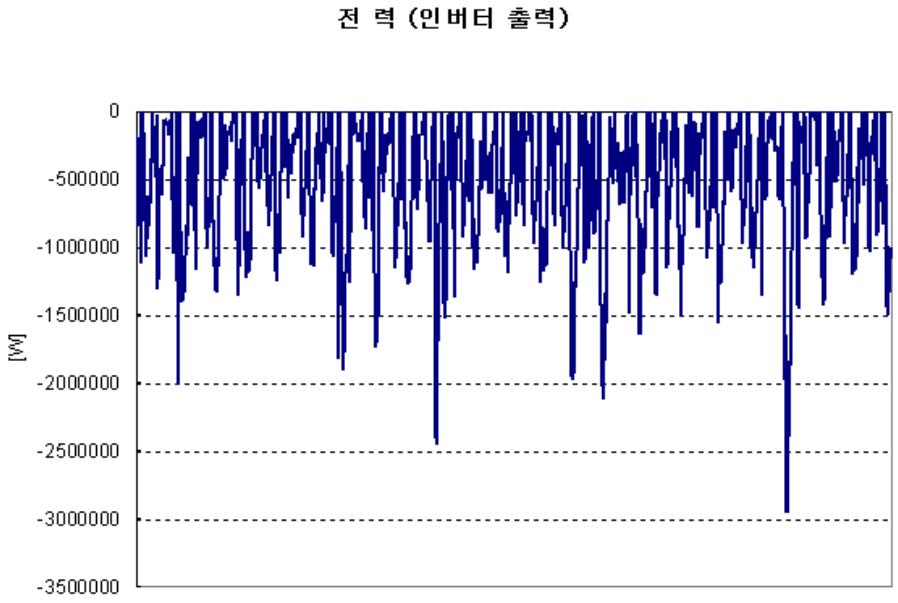


그림 3.320 컨버터 출력 특성

나. 부하 시험

부하시험은 노포기지 현장에 부설한 회생용 인버터 현장적용 설비 일체에 대한 검증을 위한 시험이다. 컨버터, 인버터 등 개별 설비에 대한 가압시험과 시스템의 무부하 시험 결과 정상임 확인 한 후에 시행된다. 본 연구의 노포기지 현장 적용 시험에서도 무부하 가압 결과 급전계통 및 회생용 인버터 모두 정상적으로 동작함을 확인하여 실제 전동차 운행을 고려한 부하시험을 그림 3.316과 같이 수행하였다. 축소형 설비와 자체 시험설비의 구축으로 회생용 인버터의 시험은 충분이 수행하였지만 실제 전차선에 연결된 전동차 운행에 대한 시험은 개발 후 처음이기 때

문에 전동차의 최고 속도를 점진적으로 늘려가면서 시험을 수행하였다. 즉, 전동차 속도를 30km/h, 40km/h 및 50km/h로 증속하며 회생용 인버터의 동작을 살펴보았다.

먼저, 전동차의 속도를 30km/h로 증속한 후에 전기제동을 사용하여 회생전력을 발생시킨 후 가설한 회생용 인버터를 동작시킨 결과는 다음 그림 3.310과 같다. 그림 3.321은 상단부터 회생용 인버터의 입력부 전압, 전류, 전력을 차례로 보여주며, 두개의 그래프 중 아래 그림은 위 그래프를 확대한 것이다. 이때, 회생용 인버터의 동작개시 전압은 1,620[V] ~ 1,670[V]로 설정하였다. 결과 그림에서 보듯이 회생용 인버터는 설정한 전압 대역에서 운전하며, 운전시 차량에서 발생한 회생전력이 인버터를 통해 유입되고 있음을 알 수 있다. 또한, 전동차가 30km/h 속도 대역에서 3번의 회생 제동을 사용했음을 알 수 있다.

그림 3.322는 전동차의 속도를 40km/h로 증속한 후에 전기제동을 사용하여 회생전력을 발생시킨 후 가설한 회생용 인버터를 동작시킨 결과이다. 30km/h 시험 때와 마찬가지로 동작개시전압을 설정하였고, 그림과 같이 인버터의 정상동작을 확인하였다. 또, 그림 3.323은 50km/h 시험 결과를 보인 것이다.

한편, 전동차에서 발생한 회생 전력은 회새용 인버터를 통하여 유입되어, 고압배전 부하에서 소비되거나 상위 계통으로 전달되게 되지만, 본 연구의 실계통 시험에서는 저항 부하를 사용하여 회생용 인버터에서 출력된 전력을 소비하게 된다. 그림 3.324는 회생용 인버터의 출력측에 설치한 부하설비에서 소비한 전력을 나타낸 것이다. 회생용 인버터와 상관없이 항상 저항 부하에 전력을 공급하는 발전기와 동작 후에는 발전기와 부하를 분담하게 되는 인버터 출력을 비교한 그래프이다. 그림에서 보듯이 총 40kW 정도 크기의 부하에 발전기가 부하에 전력을 공급하다 선로에서 발생한 회생전력으로 회생용 인버터가 동작하여 부하를 분담하는 형태를 나타낸다.

