보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )

철도기술연구사업 제3차 연도 최종보고서

R&D /
14PRTD-C063855-03

고속철도 피크전력 저감기술 개발

(부제:고조파 필터 및 교류용 에너지저장시스템 개발)

최종보고서

2017. 8. .

주관연구기관 / ㈜우진산전
공동연구기관 / 한국전기연구원
㈜앤츠
㈜다인산전
위탁연구기관 / 한국철도공사
㈜아이티베인

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

철도기술연구사업 R&D Report

14PRTD
-C0638
55-03

고속철도 피크전력 저감기술 개발

최종보고서

2017

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

'고속철도 피크전력 저감기술 개발(부제 : 고조파 필터 및 교류용 에너지저장시스템 개발)' (연구개발 기간 : 2012. 12. 07 ~ 2017. 05. 20) 과제의 최종보고서 요약본을 제출합니다.

2017. 08. .

주관연구기관명 : ㈜우진산전 (대표자) 김 영 창 (인)
공동연구기관명 : 한국전기연구원, ㈜앤츠, ㈜다인산전
위탁연구기관명 : 한국철도공사, ㈜아이티베인

주관연구기관책임자 : 권경민
협동연구기관책임자 : 김종율, 손기환, 김시호
위탁연구기관책임자 : 이병곤, 이현우

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	14PRTD -C063855-03	해당 단계 연구 기간	2012.12.07 ~2017.05.20	단계구분	3차년도)/ (총 3차년도)
연구사업명	중사업명	-			
	세부사업명	철도기술연구사업			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	고속철도 피크전력 저감 기술 개발 (부제: 고조파 필터 및 교류용 에너지저장시스템 개발)			
연구책임자	권경민	해당단계 참여 연구원 수	총: 72명 내부: 72명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부 : 2,155,000천원 기업 : 718,900천원 계 : 2,873,900천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총 : 204명 내부 : 204명 외부 : 명	총 연구개발비	정부 : 8,215,000천원 기업 : 2,742,400천원 계 : 10,957,400천원
연구기관명 및 소속 부서명	㈜우진산전 중앙연구소 연구개발팀			참여기업명 한국전기연구원, ㈜앤츠, ㈜다인산전, 한국철도공사 ㈜아이티베인	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

요약 - 고속철도 변전소의 피크전력 저감을 위한 피크전력 저감장치 개발 - 국내에서 설치 운용 중인 고조파 필터장치(해외 제품)의 국산화를 통하여 우리나라 철도 급전시스템 환경에 적합한 시스템 제작으로 고장 시 원활한 보수품 교체가 가능 - 피크전력 저감장치의 최적운영을 위한 ESS 용량산정 및 최적운전 모형설계	보고서 면수 : 200

〈 요 약 문 〉

<table>
<tr><td>연구의
목적 및 내용</td><td>◦ 고조파 능동형 필터는 2004년 경부고속철도 운행구간 전철변전소에 독일 지멘스社 제품을 설치되어 운용하고 있으나, 설비 사용가능 연한 도래에 따라 기술개발이 시급하며, 국내 고속철도 급전시스템 환경을 고려하지 않고 제작이 되어 오동작 및 설비 고장에 따른 부품교환이 어려워 국산화가 시급한 상황

◦ 아울러 피크전력 저감을 위한 교류용 에너지저장시스템의 경우 한국철도공사에서는 2011년 한해 전기요금을 약 1,900억원 지출하였으며, 정부는 전력수급 안정화를 위해 2012년 3차례 걸쳐 전기요금을 12.6% 인상한바 있어 전기요금 절감을 시스템 개발이 그 어느 때보다 중요한 실정이다. 또한 세계최고의 고속철도 정시율을 유지하기 위해 간헐적으로 변전소의 공급가능 전력보다 더 많은 부하(고속열차)가 요구되어 전압강하 및 역률 개선 등의 전력 안정화 위한 시스템 개발이 필요

◦ 본 연구과제의 최종목표에 의한 결과물은 현재 국내에서 설치 운용 중인 고조파 필터장치(해외 제품)의 국산화를 통하여 우리나라 철도 급전시스템 환경에 적합한 시스템 제작으로 고장 시 원활한 보수품 교체가 가능

◦ 직류 에너지저장시스템 요소기술을 기반으로 세계 최초 교류 에너지저장시스템을 개발하여 획기적인 전기요금 절감을 통한 운영기관의 경영개선 및 전력품질 안정화로 안전한 고속철도 서비스를 제공하기 위함

◦ 향후 미국, 동남아 등의 해외철도시장 진출을 위한 핵심기술 확보하기 위함</td></tr>
<tr><td>연구개발성과</td><td>
<table>
<tr><th>연번</th><th>핵심성과명</th><th>핵심성과 설명</th><th>성과유형</th></tr>
<tr><td>1</td><td>교류용 에너지 저장시스템 (H/W, S/W)</td><td>고속철도 교류용 피크전력 저감장치 설치 및 실증시험</td><td>시스템</td></tr>
<tr><td>2</td><td>고조파 저감 능동형 필터 (H/W, S/W)</td><td>고속철도 능동형 고조파 필터 설치 및 실증시험</td><td>시스템</td></tr>
<tr><td>3</td><td>MMI 소프트웨어</td><td>고속철도 피크전력 저감장치 MMI 소프트웨어</td><td>소프트웨어</td></tr>
<tr><td>4</td><td>전력저장시스템 일간운전 계획프로그램</td><td>고속철도 변전소용 전력저장 시스템 일간운전계획을 사전에 수립/검토할수 있는 시뮬레이션 프로그램</td><td>프로그램</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>연구개발성과의
활용계획
(기대효과)</td><td colspan="5"><활용계획>
1) 분석 기술 활용 계획
◦ 에너지 저장 시스템의 국내 확대 보급 정책 수립에 활용
- 새로운 정책 제안, 제도개선, 경제성 평가 등의 기술적 근거 자료 제공
- 지능형 전력 저장 시스템을 적용한 신개념 전력 시스템 개발
◦ 능동형 고조파 필터 국산화 기술 개발
- 기술자립을 통하여 외국의 기술로 설치되어 온 능동형 고조파 필터를 대체할 수 있고 설치된 시설의 유지 보수 또한 가능하여 외화의 지출을 줄일 수 있음.
2) 제품 상용화 시 활용 계획
◦ 고속철도 변전시스템의 안정적 전력 공급 활용
- 전차선로 급전시스템 모니터링과 연축전지와 LiB의 활용으로 고속열차 안정적 운행을 위한 솔루션 제공
- 상시 전원이 필요한 소전력 중요 부하의 상시 전백업 전원 공급
◦ 교류(AC)구간의 지능형 하이브리드 에너지저장시스템 구축
- 고속철도 운행구간 등 대용량 부하에 접목하여 안정적인 전원 공급 및 도시철도 구간에도 실용화 가능
- 낮은 전력 예비율에 대비한 전원 Back-Up시스템으로 활용 가능.</td></tr>
<tr><td>핵심어
(5개 이내)</td><td>최대 수요전력</td><td>능동형
고조파필터</td><td>전기철도
급전시스템</td><td>에너지저장
시스템</td><td>에너지 저감</td></tr>
</table>

〈 목 차 〉

제1장 연구개발과제의 개요 ····· 1
제2장 국내외 기술 개발 현황 ····· 6
제3장 연구 수행 내용 및 성과 ····· 11
제1절 고속철도 피크전력 저감장치 개발 ····· 11
제2절 능동형 고조파 필터 개발 ····· 47
제3절 피크전력 저감장치 MMI 개발 ····· 66
제4절 ESS 용량산정 및 최적운전모형 프로그램 개발 ····· 82
제5절 시스템 RAMS 분석 ····· 95
제6절 고속철도 변전소 실증단지 환경검토 ····· 109
제7절 실증단지 구축 및 시스템 사용전 검사 ····· 114
제8절 시스템 현장시험 및 시스템 보완 ····· 125
제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 183
제5장 연구개발성과의 활용 계획 ····· 187
제6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 193
제7장 연구개발성과의 보안등급 ····· 193
제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 193
제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 193
제10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 194
제11장 기타 사항 ····· 198
제12장 참고 문헌 ····· 199

제1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

주 5일 근무제, 국민소득의 증가 등 국민 생활의식이 다양화, 고급화됨에 따라 보다 빠르고 고급화된 교통수단에 대한 요구가 증대하고 있다. 또한, 에너지자원 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라는 몇 년간 전력수급난 심화, 전기요금 인상 등이 계속되고 있어 고속철도에서도 전력수급난을 완화시킬 수 있는 기술개발 및 방안이 시급한 실정이다.

KTX-1, KTX-산천 등의 고속열차는 출발/가속 시 많은 전력을 필요로 하고, 감속 시에는 운동에너지를 전기에너지로 변환함으로써 제동력을 얻는다. 다수의 고속열차가 3분에서 5분의 시격으로 운행하기 때문에 특정시간대에 더 많은 전력을 필요로 한다. 이 피크전력이 전력공급자인 한국전력에서 계상하는 전력요금의 기본요율을 결정하는 기준이 된다.

피크전력 저감을 위한 교류용 에너지저장시스템의 경우 한국철도공사에서는 2011년 한해 전기요금을 약 1,900억원 지출했으며 정부는 전력수급 안정화를 위해 2012년 3차례 걸쳐 전기요금을 12.6% 인상한바 있어 전기요금 절감을 시스템 개발이 그 어느 때보다 중요한 실정이다. 또한 세계최고의 고속철도 정시율을 유지하기 위해 간헐적으로 변전소의 공급가능 전력보다 더 많은 부하(고속열차)가 요구되어 전압강하 및 역률개선 등의 전력 안정화 위한 시스템 개발이 필요하다.

아울러 고조파 능동형 필터는 2004년 경부고속철도 운행구간 전철변전소에 독일 지멘스社 제품을 설치되어 운용하고 있으나, 설비 사용가능 연한 도래에 따라 기술개발이 시급하며, 국내 고속철도 급전시스템 환경을 고려하지 않고 제작이 되어 오동작 및 설비 고장에 따른 부품 교환이 어려워 국산화가 시급한 상황이다.

2. 연구개발의 필요성

최근 산업의 고도화에 따른 물류량 증가와 도시 인구집중화에 따른 교통난 심화로 교통문제 해결이 심각하게 부각되고 있고, 자동차의 급속한 증가와 함께 육로교통은 이제 한계 상황에 이르렀으며 공해, 오염 등 환경오염에 대한 우려도 그 어느 때보다 높아지고 있다. 이러한 상황에서 환경 친화적이고 에너지를 유효하게 이용할 수 있으며 안전성과 신속성, 편리성 등 대중교통 수단으로서 여러 가지 이점이 있는 전기철도는 교통문제의 해결의 최선의 대안으로 제시되고 있다.

전기 에너지를 이용한 전기철도는 디젤동력과 비교하여 견인전동기의 출력이 우수하며 속도의 가감 특성이 우수하고 무엇보다 에너지 이용 효율이 디젤에 비해 1.7~1.8배로서 수송원가 절감에 많은 기여를 하고 있다. 이러한 이유로 정부에서는 기존선의 전철화 개량 및 2015년 개통되는 호남고속철도를 포함한 새로운 건설노선은 디젤엔진 차량을 대신하여 열차의 주 견인력을 전기철도로 사용되는 추세이다.

표 1. 연차별 전철화율 목표

구 분	2011	2012	2013	2014	2015	2020
철도연장(km)	3,637.2	3,655.1	3,673.3	3,903.0	4,057.1	**4,934.1**
전철연장(km)	2,436.0	2,499.4	2,517.6	2,745.3	2,913.7	**4,194.0**
전철화율(%)	66.97	68.38	68.54	70.34	71.82	**85.00**

<2012. 2. 16, 한국철도시설공단 보도자료>

그러나 한편으로는 대용량의 고속열차 운행에 따른 전력품질 안정화 및 피크전력 저감을 위한 적극적인 노력을 기울여야 될 것이다. 코레일의 경우, 진상역률 발생에 따라 2011년 30억의 추가 요금을 지출하였다.(한전 공급약관 변경) 또한, 전력 공급회사의 낮은 전력 예비율에 대비하여 고속철도와 같은 중요 전원(부하)에 대한 Back-Up 시스템이 필요하고 급격한 부하 변동이 있는 경우 실시간으로 전력을 조절•공급하는 부하 평준화 시스템이 절실히 요구된다.

고속철도 등 전기철도에서는 견인전동기 구동으로 부하의 변동이 심하고 고조파가 발생하여 통신유도장애, 과전류, 계전기/변압기 오동작 및 소손 등 관련 장비에 많은 악영향을 주고, 또한 고속열차(대용량) 운행에 따라 전차선로의 순간적인 전압 보상(충·방전)으로 안정된 전압 공급과 고속철도 운행구간의 전철변전소 적정용량을 사전에 확인하여 열차운행에 안정된 전원 공급 필요성이 증대되고 있다.

또한, 고속열차의 특성상 시동 정지가 빈번하게 반복되고 큰 견인력으로 주행해야 하므로 대용량의 부하전력이 요구되고 그 크기는 시공간적으로 급변한다. 전철급전계통은 주로 3상 전력계통으로부터 단상의 전력으로 변환하여 급전 받고 있으므로, 3상 전원계통의 각 상 전류는 더 이상 평형을 유지하지 않고 3상 전압불평형을 초래할 수 있다. 이러한 전압불평형은 결과적으로 계통의 전력품질을 저해하여 관련된 다른 설비의 운전에 영향을 끼친다.

최근의 고속철도구동시스템에는 컨버터와 인버터가 포함되어 있다. 이러한 컨버터와 인버터는 위상제어 및 펄스폭 변조방식에 의하여 제어되기 때문에 고조파를 발생시킨다. 최근에 적용되는 고속철도차량은 대부분 회생제동을 채택하는 추세이며 제동에 의해 발생된 회생전력을 전원 측에 공급한다. 따라서 제동성능은 좋으나 역시 인버터, 컨버터에 의해 전기회로에 악영

향을 끼치는 고조파를 발생시킨다. 고속차량의 제어방식이 위상제어방식에서 펄스폭제어방식으로 변화함에 따라 위상제어방식에서는 발생하지 않는 짝수 차 고조파가 발생하고 고조파전류도 기본파전류에 비례하지 않고 거의 일정량 발생하는 특징이 있다. 고속차량이 투입된 급전회로는 선로의 대지정전용량 때문에 고차에서 공진은 발생하고, 이는 신호, 통신시스템에 유도장애를 줄 가능성이 있다. 아울러 전철급전계통은 레일을 귀선로로 이용하므로 1선 직접 접지방식의 전차선로 교류방식에서는 인접한 통신선에 대한 유도장애를 야기 시킬 수도 있다. 따라서 최신의 차량을 운행하는 경우 고차고조파의 발생에 따른 공진가능성을 검토하여 적절한 대책을 세울 필요가 있다.

또한, 전동차에서 사용되는 소비전력의 약 40%가 회생에너지로 발생되어 전차선에 되돌려 보내지고, 이 에너지가 사용되지 않고 낭비되고 있으므로 낭비되는 회생에너지를 활용할 필요가 있다.

고속열차가 운행하는 선로에 전력을 공급하는 전철변전소에서의 공급전력은 열차의 운행상태에 따라 변전소 공급능력의 한계까지 급격하게 부하변동이 발생하게 되어 피크전력이 매우 커지게 된다. 피크전력이 급격하게 증가되는 것은 열차운행에 필요한 에너지 비용이 증가하게 되며, 전차선로를 따라 열차에 필요한 전력을 공급하는데 소모되는 전력이 커지게 된다. 따라서 이러한 피크전력을 최소화 시키는 것이 전력소모를 줄이며 에너지 비용을 감소시키게 된다.

고속열차가 운행하는 급전선로의 말단에 에너지저장시스템을 설치할 경우, 변전소에서 공급하는 전력 감소는 물론 차량의 집전전압이 향상되고 전차선로에서의 전력손실이 크게 감소함을 보일 것이다. 또한 변전소의 공급 피크전력이 감소하게 됨으로 무엇보다 고속열차 운행에 필요한 전력요금도 감소하게 될 것이다.

이번 과제의 기술개발을 통하여 고속열차 운행구간에서 발생하는 회생에너지 및 저렴한 심야시간대의 전력을 충전하고 최대 수전전력을 넘는 주간시간대 순간 방전하여 피크전력 전력을 감소시키는 경제적 효과 즉, 전기요금 절감효과를 획기적으로 기대되고 차량 등에서 발생하는 고조파를 능동형 고조파 필터를 이용하여 저감시킬 것으로 기대된다.

3. 연구개발 범위

구분	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	○ 자료조사 ○ 시스템사양 및 용량산정 ○ 전력품질 분석	▪ 국내외 기술자료 조사 ▪ 전력품질 측정 및 분석 ▪ 운영데이터 분석 ▪ 부하 데이터 및 요금체계 분석 ▪ 개념설계서 작성 및 검토 ▪ 시스템 엔지니어링 ▪ 전력 저장 장치 계통 연계 해석 ▪ 시스템 설계 및 인터페이스(SCADA) 방안 검토 (RAMS활동 포함) ▪ 시스템 사양 선정 및 구성품별 용량 산정 ▪ 주요 부품 구매
	○ 제어 알고리즘 개발	▪ 전력저장 일간 운영계획 수립을 위한 최적화 모형 개발 ▪ 적정용량 산정 알고리즘 개발 및 시뮬레이션 검토 ▪ 대용량 양방향 전력 변환 제어 알고리즘 개발 ▪ 피크전력 저감을 위한 최적 에너지 저장 알고리즘 개발 ▪ 능동형 고조파 저감 알고리즘 개발
	○ 실증방안 모색	▪ 실증단지 선정 ▪ 실증단지 주변 환경 조사 ▪ 실증 방안 검토(실증평가 및 검증 계획 수립)
2차 년도	○ 시스템 제작 및 시험	▪ 상세설계서 작성 및 검토 ▪ 시제품 제작 및 검증 ▪ 기기배치 최적안 검토 및 운영설비와의 인터페이스 설계 ▪ 시스템 인터페이스 및 SCADA 연계 시스템 구축 ▪ 개발품 제작 및 검증 ▪ 피크전력 제어 기법 구현 ▪ 능동형 고조파 저감 기법 구현 ▪ 저장매체 모니터링 시스템 구축 ▪ 시제품 영향 평가 검토 및 문제점 분석 ▪ 신뢰성 평가(RAMS)
	○ 적정용량 설계 및 최적 운전계획 프로그램 개발	▪ 프로그램 프레임 설계 ▪ 데이터 구조설계 및 코어 연산모듈 구현 ▪ 프로그램 구현
	○ 알고리즘 평가	▪ 전력 시뮬레이션을 통한 제어 알고리즘 평가
	○ 실증방안 구축	▪ 실증단지 선정 및 설치환경 검토 ▪ 장치별 성능 테스트 ▪ 시스템 실증 시험 계획 수립

구분	연구목표	주요 연구내용
3차 년도	○ 실증단지 구축	▪ 실증단지 기초 공사 ▪ 시스템 실증 장소 운송 및 설치 ▪ 시스템 실증 시험 계획 수립 ▪ 시스템 실증 평가 계획 수립
	○ 시스템 성능 시험	▪ 시스템 인터페이스 시험 및 성능 시험 ▪ 시스템 운용 평가(RAMS활동 포함) ▪ 성능확인 및 실용화 계획 수립
	○ 시스템 최적화	▪ 시스템 최적화 운영 방안 구축 ▪ 시스템 운용 데이터 분석 및 운용 알고리즘 최적화
	○ 실증시스템 효과분석 및 프로그램 고도화	▪ 온라인 모의운영 및 분석환경 구축 ▪ 실증시스템 모의운영 및 결과분석 ▪ 알고리즘 및 프로그램 수정
	○ 운용 및 유지보수	▪ 시스템 운용 방안 구축 ▪ 시스템 유지보수 방안 구축 ▪ 개발 시스템 종합 유지보수 매뉴얼 작성

제2장 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 관련 기술 및 산업동향

현재 국가철도망 구축계획으로 '제1차 국가철도망 구축계획'에서 '06~'15년을 시간적 범위로 하여 철도망 구축의 비전 및 목표, 투자규모 등을 제시하였다. 철도경쟁력의 획기적 제고하여 다른 교통수단과 경쟁, 교통수요 최대한 흡수하고 수송 분담률 제고로 대량·대중 교통수단 위상확립을 비전으로 하고 있고, 운행속도 180km/h ~ 200km/h 이상, 대도시간 2~3시간 이내 이동하고 주요 철도역에 30분 이내 접근, 인간·환경 중심적 교통수단으로서 역할 강화를 목표로 하고 있다.

이러한 목표를 바탕으로 2011년 전철화율 66.97%에서 2020년 85%까지 확대할 계획이며 전력안정화 및 전력저감을 위하여 보다 많은 연구가 필요하지만 현재 능동형 고조파필터의 전철전력분야 적용방안은 아직 국내에서는 초기단계이고 기존의 인프라는 한국전력공사에서 연구되고 있으나 철도 전력시스템의 특성이 반영되지 않고 있다. 또한 대용량 에너지저장시스템의 시장 또한 초기단계이다.

○ 에너지저장의 국내 적용 현황
- 부하평준화용 전력저장장치의 경우 주야간 전력부하 차이가 심하던 '90년대 후반까지 납축전지를 활용한 시스템에 대한 연구가 이뤄짐
- 이화전기/전기연구원 : 1MW급 전력저장시스템 기술개발 ('98년, 납축전지)
- 2000년대 이후는 야간 전력수요가 증가함에 따라 주야간 전력부하 차이 완화로 인하여 도입 필요성이 감소함
- 한전에서는 전력저장장치를 부하평준화 및 첨두부하저감용 수요관리기기로 채택하는 방안에 대해 검토하고 있음
- UPS 및 전력품질보상용 전력저장장치의 경우 초전도코일(SMES)와 플라이휠(FESS) 등이 연구되고 있는데, SMES는 전기연구원에서 개발하였으나 아직 상용운전이 안되고 있으며, FESS는 시제품 개발 단계임
- SMES : UPS용 Micro급 3MJ(0.83kWh) SMES 개발 완료(전기연구원, '04년)
- FESS : 100kWh급 FESS 개발 진행(전력연구원, '05년~'08년)

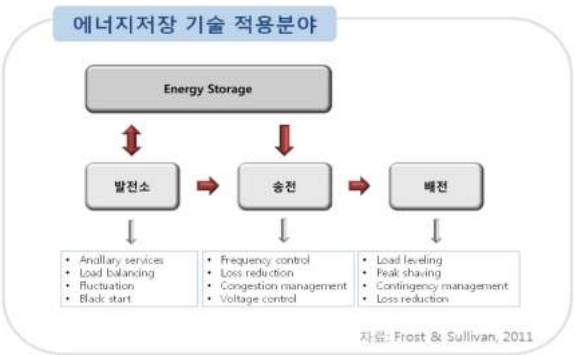


그림 1. 에너지저장 기술 적용 분야

○ 국내주요 관련업체 현황

- 삼성SDI, LG화학 등 이차전지 업계는 전력저장용 사업 확장에 주력하고 있고, 수익성 확보를 위해 低원가, 초대형 셀(Cell) 및 팩(Pack), 배터리관리시스템(BMS) 개발에 박차
- 초기시장 선점을 위해 실증사업에 집중하는 한편, 일본, 독일 등 해외시장 진출도 활발히 추진
- 효성, 포스코ICT 등 전력변환장치(PCS) 업계는 이차전지 업계와 협력하여 국내실증에 참여하는 한편, 직접 전력변환장치 사업 추진 중에 있다.

표 2. 에너지저장시스템 기술개발 현황 및 기술수준

구분	세계최고 기술업체	주요 국내업체	R&D 단계	기술수준(세계최고:100)		
				원천	부품 소재	제조
리튬이온전지	미쯔비시중공업 GS유아사(일)	삼성SDI LG화학	응용제품개발	55	70	95
나트륨-황전지	NGK(일)	포스코	초기개발	35	35	30
Rdox flow 전지	Prudent Energy(중)	LS산전 호남석유화학	초기개발	40	40	45
수퍼 캐패시터	파나소닉(일) MAXELL(미)	네스캡 LS엠트론	응용제품개발	50	55	80
플라이휠	보잉(미)	전력연구원	제품개발	70	60	70

<출처, ‘11 에너지저장 기술개발 및 산업화 전략(K-ESS 2020)_지식경제부>

① 기술개발 현황

- 상용화 정도, 원천, 부품소재 기술수준, 실증 경험 측면에서 선진국보다 열세
- (R&D 현황) 일부 기술은 상용화 단계에 도달하였으나, 그 외의 기술은 초기 기술개발 단계 수준
- (기술수준) 리튬이온전지는 최고 수준의 제조 기술로 해외 수출이 가시화되었으나, 전반적인 ESS 원천 부품소재 기술은 미흡
- (실증현황) 가정용 ESS의 실증은 초기단계, 큰 수요가 예측되는 전력망용 대규모 ESS 실증은 전무

② 인프라 현황

- 중장기적인 기술 축적 및 해외 시장 개척을 위한 안전성 평가, 핵심 인력양성 등의 인프라 구축 미흡
- (평가/인증) 안전성에 대한 엄격한 수준의 검사 수준이 요구되나, 평가/인증 기반이 열악
- (인력 양성) 전기/화학 등 에너지저장 분야의 고급 전문 인력 확보가 어려운 상황
- (표준) 평가기술/방법에 대한국제 기준이 아직 설정되지 않아 표준시장 선점의 기회

표 3. 능동형 고조파 필터 기술 분야의 기술수준

기 술 명	기술수준 (%)	전문 인력 보유 정도 (%)	인프라 구축 연도 (%)
전철전력 해석	50	50	50
계통해석/제어	50	50	50
보호설비 검증	50	50	50
전력전자해석	70	70	70

<출처, '08 전기철도 급전시스템 능동형 전력품질 보상장치 개발>

표 4. 능동형 고조파 필터 기술 분야의 인프라수준

기 술 명	인력보유 정도	자금지원 수준	연구개발시스템 (설비, 장비, 체제 등)
전철전력 해석	50	50	- Hall effect Gauss meter - Power Recoder System
계통해석/제어	50	50	- 회로정수 측정 장치 - Matlab - 급전시스템 해석용 S/W
보호설비 검증	50	50	-
전력전자해석	50	50	- Flux2D/3D - PSS/U

<출처, '08 전기철도 급전시스템 능동형 전력품질 보상장치 개발>

표 5. 국내외 능동형 고조파 필터 기술수준 비교

구 분		선진국과 비교		대상 국가	기술 격차	비 고
		국 내	선진국			
기술수준	설계	기본설계기술 개발단계	25MVA모듈설계 system integration 확립	미국	5년	EPRI
	소프트웨어	시스템 엔지니어링 기술정립단계	상업용 소프트웨어 운용/개선	미국	3년	EPRI GE. Siemens
	소재/부품	IGBT : 2kV/수백A GTO : 2kV/1.5kA	IGCT : 4.5kV/1.4kA GTO : 6kV/4.5kA	유럽 일본	10년	ABB 미쓰비시
	하드웨어	주변장치 설계기술 확보 1MVA모듈 개발완료	실용화/경제성 획득단계	미국 유럽 일본	5년	EPRI/GE Siemens 미쓰비시
연구기반	연구인력 개발능력	연구소 : 응용연구 산업계 : 기술도입	혁신기술 개발 개선능력 보유	미국 유럽	5년	
	연구설비	축소 모의장치 개발단계 컴퓨터 Emulator 개발	시험/평가시스템 보유 실증 시험 설비	미국 유럽	5년	

<출처, '08 전기철도 급전시스템 능동형 전력품질 보상장치 개발>

2. 국외 관련 기술 및 산업동향

미국과 유럽 등은 ESS 개발과 상용화에 속도를 내고 있다. 미국 캘리포니아주는 2014년부터 공급전력의 2.25%에 대해 ESS 설치를 의무화했고 유럽도 2020년까지 태양광발전 시설의 12%를 ESS로 구축할 계획으로 시장이 형성되고 있다.

○ 시장현황

- 미국, 일본 등 선진국 중심으로 초기 시장형성 단계
- 전체 120만kW ('11년 기준)중 전력계통용이 80%, 무정전전원장치(UPS) 등 보조 서비스용이 20% 점유 (美 PIKE리서치)
- 전력계통용 시장은 미국이 78% 정도 차지하여 최대시장을 형성

○ 시장전망

- 전 세계적 전력수요 증가에 따라 세계시장이 급팽창할 전망
- 전력저장 시장은 '20년 기준 약 47조원 규모로 성장이 예측
- 시장규모(조원) : ('10) 2.0 → ('13) 11.2 → ('15) 24.0 → ('20) 47.4 (美 PIKE리서치)
- 저장용량(만kW) : ('11) 120.6 → ('20) 2,010.5 (약 16배 성장, 美 PIKE리서치)

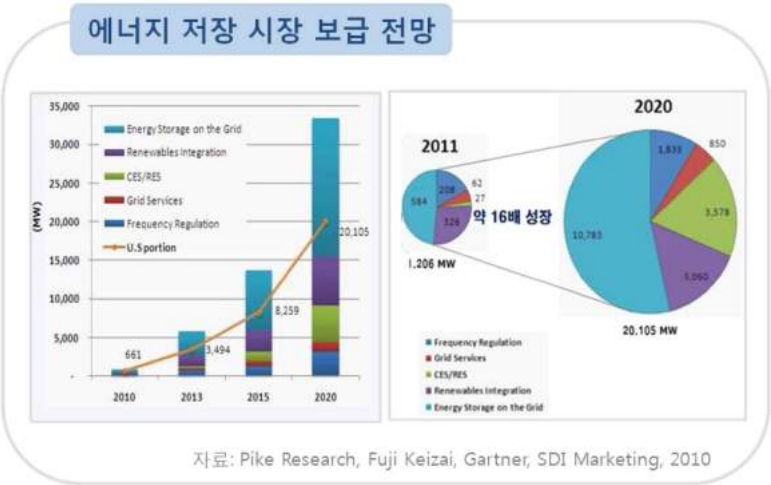


그림 2. 에너지저장 기술 시장 보급 전망

- 리튬이차전지 시장도 15년부터 전력저장용 비중이 확대될 전망

그림 3. 리튬이차전지 세계시장 전망

○ 가격전망

- 현재 리튬전지 가격은 양산기준 100만원/kWh 수준이며, 시장 확대로 대규모 양산시 가격은 급격히 하락할 것으로 전망
- 전지가격($/kWh, 日 NEDO) : ('10) 1,000 → ('15) 300 → ('20) 200 → ('30) 100
- 업계의 대용량 리튬전지 개발 노력에 힘입어 대용량 전력저장장치 가격도 점차 하락될 것으로 전망

○ 해외동향

- [일본] 전력부족 문제해결과 리튬전지산업 육성을 위해 보급사업 추진
- 리튬이차전지에서 주도권 확보를 위해 '12년부터 360억엔(한화 약 5,000억원) 규모의 ESS 설치 보조금사업 추진
- 신재생 발전소용, 가정용 등 다양한 분야에서 기술개발 추진
- 나트륨-황 전지, 리튬이온전지 등에서 앞선 기술력 보유
- [미국] 실증사업 추진과 함께 세계최초 설치의무화 제도 시행
- 공공기관(ARPA-E, EPRI 등), 대형 전력회사(AES 社, AEP 社) 중심으로 기술개발 및 실증 적극 추진
- AES社는 뉴욕 44MW 화력발전 설비에 20MW급 리튬이차전지 설치('10.6)
- 캘리포니아주는 ESS 설치 의무화* 제도 법안 제정('10.9)하고, 신규 설치되는 ESS에 대하여 $2,000/kW 보조금 지급
- '14년부터 공급전력의 2.25%, '20년 5% 이상을 ESS로 설치·공급
- [유럽] 독일을 중심으로 신재생 연계 리튬이차전지 도입 추진
- 독일 Conergy社, 프랑스 Saft社 등이 참여하여 국책과제인 Solion(태양광-리튬이차전지) 프로젝트 추진(獨환경부 · 佛경제성 공동지원)
- 약 75개의 태양광 주택용 리튬이차전지 시스템 실증 추진('12년 사업화)

표 6. 능동형 전력 필터 선진 기술 보유 각국의 동향

국 가 (기술성숙도)	보유 기술 및 정책 동향
미국 (80%)	- EPRI+GE : 500kV 송전계통용 TCSC 개발. (1992, BPA 계통) - EPRI+Westinghouse : 161kV 송전계통용 STATCOM 개발. (1996, TVA 계통) - ±320MVA급 UPFC 개발. (1997, AEP 계통) - NYPA : 345kV 송전계통용 UPFC 개발.
유럽 (70%)	- CIGRE : 연구개발 활동. - EdF/ENEL : 전력회사를 중심으로 한 타당성 연구. - ABB/Siemens : 엔지니어링 및 설비 기술개발 연구. * 설비의 compact화 기술 개발을 통해 미국과 경쟁.
일본 (50%)	- 자국내 전력계통에서 필요로 하는 기술 개발에 주력. - 전기철도 전압강하 보상장치 SP-SVC 개발.

<출처, '08 전기철도 급전시스템 능동형 전력품질 보상장치 개발>

제3장 연구 수행 내용 및 성과

제1절. 고속철도 피크전력 저감장치 개발

1. 시스템의 구성 개요

고속철도 전기 시스템의 효율적인 피크전력, 고조파 관리 및 저감을 위한 고속철도 피크전력 저감 시스템의 구성은 다음과 같다.

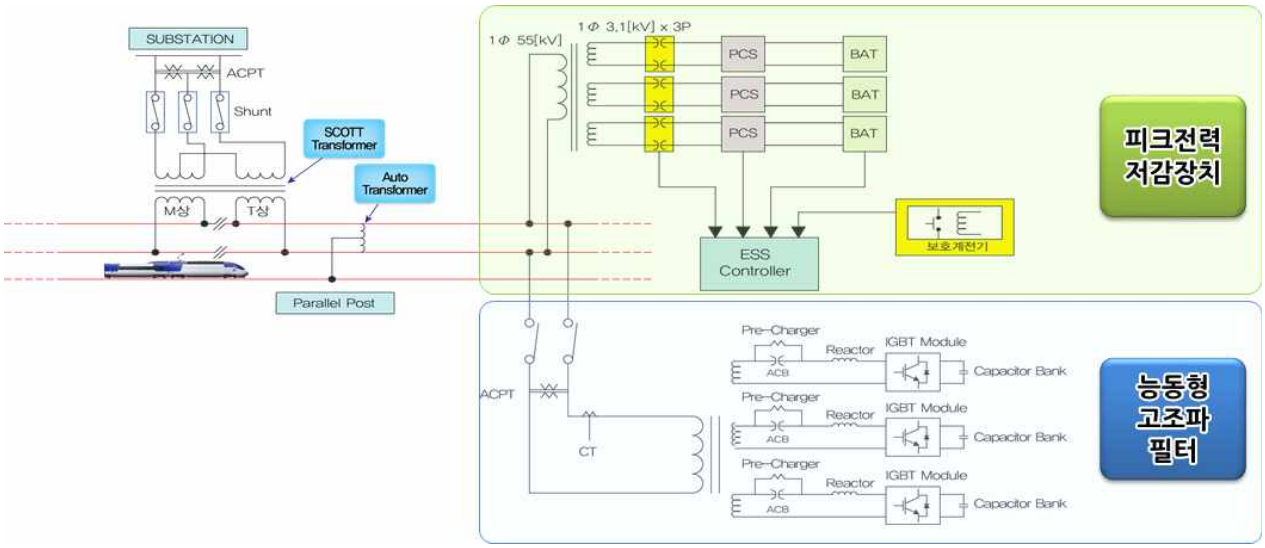


그림 4. 시스템 개요

고속열차 부하는 산업체의 고정 부하 및 수도권 전동차 부하와는 달리 대용량(정격 15MW)의 부하로 고속열차 출발과 제동 시에 급격한 부하변동을 유발시킨다. 또한 고속열차는 세계 최고의 정시율을 유지하기 위해 전철변전소 급전구간에 계획된 운행스케줄보다 더 많은 고속열차가 운행함으로 변전소 피크전력이 증가하게 된다. 이러한 피크전력 증가는 전철변전소 변압기 증가 등의 설비비용을 증가시키며, 2011년 발생했던 '에너지대란'과 같이 전기에너지 절약이 그 어느 때보다 절실한 시점에 많은 전기에너지를 소모하여 궁극에는 철도 운영기관의 전기요금도 크게 지불하고 있는 실정이다.

따라서 전차선로의 말단에 에너지저장시스템을 설치하여 전차선로의 부하가 적을 때 에너지를 충전하고, 전차선로의 부하가 많을 대는 저장시스템으로부터 에너지를 방전하여 전철변전소에서 공급하는 부하의 크기를 감소시키고자 한다. 이러한 피크전력 저감효과를 검토하기 위해 시뮬레이션을 통하여 일정 부하조건에서 에너지저장시스템이 충전할 때와 방전할 때를 기준으로 하여 에너지저장시스템에서의 전력의 변동, 변전소에서의 공급전력의 변화 및 선로손실을 검토하며 시스템 제작을 통하여 목표 사양 이상을 달성하고자 한다.

2. 시스템 기본 설계 검토

에너지저장장치는 대용량 AC/DC 컨버터 기술과 DC/DC 컨버터 기술이 유기적으로 결합된 장치이다. 에너지저장장치는 고속철도 전차선로의 말단에 설치되며, 전차선로의 부하가 적을 시간대에 에너지를 배터리에 충전하고, 전차선로의 부하가 많을 시간대에 배터리로부터 에너지를 방전하여 전차선로에 공급하여 변전소의 에너지 사용량을 일정수준이상 초과되지 않도록 설계되는 것을 목표로 한다.

에너지저장장치는 기본적으로 에너지를 저장매체인 배터리에 저장하며, 필요시에 배터리에서 충전반대방향으로 에너지를 방출한다. 에너지의 충전과 방전이 하나의 회로에서 이루어져야 하므로, 양방향 전력변환장치가 필요하다.

전차선로는 스코트 변압기에서 출력되는 전력을 공급되는 선로이며, 에너지저장장치 역시 스코트 변압기 출력단에 연결된다. 스코트 변압기는 중성점이 궤도에 연결되어있어 고속철도차량은 55kV의 절반인 27.5kV를 공급받는다.

하기의 블록도는 간략화된 형태이나 내부적으로는 PCS와 배터리는 병렬형태로 구성되어 대용량 에너지 흐름을 제어할 수 있고, 하나의 회로에 고장이 발생하더라도 전체회로에 영향을 주지 않도록 구성된다.

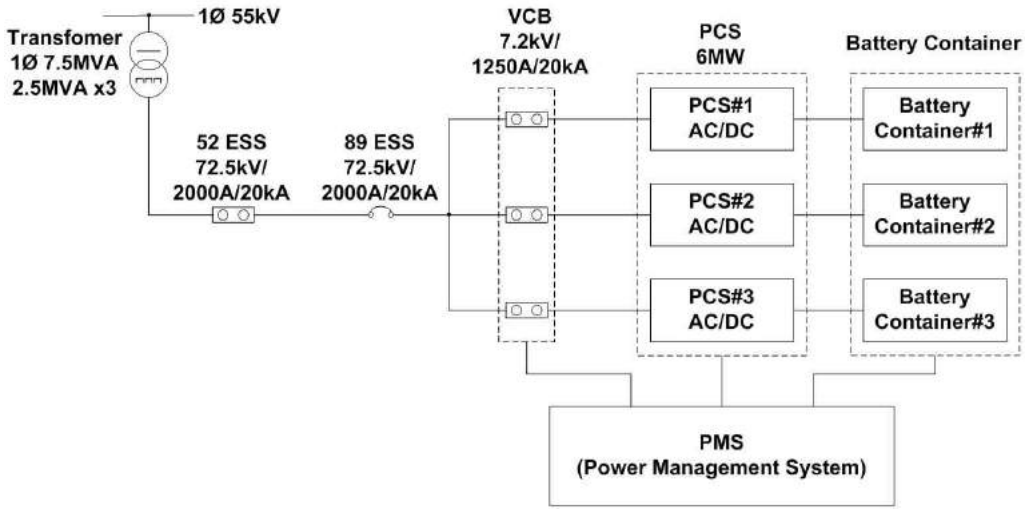


그림 5. 에너지저장장치 블록도

변압기는 두 가지의 주요한 기능을 수행한다. 첫 번째로 전차선로와의 전기적인 절연기능과 두 번째로 55kV를 3.1kV로 강압하는 기능을 수행한다.

VCB(Vacumm Circuit Breaker)는 에너지저장장치의 회로를 가선과 연결하거나 차단하는 기능을 수행하는 장치로서, 진공상태에서 회로를 차단하므로 아크의 소호가 이루어진다.

AC/DC컨버터와 DC/DC컨버터는 양방향 전력변환장치인 PCS(Power Condition System)를 구성한다. AC/DC컨버터는 단상 AC를 DC로 변환하는 컨버터회로를 내장하고 있고, DC/DC컨버터는 AC/DC컨버터에서 변환된 DC를 배터리에 충전이 가능하도록 변환하는 기능을 수행한다.

배터리는 리튬이온배터리로 구성된 에너지저장매체로서, PCS에서 생성한 DC전압이 충전되는 된다. 리튬이온배터리는 뱅크(Bank)형태로 직병렬로 연결되어 에너지를 저장한다.

가. 시스템 기본 설계

① 에너지저장장치 설계

에너지저장장치는 최대 부하 전력 저감을 고려하여 용량을 산정하였으며, [MW]급의 단위 용량으로 구성하기 위하여 고압인버터(멀티레벨 인버터) 배터리에 저장되는 에너지를 기준으로 용량이 산정하였으며, 에너지저장장치의 기본적인 구성은 아래의 그림과 같다.

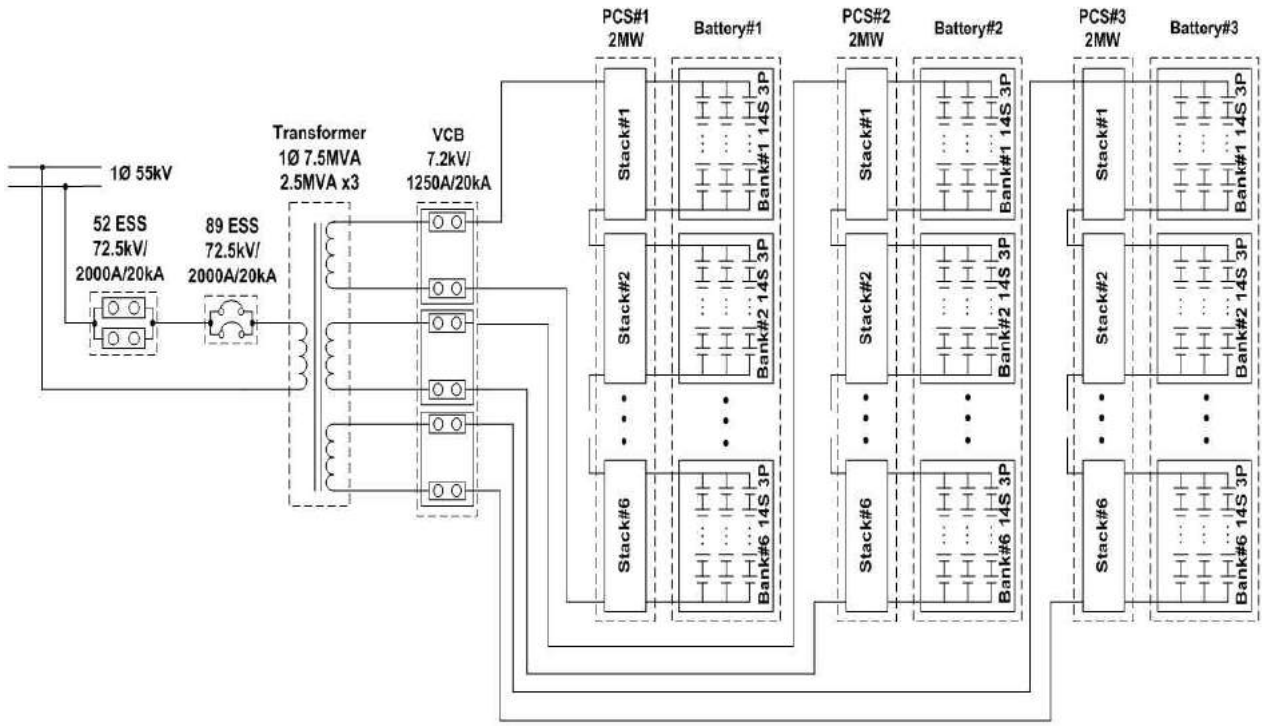


그림 6. 에너지저장장치 구성도

② 사용자 인터페이스 설계

에너지저장시스템의 현재 상태와 동작모드, 방전전력량, 고장 검지 등은 시스템의 GP Monitor를 통하여 실시간으로 확인 할 수 있다. 모니터링 장치의 전체 화면 구성도는 그림과 같다.

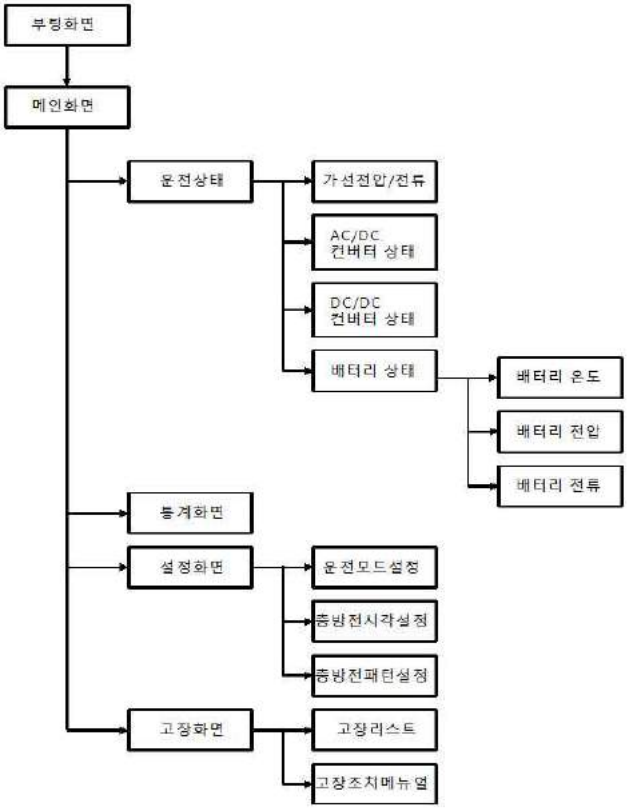


그림 7. 사용자 인터페이스

- 메인 화면

  : 매인 화면에서는 에너지저장장치의 기본적인 동작상태와 운전상태, 통계화면, 설정화면 및 고장화면으로 천이할 수 있는 버튼이 있는 화면으로서, 장치 부팅 후 자동으로 전환된다. 모니터링장치는 사용자에게 현재의 상태를 현시하여 장애 발생 시 신속하게 장애를 조치할 수 있도록 정보를 제공한다. 이 시스템에서는 특히 사용자 인터페이스를 위해 터치스크린이 이용된다.

- 운전상태

  : 운전상태화면은 에너지저장장치의 동작상태를 확인할 수 있는 화면으로서, 장치의 동작에 따른 전압 및 전류정보, AC/DC 컨버터의 상태, DC/DC 컨버터의 상태 및 배터리의 상태를 나타낸다. 배터리 상태화면은 배터리온도, 배터리 전압 및 전류 등을 확인할 수 있는 세부화면으로 전환가능하다.

- 통계화면

  : 지속적인 누적 데이터가 필요한 항목을 일별, 월별 통계를 표시하는 화면으로서, 충전전

력량과 방전전력량을 확인할 수 있다. 또한, 다양한 활용이 가능하도록 예비화면을 보유하도록 한다. 초기에 설정된 기능으로는 월별/일별 방전 전력량을 확인하기 위해 원하는 달을 선택하게 되면 선택된 달에 해당하는 모든 일별 방전 전력량을 그래프 화면에서 일단위로 보여주며 시간단위로도 보여준다.

- 고장화면

: 하부 장치들의 상태에 대한 고장정보를 현시한다. 고장정보는 하부 장치의 상태가 자체 복구가 되어도 고장정보는 비휘발성(Non-volatile) 메모리에 보존하여 해당 고장 정보를 사용자가 CLEAR 시킬 때까지 고장 정보는 유지되도록 한다. 또한, 고장화면에는 고장 이력을 현시하는 고장리스트화면과 고장에 대한 대응메뉴얼을 현시하는 고장메뉴얼화면을 세부화면으로 설계하여 고장에 대한 관리와 유지보수에 활용할 수 있도록 한다.