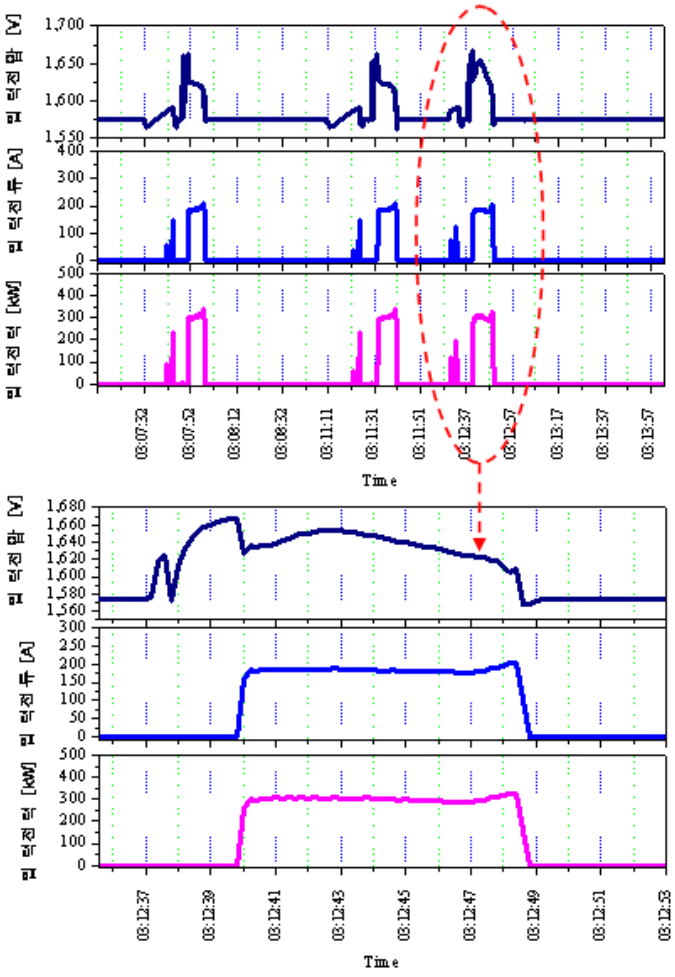


그림 3.321 부하시험 결과 (30km/h)

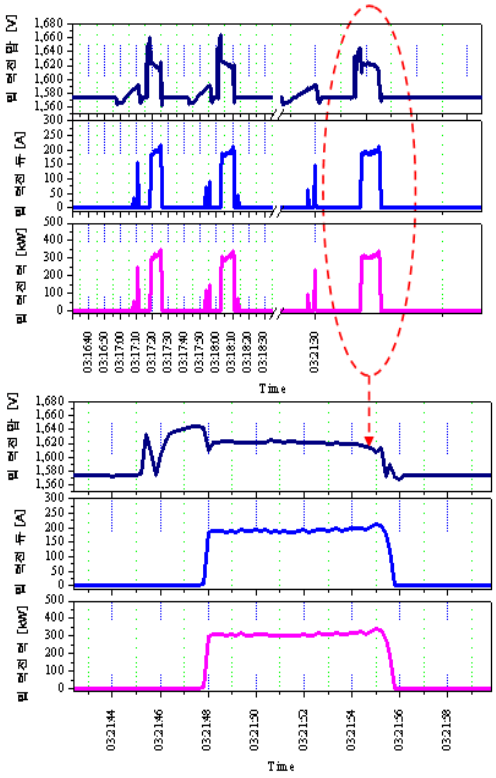


그림 3.322 부하시험 결과 (40km/h)

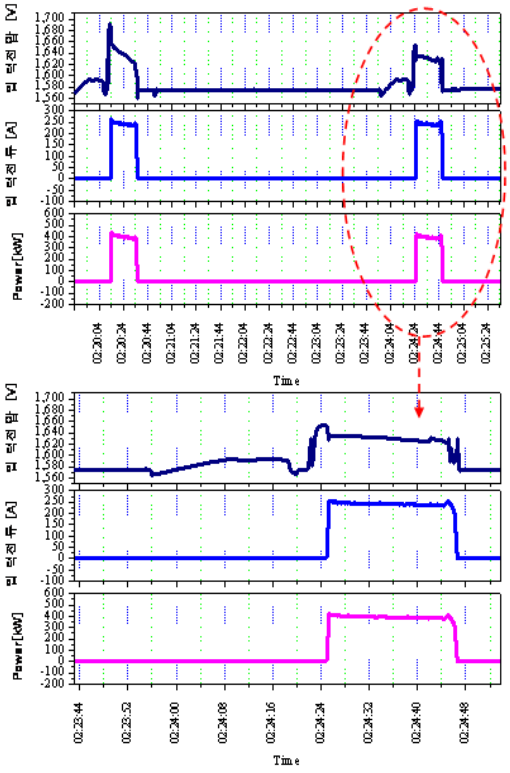


그림 3.323 부하시험 결과 (50km/h)

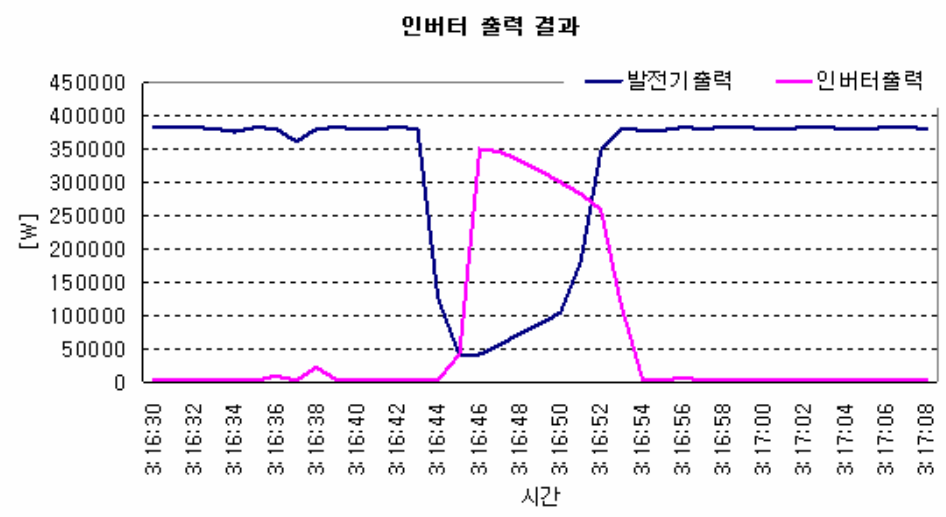


그림 3.324 발전기/인버터 출력 비교

다. 전압변동 시험

회생전력을 따로 흡수하는 설비가 없는 급전시스템에서는 회생전력이 발생하면 전차선의 전압이 상승한다. 이 전압의 상승을 모니터링해서 회생용 인버터는 동작하게 된다. 즉, 회생용 인버터는 전차선 전압을 모니터링하고 모니터링된 전압이 미리 설정한 동작개시 전압을 넘게 되면 회생전력 발생으로 판단하여 동작하게 된다. 이 동작개시 전압의 설정은 인버터가 설치된 해당 계통에 따라 다르게 적용되어야 하며, 실측 데이터를 기반으로 설정되어야 한다.

노포기지에 부설한 회생용 인버터의 동작을 위한 전압범위를 설정하기 위하여 전압변동 시험을 수행하였다. 시험은 동일한 전동차 운행 조건에서 회생용 인버터의 동작개시 전압을 변경하며 반복된 측정을 한 후 각각의 결과를 비교하여 최적의 전압 설정을 찾는 것이다. 전압 변동시험을 위해 전동차는 50km/h의 속력에서 전기제동을 사용하여 정지하고 다시 출발하는 형태로 운행하였다.

그림 3.325는 회생용 인버터의 동작개시 전압이 1,590[V]일 때 회생인버터 입력부의 전압과 전류를 보여준다. 그림에서 적색의 점선이 보여 주듯이 동작개시 전압을 전차선의 무부하 전압 1,600[V]보다 낮은 1,590[V]로 설정하였기 때문에 전동차는 회생제동을 하지 않았음에도 회생용 인버터는 동작을 하였다. 따라서 회생용 인버터의 올바른 동작을 위해서는 동작개시 전압의 조정이 필요하다.

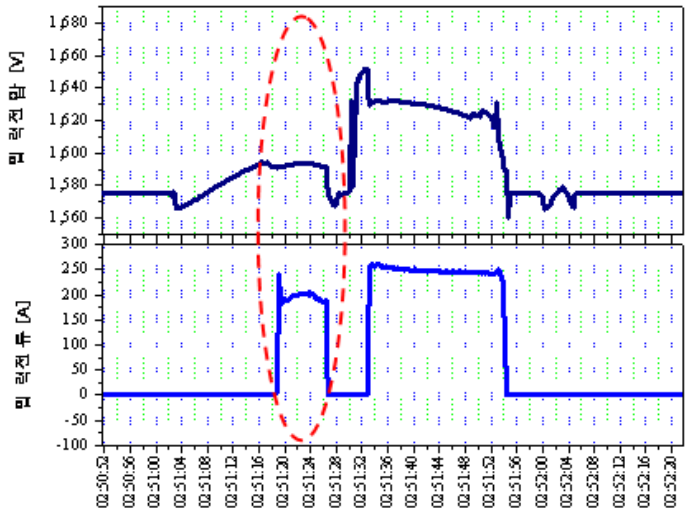


그림 3.325 인버터 출력(동작개시 전압 1,590V)

전차선의 무부하 전압 1,600[V]보다 높은 1,640[V]로 조정한 후에 전동차 운행을 재 실시하여 회생용 인버터의 가동 결과가 그림 3.326이다. 앞의 그림 3.325의 결과와는 달리 붉은 점선 부분에서 전차선 전압은 그림 3.325와 동일한 형태를 보이지만 회생용 인버터는 동작을 하지 않았음을 보여준다. 동작개시 전압의 변경으로 회생용 인버터의 출력량은 앞서의 결과보다 줄었지만 전동차가 회생하지 않을 때는 회생용 인버터도 동작하지 않도록 적절히 설정되었음을 알 수 있다.

이상의 시험 결과는 동작개시 전압의 설정이 회생용 인버터의 동작을 설치한 계통의 환경에 적정하도록 설정할 수 있음을 알 수 있었으며, 제시한 시험 결과는 동작개시 전압에 따른 회생용 인버터의 동작을 극명하게 보이도록 동작개시 전압의 차를 50[V]로 주어 비교 하였다. 그러나 상업운전을 목적으로 실제 계통에 적용할 때에는 더 민감한 동작개시 전압의 설정이 필요할 것이다.

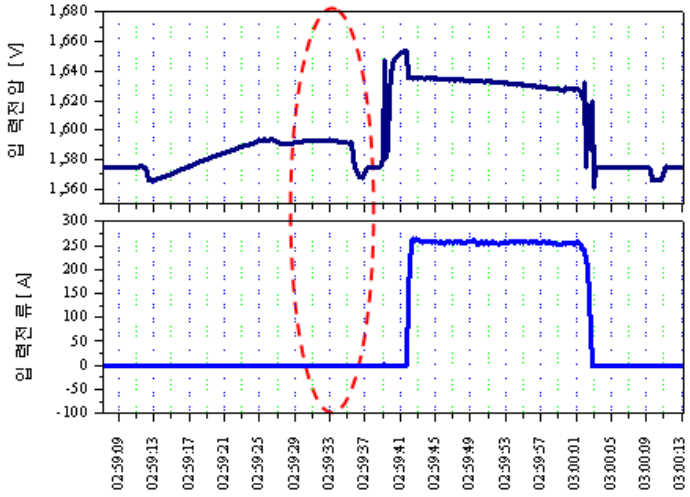


그림 3.326 인버터 출력(동작개시 전압 1,640V)

라. 연속동작 시험

현장에 부설한 각종 설비의 개별 성능확인, 무부하시험 및 부하시험을 통한 시스템 성능확인 및 회생용 인버터의 최적 설정을 위한 전압변동 시험의 적정성을 확인한 후에는 연속동작 시험을 수행하였다. 본 시험은 실계통에 적용한 회생용 인버터의 신뢰성 검증을 위하여 연속된 전동차 운행 조건에서 회생용 인버터의 운전

상태를 검토하기 위한 것이다. 즉, 부하시험과 전압변동 시험으로 회생용 인버터의 설정을 확정한 후 2시간 이상의 지속적인 계통 및 인버터의 운전을 모의하는 것이다.

그림 3.327은 전체 시험 시간동안에 회생용 인버터 입력부에서 발생한 전압, 전류 및 전력을 보인 것이고, 그림 3.328은 전체 시간중 회생용 인버터가 동작한 일부분을 확대하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전 시험시간 동안 급전계통 및 회생용 인버터가 문제없이 동작한 결과를 볼 수 있다.