나. PCS 제어알고리즘 개발

① 단상 AC/DC PWM 컨버터 제어 알고리즘

아래 그림은 PWM AC/DC 컨버터의 구성도이다. S1, S2, S3, S4의 4개의 IGBT로 구성된 단상 전압형 PWM 컨버터의 각각의 스위치에는 역병렬 다이오드가 연결되어 있으며, V_s와 V_c는 전원전압과 컨버터 입력전압이다. L_s와 R_s는 입력 측 승압용 교류 인덕터와 직렬등가저항을 나타낸다. C_{dc}는 DC측 평활용 캐패시터이고 부하가 캐패시터와 병렬로 접속되어 있다. 단상 교류전력은 교류 리액터 L_s 와 PWM 컨버터를 거쳐 직류전력으로 변환되어 평활용 캐패시터 C_{dc}에 $\frac{1}{2}C_{dc}V_{dc}^2$의 에너지로 저장되고, 직류부하로 소비된다. 부하인 전동기가 제동을 행하면 평활용 캐패시터 C_{dc}로 회생에너지가 축적되고, 축적된 에너지는 PWM 컨버터를 통하여 교류전력으로 변환하여 전원 측으로 에너지를 되돌리는 4상한 운전을 행한다. 단상 PWM 컨버터는 필요에 따라 대용량의 부하전류를 공급하기 위해 병렬 구조로 구성되어 스위칭 소자의 부하를 분담하도록 설계된다.

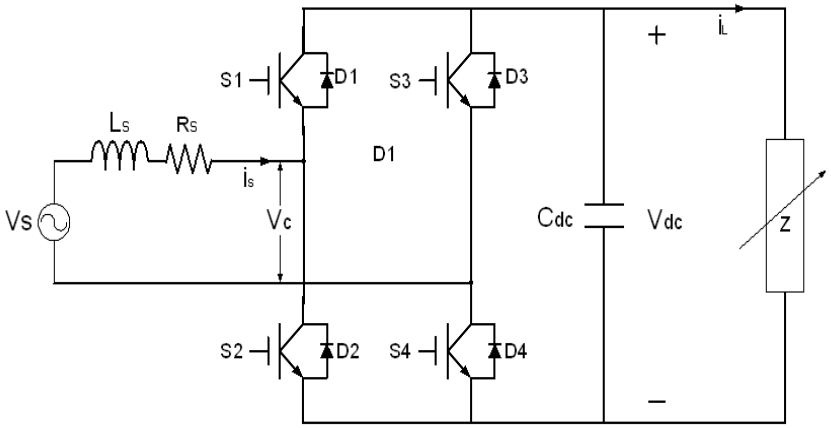


그림 8. 단상 AC/DC PWM 컨버터

② PWM 컨버터의 이중 제어 루프

아래 그림은 PWM 컨버터의 제어 블록도를 나타낸다. V_{dc}^{*}는 직류전압 기준치, V_{dc}는 실제 전압 피드백 값을 나타낸다. 이 값의 편차 $V_{dc}^{*} - V_{dc}$를 전압제어기 $G_v(s)$에 입력하고 적분 및 비례 제어를 행한다. $G_v(s)$의 출력은 부하 전류 급변에 대한 전향 보상항(정수 k_L과 부하전류 i_L의 곱)을 더하여 입력 전류의 크기를 만들어 내고, 이 값은 전원전압에 동기한 $\sin(\omega t)$와의 곱으로 입력전류 지령치 i_s^{*} 를 생성한다. 생성된 전류 지령치 i_s^{*}와 실제전류 i_s와의 편차를 전류제어기 $G_i(s)$에 입력한다. 또한, 2차 권선입력전류 i_s에 교류회로 임피던스 $R_s + L_s \frac{d}{dt}$ 와 정수 k_2를 곱하고, 정수 k_1과 2차 전압 v_s의 곱을 더한 값을 전류제어기 $G_i(s)$의 출력부에 더해 회로임피던스에 의한 입력전류파형의 왜형을 보상한다. 이렇게 얻어진 최종 출력은 2개의 스위칭 캐리어를 통해서 Unipolar 스위칭을 행하게 된다. Unipolar 스위칭 방식은 컨버터 입력 단이 단락되는 모드가 존재하여 컨버터 입력전압에 0, $\pm V_{dc}$가 나타나게 된다. 이 방식은 Bipolar 스위칭 방식과 비교하여 제어 알고리즘이 복잡한 단점이 있으나 컨버터의 스위칭 주파수를 높일 수 있어 입력전류의 맥동을 감소시키는 장점이 있다.

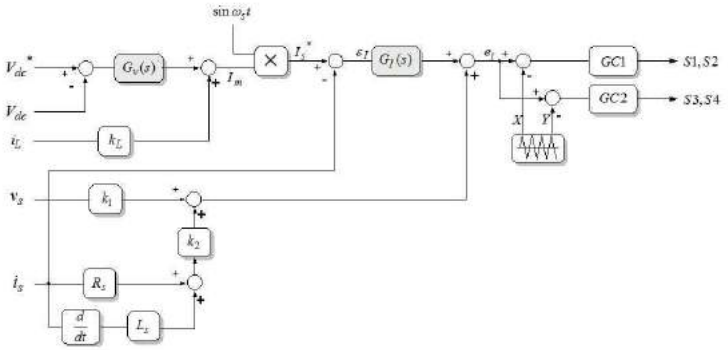


그림 9. PWM 컨버터의 제어 블록도

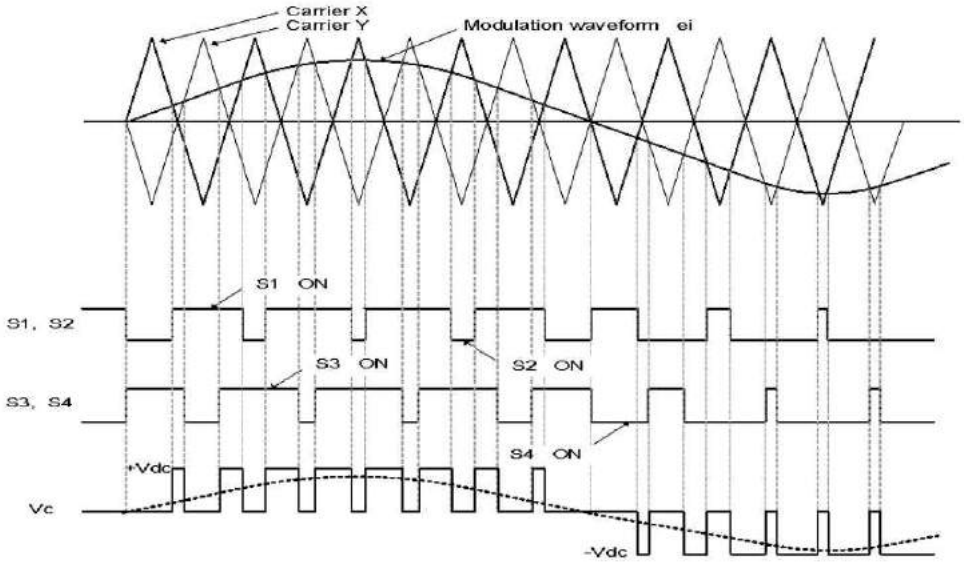
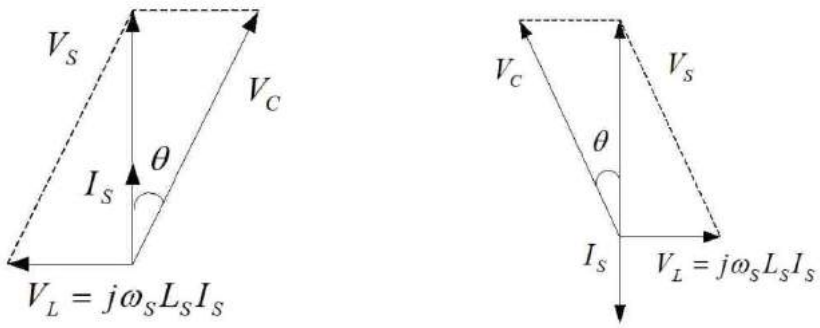


그림 10. 단상 PWM 컨버터의 Unipolar 스위칭 패턴



(a) 계통 전력 공급 시(C_{dc}충전 시)　　(b) 계통 전력 소비 시(C_{dc}방전 시)

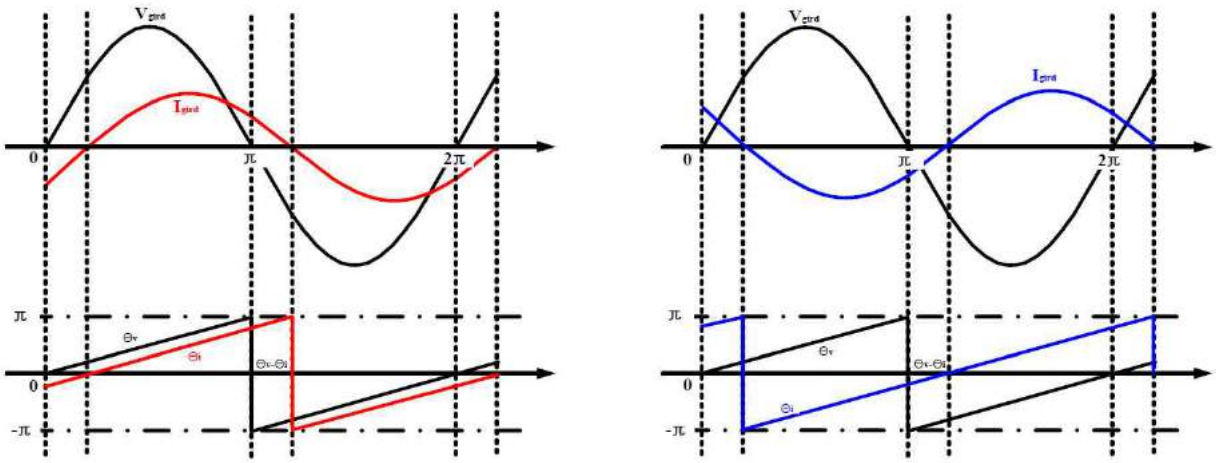
그림 11. 단상 PWM 컨버터의 벡터도

다. 피크전력 저감장치 제어 알고리즘

피크전력 저감장치는 전력 수요가 적은 시간대에 계통의 전력을 배터리에 충전하고 전력 수요가 많은 시간에는 배터리의 에너지를 계통에 공급하여 피크전력을 저감하는 장치이다. 이러한 피크 전력을 제어하기 위해서는 PWM 컨버터의 제어를 통하여 전력을 제어하여야 한다. 본 알고리즘은 이러한 전력 제어에 있어 선로임피던스와 철도차량에 따른 부하특성을 고려하여 제어함으로서 기존의 유효전력을 통한 제어보다 효과적으로 전력 제어를 수행하도록 구성하였다.

① 가선 전압/전류에 따른 전력분석

역행 시 가선의 전압과 전류는 아래 그림에서 보는 것과 같이 선로임피던스와 철도차량 부하특성에 의해 위상차가 발생 되고, 이러한 위상차로 인해 아래 그림과 같이 무효전력 성분을 야기 시킨다. 발생된 무효전력 성분은 역률을 저해하는 요인으로 작용하게 된다.



(a) 역행 시 가선 전압/전류　　(b) 회생 시 가선 전압/전류

그림 12. 역/회생시 가선전압 전류

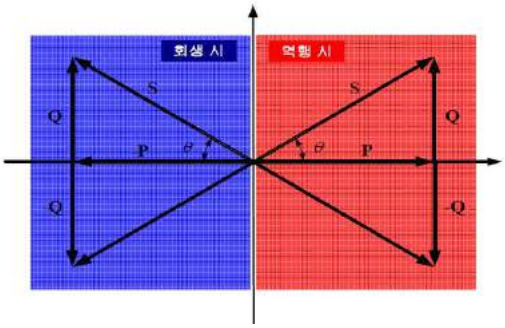
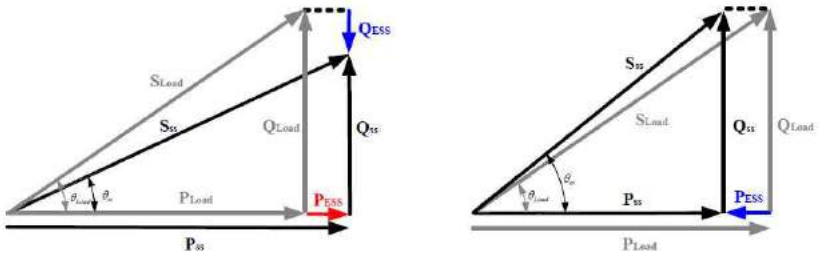


그림 13. 역/회생시 전력분포 및 역률

② 유효/무효전력(역률) 보상 알고리즘

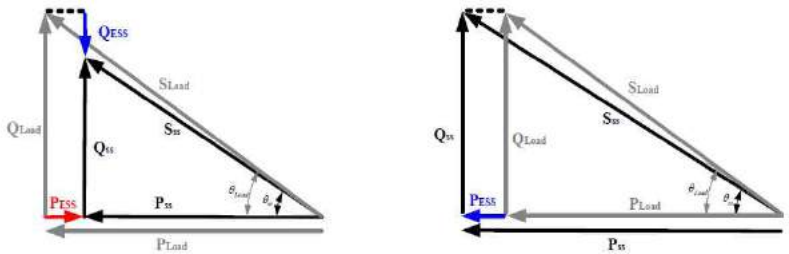
역률은 앞서 설명한 바와 같이 가선의 임피던스와 부하에 의해 발생되는 무효전력에 의해 나빠지게 되므로, 이러한 무효전력을 에너지저장장치를 적용하여 적절히 보상하여 주면 역률은 개선되면서 유효전력 또한 보상할 수 있게 된다. 역률 보상을 위한 에너지저장장치의 동작은 아래 그림과 같이 가선의 환경(역행/회생)과 에너지저장장치의 환경(충전/방전)에 따라 4가지 모드로 나누어 분석할 수 있다.

이러한 각 모드에 따른 동작특성으로부터 피크전력저감 장치가 충전/방전 시에 부하의 특성(역행/회생)상태에 따라 유효전력 및 무효전력을 수행 한다면 변전소의 전력 사용은 좀 더 효율적으로 활용할 수 있게 된다. 다시 말해 피크전력 저감 기능과 동시에 역률 보상의 효과를 얻을 수 있게 되는 것이다.



(a) 에너지 저장장치 충전시 (b) 에너지 저장장치 방전시

그림 14. 역행 시 에너지저장장치 동작 ($|\theta| \le \frac{\pi}{2}$)



(a) 에너지 저장장치 충전시 (b) 에너지 저장장치 방전시

그림 15. 회생 시 에너지저장장치 동작 ($|\theta| > \frac{\pi}{2}$)

③ 기대효과

앞에서 분석한 내용을 정리하면 표 3.1에서 보는 것과 같이 Mode1에서는 유효전력을 공급받아 무효전력을 보상하게 됨으로 역률 개선효과는 다른 모드에 비해 상당히 높은 반면 가선으로부터 유효전력을 공급받아야 하는 단점을 가진다. Mode 2는 부하에 유효전력을 공급함으로서 변전소에서 공급해야할 유효전력을 감소시켜주지만 역률은 상대적으로 저감되는 효과를 보인다. Mode3에서는 회생에너지에 의해 발생된 유효전력을 에너지저장장치가 흡수함으로서 회생 시 유효전력을 감소시키지만, 반면 역률은 개선된다. Mode4에서는 회생 시 유효전력 성분을 에너지 저장장치가 공급함으로서 변전소로 유입되는 유효전력의 양을 증가 시킬 뿐 아니라 역률 개선시키는 장점을 가진다. 분석 결과에서 보는 것과 같이 에너지 저장장치의 전력이 일정한 경우 부하의 유효/무효전력이 작거나, 역률이 좋지 않을 경우 혹은 에너지 저장장치의 전력을 증대 시킬 경우 상대적으로 역률 개선효과는 더 두드러지게 나타날 것이다. 개선된 알고리즘은 역행/회생이 발생되는 구간에서는 상시적으로 에너지저장장치가 기동됨에 따라 역률개선은 물론 유효전력에 대한 보상효과가 탁월할 것으로 기대 된다.

표 7. 각 모드에 따른 효과 분석

	부하	ESS	유효전력	무효전력	역률	비고
Mode1	역행	충전	$P_{Load}+P_{ESS}$	$Q_{Load}-P_{ESS}$	$\cos\left[\tan^{-1}\left(\frac{Q_{Load}-P_{ESS}}{P_{Load}+P_{ESS}}\right)\right]$	유효전력 증가 역률 개선
Mode2	역행	방전	$P_{Load}-P_{ESS}$	Q_{Load}	$\cos\left[\tan^{-1}\left(\frac{Q_{Load}}{P_{Load}-P_{ESS}}\right)\right]$	유효전력 감소 역률 저감
Mode3	회생	충전	$-P_{Load}+P_{ESS}$	$Q_{Load}-P_{ESS}$	$\cos\left[\tan^{-1}\left(\frac{Q_{Load}-P_{ESS}}{-P_{Load}+P_{ESS}}\right)\right]$	유효전력 감소 역률 개선
Mode4	회생	방전	$-P_{Load}-P_{ESS}$	Q_{Load}	$\cos\left[\tan^{-1}\left(\frac{Q_{Load}}{-P_{Load}-P_{ESS}}\right)\right]$	유효전력 증가 역률 개선

④ 시뮬레이션

시뮬레이션은 가선의 환경을 좀 더 정확하게 모델링하기 위하여 변전소 및 구분소에 설치된 AT변압기를 모델링하였고, 또한 에너지 저장장치는 dll에 의한 디지털 제어기로 모델링 하였다. 그림 3.5은 모델링된 시뮬레이션을 보여주고 있고, 또한 그림 3.6~3.9는 각 모드에 따른 결과를 보여주고 있고, 표 3.2는 시뮬레이션 된 결과를 각 모드에 따라 정리한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 보는 것과 같이 부하특성 및 충/방전 상태에 따른 각 모드별 특성이 표 3.2에서 보여진 것과 같은 결과를 보여짐을 알 수 있다.

표 8. 각 모드에 따른 효과 분석(시뮬레이션 결과)

	유효전력[kW]		무효전력[kvar]		역률[%]	
ESS기동상태	미기동	기동	미기동	기동	미기동	기동
Mode 1	9466	10164	4311	3563	91	94.4
Mode 2	9471	8876	4311	4163	91	90.5
Mode 3	-9457	-8758	4311	3561	-91	-92.6
Mode 4	-9461	-10057	4312	4165	-91	-92.4

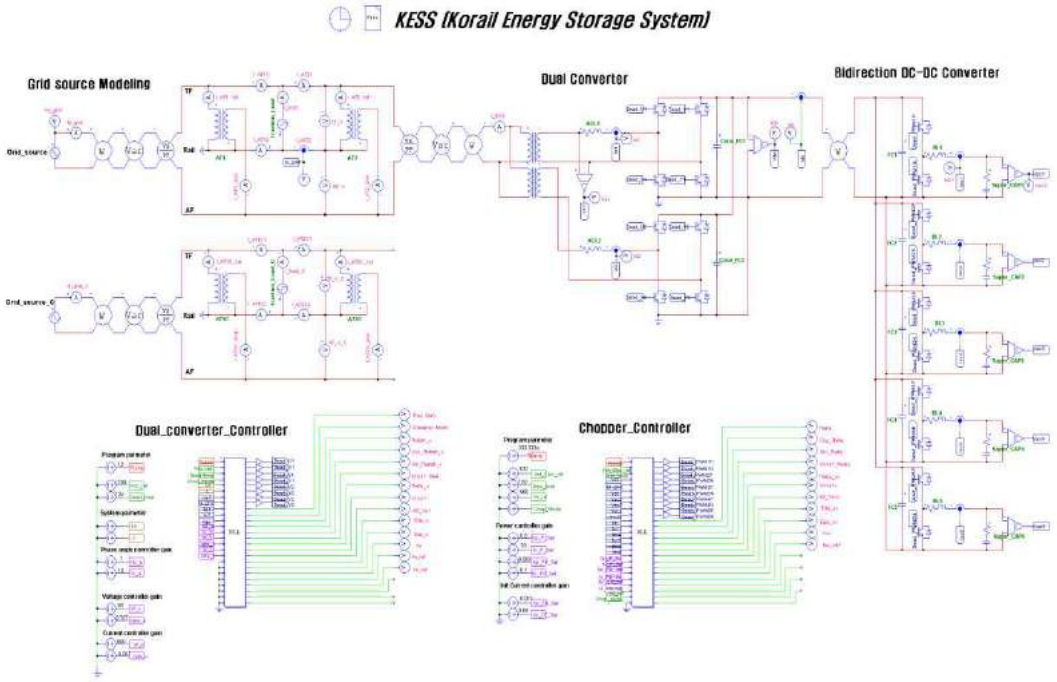
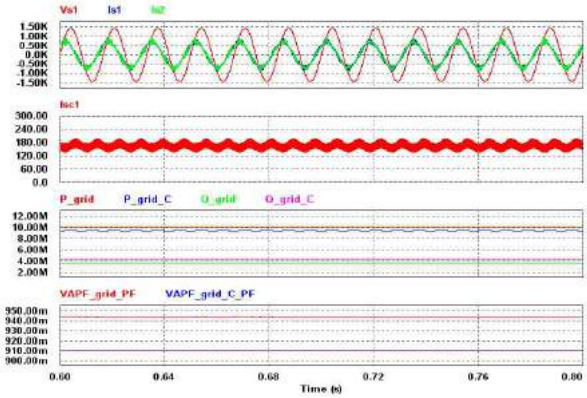
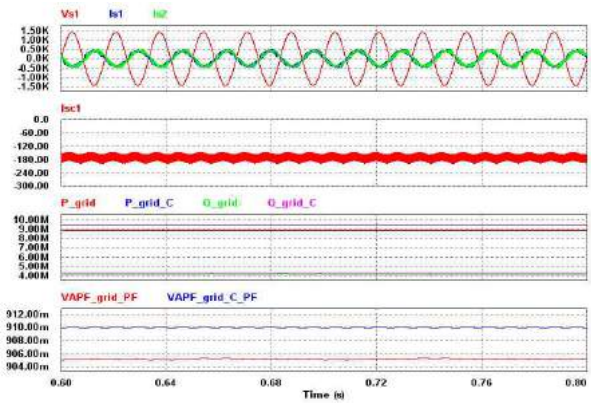


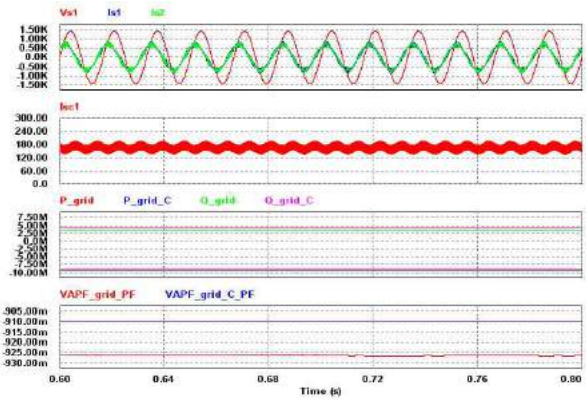
그림 16. 피크전력저감 장치 시뮬레이션 모델링



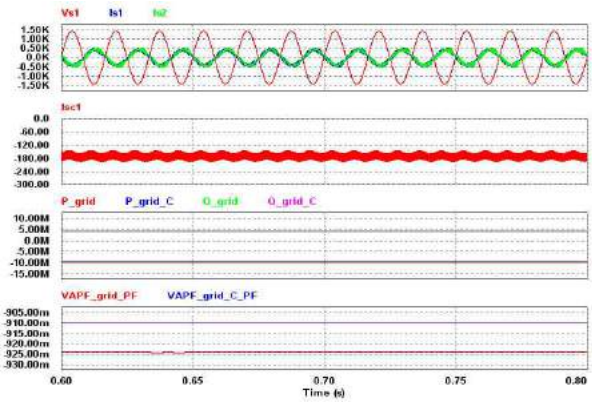
a) Mode 1



b) Mode 2



c) Mode 3



d) Mode 4

그림 17. 각 Mode별 시뮬레이션 결과

3. 피크전력 저감장치 상세설계 및 제작

가. 멀티레벨 인버터의 상세설계

본 과제에 사용되는 PCS는 전체 6[MW]용량으로 설계하고, 배터리는 4[MWh]용량에 2[C]충/방전률을 가지도록 구성되어진다. PCS의 단일 유닛 용량은 2[MW]로 3병렬 접속하도록 구성한다.

6[MW] PCS설계 구성 검토 사항으로 각 단일 용량 2[MW]급의 PCS 설계 시 배터리의 series string의 한계에 의해 인버터의 DC링크 전압은 배터리의 운용전압인 770~1,050[V]로 구성되어진다. 이는 2레벨 인버터로 구성 시 최대출력전압을 약450[Vrms]로 제한하는 요인이 되어 출력전류가 약 4,500[Arms]의 대전류를 발생시킨다. 이는 선로임피던스 및 권선물에 의한 손실을 증가 시키는 요인으로 작용하여 전체적으로 시스템 효율의 저하를 가져오게 된다. 이러한 이유에서 2[MW]급의 PCS설계 시 멀티레벨 구성은 필연적으로 구성되어야 한다. 멀티레벨 인버터 구성에 따른 장점으로는 먼저 제한된 DC전압으로부터 출력전압을 크게 가져감으로서 출력전류를 제한할 수 있고, 이와 더불어 출력전압에 대한 THD저감에 따라 필터의 용량을 줄일 수 있다는 특징을 보인다.

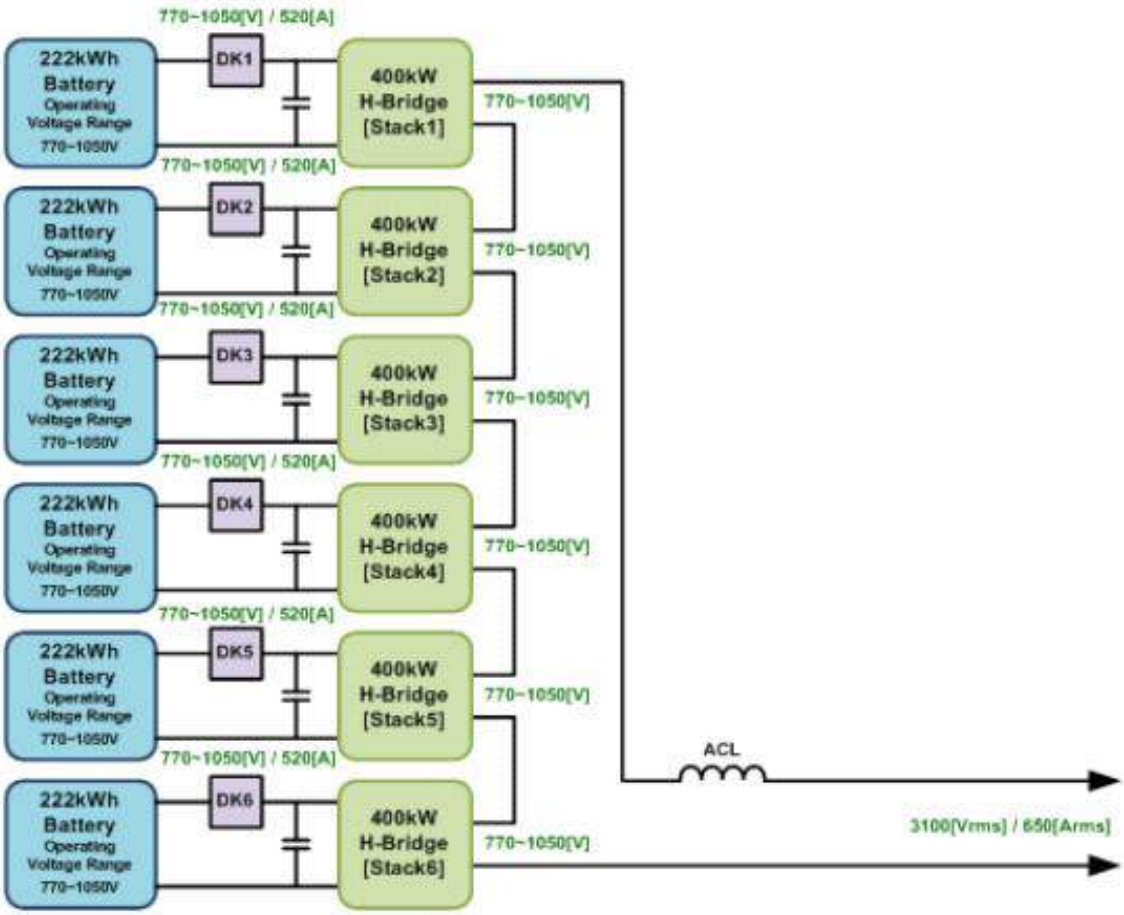


그림 18. 6[MW] PCS 단일 모듈 구성

6[MW] PCS는 멀티레벨 인버터시스템으로 설계되었고, 6개의 셀인버터(Cell Inverter)를 직렬로 연결한 구성이다.

셀인버터는 기본적으로 단상 인버터로서 강제송풍식 냉각시스템을 적용하였으며, 메인 스위칭 소자로 1,200V급의 IGBT, 바이패스 회로를 위하여 Thyristor를 추가 구성하였다.

셀인버터 자체가 하나의 시스템이자 모듈이므로 전면부에 MC커넥터를 적용하였고, 손쉬운 탈착이 가능하도록 주회로 연결부에는 Bus-Bar를 적용하였다.

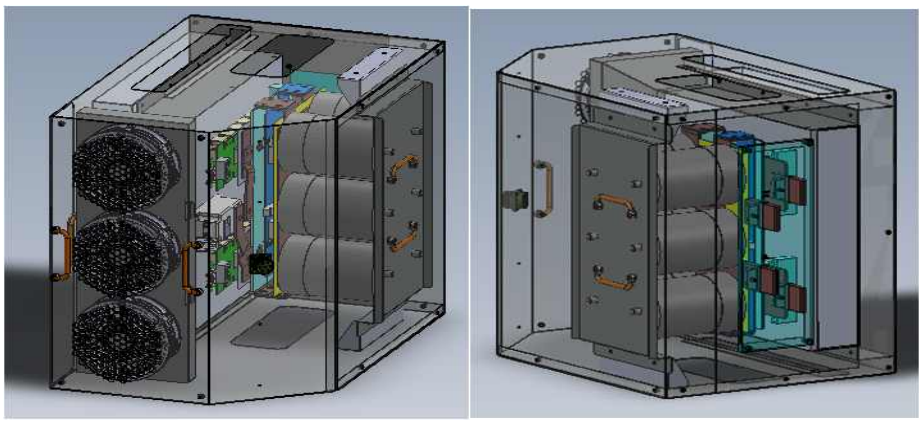


그림 19. 셀인버터 3D 형상

2[MW]급 단일 PCS는 6개의 셀인버터와 입출력 노이즈 필터, MCCB, 전압/전류센서로 구성된 멀티레벨 인버터 시스템이다. 셀인버터는 전면에서 탈착이 가능하도록 슬라이드 방식을 적용하였으며, 시스템 하단부에 고압라인 인입부를 설치하였다.

각 단일 PCS에는 제어기반이 구성되며, 제어기반은 PCS 동작에 필요한 전원과 제어신호를 생성하며 내부에 전원공급장치, 릴레이, 터미널 블록 및 제어보드로 구성되어 있다. 전면판넬에는 기동스위치, 비상정지스위치, 동작램프 및 MMI로 구성되어 있다.

아래의 그림은 2[MW] PCS의 전면과 후면 형상과 제어기반 형상이다.

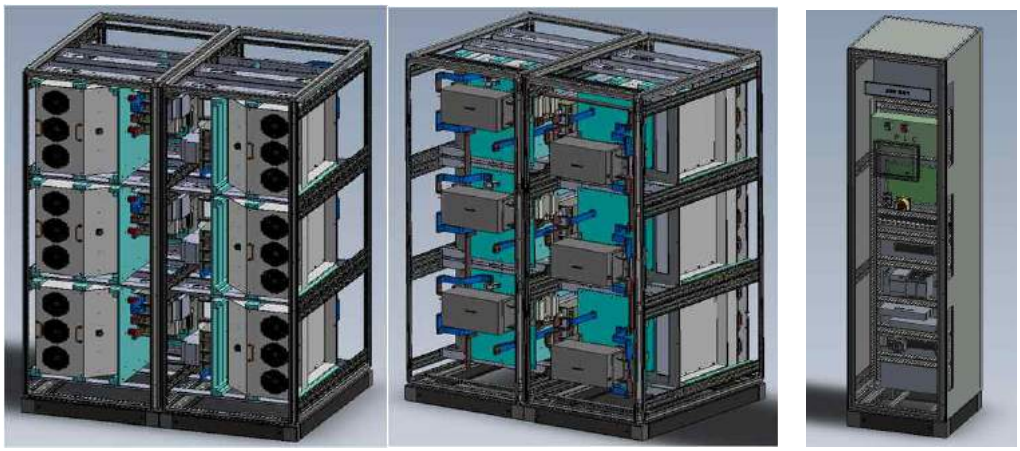


그림 20. 2[MW] PCS와 제어기반 3D 형상

나. 멀티레벨 인버터의 제작

PCS는 6개의 셀인버터와 입출력 노이즈 필터, MCCB, 센서 및 BUS Bar로 구성된 멀티레벨 인버터로서, 제작 완료된 사진은 아래와 같다. PCS는 인적오류를 최소화하기 위하여 Bus-Bar에 선속성이 나타나도록 칼라 수축튜브를 사용하였으며, 셀인버터의 전면 커넥터 역시 인적오류를 방지하기 위하여 형상이 다른 커넥터를 사용하여 신호와 전원을 분리하였다.

제어기반은 PCS 좌측면에 열반되며, 이동성을 고려하여 분리제작 되었으며, PCS와는 케이블로 연결되도록 제작하였다.

그림 21. 2[MW] PCS 및 제어기반 제작 사진

또한, 제어기반에는 PCS의 효율적인 충/방전 제어를 수행하기 위하여 아날로그/디지털신호처리부, PMS / BMS / MMI와의 통신을 위한 통신회로가 구성되어 있는 제어기를 탑재하였으며, 운영자의 편의를 위하여 제어기반 전면 중앙부에 설치되도록 하였다. 아래의 사진은 제작된 제어보드이다.

그림 22. 제어보드 제작사진

4. 배터리 시스템 설계 및 선정

가. 배터리 시스템의 구성

본 과제에 사용되는 배터리는 삼성SDI에서 제작된 제품으로서 제작된 PCS에서 시험이 진행될 수 있도록 6개의 배터리 랙으로 구성하였다. 전압범위는 실제 설치될 배터리 시스템과 동일하도록 770~1050V(256S1P)로 구성되었다.

배터리 랙의 특징으로는 16개 트레이가 직렬연결(암페놀 대전류 커넥터 사용)하고, 하나의 프레임에 256직렬 배터리 1개가 연결되어 있는 구조이다. 배터리 보호를 위한 스위치 소자와 제어감시를 위한 Rack BMS가 함께 설치되며, 전원 및 통신연결은 Rack 전면에 배치되어 유지보수가 간편한 것 등이 있다.

표 9. 배터리 트레이 및 랙 기본사양

트레이 사양		단위	값
	구성	-	16S1P
	주요부품	-	16셀, 안전퓨즈, 트레이 BMS
	치수	mm	488×590×161
	무게	kg	52
	공칭용량	Ah	60
	공칭전압	V	59.2
	공칭전력량	kWh	3.55
	POWER	kW	7.1kW(2C 연속) 14.2kW(4C 최대)
	운영전압	V	48V~65.6V
	충전방식	CC-CV	4.1V/셀, 20A, 3A 차단
	IP등급		IP2X

랙 사양		단위	값
	구성		256S1P
	주요부품		16 Tray, 1 통합형 스위치기어
	치수	mm	166 × 540 × 850
	무게	kg	~1,400
	공칭용량	Ah	60
	공칭전압	V	947.2
	공칭전력량	kWh	56.8
	운영전압	V	768 ~ 1,049.6V
	충전방식	CC-CV	4.1V/셀, 40A, 3A차단
	IP등급		None

나. 고속철도 피크전력 저감장치용 배터리 선정 검토

① 검토 범위

- 피크전력 저감장치에 적용할 4MWh급 리튬이온배터리를 선정하기 위하여 국내 리튬이온배터리 제작업체에 배포한 제안요청에 대하여 기술적으로 검토

② 배터리 제조사 기술 세미나 실시

- 국내의 주요 리튬이온 배터리 제작사에 “고속철도 피크전력 저감기술개발”과제에 대하여 정보를 제공, 향후 배터리 선정절차가 진행될 것을 알린 후, 각 배터리 제작사에 제품의 특징에 대한 기술세미나 개최

- LG화학, 삼성SDI, 에너텍인터내셔널의 엔지니어를 초빙하여 세미나 진행

③ 제안요청 사항

- 주요 요구사양 및 제안 항목

항 목	내 용	비 고
주요기술사양	용량 : 4MWh	
	충방전율 : 1.5C(상시) 2.0C(간헐적)	
제안항목	배터리 모듈	
	BMS	
	RACk	
	컨테이너	공조 및 소화설비 포함
옵션항목	배터리뱅크는 3개의 뱅크로 구성	-PCS 2MW당 1 Bank -향후 변동가능

④ 배터리 공급사 선정

- 각 배터리 제조사에서 제안한 내용을 바탕으로 기술적, 가격적으로 비교평가

- 기술적평가에서는 삼성SDI의 제안내용이 가장 우수, 가격적 평가에서는 삼성SDI와 코캄이 우수한 평가를 받음

- 최종적으로 삼성SDI를 “고속철도 피크전력 저감장치”용 배터리 공급사로 선정함

5. 피크전력 저감장치 제어알고리즘 검증 및 보완

가. 멀티레벨 인버터 제어알고리즘

본 과제에 사용되는 PCS의 제어를 위한 알고리즘은 하기와 같은 제어 알고리즘을 사용하여 운용된다.

- 단상 컨버터 제어기 설계
- 단상 PCS 유효/무효전력 제어 알고리즘
- 멀티레벨 인버터 제어 알고리즘
- 멀티레벨 인버터 구성에 따른 배터리 균등 제어 알고리즘

아래 그림은 6[MW] PCS설계 구성 검토 사항으로 각 단일 용량 2[MW]급의 PCS 설계 시 배터리의 series string의 한계에 의해 인버터의 DC링크 전압은 배터리의 운용전압인 760~1000[V]로 구성되어진다. 이는 2레벨 인버터로 구성 시 최대출력전압을 약450[Vrms]로 제한하는 요인이 되어 출력전류가 약 4500[Arms]의 대전류를 발생시킨다. 이는 선로임피던스 및 권선물에 의한 손실을 증가 시키는 요인으로 작용하여 전체적으로 시스템 효율의 저하를 가져오게 된다. 이러한 이유에서 2[MW]급의 PCS설계 시 멀티레벨 구성은 필연적으로 구성되어야 한다. 멀티레벨 인버터 구성에 따른 장점으로는 먼저 제한된 DC전압으로부터 출력전압을 크게 가져감으로서 출력전류를 제한할 수 있고, 이와 더불어 출력전압에 대한 THD저감에 따라 필터의 용량을 줄일 수 있다는 특징을 보인다. 아래 그림은 이렇게 구성된 멀티레벨 인버터의 2가지 방안 검토 사항이다.

첫 번째 토폴로지는 5레벨로 구성된 단상 멀티레벨 인버터로서 배터리와 인버터 사이에 DC-DC컨버터를 두어 인버터의 DC전압을 분리시켜주고, 인버터의 DC링크 전압레벨을 1600[V]로 제어함으로서 출력전압을 3100[V]로 가져가는 방안이며, 두 번째 토폴로지는 DC링크단의 컨버터를 생략하고 대신 멀티레벨 인버터의 레벨을 13레벨로 구성하는 방안이다.

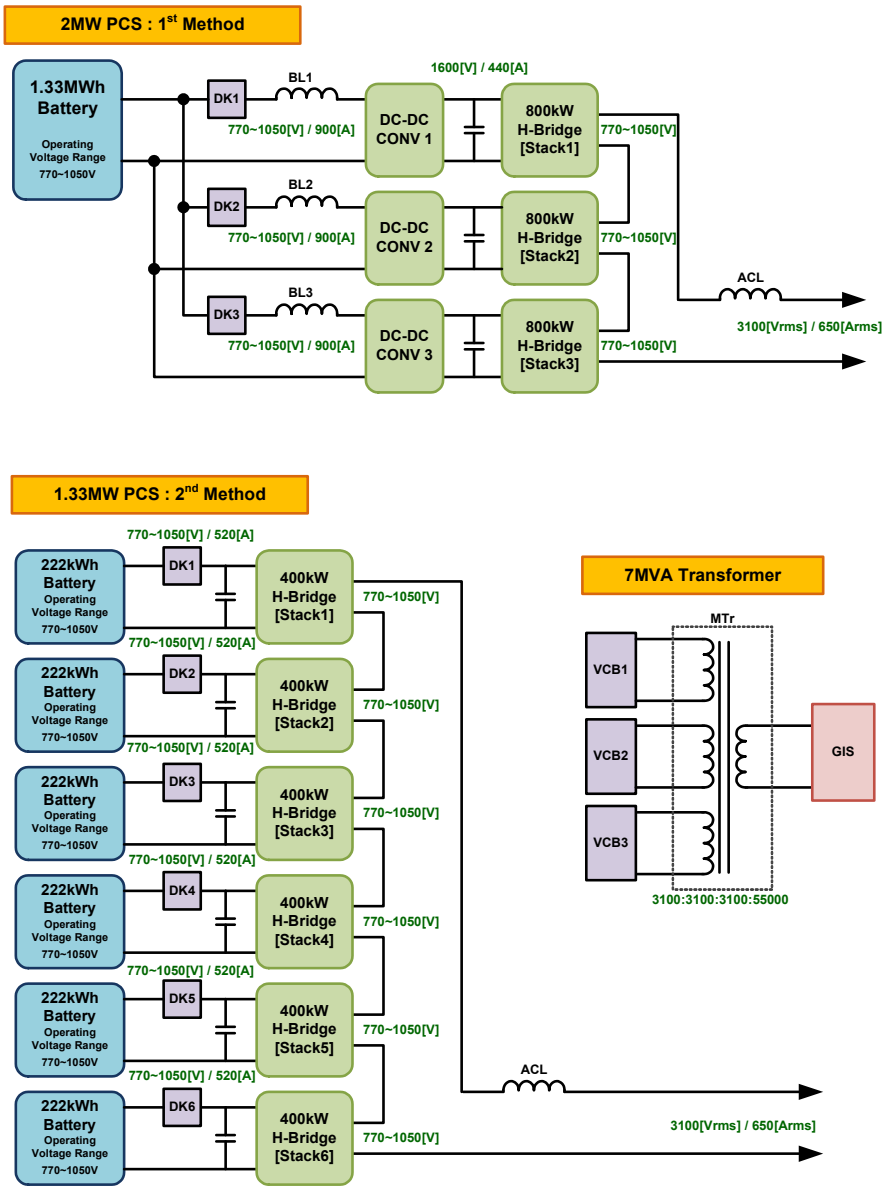


그림 23. 멀티레벨 인버터 구성도

첫 번째 토폴로지는 배터리와 인버터 사이에 DC-DC컨버터를 두어 멀티레벨 인버터의 DC링크 전압 분리 및 배터리 전압보다 높은 전압 제어에 따른 출력전압 증가를 유도할 수 있지만, 이와 더불어 DC-DC컨버터의 제어를 수반하여야 하고, DC-DC컨버터에 권선물이 포함되어 시스템의 부피를 증가 시키는 결과를 야기한다. 또한 멀티레벨 인버터의 DC링크 전압을 높게 가져감으로서 IGBT의 소자의 정격을 높여야 하는 문제가 발생한다.

두 번째 토폴로지는 DC링크 전압이 각각 분리된 배터리를 이용함으로서 배터리의 병렬 스트링에 대한 부담을 줄일 수 있고, PCS제어가 용이해 지며, 또한 인버터의 레벨 증가에 따른 출력 필터의 용량 감소를 가질 수 있다는 장점을 가진다.

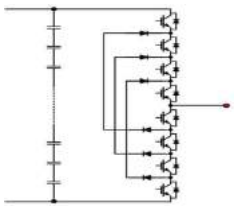
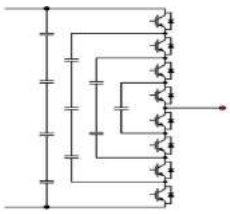
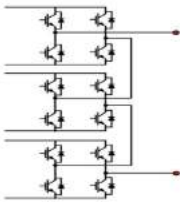
이러한 이유로 본 과제에 사용되는 PCS의 토폴로지는 13레벨 멀티레벨 인버터로 선정하였다.

① 멀티레벨 인버터 토폴로지

멀티레벨 인버터의 토폴로지는 캐스캐이드, 다이오드클램프, 플라잉캐패시터 방식이 사용된다. 표 4.1은 이러한 토폴로지들의 일반적인 특징을 설명하였다. 그림 4.1은 각 토폴로지에 따른 회로 구성을 보여주고

있다. 이 중 배터리와 같이 제한된 DC링크 전압을 사용하여 높은 출력전압을 낼 수 있는 구조의 멀티레벨 인버터 방식은 캐스캐이드 구조의 멀티레벨 인버터만이 가능하다. 이러한 캐스캐이드 멀티레벨 방식은 기존에는 다수의 탭을 가지는 변압기를 전원으로 사용하여 각각의 인버터의 분리된 DC전원을 사용함으로서 출력을 멀티레벨로 가져가는 방식으로 응용되어왔다. 하지만 PCS의 경우에는 DC전압이 변압기의 다수의 탭에서 나오는 전원이 아닌 분리된 배터리의 전원을 사용함으로서 멀티레벨 인버터의 각 층을 구성하는 인버터의 개별적인 출력 제어가 반드시 요구되어 진다.

표 10. 일반적인 단상 멀티레벨인버터의 특징

	Diode clamped 방식	Flying Capacitor 방식	Cascade 방식
회 로 구 성			
장 점	-독립된 DC전원 불필요 -캐패시터 전압불균형이 작음	-독립된 DC전원 불필요 -스너버 회로 없이 구성 가능	-모듈화가 용이 -모듈 수 조절에 따른 전압레벨 변경 용이
단 점	-클램핑 다이오드 필요 -DC link전압균형 제어 필요 -IGBT에 불균등한 전류 스트레스 발생 -스너버 회로 필요	-캐패시터단의 전압 불균형 -캐패시터 간 공진발생 가능 -캐패시터가 다량 필요 -기생 인덕턴스 감소를 위해 복잡한 인버터 구조설계 필요	-여러개의 독립된 DC전원 필요 (독립된 dc전원은 전기적으로 완전 절연되어야 만 한다.)
IGBT	2(m-1)	2(m-1)	2(m-1)
기 타	Clamping Diode 필요 : (m-1)(m-2)	Clamping Capacitor 필요 : (m-1)(m-2)/2	

(여기서, m은 멀티레벨인버터의 레벨 수)

② 캐스캐이드 멀티레벨 인버터 제어방법

멀티레벨 인버터의 일반적인 제어방법은 집중제어방식과 분산제어 방식 두 가지로 구성 할 수 있다. 본 연구진행에서는 배터리를 저장매체로 하는 단상 PCS시스템인 것을 감안하여 데이터의 일괄 처리와 각 인버터 모듈간의 안정적인 구동을 위한 집중제어방식의 제어방법을 선정하였으며, 집중제어방식에 있어 주제어기의 처리 부담을 줄여주기 위하여 시퀀스 및 제어를 담당하는 CPU와 주변장치들과의 인터페이스 부분을 담당하는 CPU를 두어 독립적으로 운용되도록 구성하였다. 주제어기와 각 인버터 모듈과의 인터페이스는 광커넥터를 통한 PWM신호, 각 배터리 링크단를 인버터와 접속하기 위한 접촉기의 지령 및 피드백 신호로 구성된다. 또한 PCS는 BMS와의 통신을 통하여 배터리의 상태를 순시로 모니터링 하고, EMS와의 통신을 통하여 가선의 상태정보 및 유효/무효전력지령을 받고, PCS 및 BMS의 상태을 전송하도록 하였다.