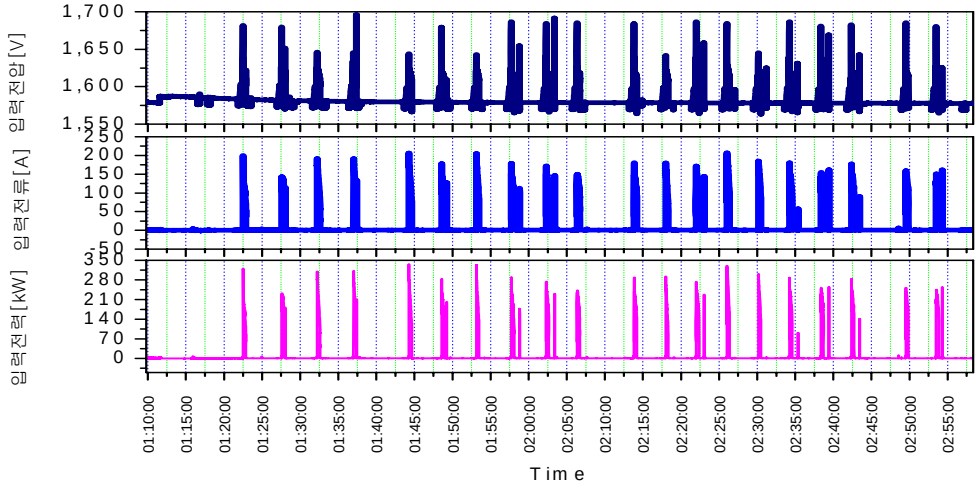


그림 3.327 연속동작 시험 결과

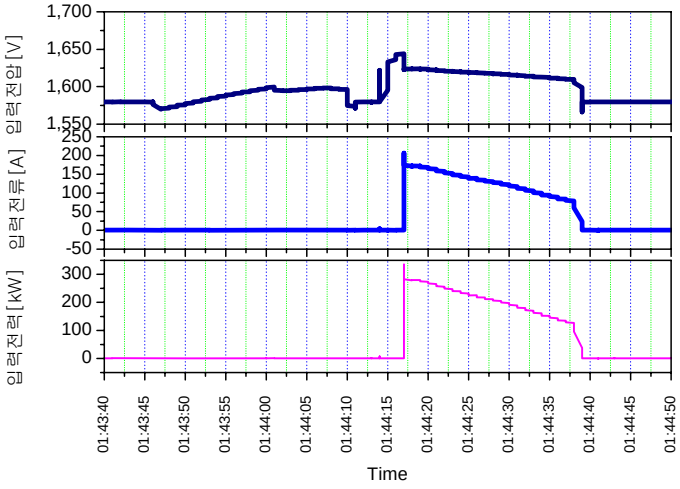


그림 3.328 연속동작 시험 결과 일부분

마. 결과 검토

회생용 인버터의 실계통 적용 시험은 부산교통공사의 노포차량기지내 시험선로에서 수행하였으며, 현장에 설비한 회생용 인버터 시스템을 구성하는 각 설비별 성능확인, 시스템 성능 확인 및 신뢰성 시험 등을 수행하였다. 시험 결과는 다음과 같다.

○ 부산교통공사 노포변전소에 회생용 인버터를 부설하고 현장시험을 수행

○ 노포기지의 C2 컨버터, 신설한 직류고속도차단기, 회생용 인버터, 부하설비 등의 개별 성능확인 시험을 수행하여 정상동작 확인

○ 무부하 시험부터 부하 시험까지 단계별로 회생용 인버터의 동작상태 검증

○ 전동차 운행에 따라 발생한 회생전력으로 회생용 인버터가 동작하여 전력이 회수됨을 확인.

○ 회생용 인버터의 최적 동작개시 전압 설정을 위하여 다양한 조건으로 시험 수행

○ 연속동작시험을 통하여 회생용 인버터가 계통 및 차량에 문제없이 동작되고 있음을 확인

이상과 같은 결과를 얻을 수 있었던 현장 적용 시험을 계기로 향후 실제 직류도시철도의 변전소에 장기간 설치하여 더욱 유용한 결과를 얻도록 할 예정이다.

제 4 장 연구개발목표 달성도

표 4.1은 1-5차년도 연구개발 목표에 대한 달성도를 나타내고 있다.

표 4.1 연구개발목표 달성도

목 표	내 용	달성도 (%)
기초기술 개발 및 전력변환기 기본 모델 개발	○전철급전시스템 분석(Ⅰ) ○전력 회생률 조사·분석(Ⅰ) ○국내외 에너지변환 및 회생장치 제품특성 조사 분석 ○전철시스템 에너지 재사용 연구 - PWM 컨버터 제어방식 고조파 영향분석 - 전력시뮬레이션 능동전력필터 용량산정 ○전력 변환 회로 검토 ○인버터 제어기기 개발 - 회생용 인버터 시스템 개념설계	100
축소형 회생인버터 개발	○ 전철급전시스템 특성 분석(II) ○ 전력 회생률 조사·분석(Ⅱ) ○ 회생전력 시뮬레이션 ○ 직류전력 회생 인터페이스 연구 ○ 직류전력 회생 알고리즘 개발 ○ 회생용 인버터 설계 및 최적화(3.7KW) ○ 인버터 제어기술 개발 ○ 회생용 전력변환 시험 장치 제작	100
회생인버터 시작품제작 및 주변장치 설계	○에너지회생 시스템엔지니어링 ○회생인버터 인터페이스 설계 ○급전계통연계시스템 설계 ○전력품질 평가 및 향상 ○능동전력필터 제어알고리즘 구현 ○1.5MVA용량 회생인버터 시작품 제작 ○회생인버터 주변장치 설계 - 입·출력 필터 - 계통연계변압기	100
회생인버터 성능평가	○에너지회생 시스템엔지니어링 ○급전계통 보호장치 설계 ○전력품질 평가 및 향상 ○회생인버터와 능동전력필터 통합제어알고리즘 구현 ○회생인버터 주변장치 제작 ○회생인버터 시작품 성능시험	100

실계통 적용 및 신뢰성평가	○에너지회생 시스템엔지니어링 ○회생인버터 실계통 부설 ○회생인버터 통합제어기능평가 ○회생전력 품질평가 및 급전전력 품질평가 ○회생인버터 시스템 신뢰성평가 ○회생인버터 표준사양 및 운영안 제시 ○회생인버터 경제적 효과 분석 및 제시	100
회생인버터 시작품 제작	·회생인버터 시스템 시작품 제작(750KVA 1기 제작)완료 ·회생인버터 및 인버터반 신뢰성시험을 위한 부하시험(1500V) 시설 구축	100
회생인버터 시스템 성능시험	·회생인버터 1.5MVA(750KVA 2기) 연계 구성 ·시작품 부하연동 및 성능시험 ·공인기관 품질성능 시험 실시방안 ·5차년도 시제품 제작을 위한 신뢰성 확보를 통해 필드테스트 적용방안	90

가. 기술적 기여도

○ 국내외 전기철도시스템에 보급된 능동전력필터에 대한 기술을 파악하였고, 일본과 스웨덴에 설치된 사이리스터제어 회생인버터의 제어기술과 시제품 사양을 조사함으로서 선진국의 회생인버터 기술수준 및 현황을 파악하였다.

○ 축소형 회생인버터의 고품질의 회생전력을 생산하기 위한 회생전력 흡수기술과 능동전력필터 제어알고리즘을 개발하였다.

○ 회생인버터를 급전계통에 설치하고 시험하는데 필요한 직류 급전시스템의 급전 및 보호설비에 대한 기술을 파악하였다.

○ 회생인버터를 플라이휠과 같은 에너지 저장 매체로 연결한 경우, 급전전압의 안정성과 전력품질을 높일 수 있고 회생에너지를 보다 효율적으로 활용할 수 있다.

○ 직류전력을 일정한 3상 교류전력으로 변환시키고 22.9kV 계통에 연계되는 대용량 IGBT 인버터는 태양열 및 풍력발전 시스템에도 적용되고 있는 핵심기술이므로 타 산업 분야로의 이전이 가능하며 국내 대용량 전력변환기기의 기술수준을

높이는 계기가 될 것이다.

나. 경제・산업적 기여도

○ 서울 7호선 4개 변전소에 회생인버터 설치 시, 년간 회생전력량은 6,570,000kWh/年, 년간 약 4.59억원의 회생전력활용기대(※서울특별시지하철건설본부 “도시철도 에너지사용 설비진단_용역보고서)

○ 전철시스템 20~25% 이상의 에너지 절약, 에너지 회생전력 재활용을 통해 20% 손실저감효과

○ 에너지 회생장치의 자체 기술 확보로 해외 선진기술 의존도를 탈피하고, 1대당 약 5-7억원의 제작비용이 필요한 대용량 회생용인버터의 수입대체 효과기대

○ 전철시스템 20~25% 이상의 에너지 절약, 에너지 회생전력 재활용을 통해 20% 손실저감효과

○ 에너지 회생장치의 자체 기술 확보로 해외 선진기술 의존도를 탈피하고, 1대당 약 5-7억원의 제작비용이 필요한 대용량 회생용인버터의 수입대체 효과기대

○ 능동전력필터기능에 의한 고조파 손실 저감과 고역률 구현으로 소비전력요금을 줄일 수 있다. ※ 기준역률 1% 미만시에 1% 전력요금을 가산하는 역율요금제도시행중

○ 최근에는 일본 Hitachi사에서 IGBT를 사용한 회생용 인버터를 개발하였고 국내시장 진출을 노리고 있어 능동전력필터 기능을 갖춘 회생용인버터 개발로 기술적 우의를 갖고 경제적 손실을 줄일 수 있음

다. 사회·문화적 기여도

○ 세계적으로 환경에 대한 관심과 대책에 대한 중요성이 절실한 현 시점에서 에너지 재사용을 확산시키는 사회적 분위기 조성한다.

○ 에너지 회생장치 분야에 핵심 및 기반 기술을 창출할 수 있으며, 에너지 사용의 억제 및 재활용으로 국가의 경쟁력을 강화한다.

○ 세계적인 전력제어기술을 국산화함으로써 대용량 전력변환기기의 선진화 및 기술경쟁력을 확보할 수 있다.

○ 에너지 재사용으로 인해 에너지활용도가 높아져, 교통약자들에게 보다 저렴한 요금으로 고품질의 교통 서비스를 제공할 수 있고 대중교통의 활성화에 크게 이바지 할 것으로 기대된다.

○ 국가적으로 막대한 에너지 비용의 낭비를 막을 수 있을 뿐만 아니라, 지하철 운영비용의 절감이 지하철 이용 승객 안전과 편의 시설의 투자로 이어져 서비스의 개선효과를 기대된다.

○ 지하철 배전설비의 전력품질을 개선하고 신뢰성을 증가시켜, 국가 중요 시설인 전력계통의 안정화에 기여한다.

○ 환경친화적 전철시스템 구현

- 제동슈의 교체주기를 연장하여 제동슈 마모에 따른 분진발생 억제 효과로 친환경적 지하철환경을 기대할 수 있음.

○ 철도시스템의 안전성 향상

- 전기제동의 사용비율을 높일 수 있기 때문에 전동차가 정차 시에 발생되는 미끄러짐 현상을 줄여 승객의 승차감을 향상시킬 수 있으며, 정밀한 정위치 정

차를 가능하도록 하여 스크린도어의 오동작을 줄임.

○ 에너지 효율성 향상 전철시스템 구현

- 고조파 저감 및 역률개선으로 전기철도의 고효율화
- 지하구간 냉방설비의 용량 및 가동률을 낮춤

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

세계적으로 한정된 에너지 자원의 활용 및 환경에 대한 관심이 지속적으로 높아져, 환경오염 및 파괴에 대한 대책의 중요성이 절실히 요구되어 국가 간의 정치적인 현안으로 거론되는 현 시점에서, 에너지의 효율적인 사용 및 재활용은 미래의 국가 경쟁력으로 이어나갈 수 있다.

전기에너지는 청정에너지이나 주로 다른 1차 연료의 가공을 통하여 생성되는 에너지원으로서 전기에너지의 생성과정에서 화석연료 등에 사용 및 환경오염을 발생시킨다. 각종 산업기기의 발달로 소비전력량은 대폭 상승하고 있으며 안정된 전력공급을 위한 설비투자에도 한계가 오고 있어 과거에 생각할 수 없었던 전기에너지의 수입이 이루어지는 국가가 있다.