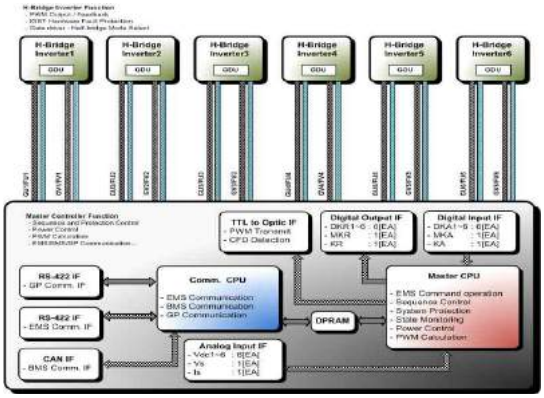


그림 24.멀티레벨인버터 제어구조 : 집중제어방식

③ 멀티레벨 인버터 스위칭 방법

멀티레벨 인버터의 스위칭 방법에는 아래 그림에서 보는 것과 같이 다양한 변조 방식들이 존재한다. 이 변조방식들은 스위칭 손실을 최소화 하고 출력 전압의 THD(Total Harmonic Distortion)를 개선시키기 위한 목적으로 사용된다. 일반적으로 산업용 멀티레벨인버터는 아래의 다양한 변조방식들 중 정현파와 여러 개의 반송파를 비교하여 스위칭 하는 멀티 캐리어 PWM방식을 채택하고 있다. 이는 출력 파형의 고조파 성분을 감소시키기 위한 방식으로 스위칭 구현이 간단하고 사용이 편리하기 때문이다. 이러한 멀티 캐리어 PWM방식에는 PSM(Phase-shifted)방식과 LSM(Level-shifted)방식이 있으며, LSM 방식은 다시 APOD(Alternative Phase Opposition Disposition), POD(Phsae Opposition Disposition), PD(Phase Disposition)방식으로 구분된다.

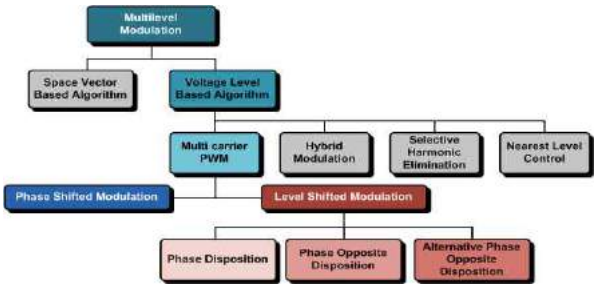


그림 25. 멀티레벨인버터 전압변조방식

- Phase Shifted Modulation [PSM]

멀티레벨인버터의 각 인버터 모듈은 독립된 DC전원을 가진 단상 인버터로서 각 인버터는 정현파와 각 모듈에서의 반송파에 의해 출력되며, 이 때 각 모듈의 스위칭 동작은 unipolar PWM 스위칭 방식에 의해 동작된다.

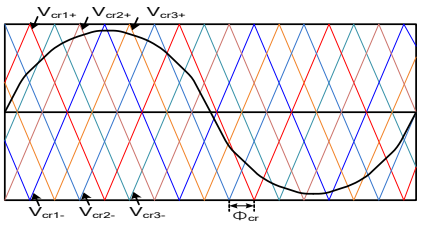


그림 26. Phase-shifted 변조의 반송파

- Level Shifted Modulation [LSM]

LSM방식은 PSM방식에 비해 고조파 특성이 우수하지만, 각 인버터 모듈의 분리된 DC전원이 불평형 전력을 가진다는 단점을 가진다. 이러한 LSM방식은 그림 4.4와 같이 반송파의 배치에 따라 PD, POD, APOD방식으로 구분된다. LSM방식들 중 PD방식의 변조가 THD특성이 가장 우수한 것으로 알려져 있다.

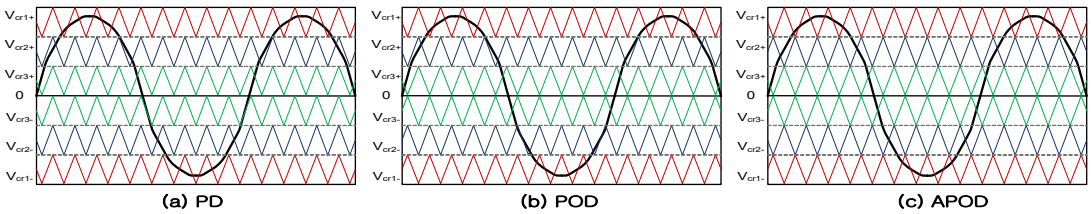


그림 27. LSM변조의 반송파 방식

- PSM방식과 LSM방식의 특징 비교

현재 적용하려는 캐스캐이드 멀티레벨인버터의 DC전원이 배터리인 점을 감안하면, 전력분배가 균등하게 제어되는 PSM방식이 유리하지만, PCS가 운용하기 전에 항상 배터리의 SOC상태가 균일하게 유지되고 있어야 한다는 점에서 배터리를 DC전원으로 사용하는 PCS에는 적합하지 않다. 반면 LSM방식의 경우에는 전력분배가 균등하게 일어나지 않는다는 단점을 가지지만, 이는 적절한 보상을 통하여 각 인버터 모듈의 전력을 조절할 수 있다는 장점으로 활용할 수 있다. 또한 THD특성에서도 PSM방식에 비해 유리한 점을 가지고 있다.

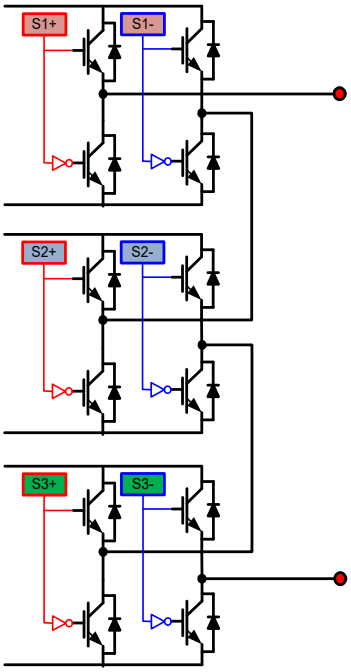
표 11. PSM과 LSM의 특징

	Phase-Shifted PWM	Level-Shifted PWM
스위칭 주파수	-모든 인버터모듈의 스위칭주파수/스위치도통시각/스위칭 손실이 동일함	-각 인버터모듈의 스위칭주파수/스위치도통시각/스위칭손실이 상이함
DC전력 분배	-자동적으로 균등분배 -임의의 제어를 통한 전력분배가 불가능	-일반적인 패턴에서는 각 인버터모듈마다 전력분포가 상이하게 나타남 -임의의 제어를 통한 전력분배 가능
THD 특성	V_{AN} : 18.8[%] V_{AB} : 15.6[%]	V_{AN} : 18.6[%] V_{AB} : 10.8[%]

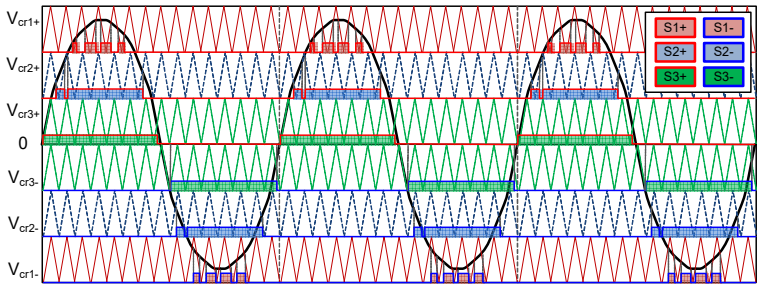
- Combination Level Shift Modulation [CLSM]

제안된 PWM변조 방식은 DC전원을 배터리로 사용하는 캐스캐이드 멀티레벨인버터를 효과적으로 제어하기 위한 변조방식으로 DC전력 분배 제어가 용이한 LSM방식에서 THD특성이 가장 우수한 PD기법을 응용하여 구성하였다. 제안된 CLSM은 각 인버터 모듈에서 발생되는 스위칭 손실을 최소화 하면서 시스템 효율을 향상시키고, DC전력의 분배를 최적화시키기 위한 알고리즘이다. 일반적인 PD변조방식은 각 인버터 단의 DC전력 사용량이 불균등하게 분포되는 문제가 있으며, 이를 보상하기 위해서는 스위칭 패턴을 적절히 회전시켜 주어야 한다.

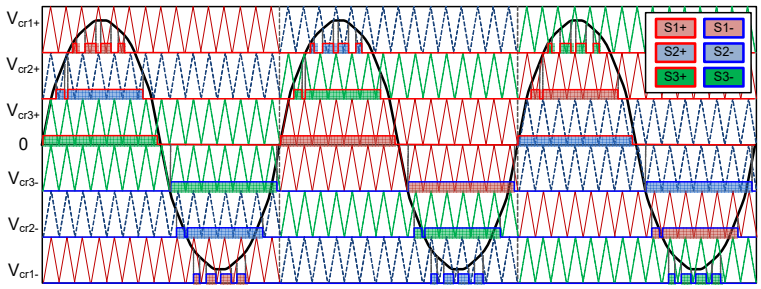
이러한 스위칭 패턴 회전방법으로 아래 그림에서 보는 것과 같이 3가지 방법에 대하여 조합하여 적용하고자 한다. 첫 번째는 RPR(Reference Period Rotation)방식으로 지령값에 대한 주기로 스위칭을 회전시키는 방법이고, 두 번째는 CPR(Carrier Period Rotation)방식으로 반송파에 대한 주기로 스위칭을 회전시키는 방법, 그리고 세 번째는 ASS(Adapted Switching Select)방식으로 각 인버터의 DC링크 전압을 감시하여 스위칭을 선택적으로 출력하는 방법이다.



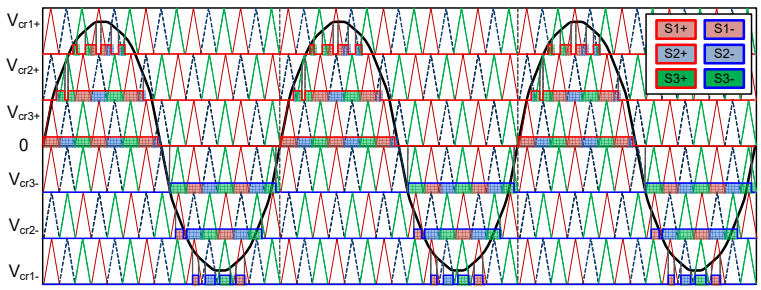
(a) 7레벨 캐스캐이드 인버터



(b) 전력분배를 하지 않은 일반적인 PD변조 스위칭패턴



(c) 전력분배를 사용한 PD변조의 RPR 스위칭패턴



(d) 전력분배를 사용한 PD변조의 CPR 스위칭패턴

그림 28. 스위칭 회전패턴에 따른 캐리어의 변화

④ 시뮬레이션

시뮬레이션은 단상 PCS 토폴로지로 사용된 13레벨의 단상 멀티레벨 인버터의 제어특성 및 알고리즘 검증을 위하여 전력변환장치 시뮬레이션 툴인 PSIM을 사용하여 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 실제 제품설계에 사용되는 파라미터로 적용하였고, 디지털 제어기의 특성을 맞추기 위하여 DLL을 사용하여 내부프로그램을 작성하였다. 이렇케 모델링 된 시뮬레이션 블록은 하기의 그림 4.7와 같이 구성된다.

시뮬레이션은 2MW 출력지령에 대한 응답확인 및 PWM 모드에 따른 전력분배 및 DC전압 균등분배를 확인하기 위하여 수행되었으며, 그 결과는 그림 4.8~ 그림 4.9와 같은 결과를 보였다.

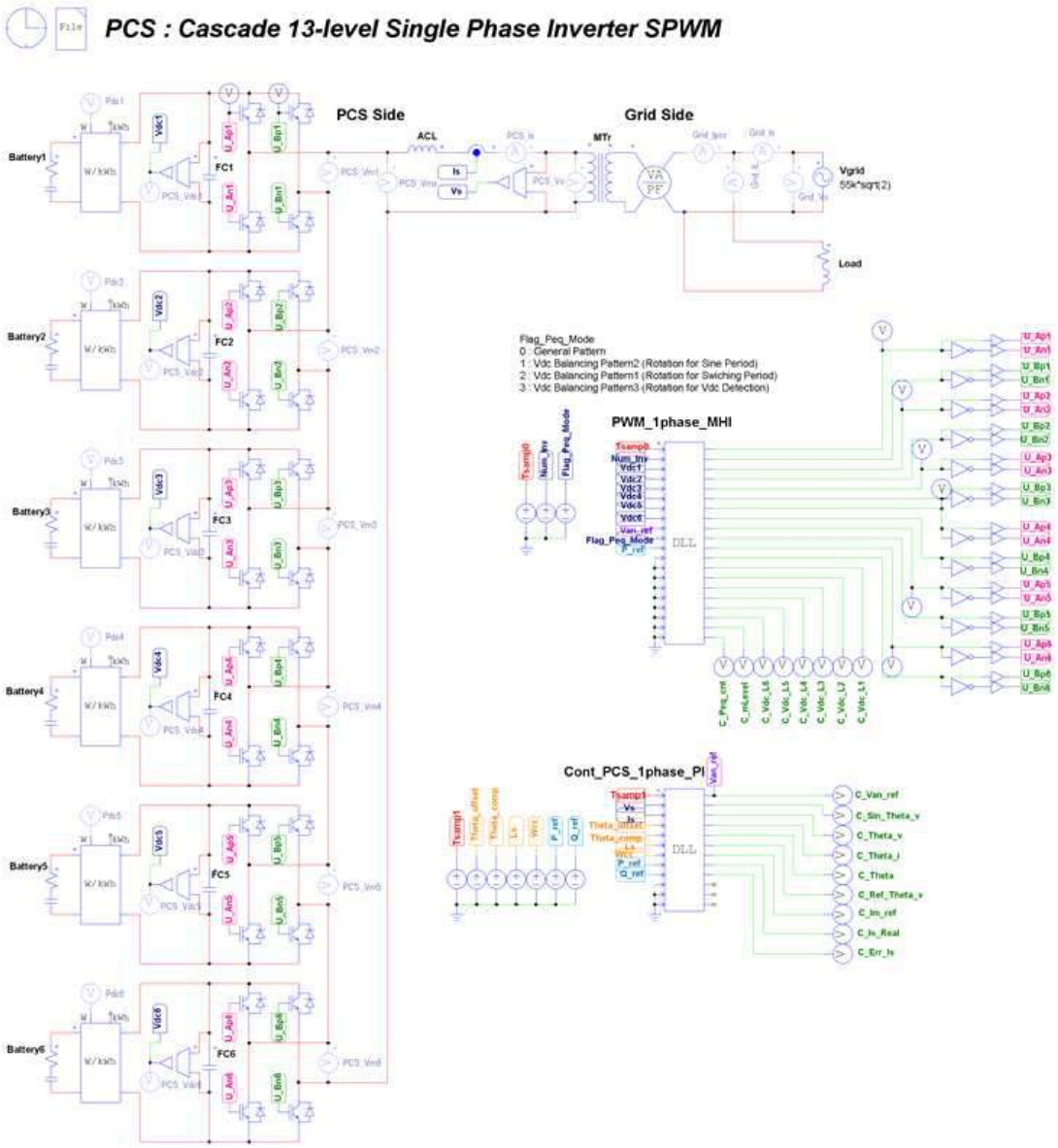


그림 29. Cascade 13-level 단상 인버터

- RPR Mode 시뮬레이션 결과

그림 4.8은 RPR(Reference Period Rotation) 모드에서의 시뮬레이션 결과로서 동일한 AC출력에 대한 DC링크에서의 전력 및 전압 분배를 확인 한 결과이다. 결과에서 보는 것과 같이 13레벨 인버터의 6개의 Cell 인버터가 AC출력주기인 60[Hz]을 주기로 순환하면서 출력됨을 확인할 수 있다. 또한 이 주기(60[Hz]/6=10[Hz])에 맞추어 전력 및 DC링크 전압이 균등하게 분배됨을 확인 하였다. 이 PWM 모드는 실제 사용 시 6개 Cell 인버터와 결선된 배터리 뱅크의 SOC편차가 적은 경우에 사용되는 모드이다. 추가로 하기에서 설명될 CPR모드에 비해 각 셀 인버터의 스위칭 손실이 적게 분포되고 있음도 확인 할 수 있다.

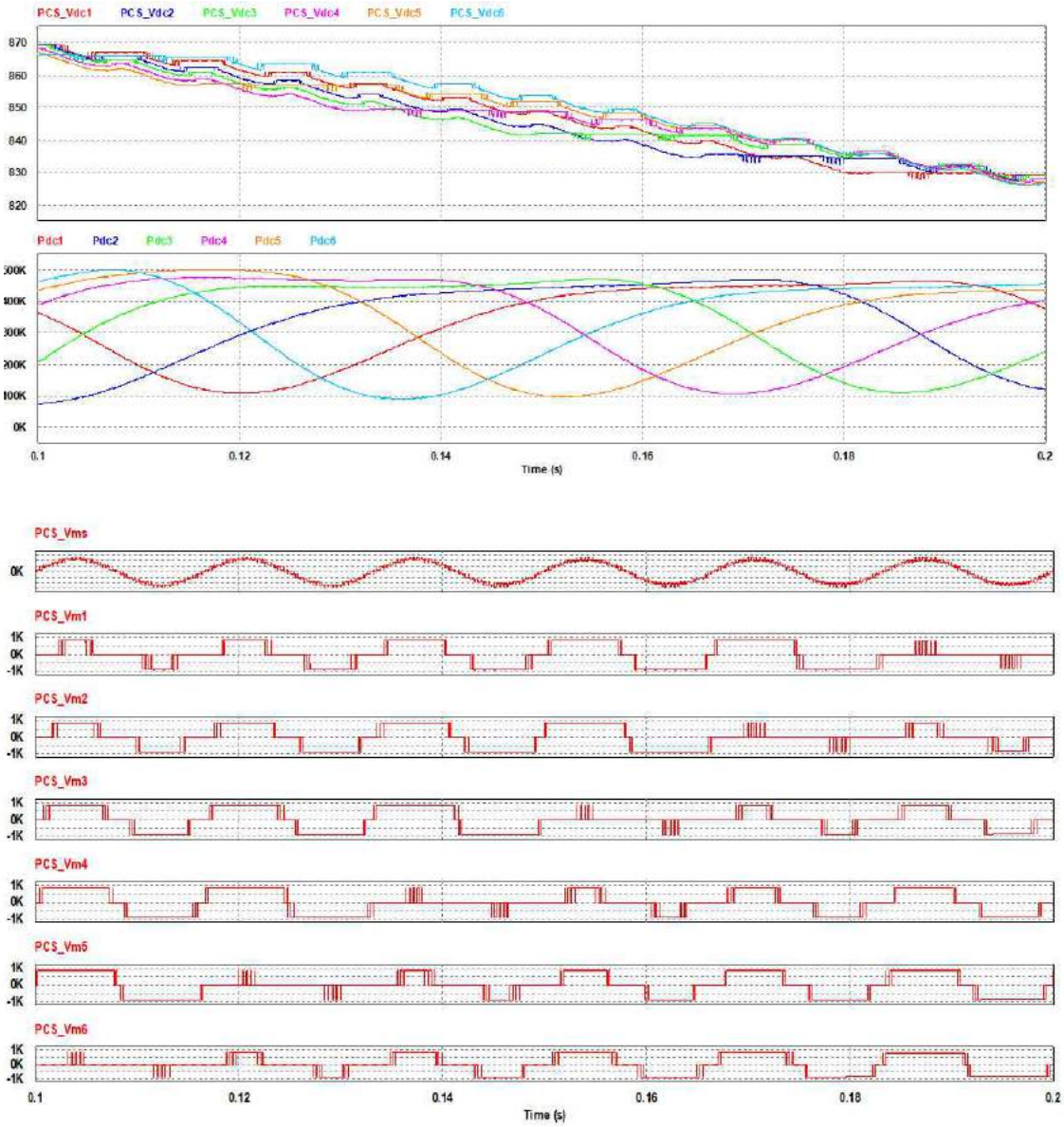


그림 30. RPR Mode에서의 시뮬레이션 결과

- CPR Mode 시뮬레이션 결과

그림 4.9은 CPR(Carrier Period Rotation) 모드에서의 시뮬레이션 결과로서 동일한 AC출력에 대한 DC링크에서의 전력 및 전압 분배를 확인 한 결과이다. 결과에서 보는 것과 같이 13레벨 인버터의 6개의 Cell 인버터가 캐리어 주파수인 2.5[kHz]을 주기로 스위칭을 함을 확인 할 수 있다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 RPR 모드에 비해 각 셀 인버터의 출력전력 및 DC-link전압의 밸런싱이 정밀하게 반응하고 있음을 확인 할 수 있다. 하지만 각 셀 인버터의 스위칭이 빈번하게 이루어 짐에 따라 손실이 증가 되는 모습도 확인 할 수 있다.

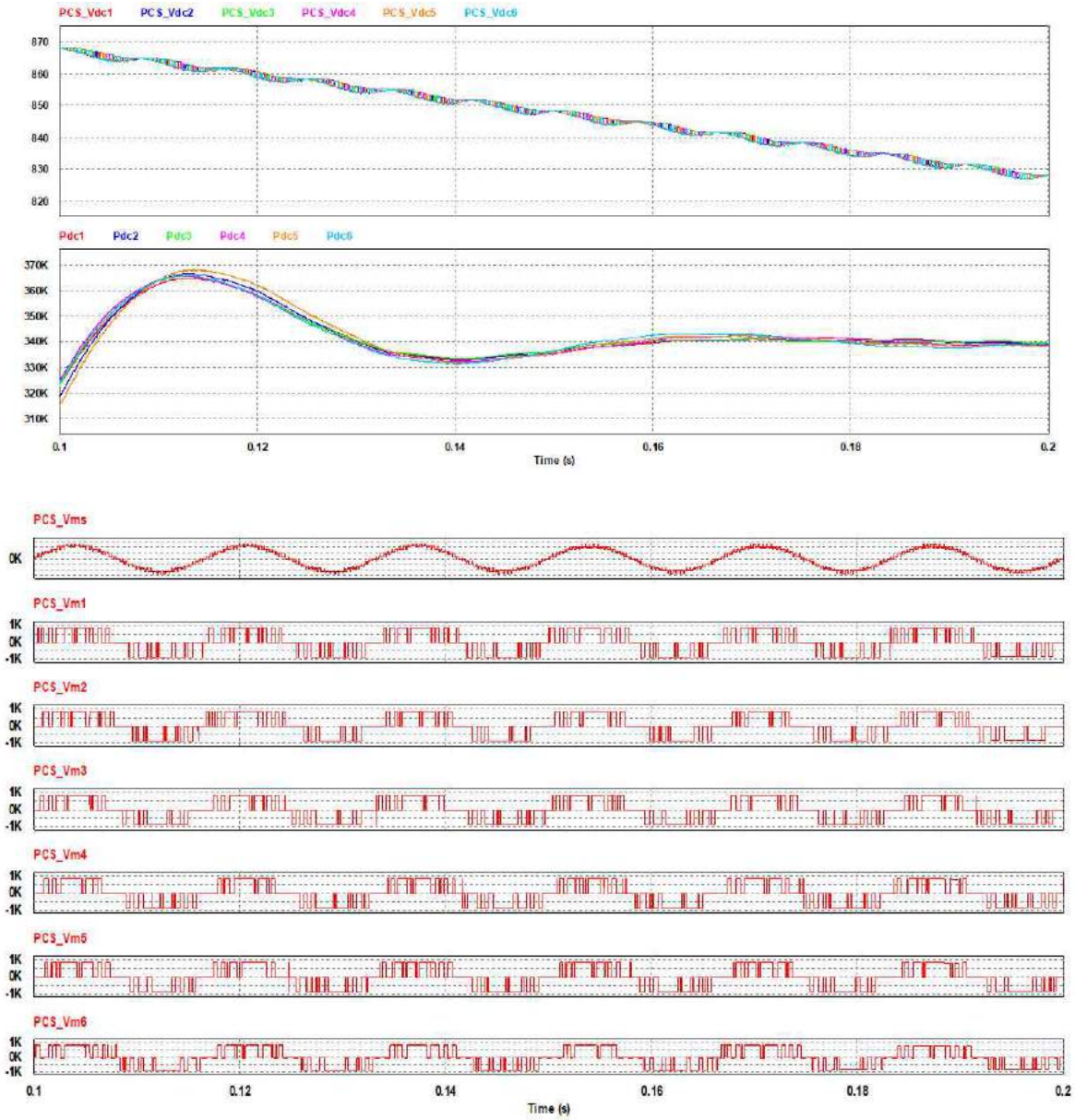


그림 31. CPR Mode에서의 시뮬레이션 결과

- ASS Mode 시뮬레이션 결과

아래 그림은 ASS(Adapted Switching Select) 모드에서의 출력 분배를 위한 전력의 분포도를 확인 한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 2MW의 출력을 내기 위한 각 셀의 인버터의 출력은 하기와 같다.

Cell Inv #1 : 60[kW]	Cell Inv #2 : 290[kW]	Cell Inv #3 : 380[kW]
Cell Inv #4 : 420[kW]	Cell Inv #5 : 430[kW]	Cell Inv #6 : 450[kW]

이 결과는 배터리의 SOC가 불균형 분포를 가지는 경우 각 셀 인버터의 순서를 변경하여 출력함으로서 밸런싱을 맞출 수 있게 된다. 이는 제어 알고리즘에 각 셀 인버터와 연결된 배터리 뱅크의 SOC를 오름차순과 내림차순 정렬을 하는 알고리즘을 포함하여야 하며, 또한 밸런싱 제어 관리 SOC의 임계점 설정치가 중요한 요소라 하겠다.

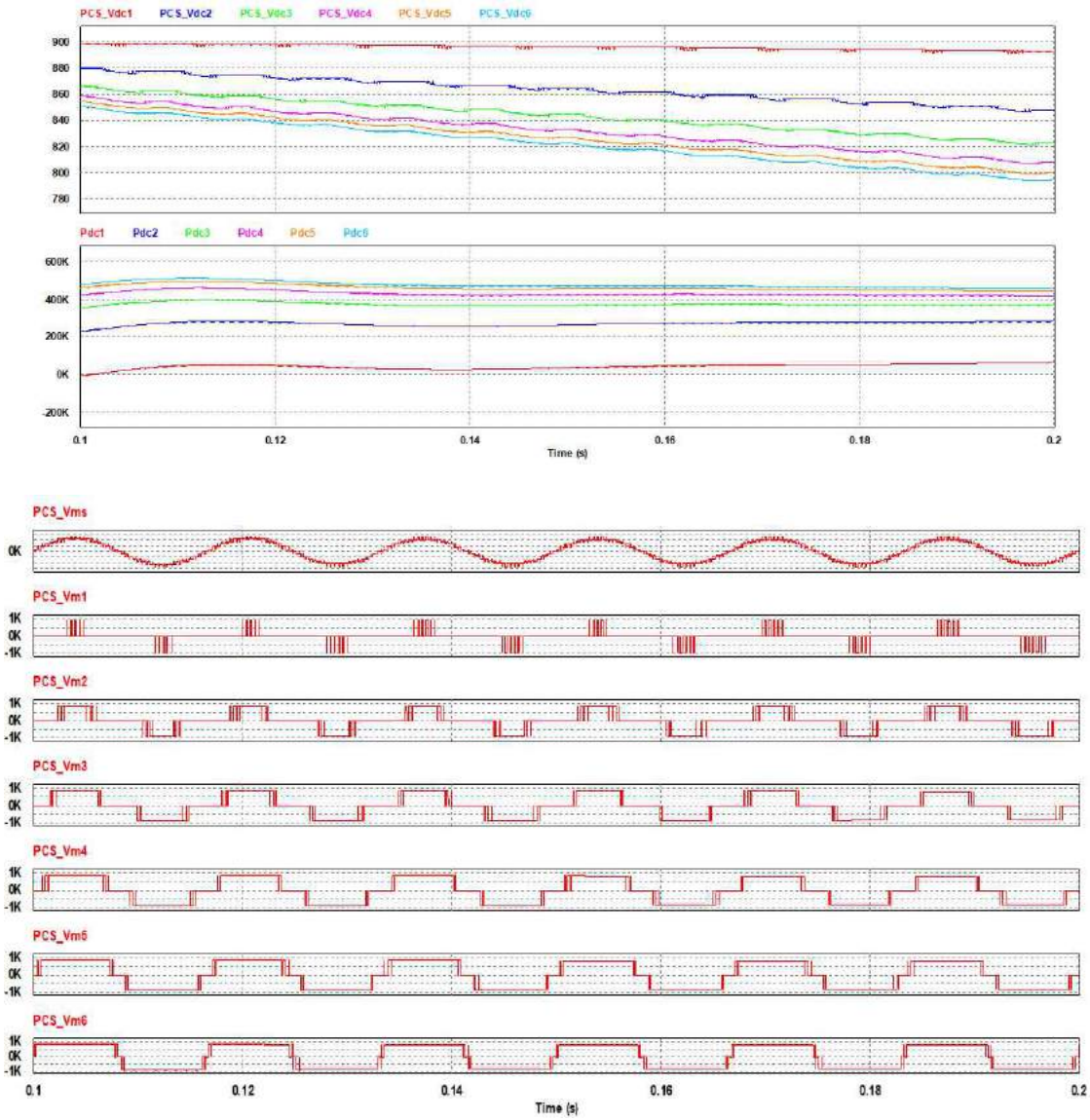


그림 32. ASS Mode에서의 시뮬레이션 결과

나. 배터리 관리 시스템 (BMS : Battery Management System)

BMS는 배터리의 상태를 실시간으로 검지하여 통신으로 PCS에게 그 정보를 전송하여 준다. 각 Cell의 상태 정보를 수집하여 이상 유·무를 PCS로 전송하여 충전 및 방전 수행의 가능 여부를 판단하고, 각 Cell간 전압차가 발생하여 Cell간 전압 편차를 없애 주거나 완전 충전을 위한 자체 충전 기능이다. PCS와 BMS간 통신 시퀀스는 아래 그림과 같으며, 장치 간 1s 간격을 두고 통신을 실시하며 기본적으로 PCS의 요청에 의하여 BMS가 응답하는 구조이다.

1. Communication Information

	Description	
Type	CAN2.0B	
Bit Rate	500kbps	
Communication Period	1s. Depending on PCS Request	
Data	PCS → BMS : 2frame	
	PCS ← BMS : 18frame	
Data Packaging > 1byte	big endian - high byte first send	
Remote Frame	Not Used	
Terminal Resistor	PCS: 120Ω	
	BMS: 120Ω	

2. BMS(Battery) Information

	Description	
Capacity[kWh]	4091kWh	
Total Number of Rack	24	
Voltage Range[V]	768~1049.6	
Cell Voltage Range[V]	3.0~4.1	
Operation SOC Range[%]	0~100%(Recommand 5~100%)	
SOC Accuracy[%]	±5%	
Normal/Max(s) C rate[C]	1.5C/2.0C(Max 1Cycle/Day)	
CC Control Mode 전환방식 (Step Constant Current)	1. 각 Bank별 Current Limit 값 및 Charge Off SW 값 주참조 2. 각 Bank별 Bank Voltage, Max Cell Voltage 값에 따른 동작상태 파악 3. Current Limit 값에 따른 빠른 빠른 응답 속도(2초이내 추천)	
Calibration	Bank 단위로는 수행하지 않음	

3. Operation Sequence

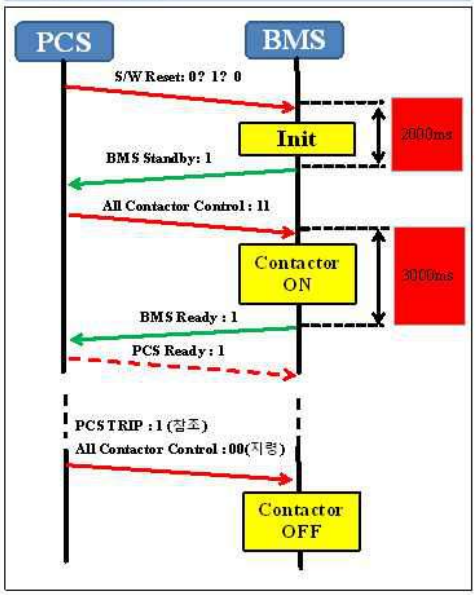


그림 33. PCS-BMS 통신 프로토콜

다. 전력 관리 시스템 (PMS : Power Management System)

PMS는 아래 그림과 같이 EMS의 지령 또는 운영자의 수동 피크 설정치에 따라 PCS의 충/방전 동작 지령을 실시간으로 원격 제어가 가능하도록 구성되었다.

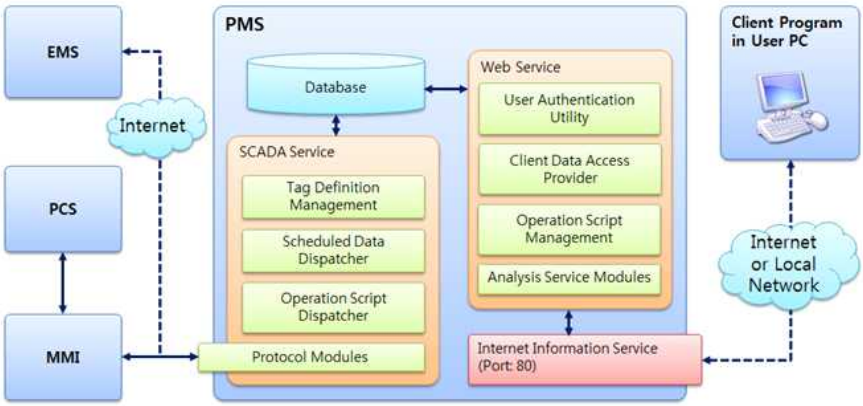


그림 34. PMS 인터페이스 구성

PMS는 아래 그림과 같이 SCADA Service, Web Service, Internet Information Service(Client Program) 및 Database로 구성된다. 또한, 운영자가 외부에서도 원격으로 접속하여 PCS 상태, Battery 상태, 시스템 운영현황, 피크저감 이력관리 및 실시간 수동 피크 제어 등이 가능하며, 운영자의 편의를 위하여 각 기기별 / 기능별 / 상태별로 UI를 구성하였다.

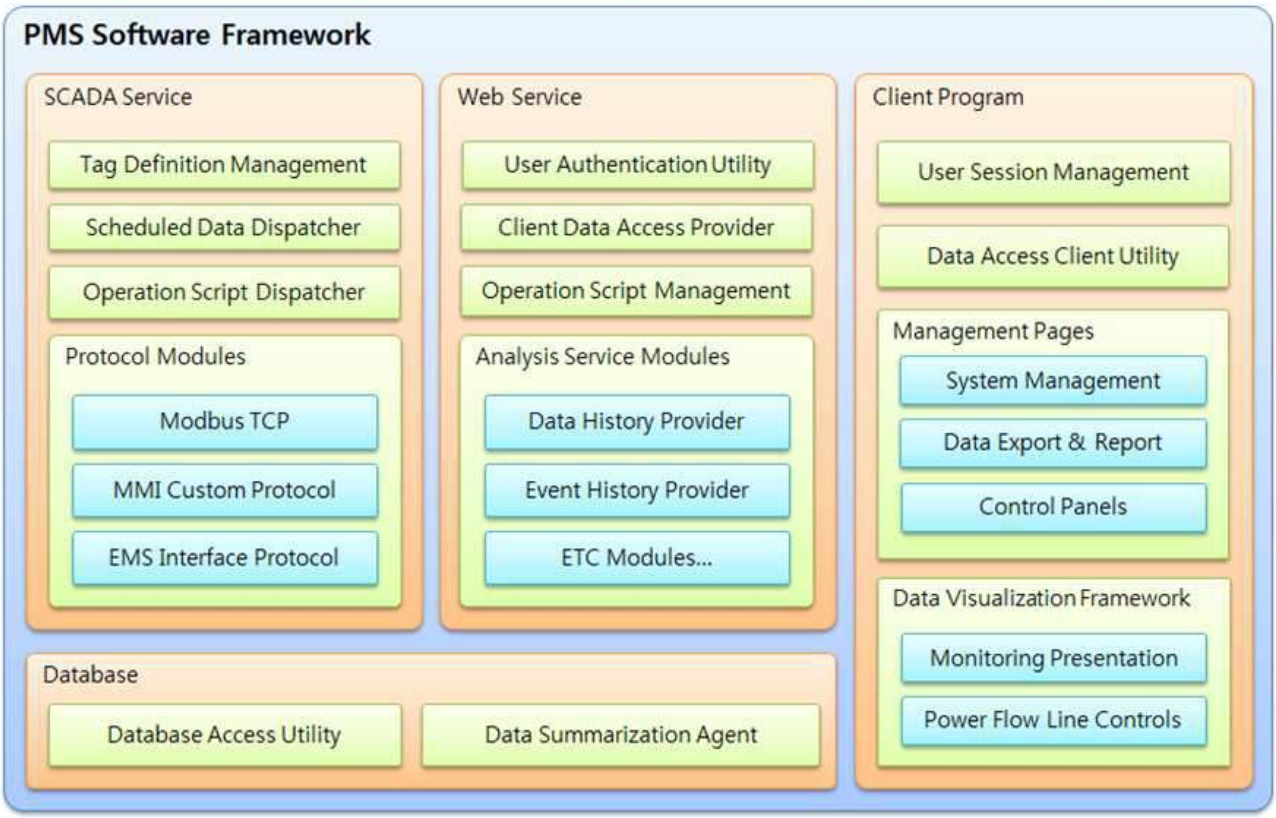


그림 35. PMS Software Architecture

6. 피크전력 저감장치 BMS 개발

가. BMS 모니터링 시스템 개발

① 시스템 구성

- o 기 구축한 ESS 시스템의 효과적인 모니터링을 위해 각 BMS의 데이터를 수신받아 배터리의 상태를 모니터링 및 진단하는 BAS시스템을 개발
- o ESS 시스템의 배터리와 데이터 연동을 통해 System BMS -> PCS로 전달되는 CAN 데이터를 컨테이너 별로 설치된 HMI에 축적
- o 축적된 데이터를 1간 단위로 BAS 시스템에서 전달받아 진단화면을 구성

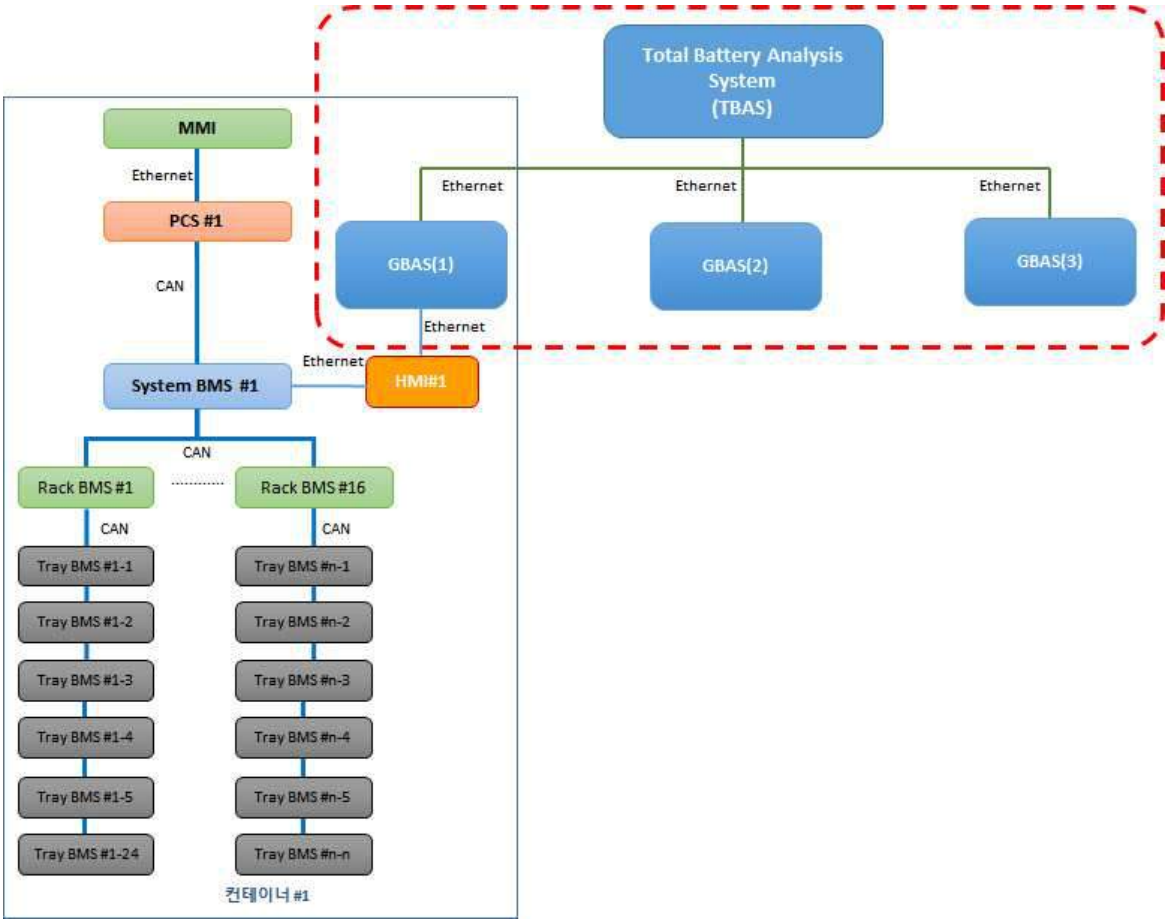


그림 36. ESS 및 BAS 시스템 구성도

② 시스템 세부 요구사항

o 각 컨테이너에 해당하는 System의 데이터는 GBAS에서 분석

o 3개의 GBAS 데이터를 통합하여 분석하는 TBAS 시스템이 상위에 존재

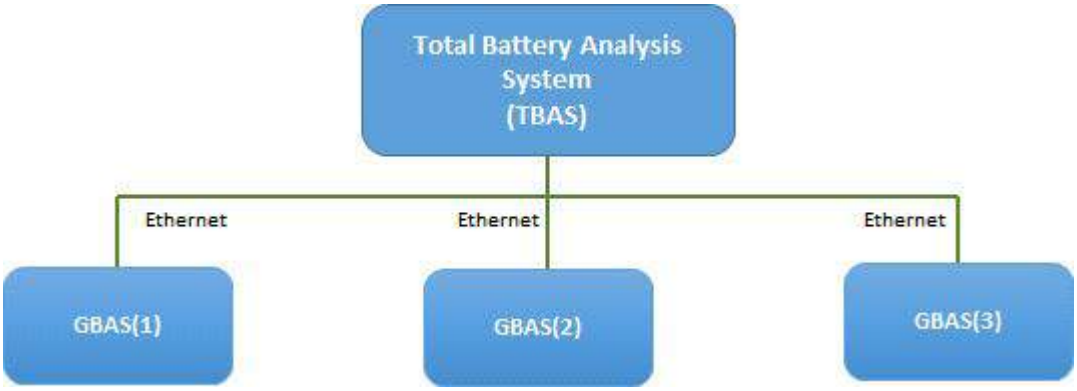


그림 37. BAS 시스템 구성도

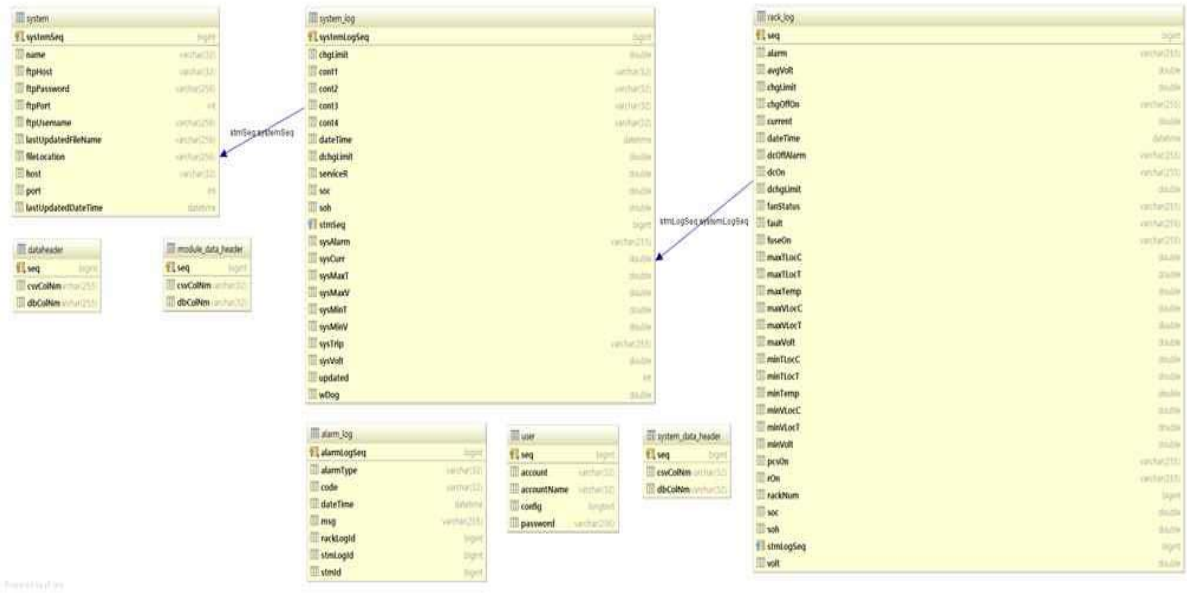
③ 시스템 구성방안

시스템 구분	구성방안	비고
TBAS	• 컨테이너 통합 배터리 상태 분석 시스템 HMI • 컨테이너별 GBAS로 부터 배터리 정보 수집 구성 • 설정 기능 없음 / DB 없음 / 단순 모니터링 / 이력조회 / 트랜드 분석 등	• PC type
GBAS	• 컨테이너 별 배터리 상태 분석 시스템 HMI Type • SYSTEM BMS로 부터 컨테이너 HMI로 전송되는 배터리 정보 입수 - 삼성SDI 컨테이너 HMI에서 데이터 전달 - 취합한 데이터를 1시간에 1번씩 통신을 통하여 수집 • Total Battery Analysis System(TBAS)으로 배터리 정보 전달(Ethernet) • 패널 PC로 구성 (현장 상황 및 네트워크 구성에 따라 유동적) • 배터리 정보 데이터베이스 구성 • 데이터 수집 및 주기 등에 대한 설정 • 네트워크 확인 필요 / 프로토콜 분석 필요 • HMI에서 GBAS로 전송하는 전송프로토콜 및 방법 확인	

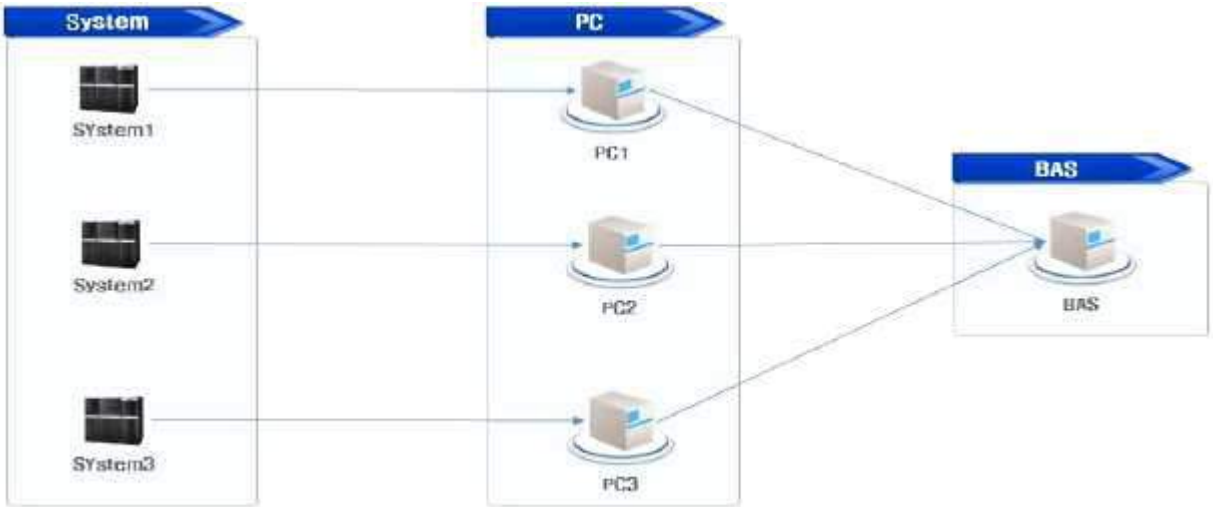
나. BMS 모니터링 시스템 설계

① 시스템 기능 설계

o BMS 모니터링 시스템의 기능은 배터리 분석 알고리듬을 탑재하여 배터리 문제점을 분석하고 배터리 충전이력, 방전이력, 알람이력, 정비이력, 측정데이터 상세이력, 진단 정보 등의 정보를 제공 배터리 이용 정보를 확인 할 수 있도록 구성



② 모니터링 시스템 설계



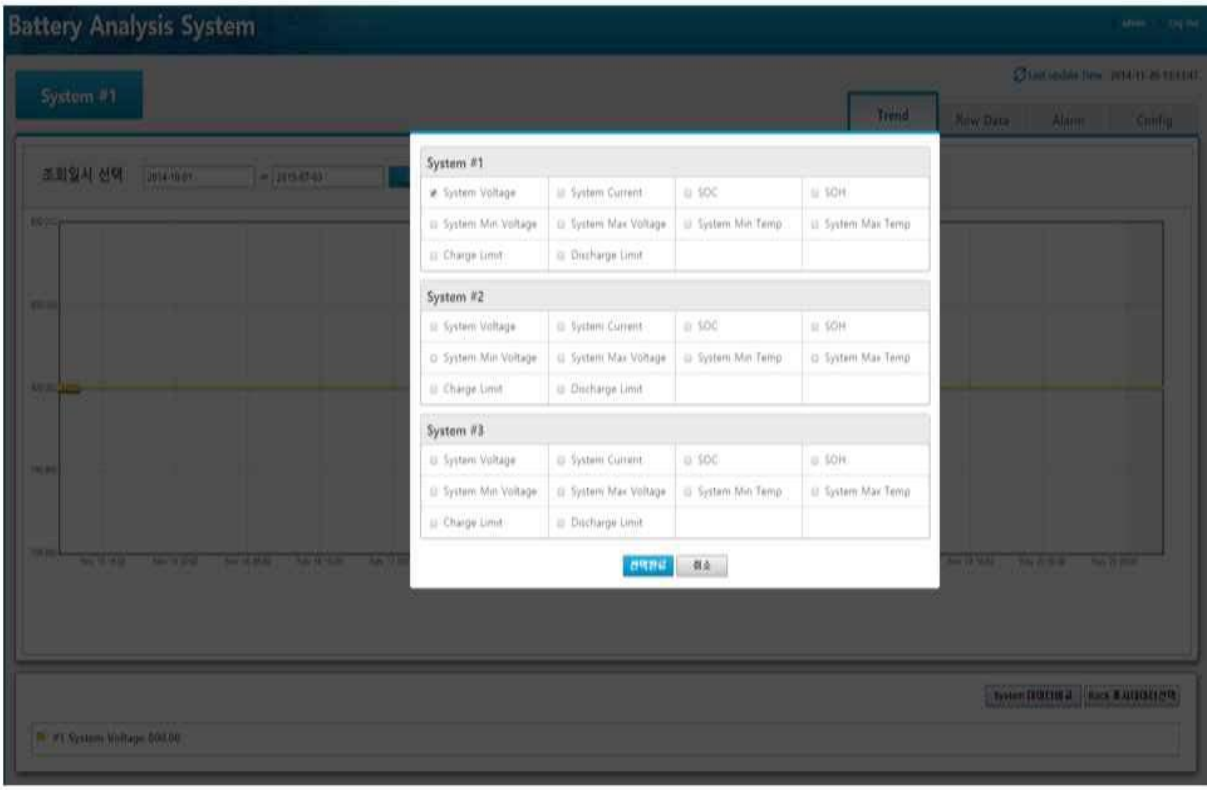
다. BMS 모니터링 시스템 개발

① BMS 모니터링 개발 화면

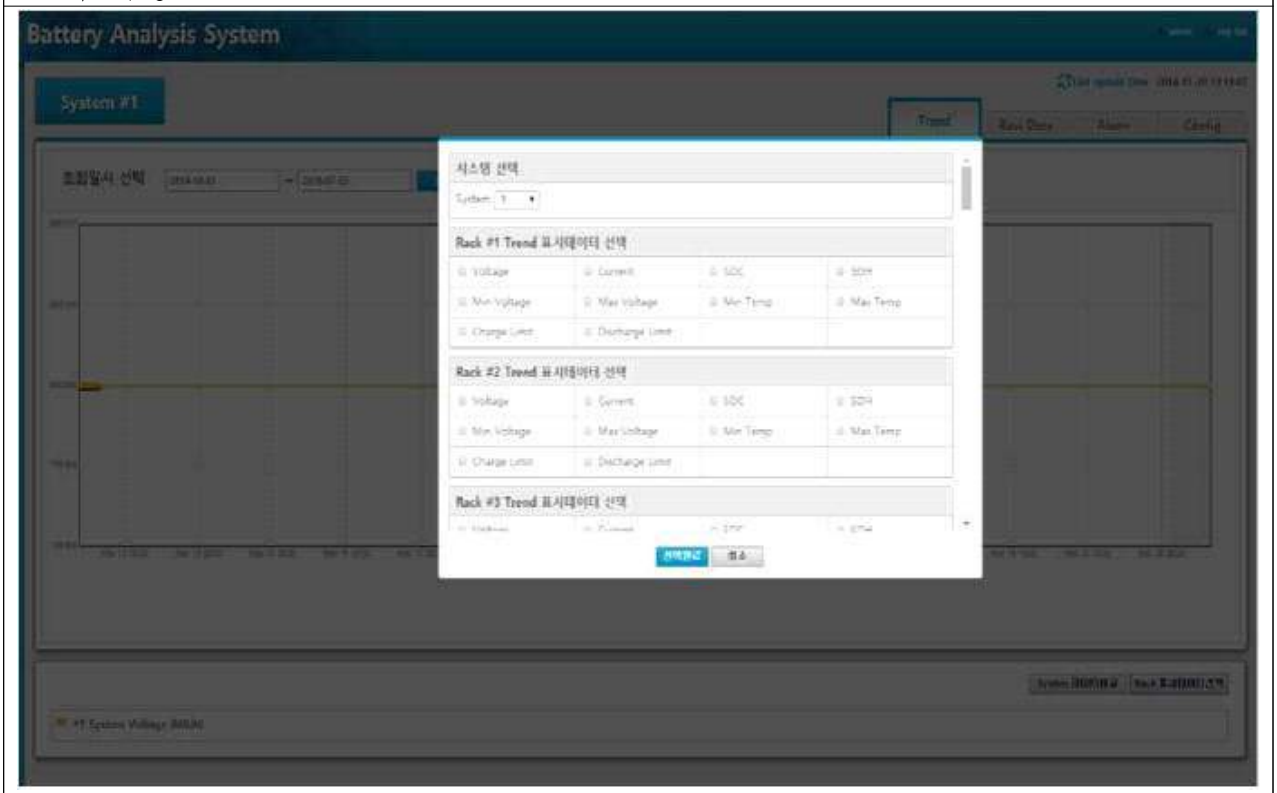
1. 로그인 화면

2. 화면구성 - Trend

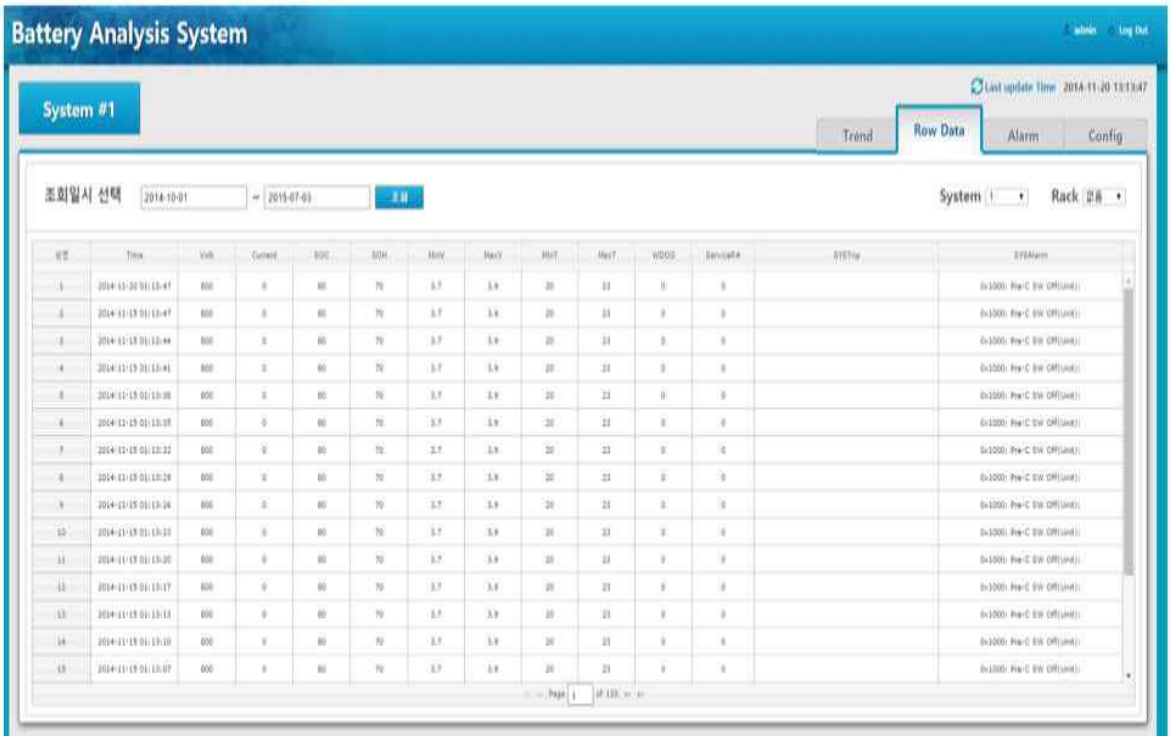
3. 화면구성 - System Select



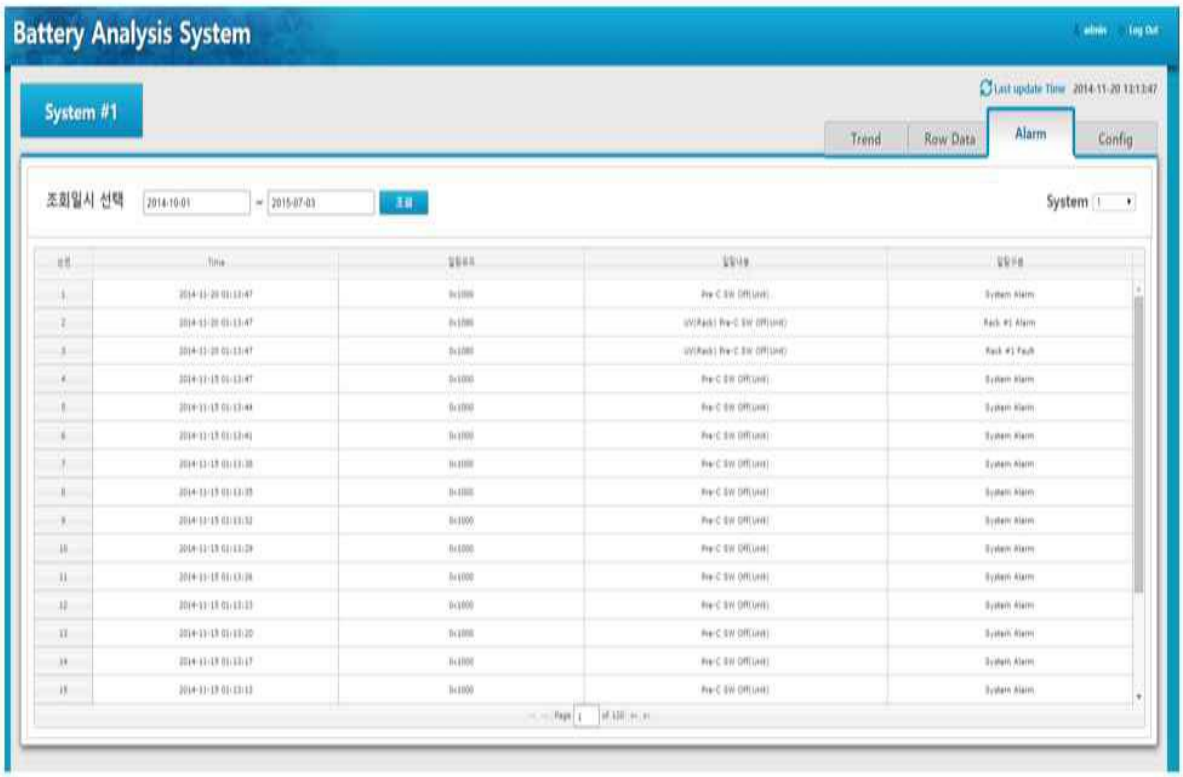
4. 화면구성 - Racl Select



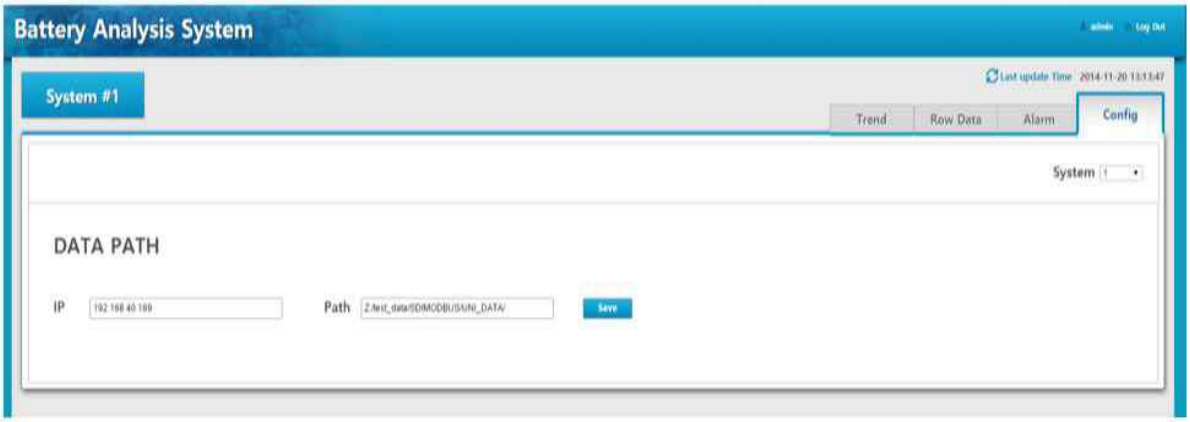
5. 화면구성



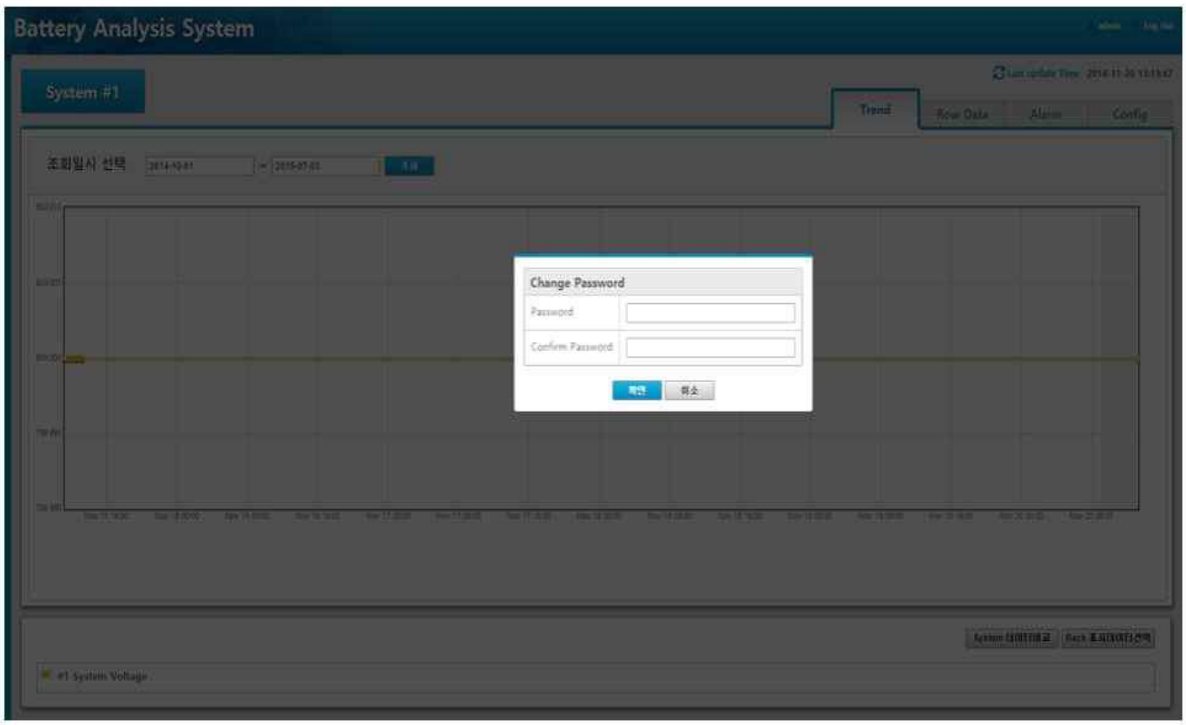
6. 화면구성 - Alarm



7. 화면구성 - Config



8. 화면구성 - Change Password



라. 현장 설치 및 실증 시험 진행

울산변전소 실증단지 내 피크전력 저감용 저장장치의 BMS와 연계하여 설치 및 시험을 진행하고, BMS(Battery Monitoring System)에서 Tray 이상의 데이터를 취합하여 기록, 분석하여 전체 시스템 유지보수/관리에 필요한 데이터 통계를 제공하기 위해, 데이터서버 및 데이터 유실 방지를 위한 UPS 등을 실증단지 내 관리실에 설치하였다.

그림 38. 저장매체 모니터링 시스템용 데이터 서버 및 프로그램 설치

그림 39. 저장매체 모니터링 시스템 프로그램 시 운전 정보

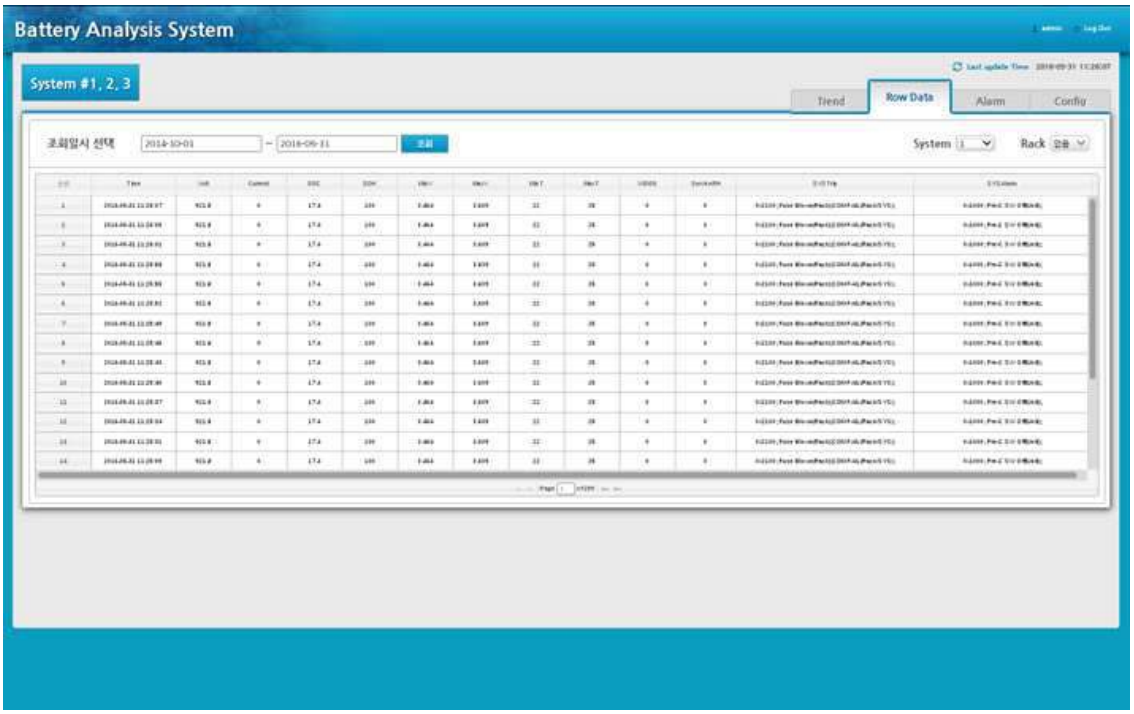


그림 40. 저장매체 모니터링 시스템 프로그램 운전 정보

제2절 능동형 고조파 필터 개발

1. 시스템의 구성 개요

능동형 고조파 필터는 발생원인 부하측의 고조파를 검출 및 분석하여 역 위상 / 동진폭의 반대되는 고조파 (역고조파)를 발생시켜 합성하여 제거. 고속 DSP (Digital Signal Processor)와 IGBT등의 전력제어 소자로 구성된다.

능동형 고조파 필터가 부하의 고조파 전류와 반대되는 고조파 전류를 만들어 고조파를 제거하기 위해서는 부하전류의 정확한 검출이 필요하다. 따라서 T상의 FEEDER #1, #2의 전류 M상의 FEEDER #1, #2 전류를 각각 SUM-CT(5+5/ 1A,30VA)로 합성하여 고기능의 고조파 제거 성능을 발휘한다.

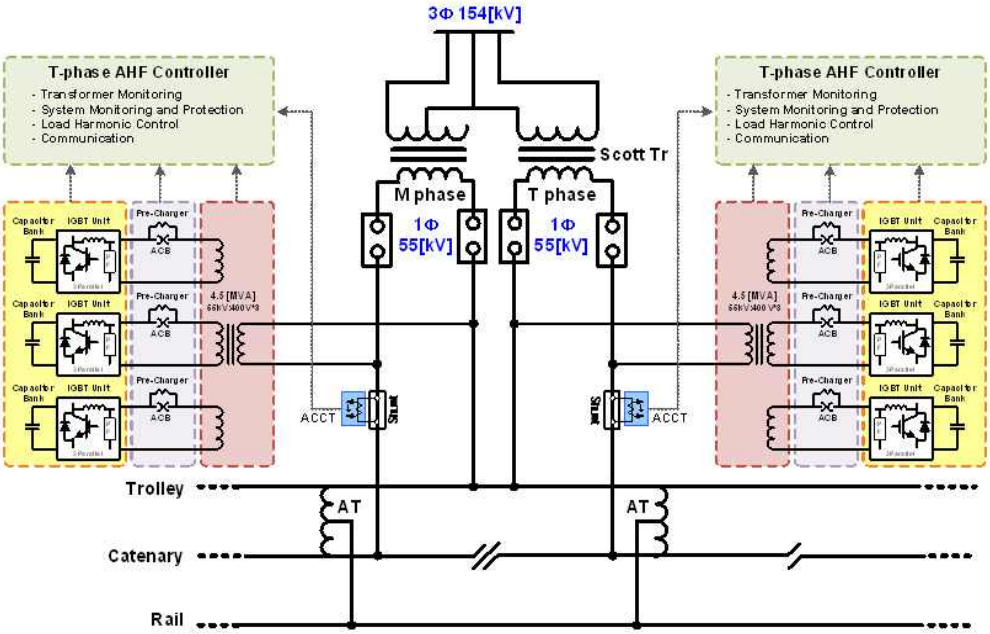


그림 41. 능동형 고조파 필터 블록다이어그램

2. 시스템 기본 설계 검토

능동형고조파필터는 스위칭 부하설비가 있는 수변전설비에 고조파억제대책으로 사용되는 장비이다. 일반적인 고조파억제 대책은 변환기의 다펄스화, 교류필터의 설치 및 기기의 고조파 내량 증가 등이 고려된다.

능동형고조파필터의 접속도와 아래와 같고, 기능원리에 대하여 상술하면 다음과 같다.

- 보상대상 부하에 병렬로 접속되어 있고, 부하전류 I_L에 포함되는 고조파 성분 I_H를 검출한다.
- I_H를 전류제어의 기준신호로 해서 인버터에 흐르는 전류를 제어하고, I_H와 역위상의 전류를 능동형필터에 흐림으로서 전원전류 I_S에 포함된 장해전류를 상쇄하도록 작용한다.
- 장해전류로서 부하의 고조파전류를 보상하는 경우를 예를들면 부하전류 I_L은 기본파성분

I_I(그림의 점선 파형)와 고조파 성분(그림의 사선부)로 분리되고 고조파성분은 그림(b)에 나타낸 파형 I_H가된다.

- 능동형고조파필터는 그림(c)처럼 고조파 성분 I_H와 역위상인 전류 I_C를 흘리도록 제어되기 때문에 I_H는 I_C에 의해서 상쇄되고 전원측에서는 그림(d)에서처럼 기본파 성분분인 사인파 전류 I_S가 된다.

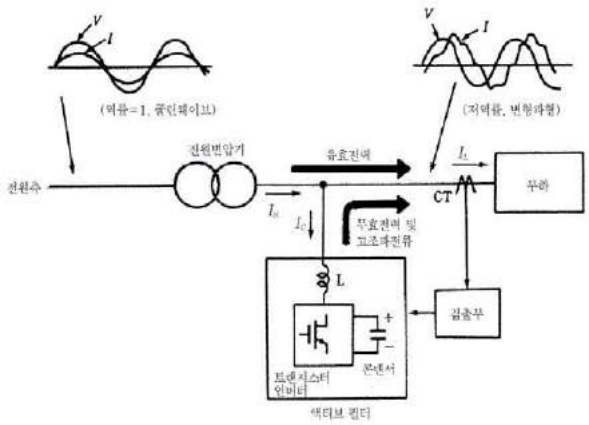


그림 42. 능동형고조파필터 접속도

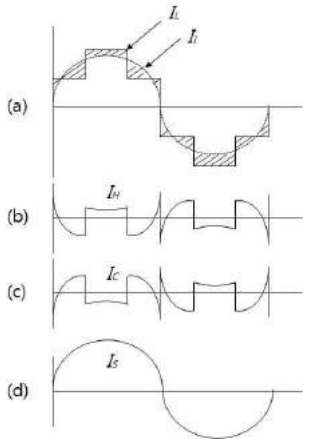


그림 43. 능동형고조파필터 동작파형

능동형고조파필터는 고속열차의 운행 등으로 발생한 고조파 성분을 검출하여 역위상의 역고조파를 발생시켜 가선에서 합성되도록 하여 능동적으로 고조파를 제거하는 장치이다. 능동형고조파필터는 특정차수만의 고조파도 제거가능하고, 전원 임피던스와 공진을 일으킬 가능성이 거의 없으며 전원단에서 발생할 수 있는 모든 차수의 고조파 억제가 가능하다. 또한, 부하조건 등의 여러 운전조건의 변화에 대응할 수 없는 수동형 필터와는 달리 여러 운전조건의 변화에도 그 성능을 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있다.

ACPT와 ACCT 등의 센서는 부하의 전압과 전류를 측정하기 위한 것이다. 능동형고조파필터는 부하의 고조파전류와 반대위상의 고조파전류를 발생시켜 고조파를 제거하는 원리이므로, 정확한 계측은 필수적이다.

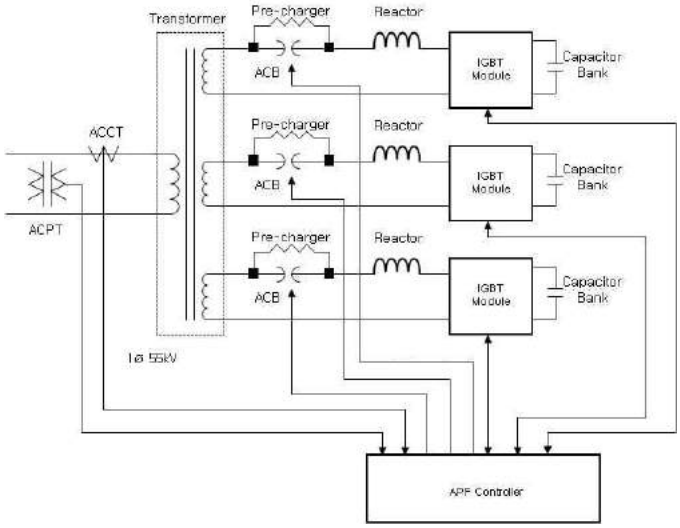


그림 44. 능동형 고조파필터 블록도

변압기는 두가지의 주요한 기능을 수행한다. 첫 번째로 전차선로와의 전기적인 절연기능과 두 번째로 55kV를 저압으로 강압하는 기능을 수행한다.

ACB는 가선과 능동형고조파필터회로를 연결하는 기능을 수행하며 프리차저(Pre-charger:초기충전회로)는 ACB가 연결되기전 전기적인 완충기능을 수행하는 저항기로서, ACB가 투입되기 전에 프리차저를 통해 연결되어 급격한 전류상승에 의한 파손을 방지한다.

IGBT Module는 단상 PWM 인버터로서 능동형고조파필터의 역고조파를 발생시키는 부분이다. IGBT 스위치, 스너버회로, 게이트드라이버 및 냉각장치 등으로 구성된다.

캐패시터 뱅크는 IGBT Module이 역고조파를 발생시키기 위한 전하를 담아두는 장소로서, 캐패시터를 직병렬로 연결하여 구성된다.

또한, 블록도에는 표현되지 않았으나 능동형필터 초기충전회로, 계측감시제어반, 전원공급반 및 방전저항박스 등이 추가적으로 구성된다.

가. 시스템 기본 설계

경부고속철도에는 KTX차량의 고조파 문제 때문에 서울-대구구간의 5개의 변전소(안산, 평택, 신청주, 옥천 및 김천)에 능동형고조파필터장치를 설치하여 운용 중에 있다. 능동형고조파필터의 하드웨어는 크게 6부분으로 구성되어 있다.

능동형고조파필터 캐비넷, 능동형고조파필터용 변압기와 검측용 CT/PT, Pre-charger DC-Link 회로, IGBT 펄스필터 회로, 전원측 과전압 보호장치(Grid Overvoltage Protection), 개폐설비(ACB) 및 기타 부대설비로 구성된다.

① 능동형고조파필터 구성품 선정

능동형고조파필터의 회로방식과 주요구성품의 사양은 다음과 같이 선정하였다. 고속 DSP (Digital Signal Processor)와 IGBT등의 전력제어 소자로 구성된다. 각 LINE별 고조파 계측 분석을 용이하게 하기 위하여 각 HMM(Harmonic Multi Meter)을 설치하며 RS-485 통신으로 COMPUTER 와 인터페이스 시켜 데이터 관리 및 분석이 용이하게 구성한다.

능동필터의 원활한 운전을 위하여 운전상태(ON/OFF, Fault, 온도표시 등)의 종합적인 감시가 용이하게 고조파감시제어반에 집합하여 제어스위치, 상태 및 고장표시램프를 설치하며 PC로 데이터를 연계시켜 감시제어가 가능하게 구성한다.

능동필터 고장 시 타 계통에 영향이 미치지 않고 신속한 계통분리가 가능하도록 설치한다. 변압기 1차측(55kV)에 50/51,27 보호계전기를 설치(본과업 이외부분)한다. 능동필터 1차측에 전자식 50/51이 내장된 ACB(Air Circuit Breaker)를 설치한다.

능동형 필터가 부하의 고조파 전류와 반대되는 고조파 전류를 만들어 고조파를 제거하기 위해서는 부하전류의 정확한 검출이 필요하다. 따라서 T상의 FEEDER #1,#2의 전류 M상의 FEEDER #1,#2 전류를 각각 SUM-CT(5+5/1A,30VA)로 합성하여 고기능의 고조파 제거 성능을 발휘하게 된다.

② 능동형고조파필터 설계

능동형고조파필터는 고속전철 변전소의 급전측에 설치되는 고조파저감설비로서 기존에 설치되는 R, L, C의 수동형소자를 이용한 수동필터에 비하여 전력형 반도체소자(IGBT, GTO 등)을 사용하여 고조파를 저감시키는 설비로서, 전력형 반도체소자를 이용하여 PWM방식으로 역고조파를 발생시켜 계통의 고조파를 제거하며, 추가적으로 무효전력 보상도 가능하다.

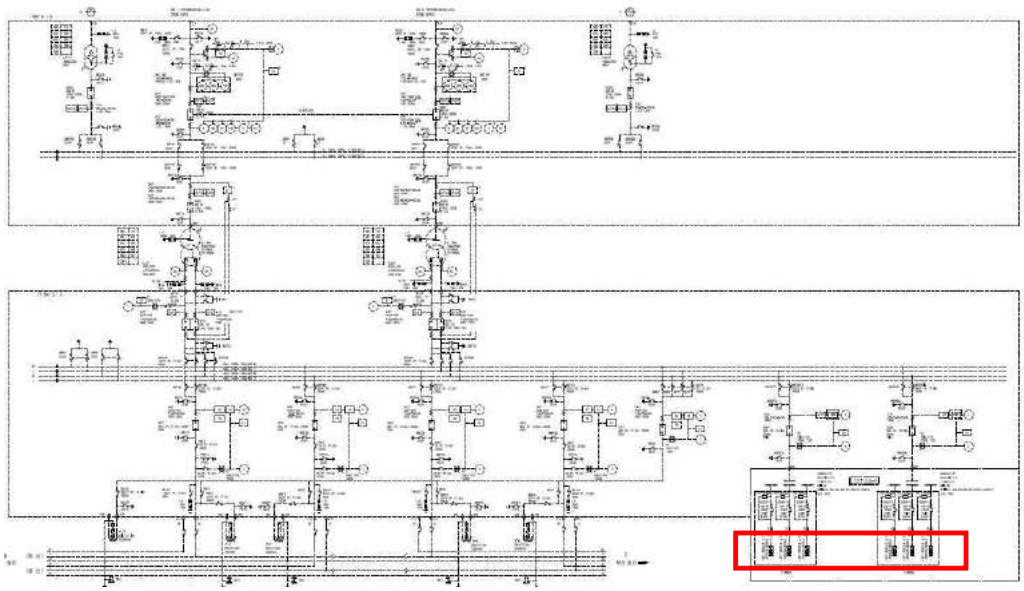


그림 45. 능동형 고조파필터 설치위치

표 12. 수동필터와 능동필터 특성

구분	수동필터	능동필터
고조파 억제효과	-분로를 설치한 차수만 억제 -저차 고조파의 확대여지(공진) -전원임피던스의 영향 크게 받음 -30~50% 정도만 저감	-임의의 고조파 동시억제가능 -저차 고조파의 확대 없음 -전원임피던스의 영향 거의 받지 않음 -95%이상 저감
과부하	부하의 증가나 계통전원 전압 왜곡이 커지면 과부하가 됨	과부하가 되지 않음
역율개선	고정적/진상역률 대책이 필요함	가변제어 가능
증설	용이하지 않음 필터간의 협조가 필요	용이

- IGBT반

IGBT반은 능동형고조파필터의 기본적으로 전압형 인버터와 초퍼회로로 구성되었으며, IGBT를 스위칭소자로 사용한다. IGBT반의 크기는 860 × 600 × 2290[mm]이고 수량은 6개로 구성된다.(M상용 3개, T상용 3개)

IGBT반의 주요구성품은 단상 인버터스택(수냉각 모듈포함) 3개, 초퍼스택 1개, 입력측 콘택

터 1개와 캐패시터 뱅크로 구성된다. IGBT반의 특징은 강제냉각을 위해 인버터스택에 수냉각 모듈을 사용하여 냉각의 효율성과 공간적인 활용성을 극대화 하였고, 냉각용 실외기는 실외 상부에 설치하여 공간적 분리가 가능하도록 하였다. 초퍼스택은 상시동작하지 않고, 간헐적으로 동작하는 단위이므로 냉각팬을 부착한 공랭식으로 설계하였다.

- 제어기반

제어기반은 기존 1단계구간 고속철 변전소에 설치된 능동형고조파필터의 단점으로 지적된 제어장치를 통합한 판넬로서, 32bit DSP를 사용하여 연산능력을 극대화하였다. 제어기반의 크기는 616 × 604 × 1997[mm]이고, 수량 2개로 M상용과 T상용으로 구분된다. 제어기반은 능동형고조파필터를 제어하는 제어장치와 시퀀스를 담당하는 각종 릴레이 및 전원공급장치를 구성하였다. 제어기반과 IGBT반간의 Gate pulse신호를 광케이블을 사용하여 Gate pulse가 IGBT반에 정확하게 전달되도록 하였다.

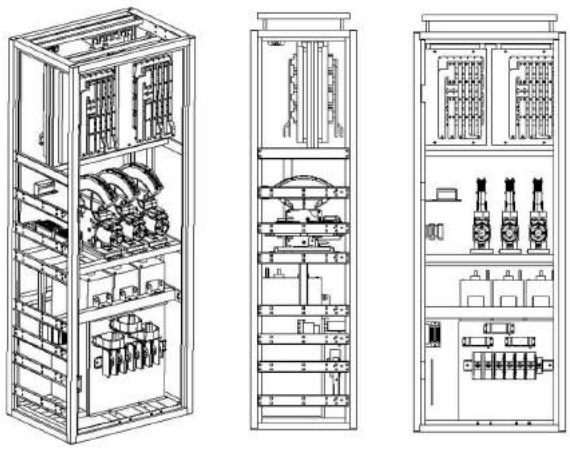


그림 46. IGBT반 구성도

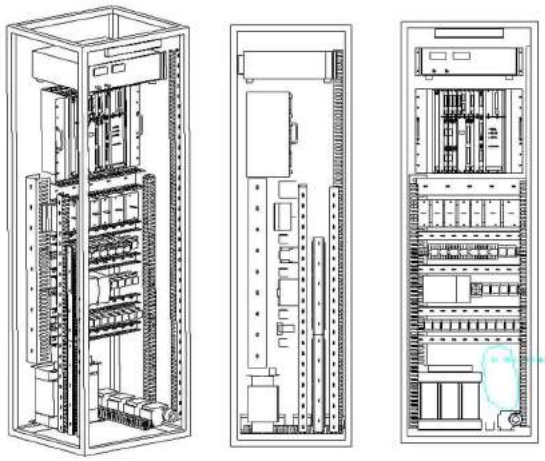


그림 47.제어기반 구성도

이 제어유니트의 특징으로는 전력변환장치에서 가장 필수적으로 빠른 연산과 정밀한 PWM 생성에 대하여 2개의 DSP를 사용하여 분할하여 연산하며, 전력변환장치의 안정적인 동작에 기본적으로 요구되는 Gate pulse신호를 광신호로 처리함으로서 장치의 신뢰성을 높일 수 있다.

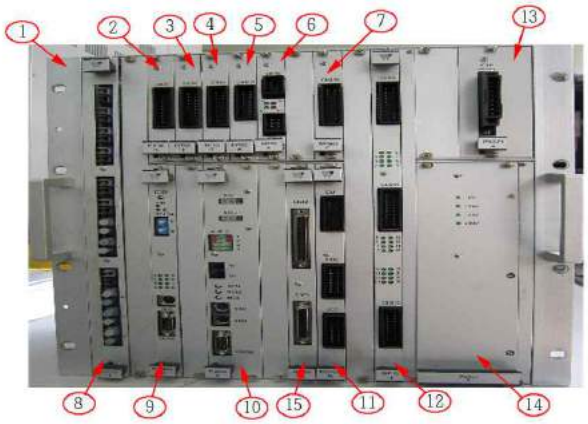


그림 48. 능동형고조파필터 제어유니트

나. 제어알고리즘 개발

능동형 고조파저감 장치는 비선형 부하 특성에 따른 고조파에 대해서 역고조파를 주입하여 제어함으로서 전원 단에서 발생되는 고조파 전류를 상쇄시키는 기능을 수행한다. 사용된 제어 알고리즘은 Lyapunov 안정도 이론을 적용하여 제어기를 설계하였다. 아래 그림은 제어블록도를 보여주고 있다.

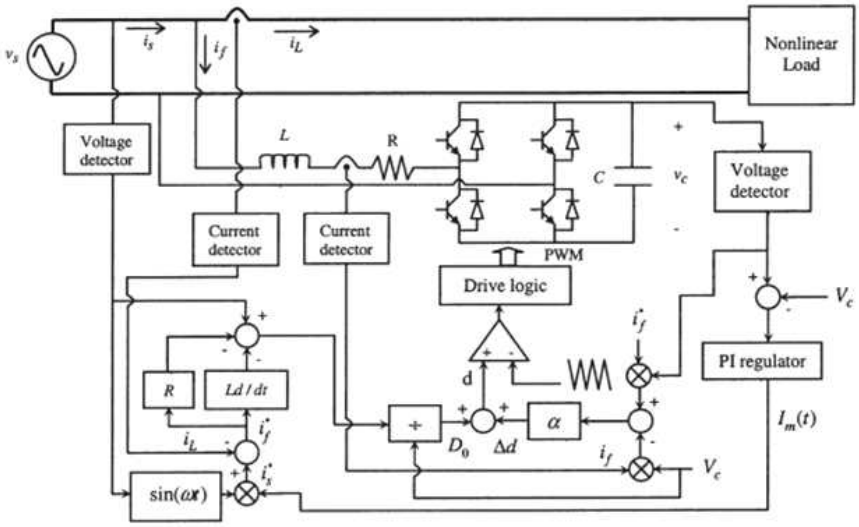


그림 49. 단상 능동형 고조파필터의 제어블록도

① 능동형고조파필터 시스템 모델링

제어 블록도에서 전압, 전류 방정식은 식(3.1),(3.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$L\frac{di_f}{dt}+Ri_f=v_s-dv_{dc} \tag{3.1}$$

$$C\frac{dv_{dc}}{dt}=di_f \tag{3.2}$$

여기서, d는 스위칭 함수($d=D_0+\Delta d$), D_0는 정상상태에서의 통유율, Δd는 Lyapunov 함수에 의한 통유율 변위이다.

또한 능동형고조파필터의 DC링크 캐패시터의 전압을 일정하게 유지하기 위한 변전소의 공급전류 i_s^*은 식(3.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_s^*=I_m(t)\sin(\omega t) \tag{3.3}$$

여기서, $i_m(t)$는 능동형고조파필터의 식(3.4)의 PI제어기에 의한 DC링크 전압 제어기에 출력이다.

$$I_m(t)=k_p(v_c-V_c)+k_i\int(v_c-V_c)dt \tag{3.4}$$

식(3.3)으로부터 능동형고조파필터가 고조파 제거를 위해 공급해야 하는 전류의 추종값은 식(3.5)와 같이 표현할 수 있다.

$$i_f^*=i_s^*-i_L \tag{3.5}$$

정상상태에서 $D_0(t)$를 계산하기 위해 식(3.1), 식(3.2)에 식(3.5)를 적용하면 식(3.6)을 얻을 수 있다.

$$D_o(t) = \frac{1}{v_{dc(t)}}\left(v_s - Ri_f^* - L\frac{di_f^*}{dt}\right) \tag{3.6}$$

$$D_o(t) = \frac{1}{i_f^*}C\frac{dv_{dc(t)}}{dt}$$

여기서, $v_{dc(t)} = V_{dc}^* + v_{dc(h)}$로 DC링크 캐패시터 전압의 순시값이고, V_{dc}^*는 전압 제어기의 추종값, $v_{dc(h)}$는 DC링크 단의 고조파에 의한 맥동전압이다.

폐루프 전달함수의 상태방정식을 계산하기위해 상태변수를 식(3.7)과 같이 정의하고, 이를 식(3.1), (3.2)에 적용하면 식(3.8)과 식(3.9)와 같이 계산할 수 있다.

$$x_1 = i_f - i_f^* \quad \text{and} \quad x_2 = v_{dc} - v_{dc(t)} \tag{3.7}$$

$$L\dot{x}_1 = -D_o x_2 - Rx_1 - \triangle d(v_{dc(t)} + x_2) \tag{3.8}$$

$$C\dot{x}_2 = D_o x_1 + \triangle d(i_f^* + x_1) \tag{3.9}$$

② Lyapunov 함수를 통한 통유율 변위 계산

Lyapunov 함수를 통한 통유율 변위(Δd) 계산은 Lyapunov 안정도 이론에 의해 계산되어진다. 여기서, Lyapunov 안정도 이론은 초기에너지를 가지고 있는 시스템은 궁극적으로 평형상태에 도달하게 된다는 이론으로 이를 정리하면 다음과 같다.

1) $V(0) = 0$

2) $V(x) > 0$ (여기서 $x \neq 0$)

3) $\dot{V}(x) < 0$ (여기서 $x \neq 0$)

4) $V(x) \to \infty$ (여기서 $\| x \| \to \infty$)

Lyapunov 안정도 이론에 입각하여 능동형고조파필터에 적용하면 식(3.10)과 같이 표현할 수 있다.

$$V(x) = \frac{1}{2}Lx_1^2 + \frac{1}{2}Cx_2^2 \tag{3.10}$$

식(3.10)을 미분하여 계산하면 식(3.11)을 유도할 수 있다.

$$\dot{V}(x) = x_1 L\dot{x}_1 + x_2 C\dot{x}_2 \tag{3.11}$$

식(3.11)에 식(3.8), 식(3.9)를 대입하여 전개하면 식(3.12)와 같이 계산된다.

$$\dot{V}(x) = \left(x_2 i_f^* - x_1 v_{dc(t)}\right)\triangle d - Rx_1^2 \tag{3.12}$$

식(3.12)가 Lyapunov 안정조건에 수렴하도록 하는 통유율 변위 조건은 식(3.13)과 같이 계산할 수 있고, $v_{dc(t)}$의 고조파에 의한 맥동성분 $v_{dc(h)}$가 V_{dc}^*에 비해 일반적으로 상당히 작은 값을 가지므로 식을 간략화 하기 위하여 맥동성분을 무시하여 전계하면 식(3.14)을 얻을 수 있다.

$$\triangle d = \alpha\left(x_2 i_f^* - x_1 v_{dc(t)}\right) \ , \qquad \alpha < 0 \tag{3.13}$$

$$\triangle d = \alpha\left(x_2 i_f^* - V_c x_1\right) \ , \qquad \alpha < 0 \tag{3.14}$$

또한, $x_1 = i_f - i_f^*$, $x_2 = v_{dc} - V_{dc}^*$로 간략화 하여 표현됨으로서 식(3.14)는 식(3.15)로 다시 계산될 수 있다.

$$\triangle d = \alpha\left(v_c i_f^* - V_c i_f\right) \ , \qquad \alpha < 0 \tag{3.15}$$

③ 시뮬레이션

시뮬레이션은 실제 제어에 사용되는 디지털 제어기의 모델링을 위해 dll로 구성하였다. 그림 41는 모델링된 시뮬레이션을 보여주고 있다. 또한 그림 42는 시뮬레이션을 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과에서 보는 것과 같이 Lyapunov의 안정도를 통한 변위 통유률을 적용한 결과 순 정류부하인 부하전류에 대해 변전소에서 공급하는 전류의 고조파가 현격히 감소되는 것을 알 수 있으며, 이때 DC링크 전압 또한 제어가 되고 있음을 확인 할 수 있다. 그림 42는 이러한 고조파 전류에 대한 FFT분석 결과를 보여주는 파형으로 50차수인 3[kHz]까지의 고조파 분포도를 보여준다.

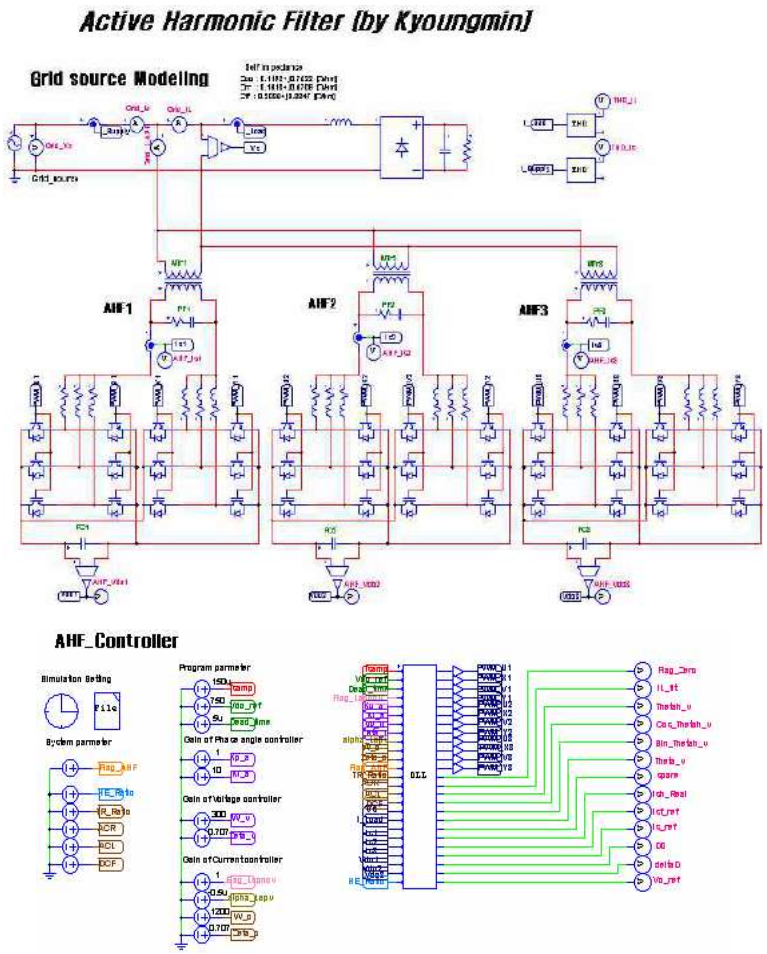


그림 50. 단상 능동형 고조파필터 시뮬레이션 모델링

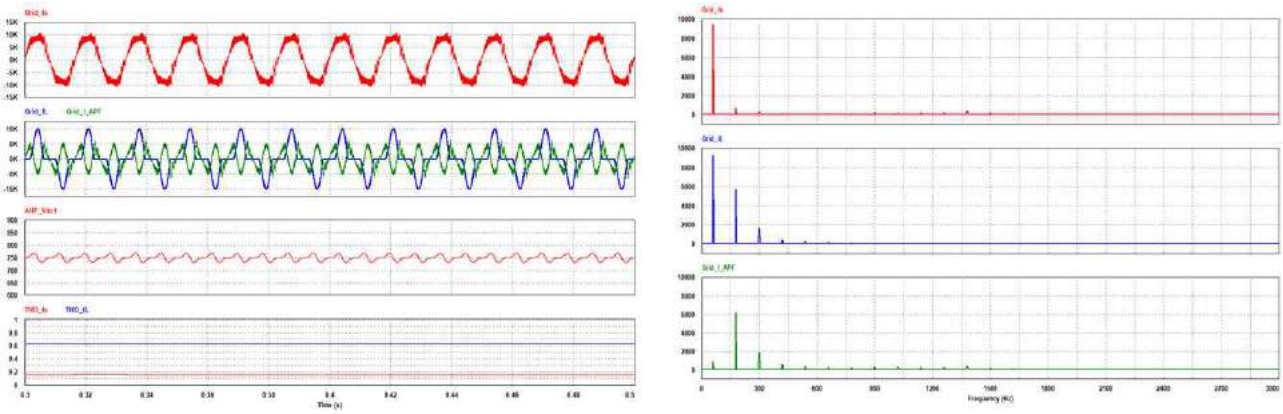


그림 51. 단상 능동형 고조파필터 시뮬레이션 결과 및 FFT 전류 분석 결과

3. 능동형 고조파 필터 상세설계 및 제작

가. 능동형 고조파 필터의 상세설계

능동형 고조파 필터의 IGBT반, 제어기반은 3D로 상세설계가 진행되었다. IGBT반의 크기는 860 × 600 × 2,290[mm]이며, 주요구성품은 단상 인버터스택(수냉각 모듈포함) 3개, 초퍼스택 1개, 입력측 콘택터 1개와 캐패시터 뱅크로 구성된다. IGBT반의 특징은 강제냉각을 위해 인버터스택에 수냉각 모듈을 사용하여 냉각의 효율성과 공간적인 활용성을 극대화 하였고, 냉각용 실외기는 실외 상부에 설치하여 공간적 분리가 가능하도록 하였다. 초퍼스택은 상시동작하지 않고, 간헐적으로 동작하는 유니트이므로 냉각팬을 부착한 공랭식으로 설계하였다.