그러므로 전기에너지의 유효한 활용과 재생은 중요한 사항이 아닐 수 없다. 전동차는 감속 운행 시에는 전동기 특성 상 회생 제동이 되어 많은 양의 전력을 발생시키면서 감속을 하게 된다. 이 전력은 가속 시에 투입된 에너지가 운동에너지로 바뀌고 감속 및 정지 시 운동에너지가 전기에너지로 바뀌게 되어 발생한 것으로 회생 전력이라 한다.

회생 제동으로 발생하는 회생 전력은 계통에서 회수하여 활용이 가능한 잉여 전력이고 이를 계통에서 활용함으로서 직류 변전소의 전력 부담을 줄일 수 있어 많은 이점이 있다. 회생에너지 활용으로 직류 변전소 자체의 에너지 효율, 유지 보수 비용, 환경, 제동 효율 등에 많은 장점을 가진다. 본 과제를 통해 개발된 전력변환 장치의 경우 별도의 장치를 추가하지 않고 전철 분야가 아닌 다른 산업 분야에 적용할 수 있다.

▪ 회생에너지 전원회생 시스템

: 직류 전철 시스템, 전기 자동차 및 하이브리드 자동차

- 전기자동차의 전동기를 회생 제동하게 되면 지하철 시스템과 동일하게 회생 전력이 발생하므로 본 과제에서 제안한 전력제어 알고리즘을 적용할 수 있다. 전기자동차에서 회생 제동을 통한 에너지 회수 및 재사용은 브레이크 라이닝 마모를 줄여주는 효과와 에너지 효율을 증대할 수 있다.

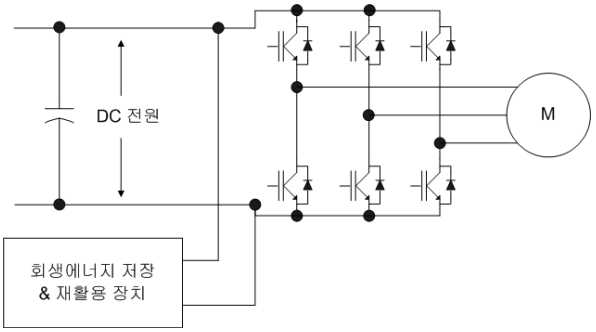


그림 5.1 전기자동차용 회생에너지 사용 예

▪ **계통 연계형 발전 시스템**

: 연료전지, 태양광, 바이오메스 등의 대체에너지 발전시스템

- 회생용인버터의 경우 일반적인 3상 인버터와 구조가 동일하다. 따라서 전력변환장치의 구조 변경 없이 계통연계형 인버터로 사용할 수 있다. 연료전지, 태양광 등의 대체에너지는 출력이 직류이므로 상용부하에 적용하기 위해선 교류 변환이 필수이다. 또한 계통연계를 위해선 전력제어를 수행해야 한다.

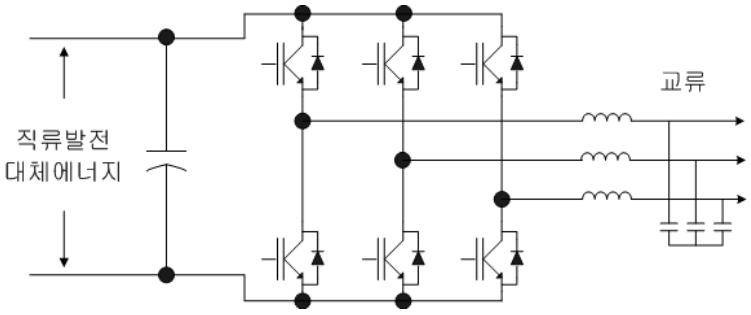


그림 5.2 대체에너지 발전용 인버터 시스템

본 과제에서 개발한 회생용인버터는 계통연계형이므로 대체에너지 발전시스템용 전력변환기에 적용할 수 있다. 또한 단위 역률을 위한 전력제어 알고리즘도 적용 할 수 있다.

▪ **에너지 절감효과를 위해 타 산업분야**

- 회생용인버터의 전력변환장치와 제어 알고리즘을 적용할 수 있다.

▪ **국제환경규제에 대응한 저감대책 및 에너지 환경관련 산업분야 육성**

: 고조파 발생 억제 및 무효전력 보상 장치

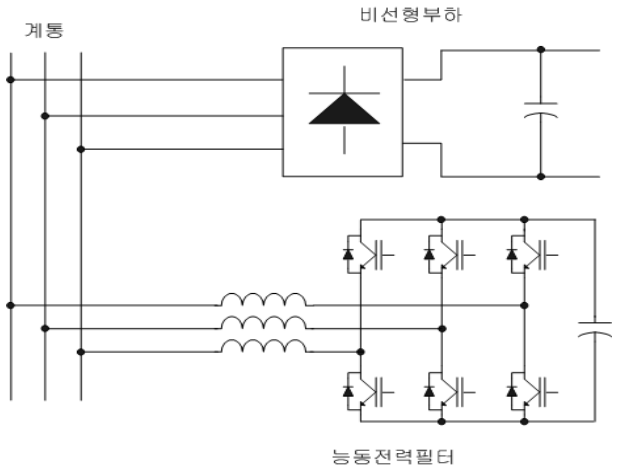


그림 5.3 고조파 및 무효전력 저감용
능동전력필터

- 본 과제에서 개발한 회생인버터 전력변환장치는 3상 능동전력필터의 한 종류인 병렬형 능동전력필터와 구조가 동일하다. 능동전력필터를 구동하기 위한 제어 알고리즘을 고조파가 다수 발생하는 곳과 무효전력의 보상이 필요한 곳에 적용할 수 있다.

▪ **직류 지하철 시스템 안정화 산업 분야**

: 직류 가선 안정화 장치

- 본 과제에서 연구한 직류 가선의 전압강하 보상 모드에 대한 연구를 바탕으로 이를 변전소에 장착하지 않고 변전소와 변전소 사이에 설치하여 실제 전동차 운행시에 변전소 사이의 구간에서 발생하는 직류가선의 전압강하를 보상할 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 장에서는 연구 개발 기간 중 수집한 해외과학 기술정보를 서술하고자 한다. 해외과학 기술정보는 국제 학술대회 참석 및 인프라를 통해 수집하였다. 국제 학회 참석을 통해 관련 논문 및 기술을 습득할 수 있으며 다양한 분야의 기술자와 기술 교류를 통해 본 과제에서 제안한 알고리즘을 검증할 수 있다.

1. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters (PELINCES : Conference)

일반적인 수동필터는 커패시터와 인덕터 그리고 저항으로 설계 되어진다. 이러한 수동필터는 다이오드와 사이리스터로 구성되어진 비선형 부하와 병렬로 연결된다. 그림 6.1은 각 상당 연결할 수 있는 수동필터 구성도를 나타낸다.

수동필터 조합에 의해 5차, 7차, 11차, 13차 등의 고조파를 상쇄 시킬 수 있지만 계통 임피던스와 공진이 발생할 수 있으며, 특정 차수의 고조파만 제거하기 때문에 능동전력필터의 사용률이 증가하고 있다.

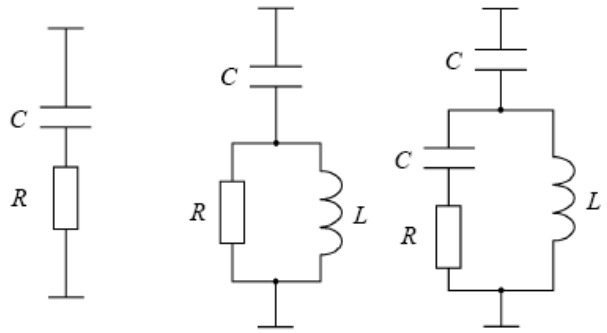
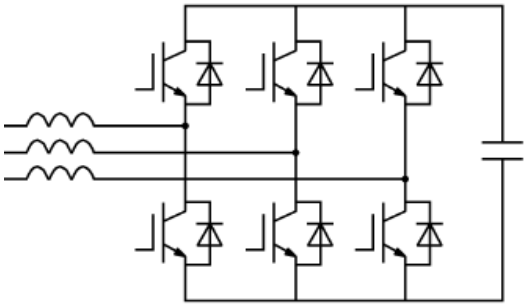
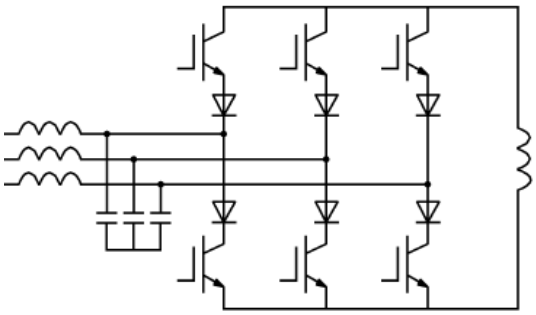


그림 6.1 수동 필터(1차, 2차, 3차 필터)

능동전력필터로 적용 가능한 전력변환장치에는 전압원 PWM 컨버터와 전류원 PWM 컨버터가 있다. 그림 6.2는 3상 능동전력필터의 구성도를 나타낸다.



(a) 전압원 PWM 컨버터



(b) 전류원 PWM 컨버터

그림 6.2 3상 능동전력필터로 적용
가능한 전력변환회로

전압원 능동전력필터에는 직류 커패시터가 구성되어 있으며 전류원 능동전력필터에는 직류 리액터가 구성된다. 전압원 능동전력필터가 전류원 능동전력필터보다 효율이 높으며 비용 측면에서도 저가로 구성할 수 있다.

본 과제에서 제안한 전력변환장치는 직류 커패시터로 구성되어진 전압원 능동전력필터이다. 전압원 능동전력필터는 리액터로 구성되어진 전류원 능동전력필터보다 크기를 줄일 수 있으므로 비용, 효율, 크기 측면에서 모두 유리하다.

2. Observer Based Reference Current Generation for a three-Phase Shunt Active Power Filter (IECON : Conference)

이 논문에서는 3상 병렬형 능동전력필터를 사용하여 고조파를 제거하는 동시에 무효전력을 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 그림 6.3은 병렬형 능동전력필터의 구성도를 나타내며 능동전력필터는 비선형 부하에 병렬로 연결된다.

풀 브리지 형태의 전압원 PWM 컨버터와 직류 커패시터 그리고 교류측 고주파 인덕터로 구성되어진 병렬형 능동전력필터는 정류기로 흐르는 부하전류를 보상하게 된다. 고조파 및 무효전력을 보상하기 위하여 관측기를 적용하였다.

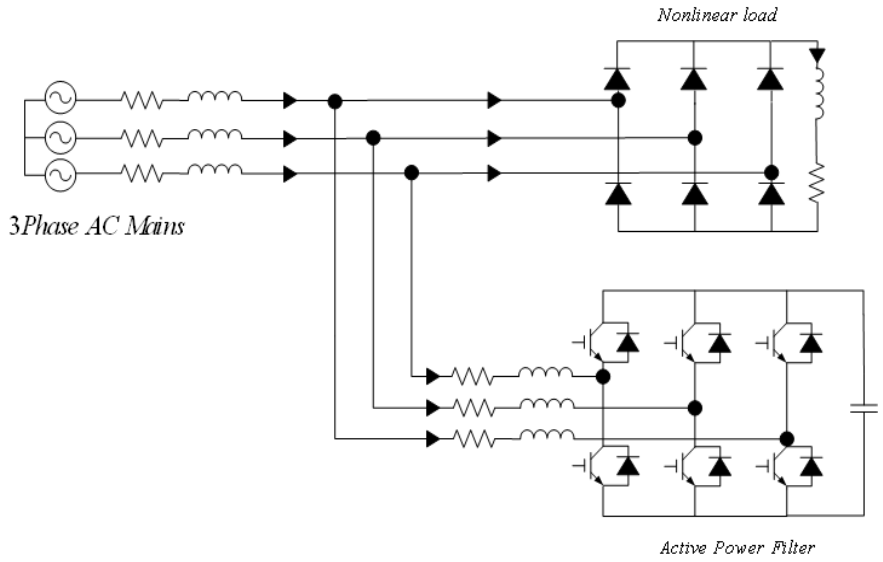


그림 6.3 비선형 부하를 가진 3상
병렬형 능동전력필터

3. Control of circulating current in two parallel three-phase boost rectifiers (IEEE)

3상 PWM 컨버터를 병렬 운전 할 때 직류 측을 공통으로 연결한다. 병렬로 구성된 3상 PWM 컨버터의 결선 구조에 의해 영상 순환전류가 흐른다. 이러한 순환전류를 방지하기 위해, 기존의 기술들은 대부분 변압기를 사용하거나 전원을 분리하는 방법을 사용하였다.