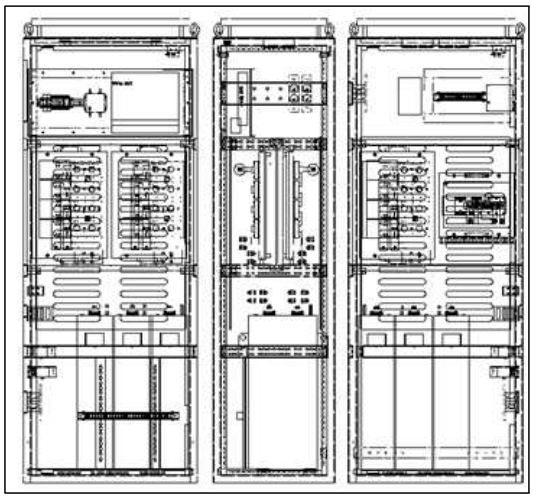


그림 52. 능동형고조파필터 IGBT반 구성도

제어기반은 기존 1단계구간 고속철 변전소에 설치된 능동형고조파필터의 단점으로 지적된 제어장치를 통합한 판넬로서, 32bit DSP를 사용하여 연산능력을 극대화하였다. 제어기반의 크기는 616 × 604 × 1,997[mm]이고, 수량 2개로 M상용과 T상용으로 구분된다. 제어기반은 능동형고조파필터를 제어하는 제어장치와 시퀀스를 담당하는 각종 릴레이 및 전원공급장치를 구성하였다. 제어기반과 IGBT반간의 Gate pulse신호를 광케이블을 사용하여 Gate pulse가 IGBT반에 정확하게 전달되도록 하였다.

수냉각기반은 능동형고조파필터의 IGBT반의 냉각을 위해 설치되는 장치로서, IGBT 스택당 1개의 수냉각기를 설치함으로써, 기존 1단계 구간 능동형고조파필터의 단점으로 지적된 냉각기 열용량 부족으로 인한 동작정지 및 소손의 문제를 해결하고자 하였다. IGBT스택의 수량이 18개이므로 수냉각기 또한 18개가 설치되도록 하였다. 수냉각기의 내부에는 순환펌프, 냉각팬 및 부동액으로 구성된다. 수냉각기의 크기는 550×476×514[mm]이다.

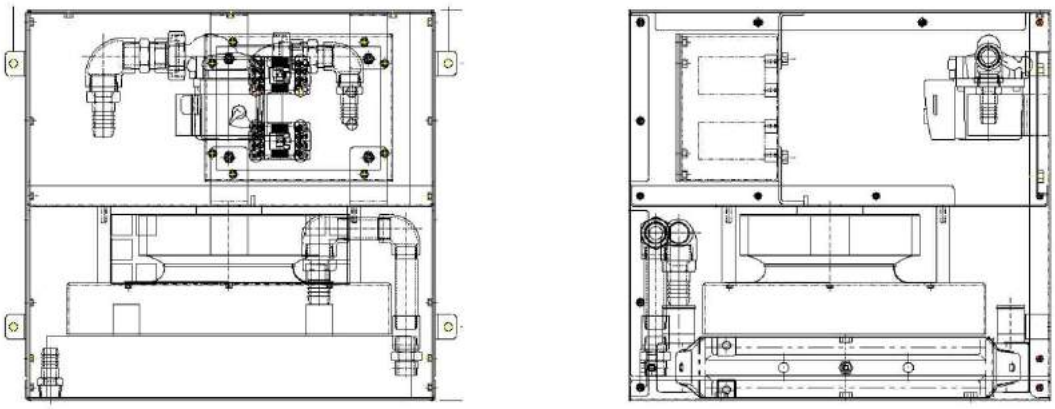


그림 53. 능동형고조파필터 수냉각기반

PLC반은 능동형고조파필터의 동작시퀀스를 제어하는 판넬로서, 변전소 감시반과 연결된 설비로서 PLC, 계기류, 모자이크반 및 램프 등으로 구성되어 있다.

PLC반은 각 LINE별 고조파 계측 분석을 용이하게 하기 위하여 각 HMM(Harmonic Multi Meter)을 설치하여 RS-485통신으로 컴퓨터와 인터페이스 한다. 능동형 필터의 원활한 운전을 위하여 운전상태(ON/OFF, Fault, 온도표시 등)의 종합적인 감시가 용이하게 고조파감시제어반에 집합하여 제어스위치, 상태 및 고장표시램프를 설치하여 감시제어가 가능하게 구성한다.

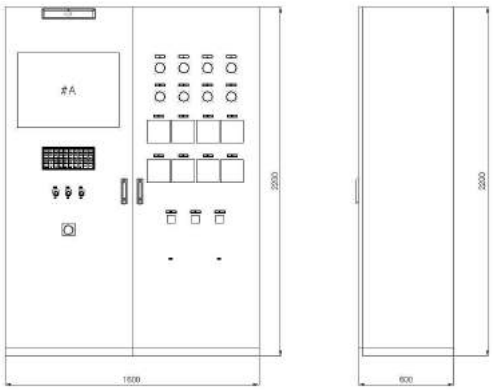


그림 54. 능동형고조파필터 PLC반

나. 능동형 고조파 필터의 제작

능동형 고조파필터의 IGBT반은 단상 인버터스택(수냉각 모듈포함) 3개, 초퍼 스택 1개, 입력측 콘택터 1개와 캐패시터 뱅크로 구성된다. 제작완료된 사진은 아래와 같다.

IGBT반은 유지보수성 향상을 위하여 모듈화 컨셉을 적용하였으며, 전체를 분해하지 않고 전면 또는 후면으로 접근하여 분리/장착이 가능한 구조로 구현하였다.

능동형 고조파 필터의 제어기반은 기존 1단계 고속철 변전소에 설치된 능동형 고조파 필터의 단점으로 지적된 제어장치를 통합한 판넬로서, 32bit DSP를 사용하여 연산능력을 극대화하였다.

제어기반은 능동형고조파필터를 제어하는 제어장치와 시퀀스를 담당하는 각종 릴레이 및 전원공급장치를 구성하였다. 제어기반과 IGBT반간의 게이트 신호는 광케이블을 사용하여 IGBT반에 정확하게 전달되도록 구성하였다.

그림 55. IGBT반 제작사진

4. 능동형 고조파 필터 제어알고리즘 검증 및 보완

가. 능동형 고조파 필터의 구성

본 과제에 사용되는 능동형 고조파 필터는 전체 2.88[MVA]용량으로 하였다. 능동형 고조파 필터는 비선형 부하 특성에 따른 고조파에 대해서 역고조파를 주입하여 제어함으로서 전원 단에서 발생되는 고조파 전류를 상쇄시키는 기능을 수행한다. 사용된 제어알고리즘은 Lyapunov 안정도 이론을 적용하여 제어기를 설계하였다. 능동형 고조파 필터의 제어 블록도를 보여주고 있다.

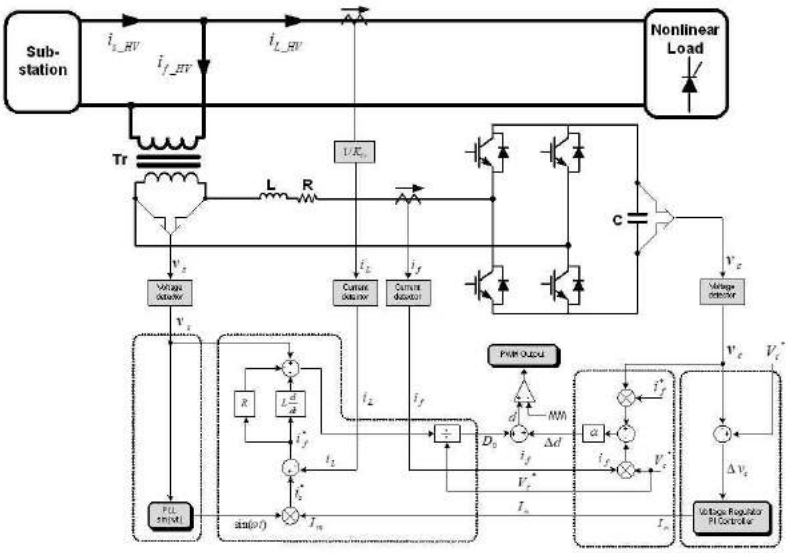


그림 56. 능동형 고조파 필터의 제어 블록도

시뮬레이션은 전력변환장치를 모델링 하여 시뮬레이션 할 수 있는 PSIM을 사용하였고, 각 시스템 파라미터는 설계를 통한 실제 적용 파라미터들로 선정하여 입력하였다. 또한 제어기는 DLL을 사용하여 디지털 제어기로 모델링 함으로서 실제 상황을 반영하여 적용하였다. 또한 가선 및 부하를 모델링하기 위하여 부하단 전류를 전류원 소스로 구성하여, 각 소스원의 주파수를 각 차수 별 고조파 전류로 구성하였다. 그림 49는 이렇게 모델링 된 시스템을 보여주고 있다.

각 부하상태(역행 중부하, 경부하, 회생 중부하, 경부하)에 따른 시뮬레이션 결과를 아래 그림과 같이 보여주고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 각 고조파를 포함한 부하전류에 대해 변전소에서 공급하는 전류의 고조파가 현격히 감소되는 것을 알 수 있으며, 이때 DC링크 전압 또한 제어가 되고 있음을 확인 할 수 있다. 이러한 결과로 적용된 시스템 파라미터가 적정 값으로 설계되었음을 확인할 수 있고, 또한 Lyapunov 안정도를 통한 변위 통유률 제어 알고리즘이 타당함을 검증한 결과이다.

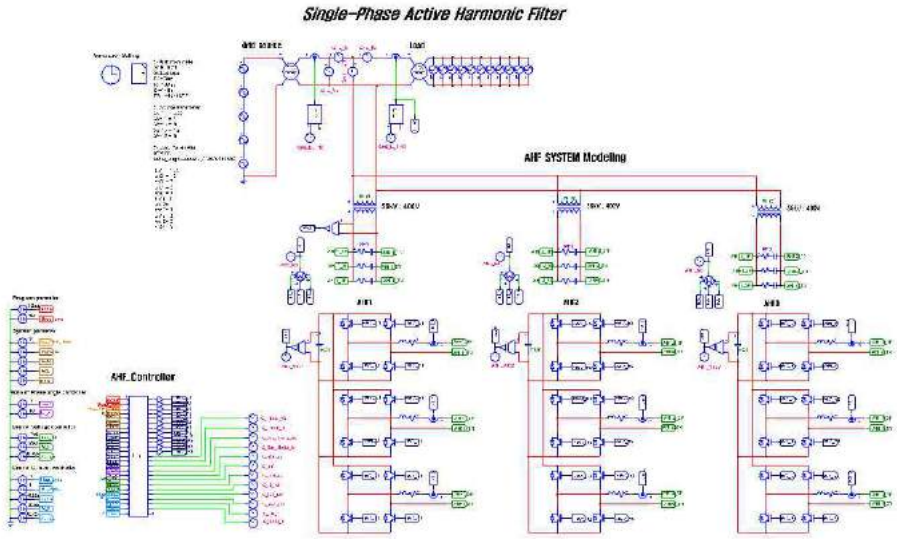
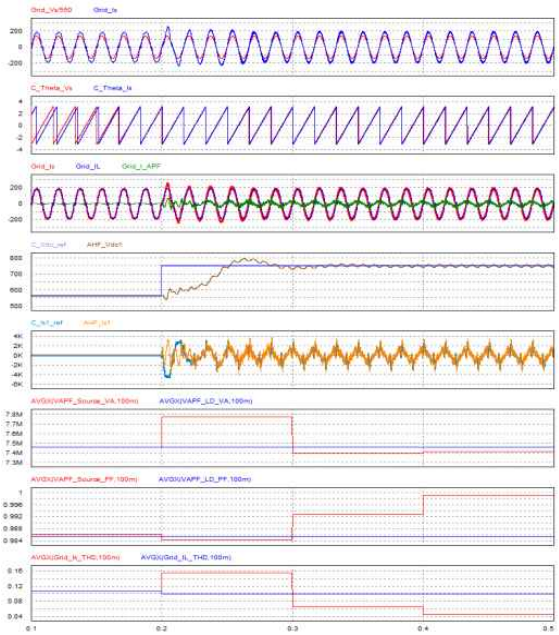
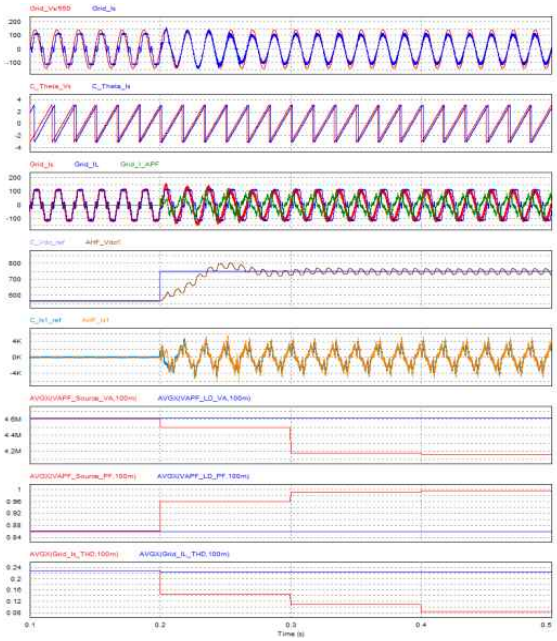


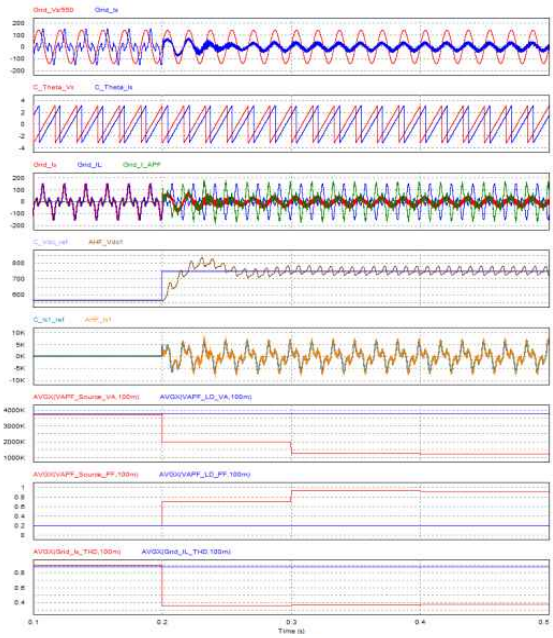
그림 57. 능동형 고조파 필터 시뮬레이션 모델링



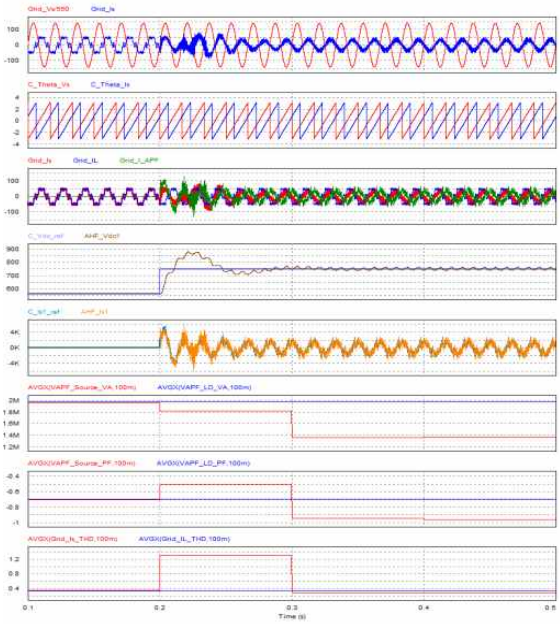
a) Case 1 결과 ; P_{LD}=7350[kW], pf=0.99
I_{1st}=135[A], I_{3rd}=2[A], I_{5th}=8A], I_{7th}=6[A],
I_{9th}=4[A], I_{11th}=7[A], I_{13th}=3[A]



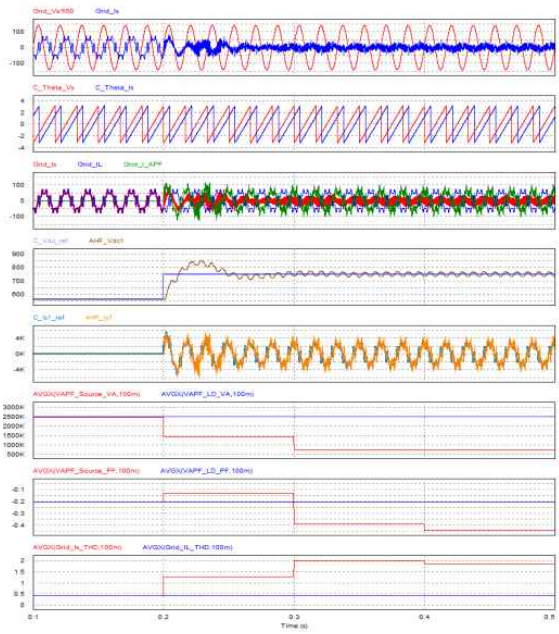
b) Case 2 결과 ; P_{LD}=3969[kW], pf=0.88
I_{1st}=82[A], I_{3rd}=6[A], I_{5th}=15[A], I_{7th}=6[A],
I_{9th}=3[A], I_{11th}=3[A], I_{13th}=5[A]



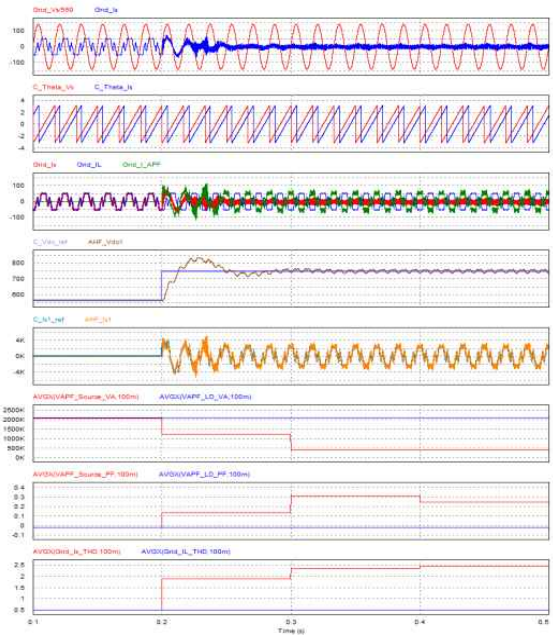
c) Case 3 결과 ; P_{LD}=729[kW], pf=0.26
I_{1st}=51[A], I_{3rd}=43[A], I_{5th}=8[A], I_{7th}=9[A],
I_{9th}=4[A], I_{11th}=4[A], I_{13th}=2[A]



d) Case 4 결과 ; P_{LD}=-1384[kW], pf=-0.74
I_{1st}=34[A], I_{3rd}=4[A], I_{5th}=8[A], I_{7th}=2[A],
I_{9th}=1[A], I_{11th}=2[A], I_{13th}=7[A]



e) Case 5 결과 ; P_{LD}=-508[kW], pf=-0.22
I_{1st}=42[A], I_{3rd}=1[A], I_{5th}=14[A], I_{7th}=4[A],
I_{9th}=4[A], I_{11th}=9[A], I_{13th}=3[A]



f) Case 6 결과 ; P_{LD}=-37.4[kW], pf=-0.02
I_{1st}=34[A], I_{3rd}=11[A], I_{5th}=12[A], I_{7th}=3[A],
I_{9th}=2[A], I_{11th}=4[A], I_{13th}=3[A]

그림 58. 부하별 시뮬레이션 결과

5. 운영설비와 인터페이스 설계

가. 신청주변전소 현장 조사

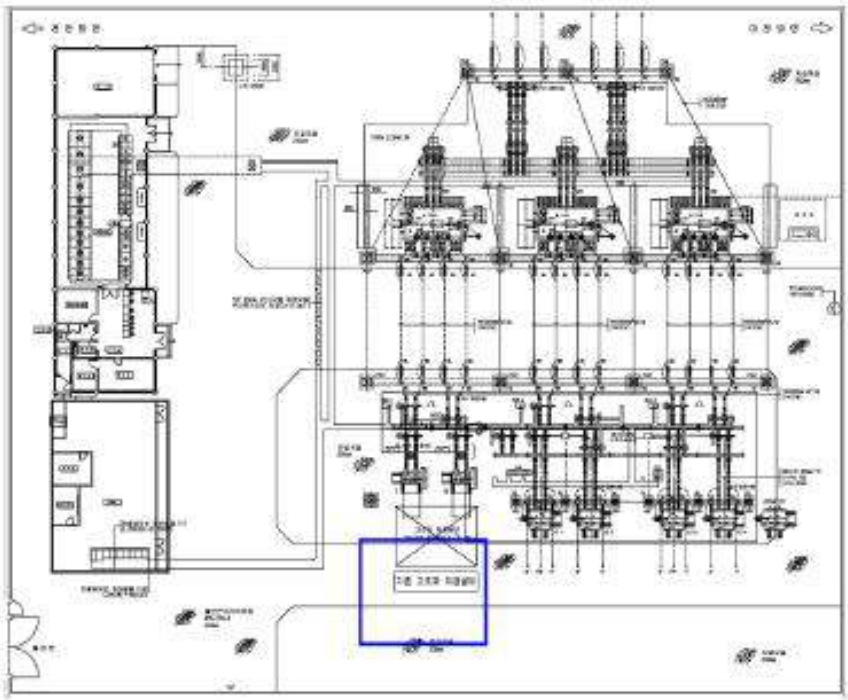
① 변전기기 시설현황

고속철도 신철주변전소는 옥외 GIS형으로 변전설비 주요기기를 옥외에 시설하여 154kV 수전계통 172.5kV GIS 및 주변압기로부터 72.5kV GIS간의 계통연결은 철구조물을 이용하여 가공 모선 연결방식으로 되어 있고 각종 제어반 및 저압반 등은 옥내에 시설하여 운영중에 있으며, 기존 능동형 고조파필터용 변압기는 72.5kV GIS와 직결하여 운영 중에 있다.

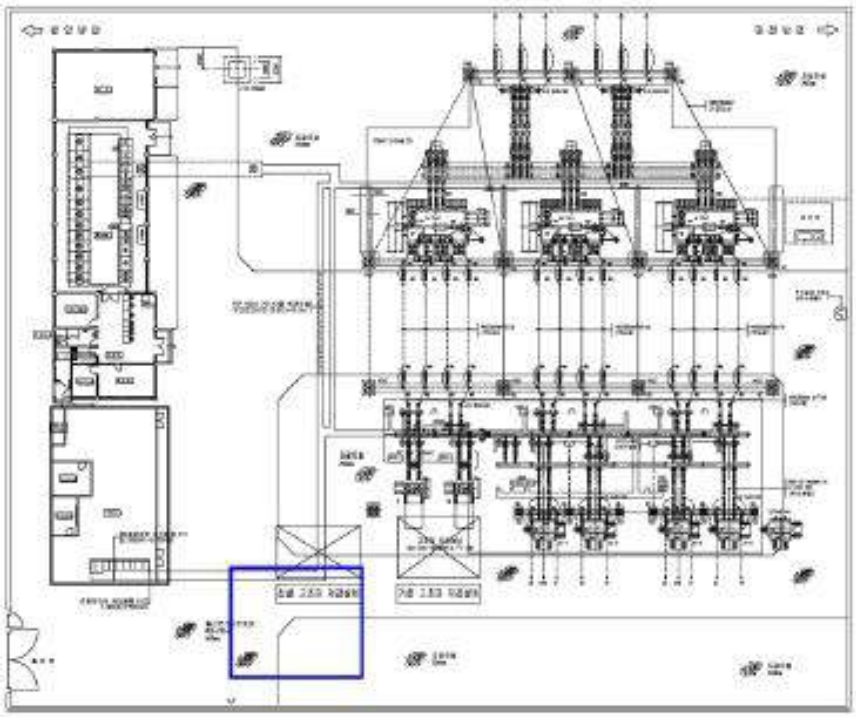
② 능동형 고조파필터 설치위치

본 과제를 통하여 신설되는 능동형 고조파 필터는 기존 능동형 고조파 필터 설치 위치와 동일 부지 내에 시설하여 상호 시스템간 고조파 저감율 비교가 가능하도록 하였다.

○ 기존 고조파필터 설치위치



○ 신설 고조파필터 설치위치



③ 신설 능동형 고조파필터 연결방안

기존 능동형 고조파필터 전원공급용 변압기는 1상2선식 55kV/400V x 3 방식으로 1차측 권선전압은 55kV, 2차측 권선전압은 1상 400V 3회선으로 구성되어 있다.

금회 능동형 고조파필터 시설은 기존 변압기 2차측 붓싱에서 전원공급용 설비를 시설하여야 하므로 기존에 시설되어 있는 케이블 덕트로는 케이블 인출이 불가하여 케이블 덕트 규격을 크게 하여 케이블 인출하여야 할 것으로 판단되어 기존 케이블 덕트는 철거하고 신설되는 케이블 덕트 내에 신설 시스템용 케이블을 포함하여 인출하는 것으로 검토하였다.

또한 기존 설비는 운영 중 가압상태이므로 변압기 붓싱에 케이블 연결시 운영자의 승인을 득한 후 운영자 입회하에 작업을 시행하여야 한다.

a) M상 인출

b) T상 인출

그림 59. 각 상별 주회로 인출 현황

④ 원격감시・제어 시스템(SCADA System)

금회 경부고속철도 신청주변전소에 신설되는 고조파저감 시스템과 울산변전소에 신설되는 에너지저장장치(피트전력저감 시스템)에 대하여 기존에 설치 운영중인 한국철도교통관제센터의 전철 원격감시제어설비간의 인터페이스를 고려하여 통신설비 등을 추가하여 설치 시스템을 구성하고 그래픽, 데이터베이스 입력 등 소프트웨어 작업을 하여 신설되는 전철변전설비와 인터페이스 하여 원활하게 전철설비를 감시·제어할 수 있도록 시스템을 구축하여야 한다.

- 원격제어계통

❍ 원격제어설비 개요

본 과업에 신설되는 시스템의 통신장치(CU)와 한국철도교통관세센터 전철 원격감시·제어시스템과 데이터 통신을 통하여 모든 전철변전설비의 제어, 표시, 계측, 누산에 관계되는 전기적인 신호를 실시간으로 Data를 수집하여 원방감시, 제어가 가능토록 하며, 철도 통합시스템 전철 원격감시제어 시스템 장애 발생시 비상제어용으로 원격감시제어 할 수 있는 소규모 원격감시제어 시스템은 각 변전소에 반영되어 있으므로 이를 활용하여 상시 감시제어 할 수 있도록 구성하여야 한다.

❍ 공급대상설비

전철 원격감시제어설비와의 실시간 DATA 교환을 위하여 전철변전소에 전철제어반의 통신장치(CU)와 통신할 수 있도록 반영되어 있으므로 한국철도교통관제센터 전철 원격감시제어 시스템에 본 시스템과 통신을 위한 설비가 추가되어야 하며, 소프트웨어 변환을 통한 통신채널 증가 및 Data 전송기능을 증설하여야 한다. 또한 기존 변전소에 반영되어 있는 소규모 원격감시제어설비를 활용하여 본 시스템을 비상시 감시제어 할 수 있도록 시스템을 구축하여야 한다.

- 전철 원격감시·제어 시스템과의 인터페이스 및 통신 구성

❍ 철도 통합시스템인 전철 원격감시제어 시스템 구성시 과업 시스템에 신설되는 제어반의 통신장치(CU)를 이중화로 신설하여 하위로는 전자식제어반과 통신을 하고 상위로는 전철 원격감시제어 시스템과 통신을 할 수 있도록 구성한다.

❍ 디지털전력보호감시제어장치는 각 제어반에 취부되어 현장에서 올라오는 상태 및 아날로그를 수집하여 통신장치(CU)로 전송한다.

❍ 디지털 전력보호감시 제어장치는 다른 디지털 전력보호감시 제어장치간의 통신은 RS485 또는 네트워크 통신을 하며, 각 기기간 상호 인터페이스에 의한 인터록 및 데이터 교환을 하도록 하여야 하며, 수집되는 데이터는 전철 원격감시제어 시스템과 통신하는 통신장치 (CU)로 연결되도록 한다.

전철용 제어반의 전자화에 따라 제어소(구로 한국철도교통관제센터 및 소규모 제어소)와의 통신을 별도 RTU 없이 가능하게 되었으며, 원격제어는 구로 철도교통관제센터 전기사령실에서 제어하게 되며, 비상시 전기사령실의 제어·감시기능을, 장애시에는 변전소에 설치된 소규모 제어장치로 구로 철도교통관제센터 전기사령실 통제하에 감시·제어하게 되며, 통신회선은 원제

설비로부터 구로 철도교통관제센터로 2회선, 변전소에 설치되는 소규모 제어장치로 1회선 총 3회선으로 구성된다.

변전소에 설치된 송전반, 변압기반 및 급전반은 급전회로별로 별도의 디지털전력보호감시제어장치(IED)로 분산 배치하고, 각 IED는 독립적으로 감시·제어가 가능하도록 구성되어 있으며, IED의 통신방법은 Point-To-Point /Multi Group 방식으로 각 IED의 고장 발생시 해당 급전회로외의 타 회로의 기능에는 어떠한 영향도 받지 않도록 구성하여야 한다.

본 원격제어 시스템은 상기와 같이 각 설비별로 독립적인 제어, 표시, 계측, 누산에 관계되는 전기적인 신호를 실시간으로 데이터를 수집하여 원방 제어・감시가 가능하며 일부 설비 고장시 고장은 그 설비에 국한되어 타 설비의 감시, 제어 등의 운영에는 지장이 없도록 구성하여야 한다.

제3절 피크전력 저감장치 MMI 개발

1. 설계검토

- 고속철도 피크전력 저감장치용 MMI 개발의 설계, 제작, 시험 및 검증까지의 단계에 있어 설계 이전에 수행되었으며, 목표에 맞는 개발방향 설정 및 기술자료를 확보하는데 목적이 있음.

가. 기술자료 분석

1) MMI 이해 및 정의

"인류는 생존을 위하여 도구를 사용하면서 진화하였고, 오늘날에 이르러 그 생존을 위한 다양한 산업의 발달 및 속도를 가름할 수 없을 만큼 빠르게 변화하는 산업사회의 환경은 우리들에게 다양한 변화와 능력을 요구하고 있다. 특히 컴퓨터 산업과 컴퓨터를 기반으로 하는 사업의 발달에 따라서 인간이 만들어놓은 각종 장치들을 편리하게 사용하는데 필요한 각종 인터페이스가 편리하고 정확하게 변화하고 있다. 그 중 하나인 사람과 기계간에 대회를 쉽게 하도록 만드는 인터페이스를 MMI(Man Machine Interface)라고 한다."

2) 제품개발 시 주안점

신뢰성 : 안전한 작동을 위한 검토

내구성 : 설치 환경에 따른 고성능 플랫폼 및 부품 적용, 견고한 기구설계

주문형 : 요구사항에 따른 다양한 옵션 검토 및 적용

3) MMI 제품 분야 / 기술영역

가) 전력분야(화력/수력/원자력/태양광/풍력 등) : 전력감시제어시스템

4) 소프트웨어

가) 그래픽 기능 : 객체 지향적 그래픽 구현

나) 경보 기능 : 그래픽, 스피커 또는 부저 형태의 정보 전달

다) 데이터베이스 : 필요에 따른 데이터베이스 구축

라) 보안 : 특정 프로그램이나 화면에 대한 접근 제한 → 외부망 연결 제한

마) 네트워크

나. 기존품 분석

1) MTU(Monitor Terminal Unit) 분석

가) 해외 S사에서 제작한 MTU는 르토리코 열차 내 운전실에 설치되는 MMI로 구조 및 기능, 외함, 구성품 분석을 진행

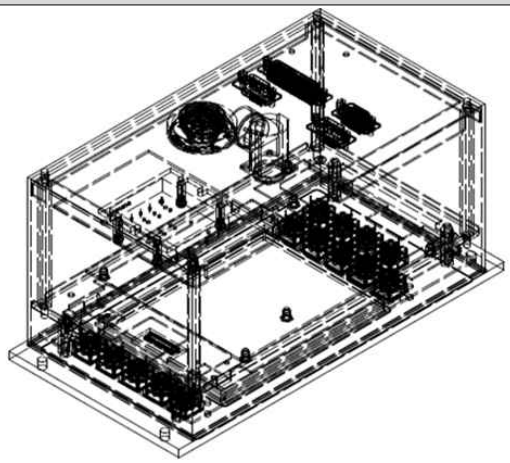
나) 기능

전원을 투입하여 동작 상태 파악

No	기능	비고
1	운행정보와 열차의 상황정보 현시	
2	노선정보, 행선지, 정차역 등 현시	
3	시스템 현황, 고장 로그, 진단 정보 등 현시	
4	시간 및 LCD 밝기 정보 현시	

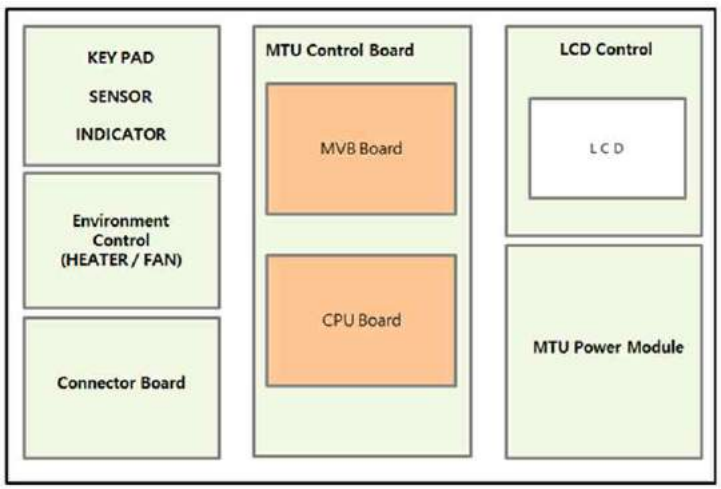
다) 외함

파악된 구조를 기준으로 기구설계(3D, 2D) 및 분석

MTU 3D 설계 결과


라) 구성분석

필수 구성요소 및 입출력 관계 파악



다. COM 플랫폼 분석

1) 모델별 성능비교결과

가) Qseven /XTX / Express 모델

성능 비교	QA	QA6
Form Factor	Qseven	Qseven
CPU	Intel® Atom™ Z510	Intel® Atom™ E680T
	Intel® Atom™ Z530	Intel® Atom™ E660T
		Intel® Atom™ E640T
		Intel® Atom™ E620T
		Intel® Atom™ E680
		Intel® Atom™ E660
		Intel® Atom™ E640
		Intel® Atom™ E620
DRAM	max. 1 GByte DDR2 400/533 MT/s	max. 2 GByte DDR2 667/800 MT/s
Temperature	Operating: 0 to +60°C	Operating: -40° to + 85°C
	Storage: -20 to +80°C	Storage: -40° to + 85°C
I/O Interfaces	1 x SATA	2 x SATA
	1 x SDIO	3 x PCI Express™
	1 x I²C bus	8 x USB 2.0
	8 x USB 2.0	1 x SDIO
	1 x PCI Express™	LPC bus
	1 x LPC bus	I²C bus
	1 x SSD 4GB	CAN Bus
Video Interfaces	1 x LVDS 1x24	1 x LVDS 1x24
	1 x SDVO	1 x SDVO

성능 비교	X945	XLX
Form Factor	XTX	XTX
CPU	Intel® Celeron® M423	AMD Geode™ LX 800
	Intel® Celeron® M440	
	Intel® Core™ Duo L2400	
	Intel® Core™ 2 Duo U7500	
	Intel® Core™ 2 Duo L7400	
DRAM	max. 2 GByte DDR2 667 MHz	max. 1 GByte DDR333
Temperature	Operating: 0 to +60°C	Operating: 0 to +60°C
	Storage: -20 to +80°C	Storage: -20 to +80°C
I/O Interfaces	2 x SATA	2 x SATA
	4 x PCI Express™	4 x USB 2.0
	6 x USB 2.0	2 x EIDE (UDMA-66/100)
	2 x Express Card®	I²C bus
	1 x EIDE (UDMA-66/100)	LPC bus
	PCI bus Rev. 2.3	2 x COM Port TTl Level
	LPC bus	1 x IrDA Port
	I²C bus	PCI bus Rev. 2.3
	2 x COM Port TTl Level	
	1 x IrDA Port	
Video Interfaces	1 x LVDS 2x24	1 x VGA
	VGA	1 x LVDS 1x18
	2 x SDVO	

성능 비교	BM57	TS77
Form Factor	COM Express Type2	COM Express Type6
CPU	intel Core i7-620M	Intel® Core™ i7-3615QE
	intel Core i5-520M	Intel® Core™ i7-3612QE
	intel Celeron P4500	Intel® Core™ i7-3555LE
		Intel® Core™ i7-3517UE
		Intel® Core™ i5-3610ME
		Intel® Core™ i3-3120ME
		Intel® Core™ i3-3217UE
		Intel® Celeron® 847E
		Intel® Celeron® 827E
		Intel® Celeron® 1020E
		Intel® Celeron® 1047UE
		Intel® Celeron® 927UE
DRAM	max 8 Gbyte DDR3 1333Mhz	max. 16 GByte DDR3 1600 MHz
Temperature	Operating: 0 to +60°C	Operating: 0 to +60°C
	Storage: -20 to +80°C	Storage: -20 to +80°C
I/O Interfaces	3 x SATA	7 x PCI Express™
	5 x PCI Express™	1 x PEG
	8 x USB 2.0	4 x SATA
	2 x Express Card®	2 x Express Card®
	1 x EIDE (UDMA-66/100)	8 x USB 2.0
	1 x PCI bus Rev. 2.3	1 x I²C bus
	1 x LPC bus	1 x LPC bus
	1 x I²C bus	4 x USB 3.0
Video Interfaces	1 x LVDS 2x24	3 x DisplayPort
	1 x VGA	3 x HDMI
	3 x DisplayPort	1 x SDVO
	3 x HDMI	1 x LVDS 2x24
	1 x SDVO	1 x VGA

라. 실증단지 조사

1) 실증 후보지

고속철도 피크전력 저감장치의 실증 후보지 선정에 따른 조사 실시

가) 조사를 실시한 실증 후보지

- 대구 변전소, 울산 변전소, 부산가야 변전소

2) 조사목표

변전소 위치 파악, 내부 구조파악, 환경 파악 등 MMI 취부위치 데이터 수집을 목표로 하였음

* 고속철도 피크전력 저감 장치의 설치 방식에 따른 검토는 과제 진행 전반에 걸쳐 진행

대구 변전소 전경	변전소 지하

울산변전소 전경	변전소 옥상

3) 조사결과

가) 환경에 대한 사양 도출

(1) 환경시험의 국제규격은 변전소 실제 환경과 철도차량 전장품에 해당하는 제품 규격 내용을 적용하여 선정

(2) 개발품의 환경기준을 만족하기 위해 데이터시트를 통해 부품선정 진행
선정된 부품을 도면에 적용하여 부품 BOM(Build of Materials)을 출력하여 기준에 적합

2. 시스템 설계 및 해석

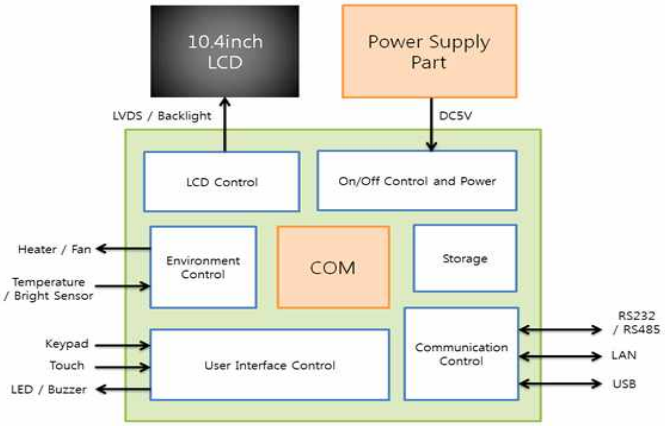
가. 시스템 설계 개요

MMI는 사용자 인터페이스를 기반으로 하드웨어 및 소프트웨어로 구성된 시스템

고속철도 피크전력 저감장치용으로 적합한 인터페이스를 적용하여 원하는 정보를 신속 정확하게 전달하고 사용자의 편의성을 고려하여 구현해야 함

나. 시스템 구성 및 해석

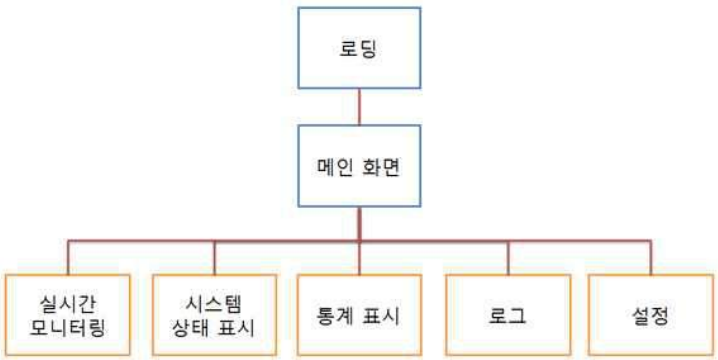
1) 하드웨어 구성



가) MMI 하드웨어 구성

10.4인치 LCD 제어부, 전원 제어부, 환경 제어부, 사용자 인터페이스부, 통신 제어부로 구분

나) MMI 소프트웨어 구성



(1) 실시간 모니터링 프로그램 : 아날로그 및 디지털 입·출력에 대한 실시간 모니터링 기능

(2) 시스템 상태 표시 프로그램 : 피크전력 저감장치의 동작 및 상태 표시기능

(3) 통계 프로그램 : 데이터 표 또는 그림으로 표시하는 기능

(4) 로그 프로그램 : 데이터 및 상태를 로그로 남기는 기능, 로그 분석하여 상태 확인

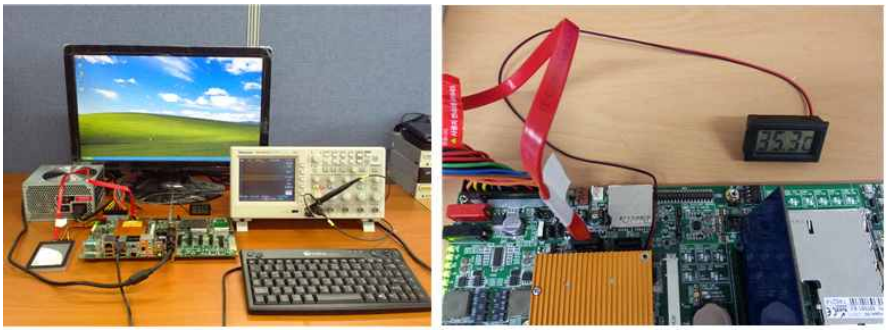
(5) 설정 프로그램 : RS-232 또는 RS-485, 네트워크 등 통신 설정, 화면 설정, 소리 등 사용자 설정 기능

3. 주요부품 단품시험

- 풍부한 통신 인터페이스, 사용자 편의성을 고려한 주요부품을 선정하였으며, 기존품 분석 시 도출된 MMI 구성품을 기반으로 주요부품을 선정
- 부품에 대한 단품시험 뿐만 아니라 주요부품을 사용한 MMI 구성품에 대한 시험을 같이 진행

가. 모듈단위 시험

1) COM 시험



COM 시험 구성 및 온도 테스트

가) 시험목적 : 고속철도 피크전력 저감장치용 MMI의 주요부품인 COM 선정을 위한 활동

나) 시험구성 : ATX 전원공급기, 평가보드, COM, HDD, 그래픽카드, 키보드, 모니터, 오실로스코프, 온도계

다) 시험내용 : 폼팩터 별/모델별 COM을 기능 및 성능을 시험하기 위해 COM 개념 정립단계에 수집한 자료를 토대로 각 폼팩터별 EVM(평가모듈) 및 COM을 구입 및 시험 수행

다) 시험결과 : 총 7개 COM 테스트, XA945, XLX는 Windows Embedded XP 설치 시 장치 드라이버 문제로 시험진행 불가, 모듈별 체크리스트 항목을 작성하여 시험을 진행 후 비교

항목			QA(Qseven)	QA6(Qseven)
Embedded XP	OS 설치		OK	OK
	OS 부팅시간		20	27
	부팅 10분 후 온도	방열판	41.8 (Fanless)	60.6 (Fanless)
		BIOS or 온도프로그램	44	79
	동영상(HD) 실행 10분 후 온도	방열판	41.5 (Fanless)	64.1 (Fanless)
		BIOS or 온도프로그램	46	85
	각장치 드라이버 인식 (사운드, LAN 등)		OK	OK
비디오 (해상도)	LVDS		VGA(640x480) ~ XGA(1024X768)	VGA(640x480) ~ XGA(1024X768)
	SDVO		1280x1024	1600x900
HDD	SATA		OK	OK
	IDE		OK	OK
USB 장치 인식 (포트 개수)			7(8)	7(8)

항목			X945(XTX)	X945(XTX)
Embedded XP	OS 설치		OK	OK
	OS 부팅시간		14	14
	부팅 10분 후 온도	방열판	38.3 (Fan)	42.1 (Fanless)
		BIOS or 온도프로그램	48	69.6
	동영상(HD) 실행 10분 후 온도	방열판	40.2 (Fan)	39.4 (Fanless)
		BIOS or 온도프로그램	52	64.1
	각장치 드라이버 인식 (사운드, LAN 등)		OK	OK
비디오 (해상도)	RGB		1024x768	1024x768
	LVDS		VGA(640x480) ~ UXGA(1600X1200)	VGA(640x480) ~ UXGA(1600X1200)
HDD	SATA		OK	OK
	IDE		OK	OK
USB 장치 인식 (포트 개수)			4(6)	4(6)

항목			BM57(COM Express Type2)	TS77(COM Express Type6)
Embedded XP	OS 설치		OK	OK
	OS 부팅시간		15	11
	부팅 10분 후 온도	방열판	36.4 (Fan)	35.7 (Fan)
		BIOS or 온도프로그램	42	48
	동영상(HD) 실행 10분 후 온도	방열판	37.3 (Fan)	36.3 (Fan)
		BIOS or 온도프로그램	46	55
	각장치 드라이버 인식 (사운드, LAN 등)		OK	OK
비디오 (해상도)	RGB		1600x900	1600x900
	LVDS		VGA(640x480) ~ WUXGA(1920X1200)	VGA(640x480) ~ WUXGA(1920X1200)
	SDVO		1600x900	1600x900
HDD	SATA		OK	OK
	IDE		OK	OK
USB 장치 인식 (포트 개수)			6(8)	6(8)