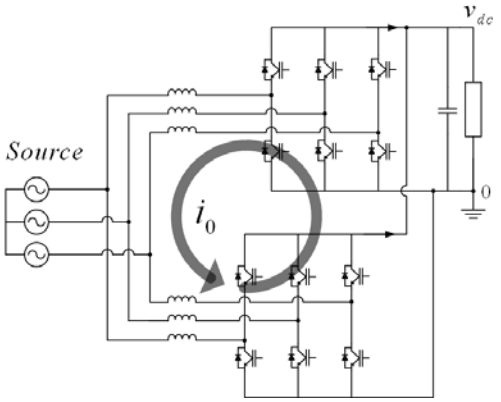


그림 6.4 병렬 3상 PWM 컨버터 시스템

1) Isolation.

: 교류 측이나 직류 측 전원을 분리하거나, 교류 측에 절연 변압기를 설치하여 각 시스템을 분리한다. 이 방법은 전체 병렬 시스템이 독립적인 전원으로 구분되나 저주파 변압기 때문에 부피가 크고, 비용이 많이 든다.

2) High impedance.

: 높은 임피던스를 공급하기 위해서 연계리액터를 사용한다. 그러나 연계리액터 는 중간 또는 고주파수에서만 높은 임피던스를 공급하므로 저주파 순환전류는 막을 수 없다.

3) Synchronized control.

: 이 방법은 병렬 컨버터를 하나의 컨버터로 취급하여 제어한다. 두 개의 3상 3-leg 컨버터는 3상 6-leg 컨버터처럼 제어된다. 하지만 더 많은 컨버터들이 병렬연결 될 때, 시스템을 설계하고 제어하는 것이 매우 복잡해진다.

참고문헌

[1] 김민철, “에너지저장장치를 활용한 DC급전시스템에서의 회생전력 이용에 관한 연구”, 성균관대학교 석사학위논문, 2006.

[2] 박영진, 김연충, 김재문, 원충연, “고속전철용 VVVF 인버터의 고조파 저감 기법에 관한 연구”, 성균관대학교 논문집, 49편, No. 1, 1998.

[3] 원종수, 원충연, 김광헌, “AC서보모터와 마이컴 제어”, 동일출판사, 1995.

[4] M. H. Rashid, “Power Electronics”, Prentice-Hall, 1993.

[5] J. R. Pattebaum, “Optimal Characteristics of a Variable Frequency Centrifugal Pump Motor Drive”, IEEE Trans. on IA, Vol. 20, No. 1, pp.23-31, 1984.

[6] 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬, “직류전력 회생시스템의 역률개선에 관한 연구”. 전력전자학회 논문집, 제6권, 제5호, pp.410-415, 2001.

[7] 김명수, 윤인식, 박영진, 윤덕용, 홍순찬, “직류전력 회생용 인버터의 고조파 저감에 관한 연구”, 전력전자학회 학술대회 논문집, pp.464-468, 1999.

[8] A. R. Bergen and V. Vittal, “Power Systems Analysis”, Prentice-Hall, 2000.

[9] 홍석진, “전기철도의 고조파 발생원인 및 저감대책에 관한 연구”, 연세대학교 학위논문집, 2005.

[10] Y. S. Tzeng, R. N. Wu and N. Chen, “Electric Network Solutions of DC Transit Systems with Inverting Substations”, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 47, No. 4, pp.1405-1412. 1998.

[11] P.J.Randewijk, and J.H.R.Enslin, “Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated”, PESC of IEEE, Vol. 1, pp.360-366, 1995.

[12] “전동기 구동시스템 설계 및 실습”, 기초전력공학공동연구소.

[13] “회생차량에 대응한 직류변전소 용량 설계법”, 일본전기학회 기술보고집, 1991.

[14] 조응상, 박기원, 권병기, 박창주, “능동전력필터의 현장적용 보고”, 포스콘 기술레포트, pp.19-35.

[15] “경부고속철도 전력계통 고조파 저감기술”, 씨엔에이전기주식회사.

[16] “전기철도 수변전설비의 유지 및 운용”, 전력기술인, 2003.

[17] G.-YJeong, T.-J.Park and B.-H.Kwon “Line-voltage-sensorless active power

filter for reactive power compensation" Electric Power Applications, IEE Proceedings, Vol. 147, Issue. 5, pp.385-390, 2000.
[18] 노재석, 함년근, 성낙규, 김길동, 김대균, 한경희, "3상 PWM 컨버터의 전류제어기 비교에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp.1248-1250, 2000.
[19] "국가교통핵심기술개발사업 차세대 에너지 회생장치 개발 보고서", 한국철도기술연구원, 2004.
[20]"대용량 직류전력 회생인버터 시스템 기술개발에 관한 최종보고서". 산자부, 2001.10
[21] H. Akagi, "Modern Active Filters and Traditional Passive Filter", PELINCES of IEEE, 2005.
[22] S. Rahmani, K. A. Haddad and Kanaan, "Observer Based Reference Current Generation for a Three-Phase Shunt Active Power Filter", IECON of IEEE, pp.1323-1323. 2005.
[23] Z. Ye, D. Boroyevich, J. Y. Choi and F. C. Lee, "Control of Circulating Current in Two Parallel Three-Phase Boost Rectifires", Vol. 17, No. 5, pp. 609-615, 2002.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술 연구개발사업의 최종(중간) 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니 됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311
한국철도기술연구원 TEL 031)460-5382
(주)시엔에이전기 TEL 031)423-0135

R&D / 03교통핵심-D01

차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발 제 5차년도 최종보고서

■ 발행일 / 2008. 05. 31
■ 발행처 / 한국철도기술연구원
경기도 의왕시 월암동 374-1
TEL : 031-460-5000
■ 인쇄처 / 명신인쇄