2) 전원모듈

- 산업용 온도를 지원하는 V 사의 DC/DC 컨버터 시험

가) 시험제품

(1) VI-J40 : Input 72V, Output 5V, Power 25W, 산업용 온도사양

(2) VI-J20 : Input 36V, Outpur 5V, Power 25W, 산업용 온도사양

나) 시험결과

- 모듈의 효율 90%, 온도는 사용량에 관계없이 일정하게 유지, 출력 리플 5% 미만 측정

3) SSD

- 기계적인 HDD의 문제점인 반응시간, 진동, 오류 등을 줄이기 위해 SSD 채용

가) 시험제품

(1) SanDisk SSD 2.5 Inch 64G : SATA 6 Gb/s, 읽기 490MB/s, 쓰기 240MB/s

(2) APSDM004G : SATA 3 Gb/s, 읽기 43MB/s, 쓰기 21MB/s

나) 시험결과

- APSDM004G 모델은 산업용 온도사양을 만족하고 PCB 탑재할 수 있도록 작고 고정이 가능하도록 되어 있으므로 MMI에 적용하기 적합함.
- 읽기 쓰기 속도가 SanDisk SSD 2.5inch 64G보다 느리지만 MMI와 같은 장치에 사용하기에 모자라지 않을 것으로 예상

나. 단품보드 제작 및 시험

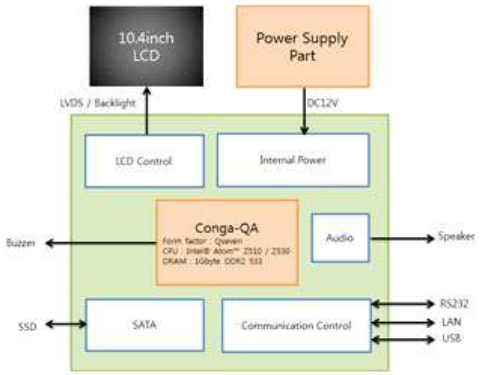
- MMI는 PC Base의 COM을 선정하여 설계 및 개발을 수행함

1) LCD 제어보드

- COM의 주요기능인 영상신호를 LCD 패널에 현시하는 기능구현을 목표로 설계 및 제작

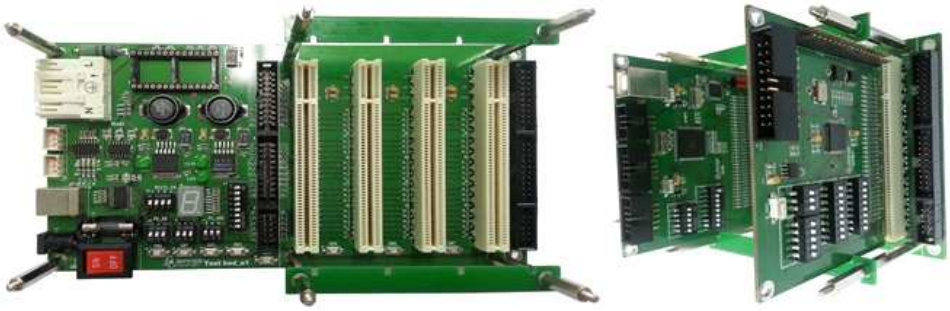
가) 제작사양 : Qseven QA6

나) 구성 : COM, LCD 신호라인(LVDS/Backlight), 전원, 기타 I/O

LCD 제어보드 구성도	LCD 제어보드
	

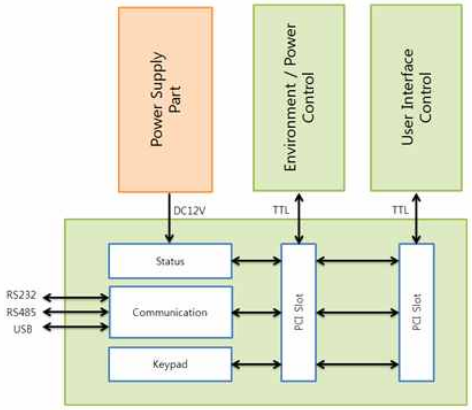
2) 환경 및 유저 인터페이스 통합 제어보드

- 통합 제어보드는 한 가지 Back Plane 보드에 PCI 슬롯을 이용하여 여러 가지 보드를 시험하고 검증하기 위해 설계됨

통합제어보드


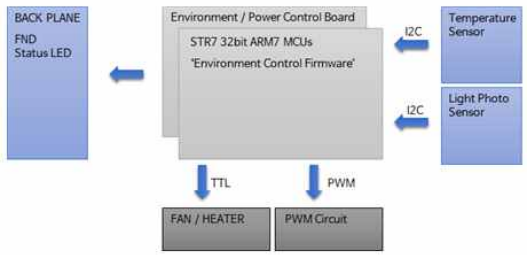
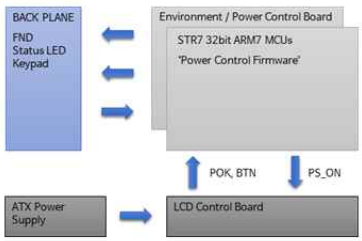
유저 인터페이스 제어보드	환경/전원 제어보드 사진

가) 구성 : Status부, Communication부, Keypad부



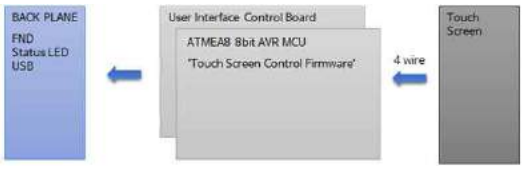
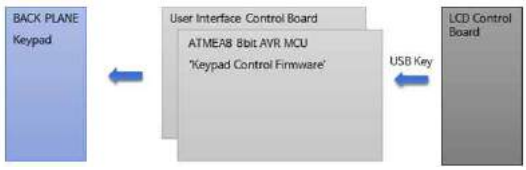
3) 환경/전원 제어보드

- 환경/전원 제어보드는 고속철도 피크전력 저감장치용 MMI의 내·외부 환경 요소를 고려하여 정상적인 동작을 하도록 제어하는 기능을 가진 보드임
- 보드의 구성은 동일하며, 펌웨어 프로그램에 따른 기능의 변경이 가능
- 외부 인터페이스는 환경 및 유저 인터페이스 통합 제어보드를 통해 하게 되며 PCI 슬롯을 통해 다른 제어보드와의 인터페이스도 가능

환경제어 구성	전원제어 구성
	

4) 유저 인터페이스 제어보드

- ATMEA8 8bit AVR MCU를 사용하여 사용자 인터페이스를 제어할 수 있는 기능을 가진보드
- 보드의 구성은 동일하며, 펌웨어 프로그램에 따른 기능의 변경이 가능
- 외부 인터페이스는 환경 및 유저 인터페이스 통합 제어보드를 통해 하게 되며 PCI 슬롯을 통해 다른 제어보드와의 인터페이스도 가능

터치스크린 제어 구성	키패드 제어 구성
	

4. MMI 제어알고리즘

가. 온도제어

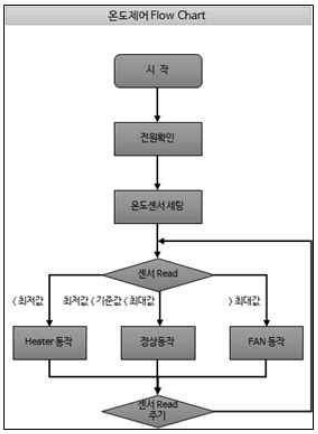
1) 온도센서의 값을 일정시간마다 I2c 통신방식으로 온도정보를 읽어옴
2) Processor는 입력된 온도정보를 받아 FAN 또는 Heater를 동작시켜줌
   - 0℃이하 : Heater 동작 / 70℃이상 : FAN 동작
3) 최초 전원 투입 시 10분 안에 장치가 동작하도록 설계

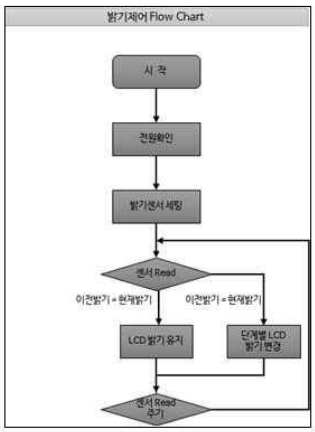
나. 밝기제어

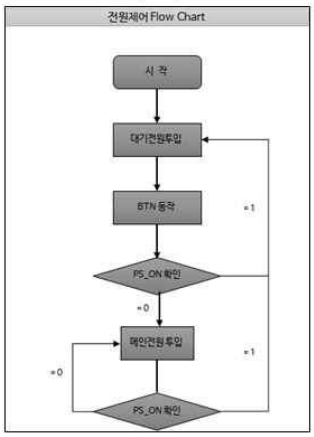
1) Light Photo Sensor의 밝기는 Analog Data를 Digital화 함
2) 일정시간마다 I2C 통신방식으로 밝기정보를 읽음
3) Processor는 입력된 밝기정보를 설정된 기준에 의해 PWM 값을 출력함
   - PWM 값 : 밝기에 따라 0~100%로 변화시킴
   - 외부 밝기 값이 높으면 PWM을 100%로 설정함

다. 전원제어

1) Processor는 장치 동작 스위치의 On/OFF를 확인
2) On일 때, 표준전원 공급절차에 따라 Stand-by 전원 투입
3) PS_ON 신호 확인 후 P_OK(전원투입)
   - 정상상태 PS_ON이 OFF 신호를 줄 경우 : 전원 차단 후 재투입
   - 장치 동작 스위치가 OFF 일 경우 : 표준 전원차단 절차에 의해 전원을 차단



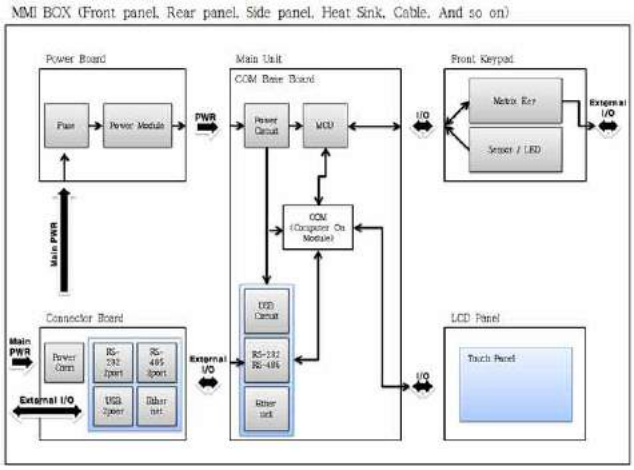




5. 시작품 제작 및 시험

가. 시제품 구성도

- 시작품은 COM의 기능과 사용자 인터페이스, MMI 내부 제어기능을 위주로 구성하였으며, 시스템과의 인터페이스를 위해 외부 인터페이스 포트를 구현하여 시험 할 수 있도록 함



나. 시작품 기능정의

No	Function	Detail	Note
1	전원투입(제어)	전원 투입 후 30초 이내 LCD, VGA 모니터에 OS화면 현시	
2	Matrix Key	MMI 전면 Matrix Key를 눌러 화면의 변화를 확인	
3	Touch Screen	LCD 전면 Touch Screen을 눌러 커서의 움직임 확인	
4	Ethernet	Ping test를 통해 Ethernet 연결을 확인	
5	RS-485	테스트 프로그램을 통해 확인	
6	RS-232	테스트 프로그램을 통해 확인	
7	조도센서(외부조도)	테스트 프로그램을 통해 확인	
8	LCD 화면 밝기 제어	조도센서의 조도를 변화시켜 확인(손전등)	
9	온도센서(내부온도)	테스트 프로그램을 통해 확인	

다. 시작품 기능시험

1) 기능시험 항목

2) MMI 테스트 프로그램

- MMI 내부 상태 및 기능, 제어알고리즘 시험 및 검토를 목적으로 개발
- 개발환경은 Windows OS(XP이상), 델파이(Delphi)를 사용

가) MMI TEST 프로그램은 시작품 기능정의 6-10번 항목의 시험에 대해 시험 및 검증용도 활용

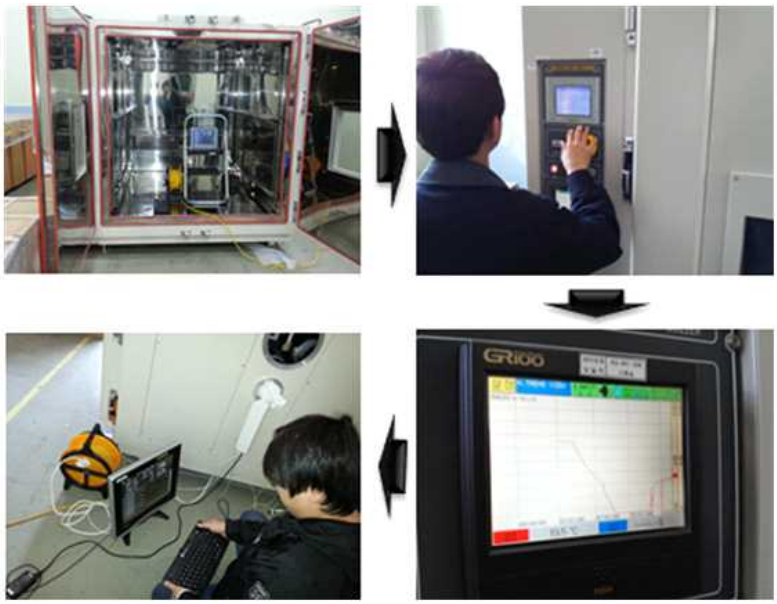
나) 1-1은 9, 8, 10번 항목의 데이터 프레임이며, 상세내용은 MMI 제어알고리즘을 참조함

3) 시작품 온도시험

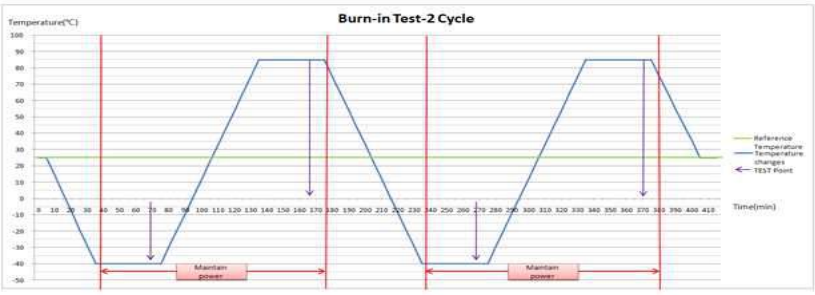
가) 온도시험 규격

No	Test-Item	Standard	International Standard
1	Cold Test	KS C 0220	IEC 60068-2-1
2	Dry Heat Test	KS C 0221	IEC 60068-2-2

나) 온도시험 절차



다) 시험결과



온도시험 사이클 그래프

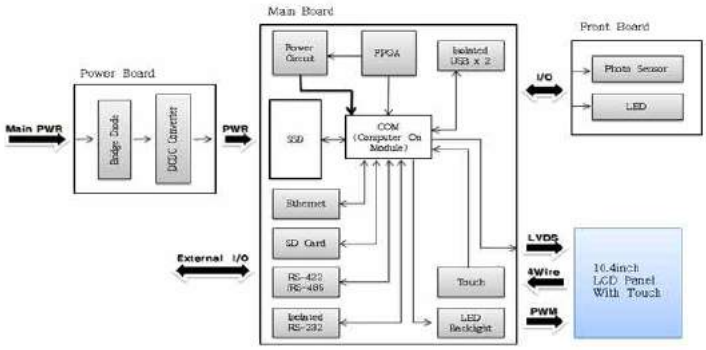
라) 온도시험 결과

철도환경에 적합한 모니터링 장치의 온도시험에 대해 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었음

- 내한성, 내열성에 적합한 모니터링 장치를 고안 및 구현
- Industrial Extended(산업용-확장) 부품의 데이터시트 상 동작온도보다 넓은 구간에서 동작확인
- 시작품 MMI를 구성하는 전자부품에 대한 동작온도 검증

6. 시제품 제작 및 시험

가. 시제품 구성도



나. 시제품 H/W 기능정의

No	Function	Detail	Note
1	전원투입(제어)	전원 투입 후 30초 이내 LCD, VGA 모니터에 OS화면 현시	
2	Touch Screen	LCD 전면 Touch Screen을 눌러 커서의 움직임 확인	
3	Ethernet	Ping test를 통해 Ethernet 연결을 확인	
4	RS-422 / 485	자제 개발프로그램을 통해 확인	
5	USB	USB 인터페이스 장치를 사용하여 인식여부 확인	
6	RS-232	자제 개발프로그램을 통해 확인	
7	LCD 화면 밝기 제어	조도센서의 조도를 변화시켜 확인(손전등)	
8	온도센서(내부온도)	테스트 프로그램을 통해 확인	

다. MMI 소프트웨어

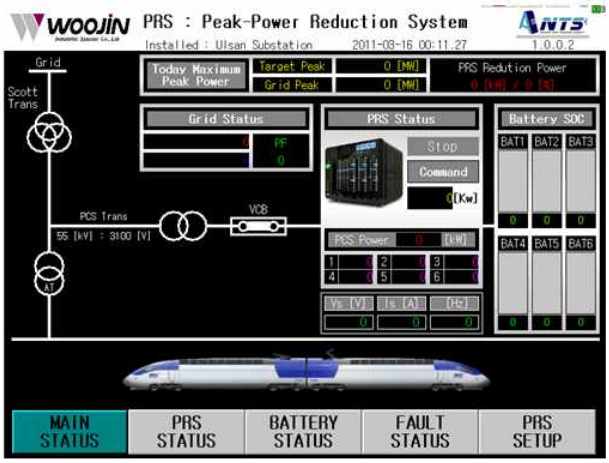
- 시스템 구성과 목적에 따른 MMI의 기능구현을 위해 Windows OS 기반으로 응용프로그램을 설계 및 제작하였음
- MMI는 ESS Controller와 PRS 사이에 존재, Ethernet to RS-485와 같이 통신 중계 역할을 하고 PRS의 상태를 육안으로 확인 할 수 있도록 LCD화면으로 현시해 주는 기능을 함

MMI 연계장치 연결 상태

1) 기본 운용환경

구분	사양	비고
O/S	Windows XP Embedded 32 bit	
CPU	Intel® Atom™ E640T (1.0GHz, 512KB L2 cache, 3.6W)	
DRAM	max, 2 GByte DDR2 667/800 MT/s	
입력장치	터치 스크린 입력장치	
통신장치	Ehternet 연결 USB to RS-485 모듈	

2) 최종버전 UI



라. MMI 시험

- 물리적 환경 속에서 시제품의 기능이 규정한 요구사항에 적합한지 평가를 위해 3자 인증업체를 통해 시험하였으며, 시험성적서를 통해 기능에 대한 신뢰성 확보

1) 적용규격

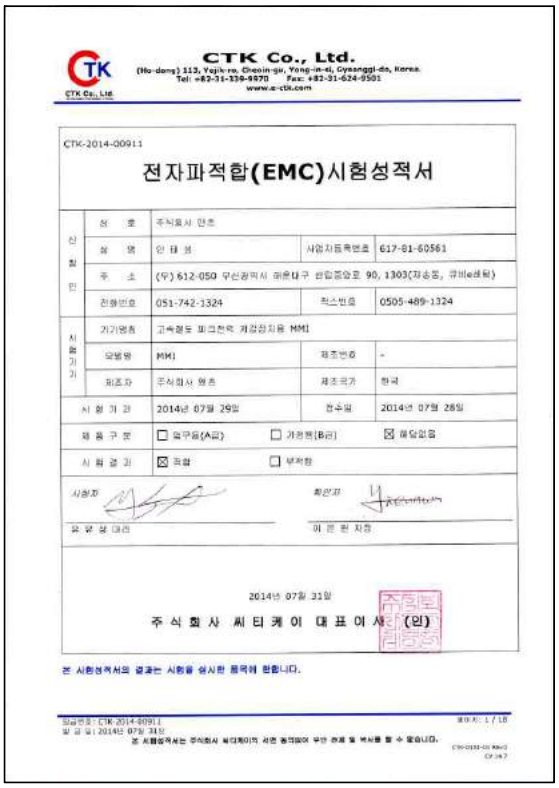
적용규격	시험항목	비 고
IEC 61000-4-4	EFT/버스트 내성 시험	
IEC 61000-4-5	서지 내성 시험	
IEC 61000-4-6	전도성 RF 전자기장 내성 시험	

2) 시험사진

EFT / 버스트 내성 시험	서지 내성 시험

전도성 RF 전자기장 내성 시험

3) 전자파적합(EMC) 시험결과



CTK Co., Ltd.

(Ho-dong) 113, Yujik-ro, Cheoin-gu, Yong-in-si, Gyeonggi-do, Korea.
Tel: +82-31-339-9970 Fax: +82-31-624-9501
www.e-ctk.com

CTK-2014-00911

전자파적합(EMC)시험성적서

신청인	성 호	주식회사 안츠		
	성 명	안 태 성	사업자등록번호	617-81-60561
	주 소	(우) 612-050 부산광역시 해운대구 반여동 1303-90, 1303(자송동, 쿠비e편물)		
	전화번호	051-742-1324	팩스번호	0505-489-1324
시험기기	기기명칭	고속정도 피크전력 계측장치용 MMI		
	모델명	MMI	제조번호	-
	제조자	주식회사 원츠	제조국가	한국
시험기간		2014년 07월 29일	접수일	2014년 07월 28일
제품구분		☐ 일무용(A급) ☐ 가정용(B급) ☒ 해당없음		
시험결과		☒ 적합 ☐ 부적합		

시험자 확인자

요 갑 상 대리 이 은 원 차장

2014년 07월 31일

주 식 회 사 씨 티 케 이 대 표 이 사 (인)

본 시험성적서의 결과는 시험을 실시한 품목에 한합니다.

접수번호 : CTK-2014-00911
발 급 일 : 2014년 07월 31일
본 시험성적서는 주식회사 씨티케이의 사전 동의없이 무단 전재 및 복사를 할 수 없습니다.

8. 실증설치

가. 설치위치

- PRS 판낼 전면 : 피크전력 저감장치용 MMI는 PRS, ESS Controller와 연계되어 있으며, PRS의 상태정보를 현시하는 목적으로 개발되었기 때문에 설치위치는 적절하다 볼 수 있음

나. 설치수량 : 3 EA

다. 설치사진

제4절 ESS 용량산정 및 운전계획 모형 개발

1. 수요관리용 ESS 운전방안 검토

전기요금은 최대 피크전력에 따른 기본요금과 전력량 사용에 대한 전력량요금으로 구성되어 있다. 이중 기본요금은 주택용 전력을 제외한 모든 계약종별이 계약전력을 기준으로 하고 있다. 다만, 최대수요전력계를 설치한 고압 고객에 대하여는 검침당월을 포함한 직전 12개월 중의 12월분, 1월분, 2월분, 7월분, 8월분, 9월분 및 검침 당월분 중의 최대수요전력을 요금적용전력으로 하여 기본요금을 산정하고 있다. 따라서, ESS를 이용하여 수용가의 전력요금을 절감하기 위해서는 기존의 최대수요를 최대한 낮춤으로써(Peak shaving) 기본요금을 최소화하고, 낮춰진 최대수요를 만족하면서, 계시별 요금단가를 고려하여 수용가의 전력량요금이 최소가 되도록(Load shifting) 시간별 충방전량을 최적화하는 형태의 운전방안이 가능하다.

고속철도 변전소의 경우는 일간 운행시간 중 특정한 일부 구간(15분 평균전력 기준)에서 전력소비가 급증하는 현상을 나타내는데 이 구간의 피크전력을 적절히 저감할 경우 기본요금 절감 효과가 상당히 클 것으로 예상된다. 반면에, 전력사용량요금을 저감하기 위해서는 일간 피크부하 시간대에 사용하는 전력량의 일부를 전력요금이 저렴한 심야시간(AM 2:00-AM 5:00)으로 이동하여야 하는데 후보 변전소의 부하수준을 고려할 때, 수십~수백 MWh 규모의 ESS이 필요하다. 그러나 수십 MWh 이상의 ESS을 신뢰성 있게 구현하는 데에는 기술적 어려움이 따르고, 현재의 가격수준을 고려할 때 초기 투자비용 역시 막대한 금액이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 현 시점에서 현실적인 고속철도 변전소용 ESS의 운전방안은 피크전력을 저감하는 용도가 가장 합리적일 것으로 판단된다.

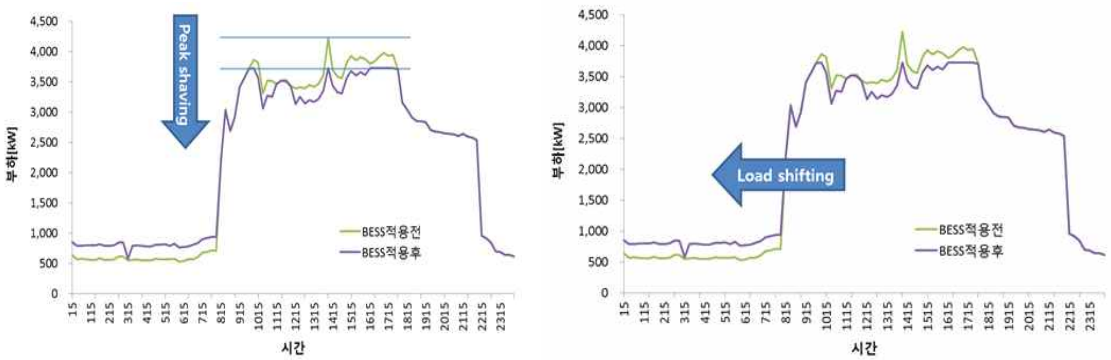


그림 60. 기본요금 및 전력량 요금 절감 운전방안

2. 피크저감용 ESS 적정용량 산정모형 개발

가. 적정용량 산정 방법론

고속철도 변전소의 피크전력을 저감하기 위한 ESS의 용량은 낼 수 있는 출력[MW]을 결정하는 PCS의 정격과 가능한 충방전 전력량(에너지)[MWh]을 결정하는 전지용량으로 구분된다. PCS의 정격은 저감해야하는 전력 크기를 고려하여 결정되어야 하며, 전지용량은 저감해야 하는 부하가 지속되는 시간 및 회수 동안 필요한 전력량 이상을 확보해야 한다. 본 연구에서는 평택, 대구, 울산, 부산 및 김천 변전소 5개를 대상으로 각 변전소의 최근 3년간(2010년~2012년)의 부하 데이터를 기준으로 ESS의 정격과 용량을 산정하였다. ESS 정격은 각 변전소의 최근 3년 기간 중 일간 최대부하를 찾고 여기에 적정한 여유분을 준 값을 기준 최대부하로 선정한 후, 이 기준값에서 피크 저감율을 곱하여 결정하였다. ESS 용량은 기준 최대부하와 피크저감율, 전지용량 이용률 및 PCS의 충방전 효율 등을 고려하여 필요한 최소한의 용량을 기준용량으로 설정하고, 이로부터 용량을 점진적으로 늘려가면서 3년간의 부하 데이터 기준 피크저감 목표치를 달성할 수 있도록 산정하였다. 용량검토를 위한 세부적인 절차는 아래 그림과 같다.

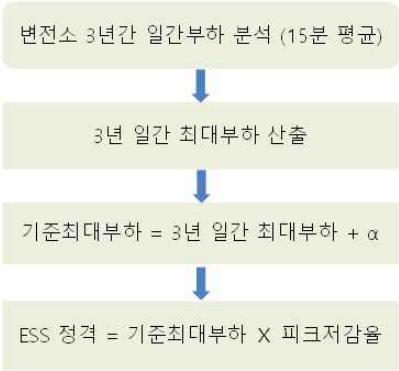


그림 61. ESS 정격출력 산정 절차

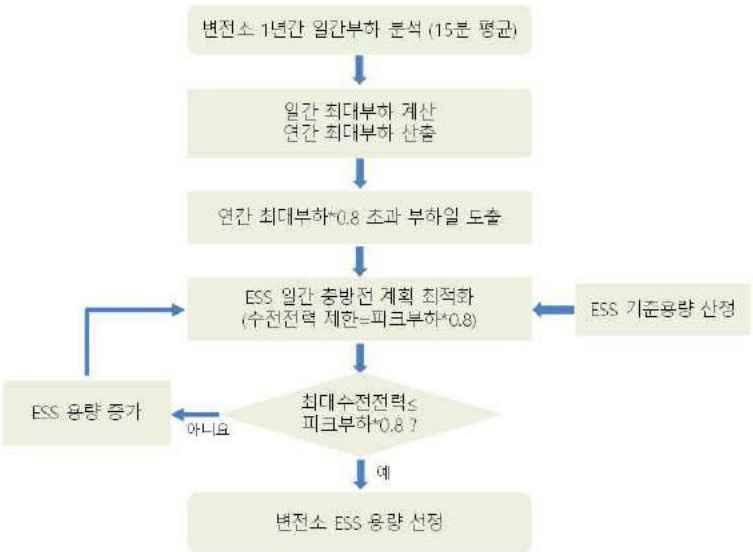


그림 62. ESS 용량 산정 절차

나. 일간 충방전 모형수립 및 기준용량 산정

적정용량 산정 절차 중 일간 충방전 계획수립을 위한 모형 및 기준용량 산정에 대한 상세 내용은 아래와 같다.

① ESS의 일간 충방전 모형

표 1. ESS 일간 충방전 계획 모형

목적함수	$Min\left[\sum(PCS\text{충전전력}\times\text{요금단가})-\sum(PCS\text{방전전력}\times\omega)\right]$	
제어변수	PCS출력	
제약조건	① PCS 출력	$-\text{정격출력}\le PCS\text{출력}\le\text{정격출력}$
	② SOC	$-\text{전지용량}\times0.9\times0.9\times\frac{4}{9}\le SOC\le\text{전지용량}\times0.9\times0.9$ (단, 8시 최소SOC=90%, 오전 8시까지 모두 충전)
	③ 수전전력	$0\le\text{수전전력}\le\text{수전전력제한}$

② 기준용량 산정

기준용량 = (기준 최대부하×20%)×0.25h÷(전지 용량 이용률×PCS 충방전 효율) (1)

리튬계열 ESS의 이용률은 50%로 산정하였는데, 이는 현재 정부 주도의 실증사업 등에서 안전성이나 기술적 검증의 부족 등으로 대용량 리튬계열 ESS의 이용률을 약 50% 수준으로 제한하여 운전 중인 것에 근거하였다. PCS 충방전 효율은 유효효율 기준으로 90%로 적용하였다. 각 변전소에 적용할 ESS 기준용량을 구하면 다음 표와 같다.

표 2. 변전소별 부하정보 및 ESS 기준용량

전철변전소	계약전력 [MW]	최대부하 [MW]	기준최대부하 [MW]	기준용량 [MWh]
평택	128	38.7	40	4.44
대구	125	33.0	35	3.89
울산	95	28.3	30	3.33
부산	95	43.9	45	5.00
김천	125	36.9	40	4.44

다. 적정용량 산정결과

아래 표는 최근 3년간의 부하데이터를 바탕으로 평택, 대구, 울산, 부산 및 김천 5개 변전소에 대한 적정용량 산정 결과를 요약한 것이며, 울산변전소의 경우 6MW/3.5MWh를 적정용량으로 최종 산정하였다.

표 3. 고속철도 변전소 피크저감용 ESS 적정용량 산정 결과

변전소	기준 최대 부하 [MW]	기준 용량 [MWh]	ESS 적정용량 산정(정격출력/전지용량)			
			2010년	2011년	2012년	결과
평택	40	4.44	8MW/5MWh	8MW/6.5MWh	8MW/5MWh	8MW/6.5MWh
대구	35	3.89	7MW/4MWh	7MW/4MWh	7MW/3.5MWh	7MW/4MWh
울산	30	3.33	6MW/3MWh	6MW/3.5MWh	6MW/3.5MWh	6MW/3.5MWh
부산	45	5.00	9MW/5MWh	9MW/5.5MWh	9MW/4.5MWh	9MW/5.5MWh
김천	40	4.44	8MW/4.5MWh	8MW/4.5MWh	8MW/4.5MWh	8MW/4.5MWh

3. 피크저감용 ESS 적정용량 산정 프로그램 개발

앞서 기술한 ESS 적정용량 산정 방법론을 토대로 용량검토 프로그램을 제작하였다. 본 프로그램은 MS.Net Framework 기반의 프로그램으로 제작되었으며, 주요 기능별로 수용가 정보 모듈, 전지정보 모듈, 최적 충방전 계획 모듈, 적정용량 산정 모듈로 구성된다.

① 수용가 정보 모듈

수용가 정보 모듈에서는 해당 변전소의 한전 i-Smart 사이트 아이디와 비밀번호 등 기본적인 정보를 입력하게 되고, 이 정보를 이용하여 연간 부하데이터를 i-Smart 사이트에서 자동으로 다운로드 하게 된다.

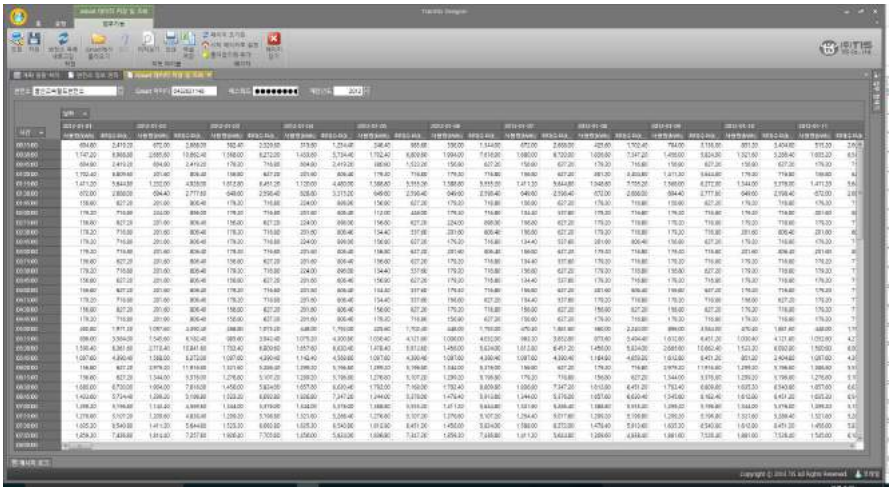


그림 63. 고속철도 변전소 i-Smart 부하데이터 다운로드 화면

② ESS 정보 입력

ESS 정보 입력 모듈은 ESS의 효율 및 SOC 운전조건 등을 입력하며, 충방전 횟수에 따른 용량감소를 계산하고 기준용량을 제공한다. 전기요금제는 2000년도 과거 전기 요금제부터 현재까지 데이터베이스를 구축하여 고시일자와 요금제 종류를 선택하여 입력할 수 있다.

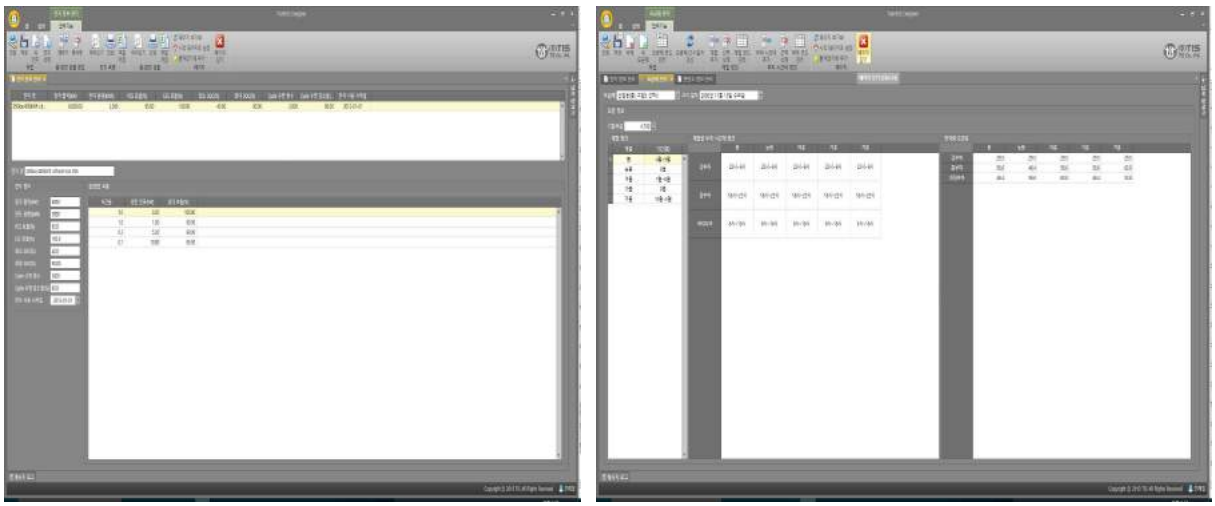


그림 64. ESS 정보 및 전기요금제 선택 화면

③ ESS 최적 충방전 계획 모듈

최적 충방전 계획 모듈은 일간 ESS의 최적 충방전 계획을 수립하는 모듈이다. 먼저 수용가를 선택하고 기준연도와 목표 피크를 확인한다. PCS정격출력, 전지용량 등을 설정하여 계산을 실행하면 목적함수 및 제약조건을 고려한 최적 충방전 계획이 생성된다.

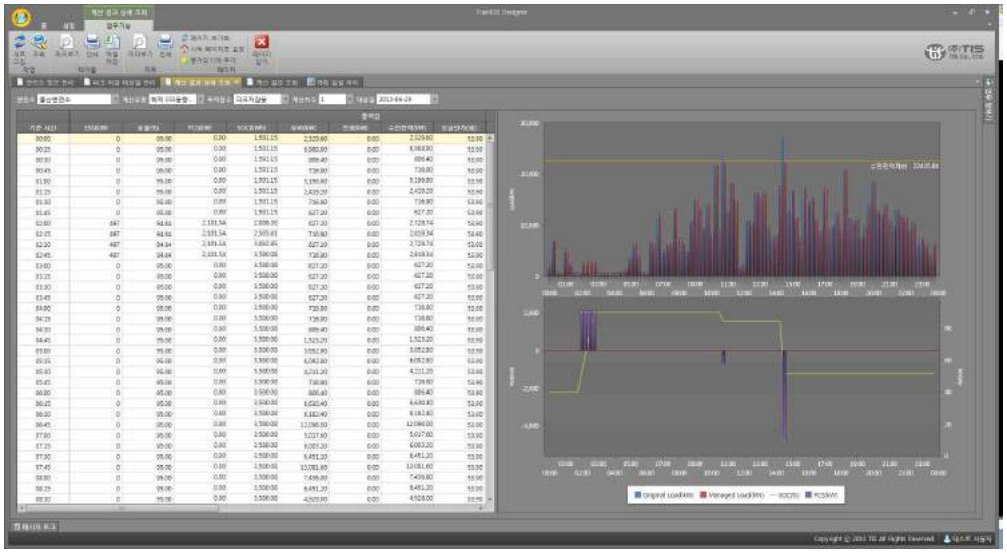


그림 65. ESS 최적 충방전 계획 화면

④ 적정용량 산정 모듈

적정용량 산정 모듈은 입력된 부하정보, 요금단가정보, 전지정보를 이용하여 ESS의 최적 PCS 정격출력 및 전지용량을 산정하는 모듈이다. 첫 번째 단계는 PCS 정격출력을 산정하게 된다. PCS정격출력 후보범위 및 증가간격을 입력하여 후보별로 피크저감 목표를 만족하면서, 전기요금을 최대로 절감할 수 있는 적정 PCS 정격출력을 결정한다. 두 번째 전지용량 산정단계에서는 앞서 결정된 PCS 정격출력을 기반으로 전지용량 후보군을 입력하고 첫 번째 단계와 동일한 방법으로 적정 전지용량을 산정하게 된다.

그림 66. 적정용량 산정 화면

4. 피크저감용 ESS 일간 운전계획 모형 개발

가. ESS 일간 운전계획 수립

본 연구에서는 피크전력 저감을 위한 ESS의 운영 시 필요한 일간 충방전 계획을 수립하는 방안을 제안하였다. 먼저, 부하분석 모듈에서 과거 부하 데이터(15분 평균)를 기반으로 피크부하가 발생될 가능성이 높은 복수개의 방전(피크부하 후보) 구간을 산정한다. 또한, 피크저감을 위한 ESS 방전으로 소모된 전력을 충전하기 위한 충전(오크피크부하 후보) 구간을 산정한다. 일간 운전 계획 모듈에서는 방전 및 충전구간, ESS 파라미터 정보를 이용하여 최적화 모형으로 정의된 ESS 충방전 계획을 수립하게 된다. 이렇게 수립된 충방전 계획은 방전구간에서는 ESS가 15분 동안 정격으로 지속적으로 방전하게 되어 피크저감 효과를 최대화한다. 아울러, 1회 방전 후 다음 방전구간에서 다시 방전 할 수 있도록 중간에 충전구간을 가져야 하는데, 본 방안에서는 부하분석 모듈에서 도출된 충전구간에서만 충전이 시행되도록 하였다. 이렇게 하면, 충전 시 충전전력으로 인해 예상치 못한 피크부하를 발생시킬 수 있는 위험성을 최소화 하도록 하였다. 아래 그림에서는 이러한 운전계획 수립절차를 흐름도로 나타내고 있다.

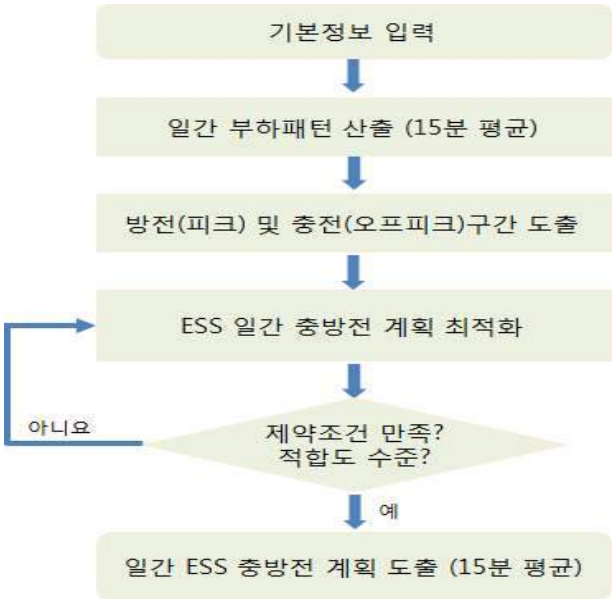


그림 67. 일간 ESS 운전계획 수립절차

나. ESS 일간 운전계획 모형수립

피크저감을 위한 ESS 일간 운전계획 모형에 대한 상세한 내용은 아래와 같다.

(1단계) 제어변수 정의

제어변수 정의 부분에서는 일간 15분 단위 ESS 충방전 전력을 최적화변수로 하였다.

■ 제어변수 : PCS 출력 (EO_i)

여기서, i : 시간 (i=1~96)

EO_i : i구간의 PCS 출력 (If $EO_i > 0$ then 충전, If $EO_i < 0$ then 방전)

E_i : i구간의 충방전 효율

O_i : i구간의 ESS 충방전량

$$O_i = EO_i \times E_i, \text{ If } EO_i > 0$$

$$O_i = \frac{EO_i}{E_i}, \text{ If } EO_i < 0$$

(2단계) 목적함수 정식화

목적함수 정식화에서는 충전전력 최소화 및 방전구간에서 피크저감 효과를 최대화 할 수 있도록 목적함수를 선정하였다.

$$Minimize(F) = \sum_{i=1}^{96}(PL_i^2 + w \times EC_i) \tag{2}$$

여기서, F : Fitness value

EC_i : i구간의 충전전력

PL_i : i구간의 Peak cutting 전력, IF $PL_i < 0$

Constant value, IF $PL_i > 0$

ω : 가중치

(3단계) 제약조건 정의

제약조건 선정에서는 ESS의 SOC 가용범위, ESS 충방전 최대전력 등을 제약으로 선정하였다. 제약조건 중 각 구간별 충방전 전력 제약값은 앞선 부하분석 부분에서 도출된 방전구간 및 충전구간 정보를 활용하여 결정하였다. 이 밖에 충방전 효율을 계산함에 있어 배터리의 C-rate별 효율, 전력변환장치의 Loading factor별 효율을 각각 산정하여 최종 합성효율을 계산하는 방식을 적용하였다.

$$EO_{\min} \le EO_i \le EO_{\max}$$
$$SOC_{\min} \le SOC_i \le SOC_{\max} \tag{3}$$

여기서, i : 시간 (i=1~96)

SOC_1 = 초기충전상태

$SOC_i = SOC_{i-1} + O_i$ (단, i = 2~96)

$EO_{\min}$ = PCS 최대방전전력

$EO_{\max}$ = PCS 최대충전전력

최소전지용량($SOC_{\min}$)= 전지저장용량 × 0.1

최대전지용량($SOC_{\max}$)= 전지저장용량 × 0.95

5. 피크저감용 ESS 일간 운전계획 프로그램 개발

앞선 일간 운전계획 모형을 기반으로 운전계획 프로그램을 제작하였다. 본 프로그램은 MS .Net Framework 환경으로 제작되었으며, 크게 GUI, D/B, 연산로직 부분으로 구성되어 있다. 프로그램 기능구조 관점에서는 파라미터 입력 모듈, 부하분석 모듈, 일간 운전계획 연산 모듈로 구성되어 있다.

① 파라미터 입력 모듈

파라미터 입력 모듈은 일간 운전계획 수립 시 필요한 설정치 및 데이터를 사용자가 용이하게 입력 및 수정하여 사용할 수 있도록 제작되었으며, 주요 입력값은 아래와 같다.

- 부하분석을 위한 과거부하 조회기간 (주 단위)
- 충전 및 방전 구간 설정치 (MW)
- ESS 최대 SOC 및 최소 SOC (%), ESS 및 PCS 효율 (%)

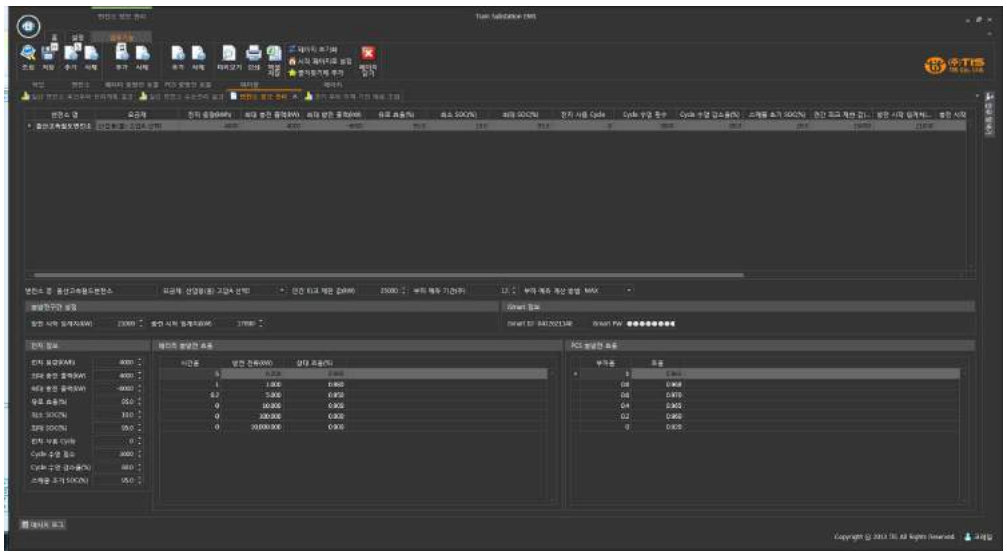


그림 68. 파라미터 입력 화면

② 부하분석 모듈

일간 운전계획을 위한 부하분석은 과거 이력데이터 기반으로 예측일 해당 구간(15분 평균값으로 하루 96개 구간)의 과거 데이터값 중 최대값을 예측값으로 이용하였으며, 각 구간 예측값이 충전구간 설정치 이하이면 충전구간, 방전구간 설정치 이상이면 방전구간, 양쪽 모두 해당하지 않으면 대기구간으로 분류되도록 제작하였다. 아래 그림에서는 예측하고자 하는 날짜의 충방전 구간 선정결과를 보여주고 있다.

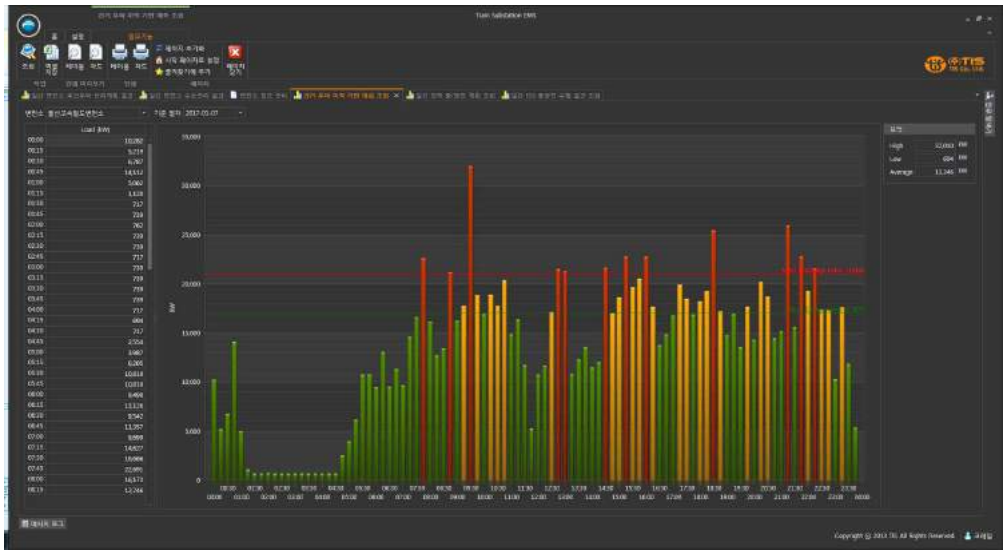


그림 69. 충방전 구간선정 화면

③ 일간 운전계획 연산모듈

일간 운전계획 연산모듈에서는 입력데이터를 이용하여 최적화 연산을 수행하고 최종적으로 일간 충방전 계획을 도출하게 된다. 충방전 계획은 일간 96개 구간으로 되어있으며 아래 그림에서는 ESS 충방전 계획 및 예측부하 기반 수요관리 결과 화면을 보여주고 있다.

그림 70. ESS 충방전 계획 및 예측부하 기반 수요관리 결과 화면

6. 온라인 모의운영 및 결과분석

앞서 기술한 ESS 일간 운전계획 프로그램을 기반으로 온라인 모의운영 시스템을 구축하였다. 구축한 모의운영 시스템은 실제 ESS가 없더라도 개발한 일간 운전계획 프로그램의 성능 및 피크저감 효과를 사전에 실 부하데이터를 기반으로 검증할 수 있으며, 향후 실증시험 시 실제 ESS와의 통합운전을 고려하여 ESS 제어장치 혹은 PMS(Power Mangement System)과 통신연계 될 수 있도록 제작하였다. 본 모의운영 시스템의 전체적인 구성은 아래 그림과 같으며, 먼저 부하 데이터 수집 모듈에서 한전 전력포털서비스인 i-Smart로부터 고속철도 변전소의 과거 부하데이터를 수집하고 일간 운전계획 수립 모듈에서는 ESS 일간 운전계획을 생성하게 된다. 최종적으로, 운영결과 분석 모듈에서는 해당일의 실제 부하데이터에 일간 운전계획을 적용하여 피크저감 효과를 분석하게 된다. 본 연구에서는 모의운영 시스템을 이용하여 울산 변전소를 대상으로 6MW/4MWh 용량 ESS에 대한 운전계획 수립 및 효과분석을 진행하였으며, 모의검증 기간은 2015년 12월부터 2017년 5월까지 총 18개월로 하였다.

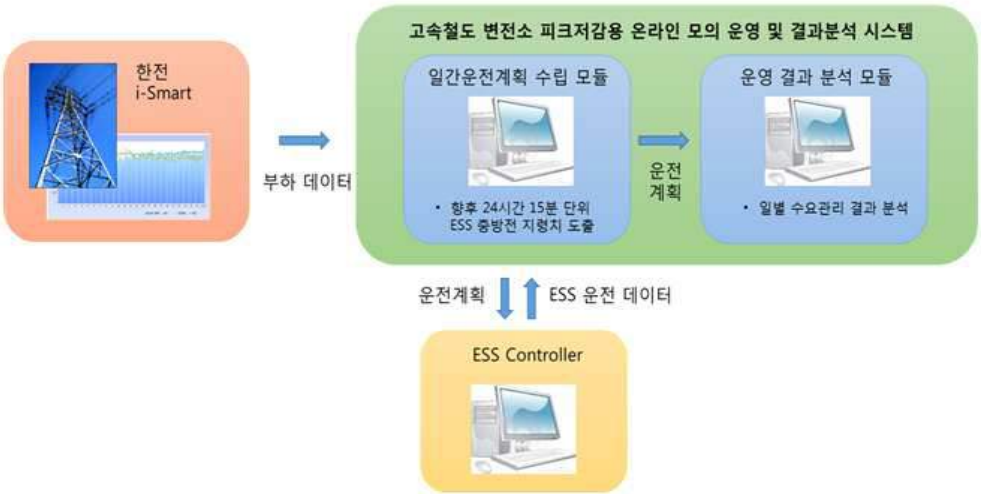


그림 71. 온라인 모의운영 시스템 구성

① 모의운영 결과 1 (2015년 12월~2016년 10월)

본 모의운영에서 울산 고속철도 변전소의 2014년, 2015년 피크전력이 약 25,000kW 정도인 것을 감안하여 아래와 같이 2016년 피크관리 목표를 설정하였다.

표 4. 2016년 수요관리 목표

2014년~2015년 피크전력(kW)	피크관리 목표(kW)
25,000	20,000 (20% 저감)

- 2015년 12월부터 2016년 2월까지 모의운영 결과 최대피크는 2016년 2월 12일에 발생하였으며 실제부하 24,282kW를 20,339kW로 저감하였다. 또한, 모의운영 3개월간 월간 피크전력이 모두 피크관리 목표치에 가깝게 관리되었다.
- 2016년 3월부터 5월까지 모의운영 결과 최대피크는 2016년 5월 13일에 발생하였으며 실제부하 23,475kW가 19,373kW로 저감되었다. 또한, 3개월간 월간 피크전력이 피크관리 목

표치 이하로 관리되었다.

- 2016년 6월부터 8월까지 모의운영 결과 최대피크는 2016년 6월 4일에 발생하였으며 실제부하 24,013kW가 21,072kW로 저감되었다. 3개월 동안 6월을 제외한 7월, 8월은 월간 피크전력이 피크관리 목표치 이하 혹은 가까운 값으로 관리되었으며, 6월만 다소 높은 21,072kW로 나타났다.
- 2016년 9월부터 10월까지 모의운영 결과 최대피크는 2016년 9월 17일에 발생하였으며 실제부하 23,050kW를 20,049kW로 저감하였다. 또한, 2개월간 월간 피크전력이 모두 피크관리 목표치를 만족하는 것으로 나타났다.

표 5. 2015년 12월~2016년 2월 모의운영 결과

	2015년 12월	2016년 1월	2016년 2월
관리전 피크전력(kW)	24,214	23,654	24,282
관리후 피크전력(kW)	20,845	20,787	20,966

표 6. 2016년 3월~5월 모의운영 결과

	2016년 3월	2016년 4월	2016년 5월
관리전 피크전력(kW)	22,848	21,504	23,475
관리후 피크전력(kW)	18,995	20,160	19,373

표 7. 2016년 6월~8월 모의운영 결과

	2016년 6월	2016년 7월	2016년 8월
관리전 피크전력(kW)	24,013	22,288	22,938
관리후 피크전력(kW)	21,072	20,608	19,757

표 8. 2016년 9월~10월 모의운영 결과

	2016년 9월	2016년 10월
관리전 피크전력(kW)	23,050	21,661
관리후 피크전력(kW)	20,049	18,682

② 모의운영 결과 2 : SRT 도입 과도기 (2016년 11월~12월)

- 2016년 11월에 또 다른 고속열차인 SRT의 시범운행이 한 달간 있었으며 12월부터 정식운행을 시작하였다. SRT 역시 KTX 경부선과 동일한 노선을 사용하기 때문에 변전소의 부하가 기존에 비해 큰 변화가 있었다. 2016년 11월의 열차편성은 시험운행으로 변동성이 증가하여 피크관리에 어려움이 있었고 30,150kW의 피크전력이 발생했지만 저감하지 못하였다.
- 12월은 SRT의 정식운행에 따라 변전소 피크전력이 30,000kW를 상회하는 정도로 크게 증가하였다. 12월 중 32,010kW의 피크가 발생하였으며 30,780kW 정도로 저감할 수 있는

것으로 보여지나 급격한 부하증가로 인해 기존 피크관리 목표치를 유지하는 것은 어려운 것으로 나타났다.

표 9. 2016년 11월~12월 모의운영 결과

	2016년 11월	2016년 12월
관리전 피크전력(kW)	30,150	32,010
관리후 피크전력(kW)	30,150	30,780

③ 모의운영 결과 3 : SRT 정식운행 (2017년 1월~5월)

SRT의 추가운행으로 변전소 부하수준이 전반적으로 상승하였으며 특히 2016년 12월 10일 이후의 부하량 증가가 주목할 만하다. 따라서, 2017년 1월부터는 지난 11월, 12월의 부하패턴을 고려하여 피크저감 목표치를 아래와 같이 수정하였으며 그에 따라 운전계획 프로그램의 파라미터도 변경하였다. 피크관리 목표는 과거 피크전력 대비 20%가 ESS 정격인 6MW를 초과하기 때문에 2017년 목표는 과거 피크전력에서 ESS 정격을 뺀 값을 적용하였다.

표 10. 2017년 수요관리 목표

2016년 11월~12월 피크전력(kW)	피크관리 목표(kW)
30,150~32,010	24,150~26,010

- 2017년 1월부터 2월까지 모의운영 결과 최대피크는 2017년 1월 7일에 발생하였으며 실제 부하 29,926kW를 23,926kW로 저감하였다. 또한, 모의운영 2개월간 월간 피크전력이 모두 피크관리 목표치 이하로 관리되었다.
- 2017년 3월부터 5월까지 모의운영 결과 최대피크는 2017년 4월 4일에 발생하였으며 실제 부하 28,762kW가 25,530kW로 저감되었다. 또한, 3개월간 월간 피크전력이 피크관리 목표치 이하로 관리되었다.

표 11. 2017년 1월~2월 모의운영 결과

	2017년 1월	2017년 2월
관리전 피크전력(kW)	29,926	27,149
관리후 피크전력(kW)	24,197	25,805

표 12. 2017년 3월~ 5월 모의운영 결과

	2017년 3월	2017년 4월	2017년 5월
관리전 피크전력(kW)	26,253	28,762	26,163
관리후 피크전력(kW)	24,640	25,530	23,738

④ 모의운영 결과분석

2015년 12월부터 2017년 5월까지 울산 고속철도 변전소 실 부하데이터를 토대로 ESS 모의운영 결과를 분석하면 다음과 같다.

■ 2015년 12월부터 2016년 10월(SRT 운영 전)까지의 운영결과

- 11개월간 관리전 최대 피크전력은 24,282kW, 관리후 최대 피크전력은 21,072kW
- 전체 기간 중 4개월은 피크관리 목표치인 20,000kW 이하로 관리되었으며, 7개월은 목표 보다 약간 높은 20,049kW~21,072kW 수준을 기록함

■ 2016년 11월부터 12월(SRT 도입 과도기)까지의 운영결과

- 2개월간 관리전 최대 피크전력은 32,010kW, 관리후 최대 피크전력은 30,780kW
- SRT 도입에 따른 급격한 부하패턴의 변화로 인해 기존 피크관리 목표치 달성에 실패하였으며, 새로운 피크관리 목표치 설정 및 모의운영 시스템 파라미터 재설정

■ 2017년 1월부터 5월(SRT 정식 운영)까지의 운영결과

- 5개월간 관리전 최대 피크전력은 29,926kW, 관리후 최대 피크전력은 25,819kW
- 전체 기간 중 월간 피크가 모두 피크관리 목표치인 26,010kW 이하로 관리되었음

제5절 시스템 RAMS 분석

철도산업에서의 RAMS업무는 대체적으로 국제규격인 EN 50126의 시스템 수명주기를 근거로 하여 각 단계별 관리 절차를 설명하고 각 단계별로 정리한 업무 내용에 근거하여 수행하였다.

본 연구에서는 피크전력 저감을 위한 교류용 에너지저장장치(ESS)와 능동형 고조파 저감필터(APF)에 대한 RAMS 분석 업무를 수행하여 RAMS 요구사항에 관련된 신뢰도 목표 값을 정리하고, 하부시스템의 신뢰도 값을 이용하여 시스템의 목표값을 산출하였다.

1. PBS 구성 및 신뢰성 예측

제품분류체계(Product Breakdown Structure: PBS)는 고객사별로 요구하는 양식이 모두 다르나 대체적으로 전체 시스템에서 하부 시스템의 계층 구조를 분석하고, 아래의 표와 같이 각 구성품에 대한 간략한 설명과 함께 구성품의 기능 및 수량을 기술하고, 신뢰성 예측을 통해 산출된 고장률 및 평균고장시간(MTBF) 등을 기술한다.

고장율(또는 수명)은 실제로 현장에서 운용되는 동안 고장이 발생한 이력자료를 기반으로 신뢰성분석 과정을 통해 추정하는 것이 원칙이지만, 본 피크저감장치는는 운영이력이 없는 신규 제작 시스템이기에 고장자료를 획득하기가 불가능하기 때문에 대상 기기의 고장율(또는 수명)을 예측하기 위해 신뢰성 예측을 수행하였다. 신뢰성 예측은 제품 제조사에서 제공하는 신뢰성 데이터를 활용하거나, 구성 부품의 명세서를 정리하여 이를 토대로 MIL-HDBK-217 기준서 또는 EPRD 및 NPRD 등과 같은 데이터북을 적용하여 구성 부품에 대한 고장율을 산출하는 과정을 거쳐 신뢰성 값을 계산한다. 즉, “과거의” 신뢰성 자료를 이용하여 “새로운” 부품의 신뢰성을 추정하는 것으로서 현장 자료에 근거한 실험식 (Empirical Model)을 이용하되, 대상 부품의 유형(Type), 사용조건(Environment) 및 제조 과정에서의 품질(Quality)등 기준이 되는 부품과의 유사적 속성(Similar Attributes)을 판단하는 과정을 거친다.

신뢰성 예측을 수행하기 위해서는 먼저 구성 부품의 계층 구조 및 분해 수준을 결정하고 각 부품에 대한 상세 부품 명세서를 수집, 정리하며 동작 환경, 온도, 품질수준, 전기적, 기계적, 기술적인 특성을 파악한 후 기준서를 적용하여 고장율을 예측한다.

아래의 표는 신뢰성 예측 결과를 포함한 ESS 및 APF의 PBS에 대한 내용을 일부 기술한 것이며, ESS 및 APF에 대한 PBS 상세 결과는 부록을 참조한다.

표 60. PBS 결과 예시(ESS)

ID	Item	Q'ty	Description	Failure Rate (failure/10^6hr)	Manufacturer	Remark
100000	교류용 에너지 저장 시스템					
110000	GIS (Gas Insulated Switchgear)	1	메인 차단기	0.2987	-	NPRD Databook
120000	VCB (Vacuum Circuit Breaker)	3	분기 차단기	0.5121	-	NPRD Databook

표 61. PBS 결과 예시(APF)

ID	Item	Q'ty	Description	Failure Rate (failure/10^6hr)	Manufacturer	Remark
200000	능동형 고조파 필터					
210000	IGBT반	6				
211000	CHOPPER IGBT MODULE					
211100	IGBT MODULE	1	Chopper용 전력용 반도체 소자	0.0022	INFINEON	EPRD Databook
211200	GATE DRIVER	1	Chopper용 IGBT 구동 드라이버	1.5452	WOOJIN	MIL-HDBK-217 & Manufacturer Data

2. Maintenance Analysis

보전(Maintenance)은 요구기능을 수행할 수 있는 상태로 아이템을 유지하거나 회복시키기 위한 관리활동을 포함한 모든 기술적·행정적 활동의 조합으로 정의되며, 보전성(Maintainability)은 주어진 조건에서 규정된 절차와 자원을 사용하여 보전이 수행될 때 요구기능을 수행할 수 있는 상태로 유지 또는 복원되는 아이템의 능력을 의미한다.

보전성은 시스템 설계가 끝나고 시제품이 완성된 상태에서 검토한다면 이때는 이미 때늦은 상태가 된다. 따라서 기획 및 설계 단계에서부터 보전성 설계에 대한 심사를 해야 한다. 아울러 설계자는 시스템이나 하위시스템의 운용 시 생기는 보전상의 문제를 정리하여 이것을 설계에 반영하도록 하는 사후보전 활동도 중요하다.

보전성의 중요 결정요소로는 다음 세 가지를 들 수 있다.

- 하드웨어 설계: 접근성, 하위시스템/유니트의 모듈화, 시험 및 점검의 용이성, 예방보전과 상태감시, 인간의 역할에 대한 고려 등
- 보전방침(소프트웨어 설계 포함): 필요한 보전요원의 수, 보전작업의 난이도와 작업환경에 의거한 개선 요구사항, 시스템의 고장 모드와 그 원인의 조사결과, 점검 시에 관측된 하위 시스템이나 기기의 열화 진행 상황 등
- 보전요원에 대한 요건: 보전요원의 선택(교육, 경험, 소질 등 고려), 보전요원의 훈련(작업분석, 훈련계획, 훈련에 사용하는 기기 등 고려), 숙련도 검토 등

보전은 예방보전(Preventive Maintenance: PM)과 사후보전(Corrective Maintenance: CM)으로 구분된다.

가. 예방보전분석

예방보전이란 “아이템의 고장확률 또는 기능열화를 줄이기 위해 미리 정해진 간격 또는 규정된 기준에 따라 수행되는 보전”으로 정의하고 있다. 따라서 예방보전에는 고장의 징후 및 결점을 찾아내기 위한 시험·검사, 주유, 청소, 조정, 불량부품의 교환수리 및 정기교환 등이 포함된다. 아래의 표는 ESS 및 APF의 예방보전분석에 대한 내용을 일부 기술한 것이며, ESS 및 APF에 대한 예방보전분석의 상세 결과는 부록을 참조한다.

표 62. 예방보전분석 결과 예시(ESS)

ID	Item Description	Q'ty	Step No.	Maintenance Task Rough Description	Maintenance Task Detailed Description	Interval	Standard Tools	Personnel	Maintenance Time (hour)
100000	교류용 에너지 저장 시스템								
110000	GIS (Gas Insulated Switchgear)	1	01	외관 검사	점검 항목 1.외측 COVER의 손상 유무 및 취부 상태의 양부 점검 2. DUST FILTER 상태 점검 및 청소	월간 점검	1.BOX WRENCH 2.SCREWDRIVER	1	0.08
		1	02	육안 점검	점검 항목 1.내부기기 손상 및 변색 유무 점검 2. 광케이블의 손상유무 및 취부상태 점검	월간 점검		1	0.08
		1	03	육안 점검	점검 항목	월간	1.BOX	1	0.08

ID	Item Description	Q'ty	Step No.	Maintenance Task Rough Description	Maintenance Task Detailed Description	Interval	Standard Tools	Personnel	Maintenance Time (hour)
					1.전선 노화의 경우 손상 유무 점검 2. 배선도체의 손상 및 절연처리부 노화, 고정상태의 양부 점검 3. 단자부의 변형,변색,흠집,나사의 체결상태 점검	점검	WRENCH 2.SCREWDRIVER		

표 63. 예방보전분석 결과 예시(APF)

ID	Item Description	Q'ty	Step No.	Maintenance Task Rough Description	Maintenance Task Detailed Description	Interval	Standard Tools	Personnel	Maintenance Time (hour)
200000	능동형 고조파 필터								
210000	IGBT반	6	01	외관 검사	점검 항목 1.외측 COVER의 손상 유무 및 취부 상태의 양부 점검 2.DUSTFILTER상태 점검 및 청소	월간 점검	1.BOX WRENCH 2.SCREWDRIVER	1	0.08
		6	02	육안 점검	점검 항목 1.내부기기 손상 및 변색 유무 점검 2.광케이블의 손상유무 및 취부상태 점검	월간 점검		1	0.08
		6	03	육안 점검	점검 항목 1.전선 노화의 경우 손상 유무 점검 2.배선도체의 손상 및 절연처리부 노화, 고정상태의 양부 점검 3.단자부의 변형,변색,흠집,나사의 체결상태 점검	월간 점검	1.BOX WRENCH 2.SCREWDRIVER	1	0.08

나. 사후보전분석

사후보전은 사건이 일어난 후 처리하는 것으로 “결함 인식 후에 아이템이 요구기능을 수행할 수 있는 상태가 되도록 복구하기 위해 수행되는 보전”으로 정의하고 있고, 통상 사후보전과 긴급보전으로 나뉜다. 사후보전분석을 통해 ESS의 MTTR은 0.37 (hours)로 산출되었으며, APF의 MTTR은 0.33 (hours)로 산출되었다. 아래의 표는 ESS 및 APF의 사후보전분석에 대한 내용을 일부 기술한 것이며, ESS 및 APF에 대한 사후보전분석의 상세 결과는 부록을 참조한다.

표 64. 사후보전분석 결과 예시(ESS)

ID		Item Description	Q'ty	Failure Mode	Maintenance Task Description	Spare Parts	Special Tools	Standard Tools	Personnel	Maintenance Time (hour)
100000	1	교류용 에너지 저장 시스템								
110000	1	GIS (Gas Insulated Switchgear)	1	개폐 동작 불능	점검항목 1.경보 LAMP 점등 시 고장 메시지 확인 2. 해당 장치의 인터페이스 점검 3. 해당 장치 및 부품 교체	GIS	DMM (Digital Multi Meter)	1.BOX WRENCH 2.SCREW DRIVER	1	0.50
120000	1	VCB (Vacuum Circuit Breaker)	3	개폐 동작 불능	점검항목 1.경보 LAMP 점등 시 고장 메시지 확인 2. 점검 및 Test 시행 3. 해당 장치 및 부품 교체	VCB	DMM (Digital Multi Meter)	1.BOX WRENCH 2.SCREW DRIVER	1	0.50

표 65. 사후보전분석 결과 예시(APF)

ID		Item Description	Q'ty	Failure Mode	Maintenance Task Description	Spare Parts	Special Tools	Standard Tools	Personnel	Maintenance Time (hour)
200000	1	능동형 고조파 필터								
210000	1	IGBT반	6							
211000	1	CHOPPER IGBT MODULE								
211100	1	IGBT MODULE	1	소자 소손	점검항목 1. 경보 LAMP 점등 시 고장 메시지 확인 2. 해당 장치 및 부품 교체	IGBT MODULE		1.BOX WRENCH 2.SCREW DRIVER	2	1.00
211200	1	GATE DRIVER	1	출력 불능	점검항목 1. 경보 LAMP 점등 시 고장 메시지 확인 2. 해당 장치 및 부품 교체	GATE DRIVER		SCREW DRIVER	1	0.50

3. FMECA Analysis

FMEA(Failure Mode and Effects Analysis, 고장 유형 및 영향 분석)는 시스템이나 기기의 잠재적인 고장유형을 찾아내고, 시스템이나 기기의 가동 중에 이와 같은 고장이 발생하였을 경우 임무수행에 미치는 영향을 조사 및 평가하여 영향이 큰 고장유형에 대하여는 적절한 대책을 수립하는 구조공학분석 방법이다.

즉, FMEA는 부품의 설계 및 제품의 기획단계에서 제품이 고객(최종소비자)에게 인도된 후 발생할 수 있는 예상 가능한 모든 잠재적 고장형태와 그 영향을 분석 평가하여 사전에 제반 문제점을 해소함으로써 사후에 발생하는 추가비용의 발생을 최소화 하고자 하는 끝없는 상호작용의 과정이다.

또한 FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, 고장 유형, 영향 및 치명도 분석)는 FMEA를 실시한 결과에 의해 고장 등급이 높은 고장모드를 중심으로 시스템이나 기기의 고장에 어느 정도 기여하는가를 정량적으로 해석하여 평가하는 방법이다.

FMECA의 절차는 아래 그림과 같은 순서로 진행되며, 단계별 수행 내용은 아래와 같다.

① 관련자료 정리
② 기능규명
③ 분해 수준 결정
④ 신뢰성 블록도 작성
⑤ 고장유형 분석
⑥ 고장 영향
⑦ 고장 원인 분석
⑧ 치명도(Criticality) 등급 산정

표 66. 고장 심각도 등급 기준

고장 심각도 등급	설명
장기고장(LTF)	제공된 서비스와 정기성 악화, 임무의 손실로 인한 운행차질을 초래하는 고장 (이때 지연은 6분 이상이다.)
단기고장(STF)	지연으로 인한 운행 장애가 초래되는 고장들을 포함 (이때 지연은 6분 미만이다.)

표 67. 고장 발생빈도 등급 기준

고장 발생빈도 등급	λ	설명(일일 20시간 운행 고려)
매우 빈번한	$\lambda \geqq 10^{-2}$	주당 최소 1회 발생되는 고장
빈번한	$10^{-2} > \lambda \geqq 10^{-3}$	2달에 걸쳐서 발생 가능한 고장
때때로	$10^{-3} > \lambda \geqq 10^{-4}$	2년에 걸쳐 발생 가능한 고장
가능성이 희박한	$10^{-4} > \lambda \geqq 10^{-5}$	설계 기간 동안 발생 가능한 고장
가능성이 없는	$10^{-5} > \lambda$	설계 기간 동안 발생될 것으로 생각할 수 없는 고장

표 68. 고장 치명도 등급 기준

고장 치명도 등급		고장 심각도	
		장기 고장(LTF)	단기 고장(STF)
발생빈도	매우 빈번한	Critical	Critical
	빈번한	Critical	Critical
	때때로	Critical	Non-critical
	가능성이 희박한	Non-critical	Non-critical
	가능성이 없는	Non-critical	Non-critical

아래의 표는 ESS의 FMECA 결과에 대한 내용을 일부 기술한 것이며, ESS 및 APF에 대한 FMECA의 상세 결과는 부록을 참조한다.

표 69. FMECA 결과 예시(ESS)

ID		Item Description	Q'ty	Functions	Failure Mode	Failure Cause	Failure Effects		Failure Detection Methods
							Local	System	
100000	1	교류용 에너지 저장 시스템							
110000	1	GIS (Gas Insulated Switchgear)	1	고압 개폐	개폐 동작 불능	1. 과전압/과전류 2. 부품 손상 3.단품 불량	에너지 저장 시스템 기동 불능	에너지 저장 시스템 동작 불능	유지보수 점검 시 육안으로 확인
120000	1	VCB (Vacuum Circuit Breaker)	3	고압 분기 개폐	개폐 동작 불능	1. 과전압/과전류 2. 부품 손상 3.단품 불량	1. 해당 PCS 동작 정지 2. 해당 BAT SYSTEM 충/방전 정지	출력 전력 저하	유지보수 점검 시 육안으로 확인

표 70. FMECA 결과 예시(ESS) - 계속

ID		Item Description	Q'ty	Functions	Failure Mode	Item Criticality Assessment			Compensating Provisions / Mitigation
						Frequency	Severity	Criticality	
100000	1	교류용 에너지 저장 시스템							
110000	1	GIS (Gas Insulated Switchgear)	1	고압 개폐	개폐 동작 불능	가능성이 없는	단기 고장 (STF)	NC	주기적인 예방 점검
120000	1	VCB (Vacuum Circuit Breaker)	3	고압 분기 개폐	개폐 동작 불능	가능성이 없는	단기 고장 (STF)	NC	1. PCS 3개로 에너지 저장 시스템을 구성하여 해당 PCS 고장 시에도 에너지 저장 시스템 동작 가능 2. 출력 마진을 고려한 설계 3. 주기적인 예방 점검

표 71. FMECA 결과 예시(APF)

ID		Item Description	Q'ty	Functions	Failure Mode	Failure Cause	Failure Effects		Failure Detection Methods
							Local	System	
200000	1	능동형 고조파 필터							
210000	1	IGBT반	6						
211000	1	CHOPPER IGBT							

ID		Item Description	Q'ty	Functions	Failure Mode	Failure Cause	Failure Effects		Failure Detection Methods
							Local	System	
		MODULE							
211100	1	IGBT MODULE	1	Chopper용 전력용 반도체 소자	소자 소손	1. 과전류/과전압 2. GATE DRIVER 오동작	1. 해당 CHOPPER 동작 정지 2. 해당 CHOPPER 전압 상승 3. 해당 IGBT반 동작 정지	해당 상(M or T) 출력 감소	1. 경보 LAMP를 통해 확인 2. 제어반 MMI 고장 메시지를 통해 확인 3. 유지보수 점검 시 육안으로 확인
211200	1	GATE DRIVER	1	Chopper용 IGBT 구동 드라이버	출력 불능	1. 과전류/과전압 2. 부품 손상	1. 해당 CHOPPER 동작 정지 2. 해당 CHOPPER 전압 상승 3. 해당 IGBT반 동작 정지	해당 상(M or T) 출력 감소	1. 경보 LAMP를 통해 확인 2. 제어반 MMI 고장 메시지를 통해 확인 3. 유지보수 점검 시 육안으로 확인

표 72. FMECA 결과 예시(APF) - 계속

ID		Item Description	Q'ty	Functions	Failure Mode	Item Criticality Assessment			Compensating Provisions / Mitigation
						Frequency	Severity	Criticality	
200000	1	능동형 고조파 필터							
210000	1	IGBT반	6						
211000	1	CHOPPER IGBT MODULE							
211100	1	IGBT MODULE	1	Chopper용 전력용 반도체 소자	소자 소손	가능성이 없는	단기 고장(STF)	NC	1. 3병렬 회로를 구성하여 해당 CHOPPER 고장 시에도 동작 가능 2. 출력 마진을 고려한 설계 3. 주기적인 예방 점검
211200	1	GATE DRIVER	1	Chopper용 IGBT 구동 드라이버	출력 불능	가능성이 없는	단기 고장(STF)	NC	1. 3병렬 회로를 구성하여 해당 CHOPPER 고장 시에도 동작 가능 2. 출력 마진을 고려한 설계 3. 주기적인 예방 점검

4. 고장수목분석(FTA)

고장수목분석(Fault Tree Analysis: FTA)은 원하지 않는 사건을 일으키는 고장에 대해 게이트(Gate)와 이벤트(Event) 기호를 이용한 연역적인 분석 방법이다. FTA는 시스템고장을 발생시키는 원인들과의 관계를 논리적으로 사용하여 나뭇가지 모양의 그림(Tree)으로 나타낸 FT(Fault Tree)를 만들고 이에 의거하여 시스템의 고장확률을 구함으로서 취약 부분을 찾아내어 시스템의 신뢰도를 개선하는 정량적 고장해석 및 신뢰성 평가 방법이다.

FTA의 가장 큰 특징은 AND와 OR인 두 종류의 논리게이트 조합에 의해 대상 설비 또는 공정의 위험성을 트리구조에 의해 표현하므로, 시각적으로 파악하는 우수한 수단이며 여러 가지 전문 기술 분야에 걸친 정보를 망라할 수 있는 유연성이 풍부한 방법이라고 할 수 있다. 또한 분석대상의 위험성에 대한 확률론적인 정량평가가 가능하게 하여 기본사상(Basic Event) 발생률로써 중간 및 정상 사상에 대한 확률을 차례로 계산할 수 있게 함으로서 기존의 감각적, 경험적 사고로부터 탈피하여 논리적이고 확률론적인 정량적 결과를 도출할 수 있다.

교류용 에너지 저장 시스템 및 능동형 고조파 필터에 대하여 고장 유형, 영향 및 치명도 분석(Failure Mode, Effect and Criticality Analysis, FMECA) 결과를 기반으로 각 시스템의 기능 및 동작에 영향을 주는 요인들을 FTA를 통해 분석하였다.

고장률이 일정한 지수분포(Exponential Distribution)를 가정한 상태에서 기본사상(Basic Fault Event)의 고장률을 이용하여 각 정상사상(Top Event)에 대한 고장률을 산출하였으며, Fault Tree 구성 및 분석 수행 시에 적용한 가정 사항은 다음과 같다.

- 각 시스템에 대한 일부 기능 상실을 시스템의 기능 상실로 고려한다. (보수적 접근)
- 각 아이템에 대한 고장률은 지수분포를 따른다. (즉, 고장률이 일정)
- 각 아이템은 통계적으로 서로 독립이다.
- 각 시스템은 1년 365일 운행되며, 일일 운행시간은 20시간이다.

FTA를 통해 ESS의 기능 상실에 대한 고장률은 4.3397E-05 (failure/hour)으로 산출되었고, MTBF은 23,043 (hours)으로 산출되었다. 또한 APF의 기능 상실에 대한 고장률은 2.6283E-05 (failure/hour)으로 산출되었고, MTBF은 38,047 (hours)으로 산출되었다. Failure Rate는 아이템에 대한 고장률을 의미하므로 FTA의 Top Event에 대한 Failure Rate는 Event 발생률의 의미로 해석 가능하다. 따라서 FTA 결과를 토대로 ESS의 경우에는 약 3.16년 운행 시 ESS의 기능 상실이 1회 정도 발생할 수 있다고 해석할 수 있고, APF의 경우에는 약 5.21년 운행 시 APF의 기능 상실이 1회 정도 발생할 수 있다고 해석할 수 있다.

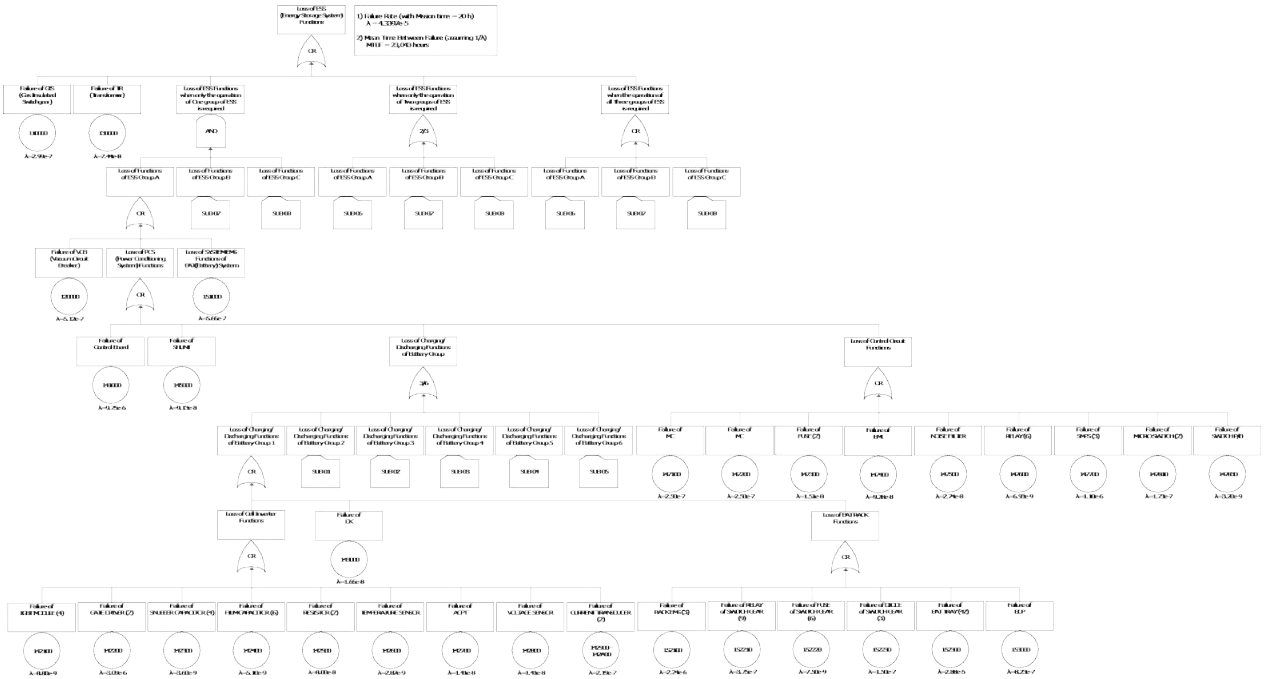


그림 72. FTA 결과 예시(ESS)

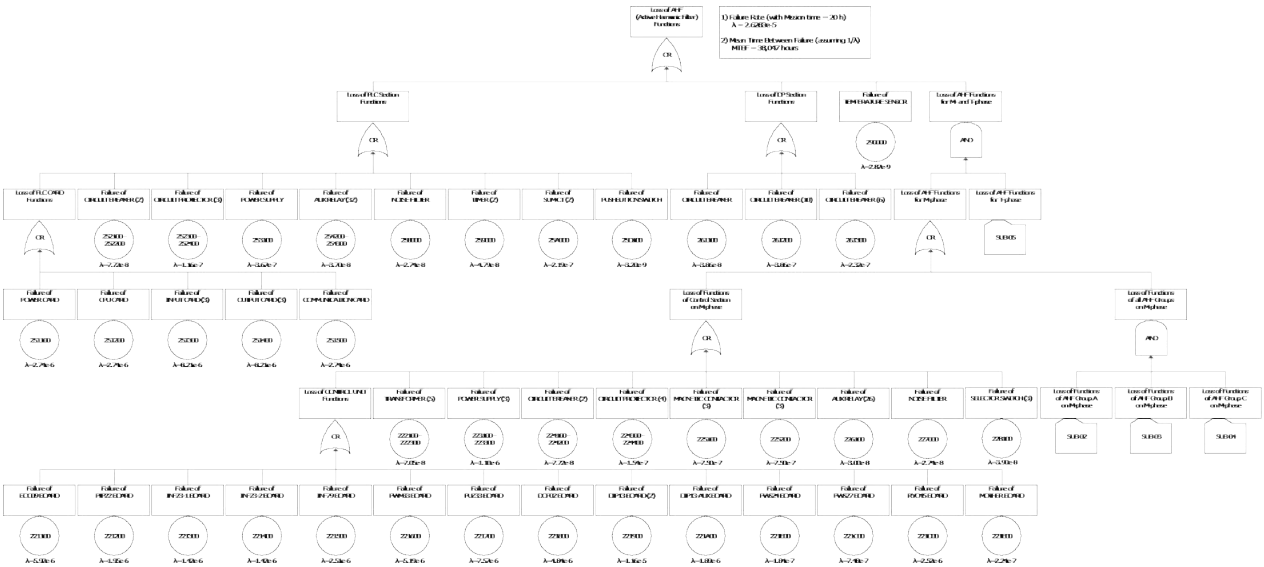


그림 73. FTA 결과 예시(APF)

5. LCC 분석

수명주기(Life Cycle)란 제품의 계획에서부터 철거까지에 이르는 전 과정을 나타내는 용어로 일반적으로 계획단계, 설계단계, 입찰 및 계약단계, 시공단계, 인도관계, 유지관리단계, 해체, 폐기단계 등 모든 단계를 포함한다. 따라서 철도차량의 수명주기비용(Life Cycle Cost: LCC)은 철도차량의 수명주기 동안 발생하는 모든 비용 즉 계획, 설계, 시공, 유지관리, 해체, 폐기 등에 소요되는 전체 비용을 의미한다.

수명주기비용의 분석은 철도운영기관 뿐만 아니라 제작업체에서 철도 시스템의 전체 수명주기 동안에 정확한 수명주기비용의 예측이 필수적으로 요구되고 있으며, 이를 위해 신뢰성(reliability), 가용성(availability), 유지보수성(maintainability) 및 안전성(safety)의 RAMS를 기반으로 운영기관뿐만 아니라 차량제작사 및 모든 관련 당사자가 서로 협력하여야만 이룰 수 있다. 본 연구에서는 RAMS 분석 결과를 기반으로 수명주기 동안에 예상되는 유지보수비용에 대한 LCC 분석을 수행하였다.

LCC 분석 대상은 현장교체단위(LRU)를 기준으로 구성한 PBS를 기준으로 수행하였으며, 아래의 표와 같이 LCC 분석에는 아이템의 고장확률 또는 기능열화를 줄이기 위해 미리 정해진 간격 또는 규정된 기준에 따라 수행되는 예방보전에 대한 비용과 결함 인식 후에 아이템이 요구기능을 수행할 수 있는 상태가 되도록 복구하기 위해 수행되는 사후보전에 대한 비용 등을 적용하여 분석을 수행하였다.

표 73. LCC 분석 정보

구분		설명	비고
사전 정보	Global Data	• 프로젝트 기본 정보 • 인건비 및 수명주기 정보 • 시스템 구성 정보	“1. PBS 구성 및 신뢰서 예측” 참조
	Spare Parts	• Spare part 기본 정보 • 제품 양산 기간 및 양산 이후의 가격 정보 • 수리 및 Overhaul 비용	“1. PBS 구성 및 신뢰서 예측” & “2. Maintenance Analysis”의 “나. 사후보전분석” 참조
	Preventive Maintenance (PM)	• 예방보전(Preventive Maintenance) 기본 정보 • 유지보수작업 주기, 인원, 소요시간 정보 • 유지보수작업에 필요한 도구 및 자원 정보	“2. Maintenance Analysis”의 “가. 예방보전분석” 참조
	Corrective Maintenance (CM)	• 사후보전(Corrective Maintenance) 기본 정보 • 아이템 고장유형, 영향 및 고장율 정보 • 유지보수작업 인원, MTTR 및 공수 정보 • 유지보수작업에 필요한 도구 및 자원 정보	“2. Maintenance Analysis”의 “나. 사후보전분석” 참조
LCC 분석	Results	• LCC 분석 결과 정보 • 평균유지보수비용 정보 • PM 및 CM별 인건비/재료비 정보 • 각 주기별 인건비 및 재료비 정보 • 시스템 고장률 및 시스템 MTTR 정보	
	Diagram	• 총 수명주기동안의 각 연차별 PM 비용, CM 비용 및 누적 유지보수비용에 대한 Diagram	

예방보전비용은 인건비와 재료비로 구성되며, 전체 수명주기동안의 예방보전 시행 횟수를 고려하여 그에 따른 각각의 비용을 아래의 식을 적용하여 산출하였다.

- 인건비$_{PM}=\sum\left[\frac{(PM\ 시행횟수)\times(PM\ Man-hour)}{(총\ 수명주기)}\right]\times(Man-hour\ 단가)$

  ※ $(PM\ Man-hour)=(총\ 아이템\ 수량)\times(Man-hour)$

- 재료비$_{PM}=\sum\left[\frac{(PM\ 시행횟수)\times(PM\ Material\ Cost)}{(총\ 수명주기)}\right]$

  ※ $(PM\ Material\ Cost)=(총\ 아이템\ 수량)\times(PM에\ 사용되는\ Material\ 수량)\times(Material\ 단가)$

- [예방보전비용] = 인건비$_{PM}$ + 재료비$_{PM}$

사후보전비용도 예방보전과 동일하게 인건비와 재료비로 구성되며, 각 아이템의 고장율 및 연간운행시간 등을 고려하여 전체 수명주기동안의 각 아이템의 사후보전비용을 아래의 식을 적용하여 산출하였다.

- 인건비$_{CM}=\sum[(CM\ Man-hour)\times(Failure\ Rate)\times(평균\ 연간운행시간)]\times(Man-hour\ 단가)$

- 재료비$_{CM}=\sum[(CM\ Material\ Cost)\times(Failure\ Rate)\times(평균\ 연간운행시간)]$

  ※ $(CM\ Material\ Cost)=(CM에\ 사용되는\ Material\ 수량)\times(Material\ 단가)$

- [사후보전비용] = 인건비$_{CM}$ + 재료비$_{CM}$

인건비 단가는 산업공장 기준의 중급기술자에 대한 엔지니어링 노임단가를 기준으로 시간당 인건비를 산출하여 적용하였으며, 평균 연간운행시간은 하루 20시간 운행을 기준으로 연간 평균 7,300시간을 운행한다고 가정하였고, 총 수명주기는 30년으로 선정하여 유지보수비용의 관점에서 LCC 분석을 수행하였다.

ESS에 대한 LCC 분석 결과, 연간 예방보전비용과 사후보전비용은 각각 31,863,144원과 14,014,006원으로 산출되어 연간 유지보수비용이 45,877,150원으로 분석되었다. 예방보전비용에 대한 분석 결과를 살펴보면 인건비 부분에서 BAT RACK의 BAT Tray가 전체의 10.70%로 가장 높게 나타났으며 Cell Inverter의 Film Capacitor와 BAT RACK의 RACK BMS가 그 뒤를 이었다. 사후보전비용에 대한 분석 결과를 살펴보면 인건비 부분에서 BAT Tray가 전체의 72.81%로서 가장 높게 나타났고 Cell Inverter의 Gate Driver와 Control Board가 그 뒤를 이었다. 또한 사후보전비용의 재료비 부분에서는 BAT RACK의 BAT Tray가 전체의 81.59%로 가장 높게 나타났고 GIS와 BCP의 SMPS가 그 뒤를 이었다.

표 74. ESS에 대한 LCC 분석 결과 요약

구분	분석 결과	
평균 유지보수비용(Average Maintenance Costs)	45,877,150	KRW/year
예방보전비용(Preventive Maintenance Costs)	31,863,144	KRW/year

구분		분석 결과	
	인건비(Labour Costs)	31,863,144	KRW/year
	재료비(Material Costs)	0	KRW/year
사후보전비용(Corrective Maintenance Costs)		**14,014,006**	**KRW/year**
	인건비(Labour Costs)	97,033	KRW/year
	재료비(Material Costs)	13,916,972	KRW/year

APF에 대한 LCC 분석 결과, 연간 예방보전비용과 사후보전비용은 각각 36,738,411원과 2,516,350원으로 산출되어 연간 유지보수비용이 39,254,761원으로 분석되었다. 예방보전비용에 대한 분석 결과를 살펴보면 인건비 부분에서 Inverter IGBT Module의 IGBT Module과 Gate Driver가 전체의 5.47%로 동일한 비율로 가장 높게 나타났으며 Aux Relay와 Pilot Lamp가 그 뒤를 이었다. 사후보전비용에 대한 분석 결과를 살펴보면 인건비 부분에서 Inverter IGBT Module의 Gate Driver가 전체의 23.98%로서 가장 높게 나타났고 Harmonic Multimeter와 Heat Exchanger가 그 뒤를 이었다. 또한 사후보전비용의 재료비 부분에서는 Control Board가 전체의 40.84%로 가장 높게 나타났고 Harmonic Multimeter와 Inverter IGBT Module의 Gate Driver가 그 뒤를 이었다.

표 75. APF에 대한 LCC 분석 결과 요약

구분		분석 결과	
평균 유지보수비용(Average Maintenance Costs)		**39,254,761**	**KRW/year**
예방보전비용(Preventive Maintenance Costs)		**36,738,411**	**KRW/year**
	인건비(Labour Costs)	36,738,411	KRW/year
	재료비(Material Costs)	0	KRW/year
사후보전비용(Corrective Maintenance Costs)		**2,516,350**	**KRW/year**
	인건비(Labour Costs)	47,422	KRW/year
	재료비(Material Costs)	2,468,928	KRW/year

6. SW 설계산출물 적합성 검토

가. S/W 설계 산출물 검토

고속철도 피크전력저감 및 능동형 고조파필터 개발과 관련하여 교류용 에너지 저장시스템과 고조파 저감 능동형 필터의 소프트웨어 개발을 수행하는데, 소프트웨어 생명주기 중, 요건단계 및 설계단계에서 산출된 문서의 검증을 위하여 문서 유형별 해당 IEEE Std. 기술표준에서 요구하는 사항들을 기준으로 적용하여 검토를 수행하였다.

(1) 소프트웨어 요구사항 명세서 검토

(가) 검토 개요

소프트웨어 요구사항 명세서는 소프트웨어에 대한 기능, 인터페이스, 품질, 안전, 보안, 사용자 인터페이스, 데이터 정의, 사용자 문서, 설치 및 승인, 운전, 유지보수성 등에 대해 기술하는 문서이다. 소프트웨어 요구사항 명세서의 검토는 소프트웨어 요구사항 명세서(SRS)의 기능과 성능 요구사항, 인터페이스 등에 대하여 정확성, 일관성, 완전성 측면에서 적합하게 기술되었는지의 관점에서 검토하였다.

(나) 검토 의견

제1장에는 과제개요에 대하여 목적과 범위, 용어, 참고문서 및 문서개요가 기술되어 있음을 확인하였다.

제 2장에서는 설계할 소프트웨어의 개략적인 기능과 구조, 연계사항, 제약사항 등에 대해서 기술하고 있음을 확인하였다.

2.1.3절에 사용자 인터페이스에 대해 기술하고 있음을 확인하였다.

2.1.4절에는 하드웨어 인터페이스에 대해 기술하고 있음을 확인하였다.

2.1.5절에는 소프트웨어 인터페이스에 대해 기술하고 있음을 확인하였다

2.4절에 제약조건에 대해 기술하고 있음을 확인하였다.

2.5절의 가정과 의존성에 대해 기술하고 있음을 확인하였다.

문서 제 3장에는 상세 요구사항을 인터페이스 요구사항, 기능요구사항으로 구분하여 기술하고 있음을 확인하였다. 3.1절에서 인터페이스 요구사항을 System. 인터페이스, 사용자 인터페이스, H/W 인터페이스, S/W 인터페이스, 통신 인터페이스로 구분하여 기술하고 있음을 확인하였다.

3.2절에 기능 요구사항을 상세히 기술하고 있음을 확인하였다. 3.4절에 성능 요구사항에 대해 기술하고 있는데 요구되는 성능에 대하여 수치적 표현으로 명확하게 기술할 것을 권고한다.

3.6절에는 설계 제약사항에 대해 기술하고 있음을 확인하였다.

3.12절에서는 소프트웨어의 특성에 대해 기술하고 있음을 확인하였다.

(2) 소프트웨어 설계 명세서 검토

(가) 검토 개요

소프트웨어 설계 명세서는 데이터베이스 설계와 인터페이스에 대한 설계를 포함하여 소프트웨어에 대한 요구사항을 구조화하여 상세설계로 변환한 문서이다. 소프트웨어 설계 명세서의 검토는 소프트웨어 요구사항 명세서(SRS)에 기술된 요구사항이 올바르고, 정확하며, 완벽하게 소프트웨어 기능 명세로 변환되었는지 확인하고, 의도하지 않은 어떤 특성도 반영되지 않았는지 확인하였다. 상위 문서에 대한 추적성 확인 측면에서는 정확성, 일관성, 완전성을 검토하고, 설계에 대한 확인 측면에서는 정확성, 일관성, 완전성, 정확도, 가독성, 시험가능성에 대하여 검

토하고, 인터페이스에 대한 확인 측면에서는 정확도, 일관성, 완전성, 정확도, 시험가능성에 대하여 검토를 수행하였다.

(나) 검토 의견

제3장에는 소프트웨어의 구성을 모듈로 구분하여 기술하고 구성에 대해 설명하고 있음을 확인하였다.

제4장에는 종속성(Dependency Description)에 대해 DFD(Data Flow Diagram)과 표를 이용하여 외부 프로세스 의존성과 내부 프로세스 의존성에 대해 입력 및 출력 데이터를 이용하여 상세하게 기술하고 있음을 확인하였다.

제5장에는 인터페이스(Interface Description)에 하드웨어 인터페이스와 사용자 인터페이스에 대해 상세하게 기술하고 있음을 확인하였다.

제6장에는 상세 설계(Detailed Description) 사항에 대해 기술하고 있음을 확인하였다. 그러나 함수에 대한 개략 설명만 되어 있고, 주요 로직에 대한 기술이 부족하므로 추가하여 기술할 것을 권고한다.

명세서 전반에 걸쳐 소프트웨어의 신뢰성 및 강인성에 관련된 설계 내용이 추가되어야 할 것으로 판단된다. 신뢰성을 향상시키기 위해서는 고장으로부터 복귀하기 위한 내용, 온라인 시험과 진단에 대한 설계 내용이 추가되어야 하고, 강인성을 위해서는 오류나 비정상 상황에 대한 대처 방안이 설계에 추가되어야 할 것으로 판단된다.

명세서 전반에 걸쳐 타이밍에 대한 설계 내용이 추가되어야 할 것으로 판단된다. 특정한 타이밍 제약조건 내에서 동작해야 할 기능이 확인되고 각 기능에 대한 타이밍 기준이 지정되어야 한다.

나. 결론

교류용 에너지 저장 시스템 및 고조파 저감 필터 소프트웨어 개발과 관련하여 소프트웨어 생명주기 중, 요건 단계 와 설계 단계의 산출물에 대한 문서 검토를 수행한 결과, 작성된 산출물이 기술표준에 의하여 작성되었으며, 기능요구사항이 적절하게 식별되어 상세 설계 사항을 제공하고 있고, 식별된 기능이 유일한 식별자를 가지고 설계되었음을 확인하였다. 그러나 소프트웨어 강건성과 타이밍에 대한 설계 사항이 없으며, 비정상 상황이나 오류 상황에 대한 요건, 설계, 시험이 부족한 점등은 보완해야 할 것으로 할 것으로 판단된다.

소프트웨어 요구사항 명세서 및 소프트웨어 설계 명세서가 적절하게 작성된 것으로 확인되는 바, 소프트웨어 생명주기의 다음 단계 업무로의 공정 진행이 생성된 계획 문서에 근거하여 기술표준에 부합되게 진행될 수 있을 것으로 평가한다.

제6절 고속철도 변전소 실증단지 환경검토

1. 전력품질 분석

가. 변전소 전력품질 분석

① 목표 및 내용

㉮ 목표

고속선 전철변전소 전력품질 측정을 통한 변전소별 수요전력 및 고조파 성분을 분석하여 에너지저장 시스템 및 능동형 고조파 필터 개발 및 최적의 시스템 실증 단지선정

㉯ 측정 대상 구간

측정대상 구간은 경부고속선 전철변전소 9개소 중 7개 개소를 대상으로 하였다. 그 이유는 기존선 및 호남선은 고속열차 운행 횟수가 적어 최대수요전력이 낮은 관계로 측정개소 선정에서 제외하였으며, 고양기지변전소, 가야변전소는 차량기지 및 일부 운행선에 부하를 공급하는 변전소로서 최대수요전력이 일정하여 피크(Peak) 저감에 불리하기 때문이다.

표 21. 경부고속선 전력품질 측정 대상 개소

구 분	측정 변전소	비 고
경부고속선 1단계 구간	안산변전소, 평택변전소, 신청주변전소 옥천변전소, 김천변전소	5개소
경부고속선 2단계 구간	대구변전소, 울산변전소	2개소

② 경부 고속선 전철변전소 전력품질 측정

㉮ 전력품질 측정 개요

1. 측정 개요

경부고속선 전철변전소의 수요전력 및 고조파 분석을 위해 각 전철변전소의 수전측(154kV)와 급전측(55kV)의 전력품질을 측정하였다. 일일 수요전력을 비교하기 위해 24시간 주기로 데이터를 취득하였으며, 측정항목으로는 전압, 전류, 유효전력, 무효전력, 전압왜형률, 고조파등을 측정하여 전압변동률, 15분 수요전력, 차수별 고조파 전압/전류를 확인하고자 하였다.

2. 측정 포인트

측정 포인트는 변전소 수전계통의 R상, S상 그리고 T상 및 급전계통의 피더1, 피더2, 피더3, 피더4에 계측기를 설치하여 측정하였다.

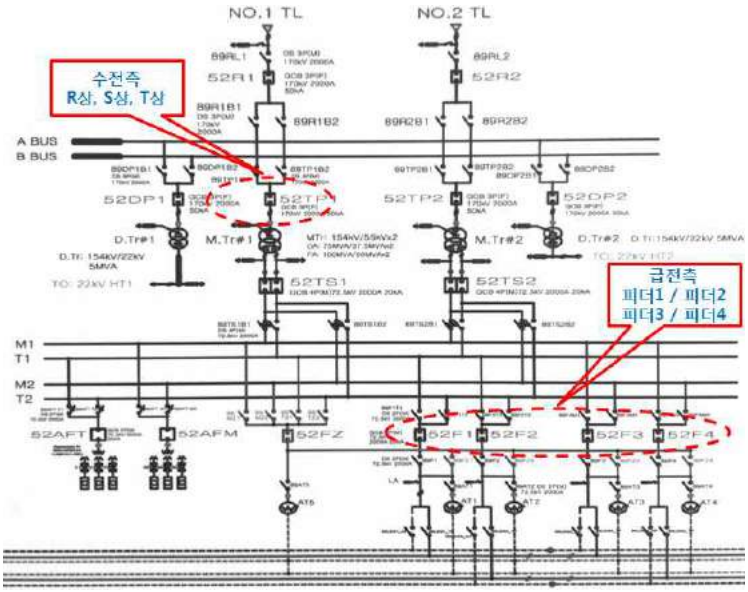


그림 74. 변전소 전력품질 측정 포인트

3. 측정 결과

에너지저장 시스템을 이용한 전철변전소 피크전력 저감 기술 개발과 능동형 고조파 필터 개발 및 실증단지 선정을 위하여 경부고속선의 7개소의 전철변전소를 대상을 전력품질을 측정하였다. 전철변전소 전력품질 측정은 KS C IEC 60850(철도용 견인시스템의 공급전압)에 준수하여 교류 전압의 실효치를 기준으로 전력품질을 분석하였다. 7개 개소의 변전소의 수전 측 상전압은 90,616[V]~94149[V]로 선간전압으로 계산하였을 시 156,951[V]~163,070[V]로 공칭전압인 154,000[V]보다 높게 측정되었다. 이는 한전에서 공급하는 154[kV] 전압이 높기 때문이다. 전압변동률은 2.0~4.9[%]의 범위에서 유지되고 있으며, 종합 전압왜형률은 김천변전소에서 한전 기본공급약관시행세칙인 1.5[%]를 1[%]정도 초과하였고 나머지 6개 변전소는 기준치에 보다 낮은 종합 전압왜형률을 보였다.

수요전력은 전력품질 측정값에서는 평택변전소에서 20,079[kW] 가장 낮은 수요전력을 보였고 신청주변전소가 30,499[kW]롤 가장 높은 수요전력을 보였다. 하지만 평택변전소가 측정값이 낮게 나온 것은 측정 당일의 열차부하가 적어 최대 피크전력이 낮게 측정된 것으로 판단되며 1단계구간보다는 2단계 구간인 대구와 울산변전소가 일반적으로 낮은 수요전력을 보였다.

표 26. 경부고속선 전철변전소 수전측 측정 결과

구 분	수전전압[V]			전압변동률[%]			전압왜형률[%]			수요전력[kW]	
	R상	S상	T상	R상	S상	T상	R상	S상	T상	측정	iSMART
안산 변전소	90,994	91,837	91,660	3.0	2.7	2.5	0.8	0.7	0.9	28,100	26,746
평택 변전소	93,018	92,740	92,040	3.0	3.4	2.8	0.7	0.9	0.9	20,046	22,042
신청주 변전소	91,364	92,342	92,160	4.6	4.0	3.6	1.1	1.2	1.0	30,499	28,762
옥천 변전소	92,690	93,588	93,292	4.9	3.0	4.0	1.4	1.1	1.2	29,056	25,402
김천 변전소	90,616	91,665	91,780	4.1	3.4	3.5	1.7	1.6	1.6	29,066	28,862
대구 변전소	91648	92892	93071	3.2	3.0	3.2	1	0.9	0.9	21,584	-
울산 변전소	93,331	94,149	93,658	2.7	2.8	2.0	0.7	0.7	0.7	26,077	23,565

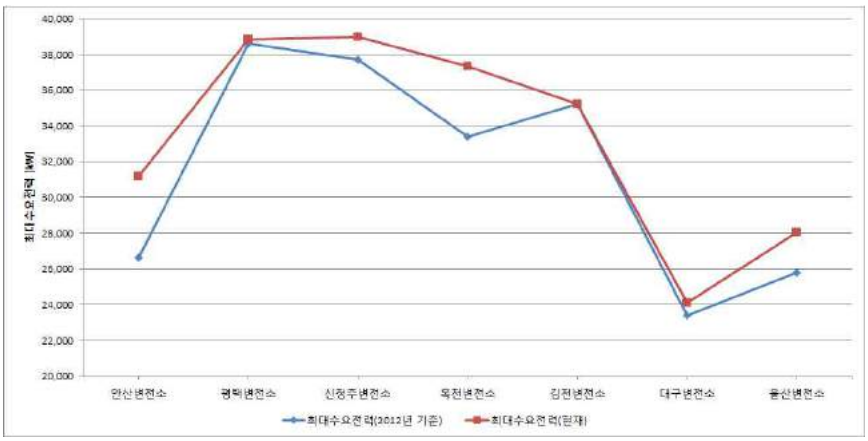


그림 75. 경부고속선 전철변전소 최대수요전력

7개소의 전철변전소 급전 측 공급전압은 52,907(26,453)[V]~54,709(27,354)[V]로 KS C IEC 60850의 전차선로 공급전압 기준에 충족되는 것으로 측정되었다. 전압변동률은 김천변전소, 대구변전소를 제외한 나머지 변전소에서 10[%] 이상의 변동률을 보였지만 공급전압 기준인 최고전압과 최저전압을 범위를 벗어나지는 않았다.

종합 전압왜형률은 24시간 평균값으로 계산하였을 때 평택변전소, 대구변전소, 울산변전소는 한전 기본공급약관시행세칙인 3[%]에 기준에 만족하였으나, 나머지 변전소에는 기준을 초과하였다. 종합 전압왜형률은 대구변전소가 가장 낮은 측정값을 보였으며, 옥천변전소가 가장 높은 측정값을 보였다.

표 27. 경부고속선 전철변전소 급전측 측정 결과

구 분	급전전압[V]				전압변동률[%]				전압왜형률[%]			
	피 더 1	피 더 2	피 더 3	피 더 4	피더1	피더2	피더3	피더4	피더1	피더2	피더3	피더4
안산 변전소	53,107	53,132	52,907	52,923	12.4	12.4	9.0	9.0	3.9	3.9	2.8	2.9
평택 변전소	53,873	53,902	53,580	53,595	7.5	7.5	14.0	14.0	2.5	2.5	2.8	2.8
신청주 변전소	53,644	53,672	53,473	53,484	10.8	10.8	11.0	10.8	3.5	3.5	3.0	3.0
옥천 변전소	54,082	54,106	54,629	54,642	13.8	13.7	9.4	9.4	5.7	5.7	3.0	3.1
김천 변전소	53,539	53,563	53,326	53,332	8.8	8.8	8.5	8.5	3.3	3.3	3.6	3.6
대구 변전소	53,971	54,142	54,199	54,206	7.8	7.8	5.6	5.6	3.0	3.0	1.9	1.9
울산 변전소	54,709	54,723	54,480	54,489	11.2	11.2	10.1	10.1	3.0	3.0	3.0	3.0

※ 급전전압 : 전차선(TF)과 급전선(AF) 사이의 전압

나. 고속열차 전력품질 분석

(1) 경부고속선 울산변전소 급전구간 고속열차 전력품질 분석

경부고속선 2단계 구간 울산변전소 급전계통은 아래 그림과 같다. 울산변전소를 기준으로 서울 방면에 당리구분소가 부산방면으로 보은구분소가 위치해 있으며 당리구분소로 T상 전원, 보은구분소로 M상 전원을 공급하고 있다. 당리구분소-울산변전소 구간에는 신경주역이 있으며, 울산변전소-보은구분소 구간에는 울산역이 있다.

그림 76. 울산변전소 급전계통

에너지저장장치(ESS : Energy Storage System)가 설치될 실증단지로 현재 울산변전소가 가장 유력하여 고속열차가 울산변전소 급전구간을 운행할 때의 집전전압, 부하전류, 속도별 소비전력을 분석하였다.

서울역을 출발하여 부산역이 종착역인 121열차(하행)는 울산변전소 급전구간에 있는 신경주역과 울산역 두 곳을 모두 정차하였으며, 부산역을 출발하여 서울역이 종착역인 136열차(상행)는 울산역은 통과하고 신경주역에만 정차하였다.

① 울산변전소 급전구간 내 고속열차 집전전압 및 부하전류

표 28. 울산변전소 급전구간 고속열차 집전전압 및 부하전류

구 분			최대값	최소값	평균값	비 고
집전 전압	하행	당리SP-울산SS	27,541[V]	25,079[V]	26,576[V]	절연구간 제외
		울산SS-보은SP	27,623[V]	23,895[V]	26,418[V]	절연구간 제외
	상행	보은SP-울산SS	26,591[V]	24,727[V]	25,604[V]	절연구간 제외
		울산SS-당리SP	26,478[V]	23,682[V]	25,169[V]	절연구간 제외
부하 전류	하행	당리SP-울산SS	325[A]	-	174[A]	PC1만 계측
		울산SS-보은SP	340[A]	-	168[A]	PC1만 계측
	상행	보은SP-울산SS	320[A]	-	221[A]	PC1만 계측
		울산SS-당리SP	345[A]	-	191[A]	PC1만 계측

② 울산변전소 급전구간 내 고속열차 속도 및 소비전력

표 29. 고속열차 울산변전소 급전구간 운행속도

구 간		최 대	최 소	평 균	비 고
하행	당리SP-울산SS	270[km/h]	0[km/h]	133[km/h]	신경주역 정차
	울산SS-보은SP	264[km/h]	0[km/h]	124[km/h]	울산역 정차
상행	보은SP-울산SS	284[km/h]	163[km/h]	205[km/h]	울산역 무정차
	울산SS-당리SP	286[km/h]	0[km/h]	129[km/h]	신경주역 정차

표 30. 고속열차 울산변전소 급전구간 소비전력

구 간		최 대	최 소	평 균	비 고
하행	당리SP-울산SS	7,967[kW]	-5,150[kW]	1,783[kW]	PC1만 계측
	울산SS-보은SP	7,990[kW]	-5,244[kW]	1,526[kW]	PC1만 계측
상행	보은SP-울산SS	7,752[kW]	-4,408[kW]	4,853[kW]	PC1만 계측
	울산SS-당리SP	7,757[kW]	-5,031[kW]	2,343[kW]	PC1만 계측

2. 실증단지 선정

고속철도 1단계 구간 변전소 3개변전소와 2단계 구간 3개변전소에 대하여 변전소의 입지적인 요건, 진입도로의 여건, 피크전력의 크기, 지반 여건 등을 고려하여 선정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

표 32. 변전소별 특성 및 설치여건 비교

	평택	신청주	옥천	대구	울산	부산
Peak 전력	39.262 MW	37.736 MW	33.394 MW	33.062 MW	28.314 MW	32.032 MW
ESS PCS 용량	8 MW급	8 MW급	7 MW급	7 MW급	6 MW급	7 MW급
ESS Bat. 용량	6.5 MWh급	6.5 MWh급	5.5 MWh급	5.5 MWh급	4 MWh급	5.5 MWh급
실내 / 실외 설치 여부	실외	실외	실외	실내/실외	실내/실외	실내/실외
부지 크기	좁다	넓다	넓다	옥상 (20*50)	가장 넓다	옥상 (20*50)
ESS 설치 효과	가장 크다	아주 크다	아주 크다	가장 적다	크다	크다
기존 APF와 비교 여부	가능	가능	가능	불가능	불가능	불가능
장비 반입 수월성	수월	수월	어려움	어려움	수월	수월
인가 여부	도심	인가	X	도심	인가	도심
상주 직원 여부	상주	상주	상주	비상주	상주	상주
신규노선 추가 가능 여부	O	X	X	X	X	X
추가 건물 공사 여부	O	O	O	△ (실외설치시)	△ (실외설치시)	△ (실외설치시)
일반선 병행 여부	O	X	X	O	X	O
지반 여건	지반 약함	양호	양호	양호	양호	양호
설치 순위	3	2	6	4	1	5

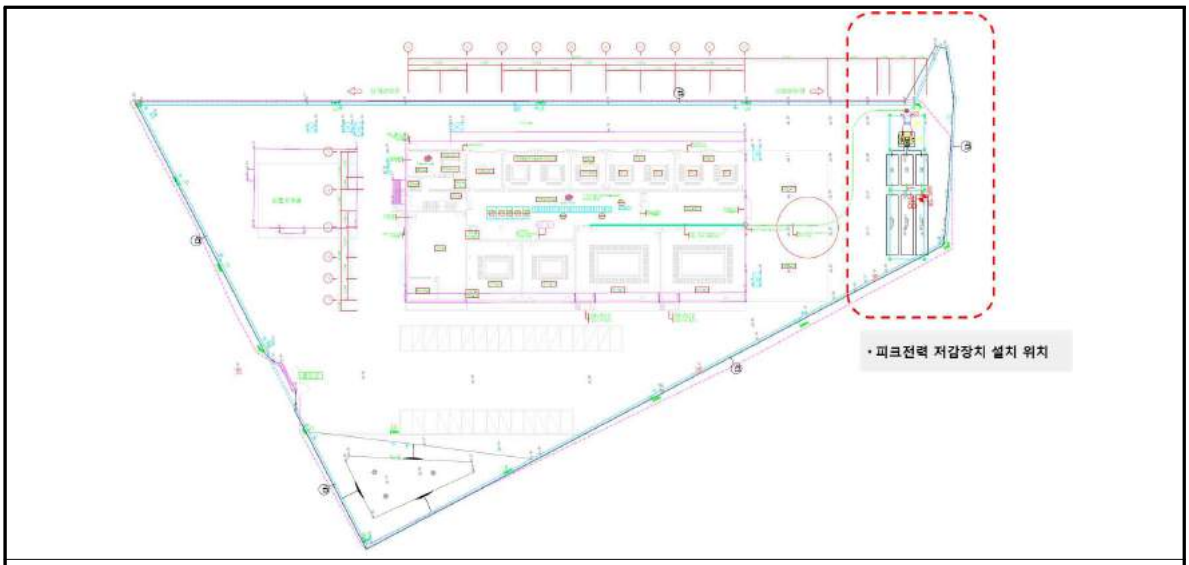
제7절. 실증단지 구축 및 시스템 사용전 검사

1. 피크전력 저감장치 개발

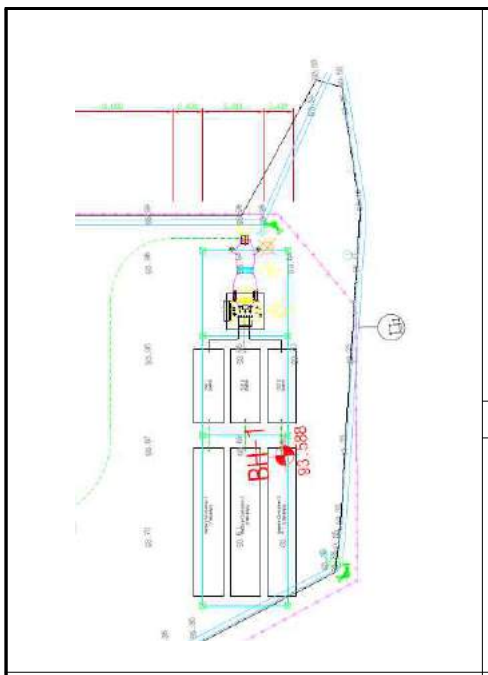
가. 실증단지 구축

(1) 실증단지 지반 검토사항

- 울산변전소 실증단지의 지반에 대한 지질분석보고서를 확보하여 검토 수행, 그 결과 지반 침하량에 규정치(25mm) 이하임을 확인
- 장치 설치위치 및 배치도



장치 설치위치



배치도

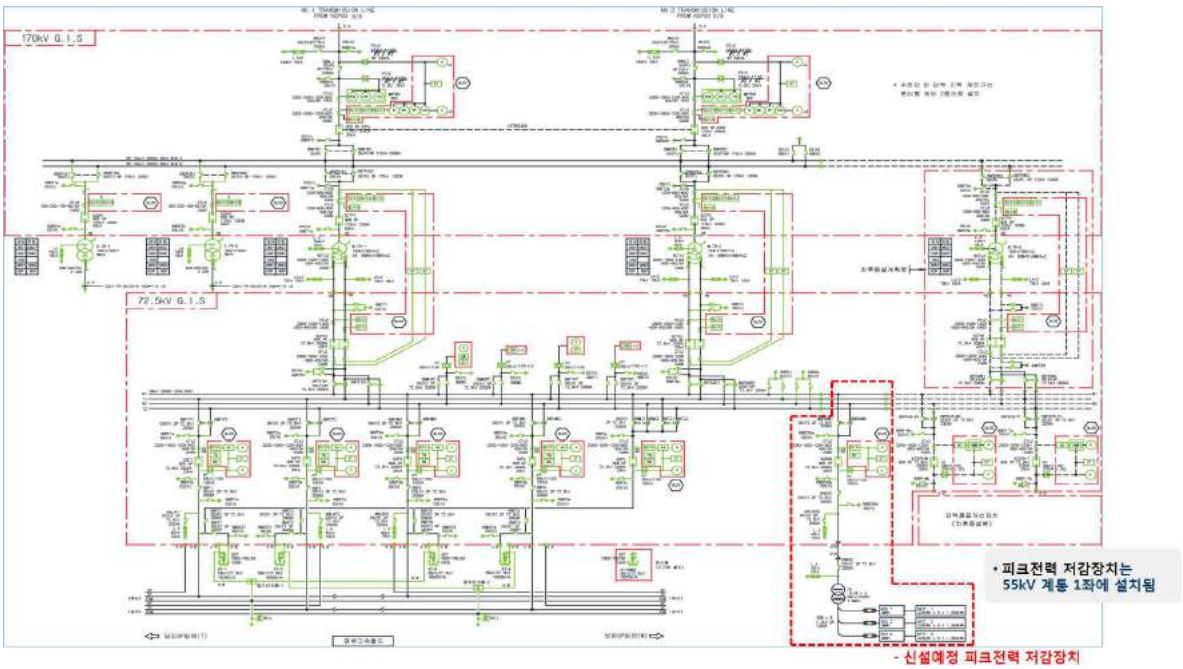
설치장소 (울산변전소)

시추작업 및 결과물

(2) 실증단지 기초 공사

실증단지 부지	부지정리
기초공사	건축물 철골작업

(3) 실증단지 단선결선도



(4) 시스템 구성품 및 설치

- GIS 설비 : 1 Bay
- 보호설비 : 피뢰기 및 단로기
- 변압기 : 7.5MVA(55kV : 3100V) 1대
- PCS : 2MW 멀티레벨 인버터 3대
- BATTERY : 4MWh BATTERY - 40ft Container 3대

변압기	PCS
4,092kWh 리튬이온 배터리 및 40피트 컨테이너 3대	
GIS 설비 설치	

변압기 설치사진

가공지선 설치

PCS 설치사진

배터리 설치사진

피크전력 저감장치 설치 전경

나. 피크전력 저감장치 인증시험 및 사용 전 검사

1) 공인인증기관 인증시험(구성품 시험)

가) 주요 구성품의 개요

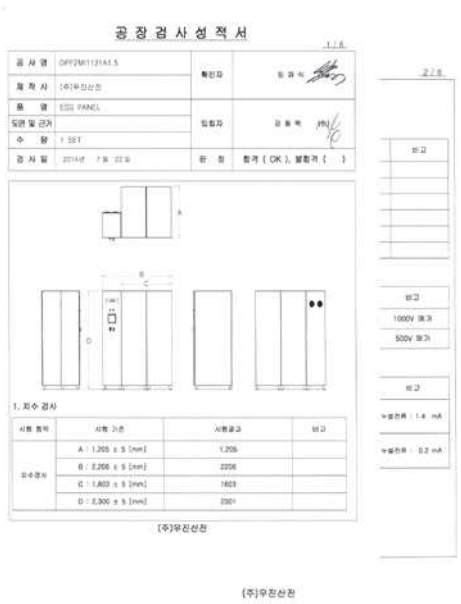
피크전력 저감시스템은 AC 입력측은 전차선과 급전선의 55[kV]에 연결되어 전력 사용 경부하 시간대에 충전하고, 전력 사용 피크 또는 최대(중)부하 시간대에 충전된 에너지를 공급하는 시스템으로 KTX 2단계 구간 울산변전소에 설치/운용된다. 주요 구성품으로는 AC 계통과 연결되어 차단기능을 수행하는 GIS 장치, AC 계통 회로와의 연결/분리기능을 수행하는 단로기, PCS의 운용전압(AC 3,100[V])으로 변압기능을 수행하는 변압기, 변압기 2차측에 연결되어 차단기능을 수행하는 VCB 장치, 에너지 충/방전 제어기능을 수행하는 PCS와 에너지를 충/방전하는 배터리로 구성되어 있으며, 각 구성품에 대한 기본 사양은 아래와 같다.

- GIS
  - 형식 : 옥내용 가스절연개폐장치 (SF_6 Gas Insulated Switchgear)
  - 정격 : 72.5[kV]/2,000[A]/20[kA]
- 단로기
  - 형식 : 전동 조작용 단로기
  - 정격 : 72.5[kV]/2,000[A]
- 변압기
  - 형식 : 옥외용 유입식 변압기
  - 정격 : 7.5[MVA] 단상 4권선, 55[kV]/3.1[kV]×3
- VCB
  - 형식 : 진공차단기 (Vacuum Circuit Breaker)
  - 정격 : 7.2[kV]/1,250[A]/20[kA]
- PCS
  - 형식 : 양방향 Multi-Level Inverter
  - 정격 : 6[MW] (2[MW]×3P)
- 배터리
  - 형식 : Li Battery
  - 정격 : 2[MW]/1.4[MWh]

나) 주요 구성품의 인증시험

○ PCS 장치

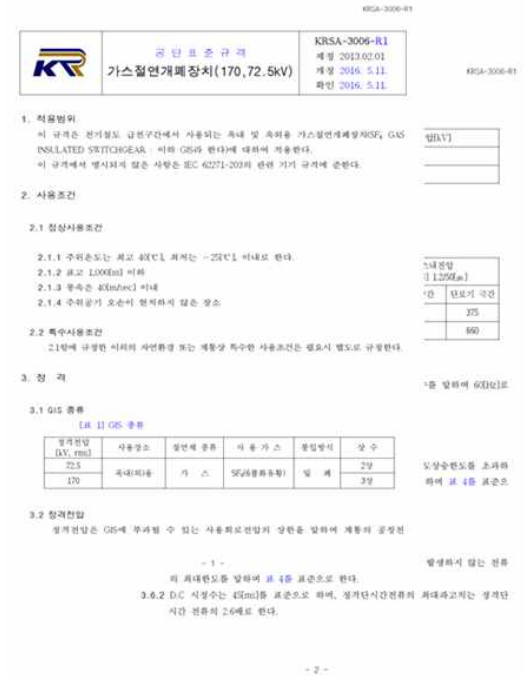
- PCS는 전력전자 변환기 및 시스템을 포함하는 제품에 해당하므로 IEC62477-1에 근거한 안전성요구사항을 만족시켜야 함
- 피크저감장치용 PCS의 안전성 및 신뢰성 확보를 위한 시험으로 SGSF-04-2012-07의 에너지저장 시스템용 전력변환장치의 성능요구사항에 의거하여 시험 수행



<공장검사>

<공인시험성적서>

○ GIS 장치



<시험규격서>

<공인시험성적서>

○ 단로기

시 험 성 적 서

품 관 : 제2015 - 1494호
일 자 : 2015 년 10 월 31 일
수 량 : - 1 - 조

ISO 9001:2008
송전기기,공제보험가입
경기도 용인시처인구편삼면
세 광 전 기
대 표 한 선
TEL : (0 3 1) 3 3 6 - 4 5 5 2

1. 제 품 명 : 동력단로기
2. 표조번호 : 72075
3. 정 격 : 72.5KV 2P 2000A
4. 조작방법 : 전동조작

시험검사 및 결과

NO.	시 험 항 목	시 험 검 사 기 준	결 과
1.	외관 및 구조검사	한국전기안전공사 검사필 고객명: 우리산전 날짜: 2016 년 1 월 이 계 원	양
2.	주 회로 저항	97 μΩ	양
3.	무부하개폐시험	10회 시험시 이상 없을것	양
4.	상용주파 내전압시험	주회로 : 140KV/1분 대지간, 상간 주회로 : 160KV/1분 동상간	양
5.	충격파 내전압시험	주회로 : 325KV 정, 부극성1.2/50μs 5회 대지간 ,상간	양
6.	도금시험	50㎛/㎠이상	양
비 고	IEC 62271-102 에준함		
종합판정	합 격	시 험 자	조 장 (인)

세 광 전 기

<공인시험성적서>

○ 변압기

시험결과통지서

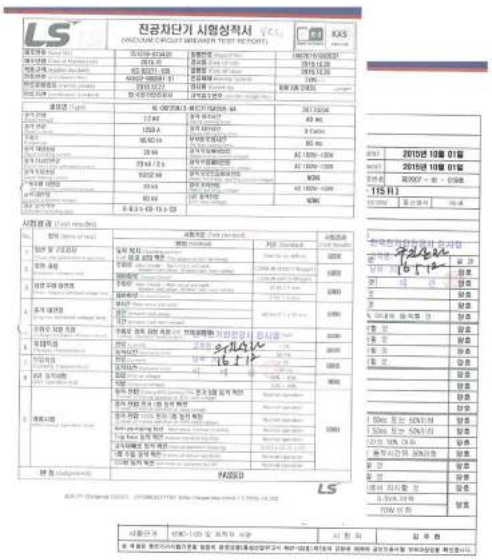
품 명	상 표 명	정격전압	수 량 (대)	종합판정
유입변압기	1 φ 7500 kVA	66000V / 3100V	1	합 격

한국전기안전공사 검사필

한양전기공업주식회사

<공인시험성적서>

○ VCB



진공차단기 시험성적서

(VACUUM CIRCUIT BREAKER TEST REPORT)

2015년 10월 01일

PASSED

<공인시험성적서>

○ 배터리

시험결과통지서

품 명	상 표 명	정격전압	수 량 (대)	종합판정
유입변압기	1 φ 7500 kVA	66000V / 3100V	1	합 격

한국전기안전공사 검사필

한양전기공업주식회사

<공인시험성적서>

2) 사용 전 검사

- 각종 발전설비, 송·변전·배전설비 및 가로등, 신호등, 보안등, 공장, 상가 등 대형건물의 설치공사 또는 변경공사를 완료하고, 그 전기설비가 공사계획의 인가 또는 신고를 한 내용 및 전기설비기술기준에 적합한 지의 여부에 대한 검사

- 법적근거 : 전기사업법 제63조, 제64조, 제98조 제②항 , 동법시행령 제62조 제③항, 동법 시행규칙 제31조, 제31조의2 및 별표 9
- 사용전 검사 확인증

KESCO

사용전검사확인증

발행번호 제 631050407 호 고객번호 : 3105-016710

신청인	대표자 성명	한국철도공사 사장	전화번호	☎ 054)613-8141
	회사명 또는 상호	한국철도공사 경주고속철도 전기사무소		
	주 소	울산 울주군 두서면 활천리 795-4		
검사결과	검사전기설비	수전설비 154,000V 7,500KW		
	검사연월일	2016년 06월 09일		
	검 사 자	소속 울산지사	성명	이재관 ㊞
	판 정	합격	다음검사	
임시사용	허용사유 :			
	사용기간 :			
	사용범위 및 사용방법 :			

기타 : 전체설비 수전설비 154,000V 190,000KW 발전설비 3,300V 4,902KW

「전기사업법」 제63조부터 제65조까지의 규정에 따라 검사를 하고 같은 법 시행규칙 제31조의2제3항 및 제34조제1항에 따라 위와 같이 검사확인증을 발급합니다.

2016 년 06 월 09 일

한국전기안전공사 사장

검사신청인 한국철도공사 사장

※ 이 확인증은 사무관리규정에 의하여 전자적인으로 발행되었습니다.

출력일시: 2017-06-13 10:55:13

2. 능동형 고조파필터 개발

가. 실증단지 구축

(1) 실증단지 지반 검토사항

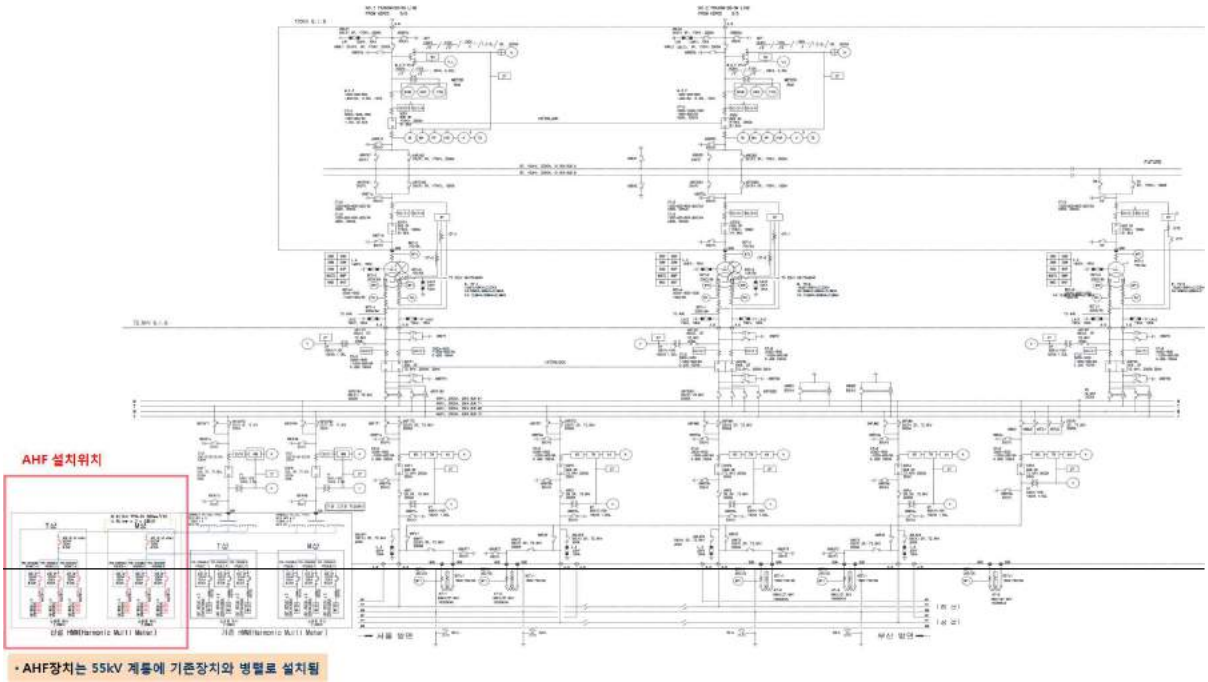
▹ 신청주변전소 실증단지의 지반에 대한 지질분석보고서를 확보하여 검토 수행, 그 결과 지반침하량에 규정치(25mm) 이하임을 확인

(2) 실증단지 기초 공사

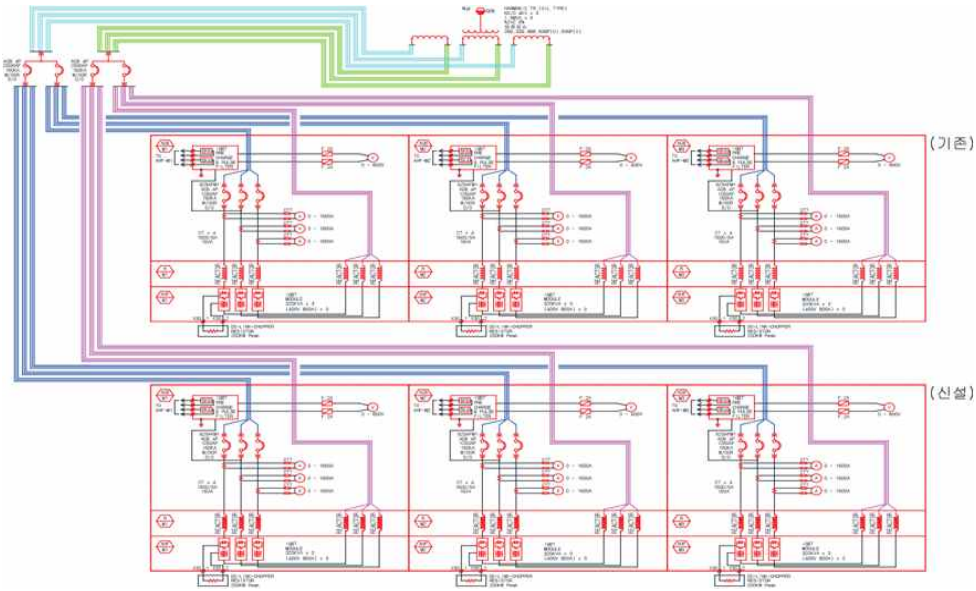
실증단지 부지	터파기
기초공사	
건축물 철골작업	건축물 외관작업

내외부 배선작업

(3) 실증단지 단선결선도



(4) 장치 계통도



- 계통도 (기존 설비와 병렬 설치) -

(5) 시스템 구성품 및 설치

능동형 고조파 필터 장치

(IGBT반, 리액터반, ACB반, PLC반, DP반, 저항기반, 수냉각 실외기반)

구성품 반출 및 반입

구성품 배치 작업

제8절 시스템 현장 시험 및 시스템 보완

1. 피크전력 저감장치

가. 외부 인터페이스 시험

외부 인터페이스 시험은 SCADA 인터페이스 시험과 PMS 통신 인터페이스 시험으로 진행하였다. SCADA 인터페이스 시험은 변전소에 추가된 PCS의 GIS 및 단로기와의 보호협조 체계 및 상태감시를 위한 시험이다. 또한 PMS 통신 인터페이스 시험은 PCS의 피크전력 운용에 필요한 변전소의 가선의 전력정보를 확인하기 위한 시험이다.

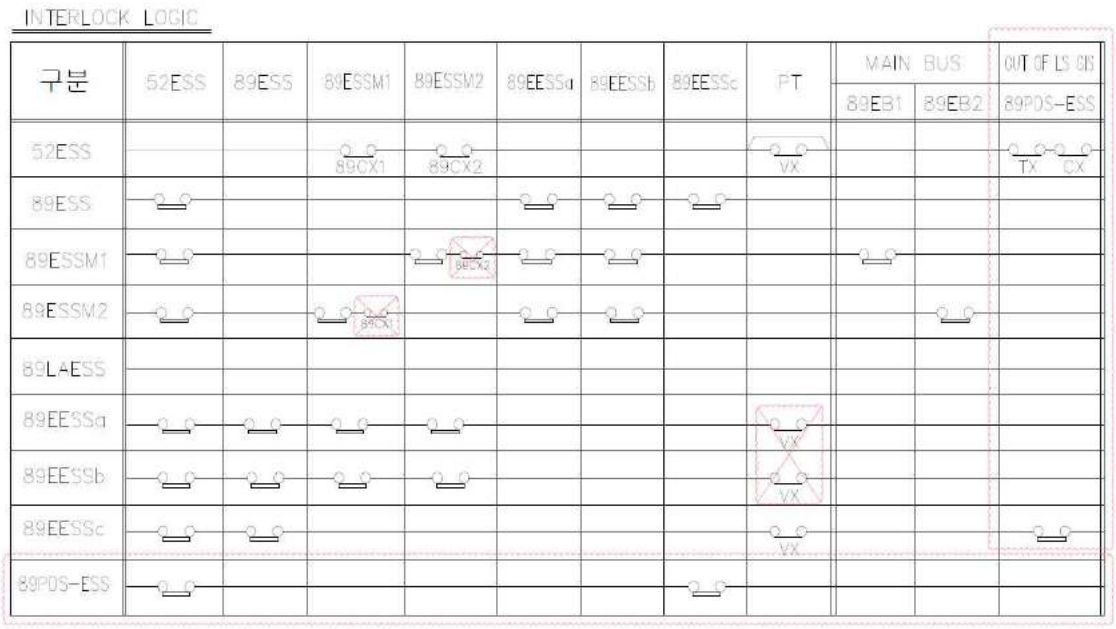
(1) SCADA 인터페이스 시험 : 연계 포인트(제어, 상태) 구성

① 종합연동시험 진행

- 각 기기별 제어 요소 및 상태 접점 확인 시험 : 야간 단전 시간 활용
- 각 기기를 직접 수동(자동) 동작 후, 관제 제어 및 표시 확인
- 변압기 인터페이스 확인 시험 : 8개 DI POINT 확인
- NPID 인터페이스 확인 시험 : 5개 DI POINT 확인
- GIS 인터페이스 확인 시험 : 19개 DI / 3개 DO POINT 확인
- PDS 인터페이스 확인 시험 : 5개 DI / 1개 DO POINT 확인
- VCB1,2,3 인터페이스 확인 시험 : 각 5개 DI / 1개 DO POINT 확인
- 해정/쇄정 확인 시험 : 4개 DI / 4개 DO POINT 확인
- 기기별 인터락 확인 시험 : 9개 요소

② 기기별 인터락 회로 구성 및 변경

- GIS / 접지계전기 / PT / 단로기 상호 간 인터락 회로 구성



< 기기별 인터락 회로 구성 변경 >

관제 감시/제어 포인트 동작 시험

관제 감시/제어 포인트 확인 시험 | 인터락 변경 회로 확인 시험

(2) BMS 통신 인터페이스 시험

- PCS→BMS 전송확인시험
- BMS 전송데이터 확인(System 정보)
- BMS 전송데이터 확인(Bank 정보)

PCS-BATTERY 통신 인터페이스 확인 시험

PCS-BATTERY 인터페이스 동작 시험

(3) PMS 통신 인터페이스 시험

PCS와 PMS간 통신 인터페이스 시험으로 PCS의 상태 정보 및 BMS정보를 PMS에 전송하고 또한 PMS의 지령에 대한 PCS의 응답을 확인하는 시험이다. PCS, PMS간 통신은 아래의 통신 프로토콜에서 보는 것과 같이 PMS와 MMI간 TCP/IP통신을 하고, MMI, PCS간 RS-485통신을 통하여 인터페이스 된다. PMS, MMI, PCS의 통신사양 및 프로토콜 내용은 하기와 같다. 인터페이스 시험은 프로토콜의 내용의 데이터가 정상적으로 동작 되는지 확인하는 시험이다.

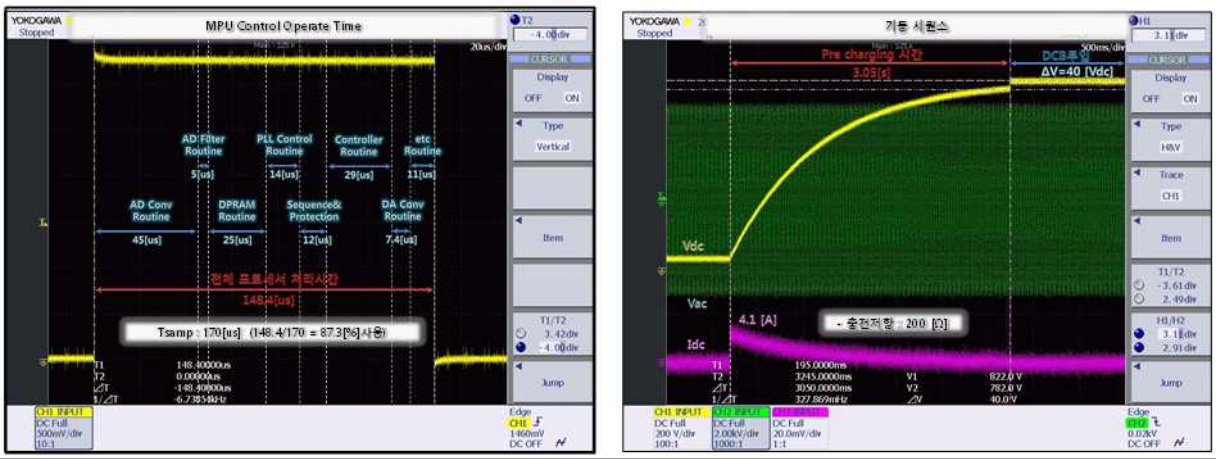
PCS-MMI-PMS 통신 인터페이스 시험

나. PCS 저압시험

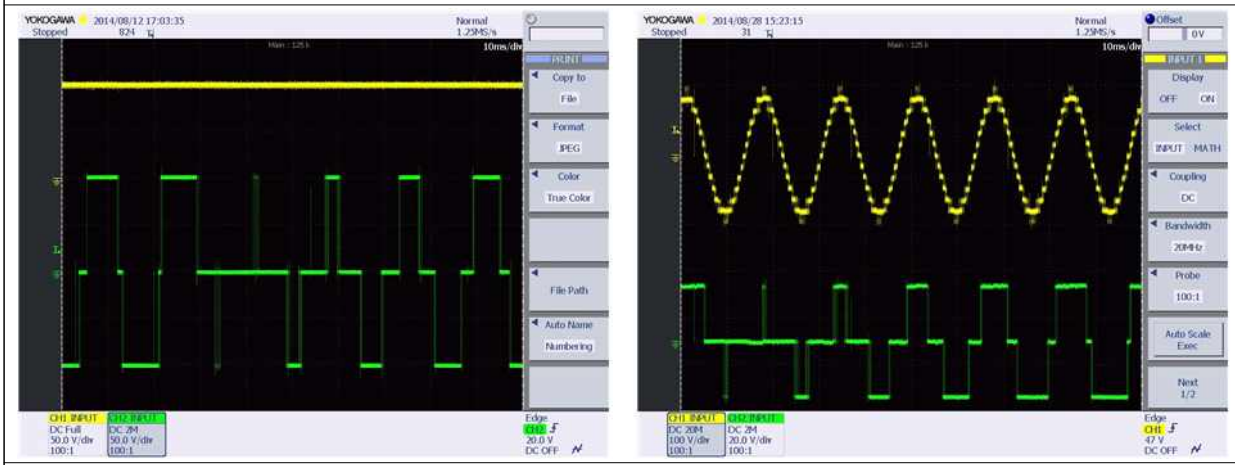
PCS의 성능 확인을 위한 시험으로 DC-link단에 저압(DC24V) 전원을 인가 후 제어기 동작을 확인한다. 저압시험은 하기와 같은 시험으로 진행 된다.

- PCS 제어기동작확인 시험 : 제어기 동작 타이밍 및 기동/보호동작 시퀀스
- PWM 출력 확인 시험 : Dead-time 및 PWM모드 변환 출력 확인
- 가선전압 위상동기검출 : 가선전압 센싱확인 및 PLL제어기 튜닝

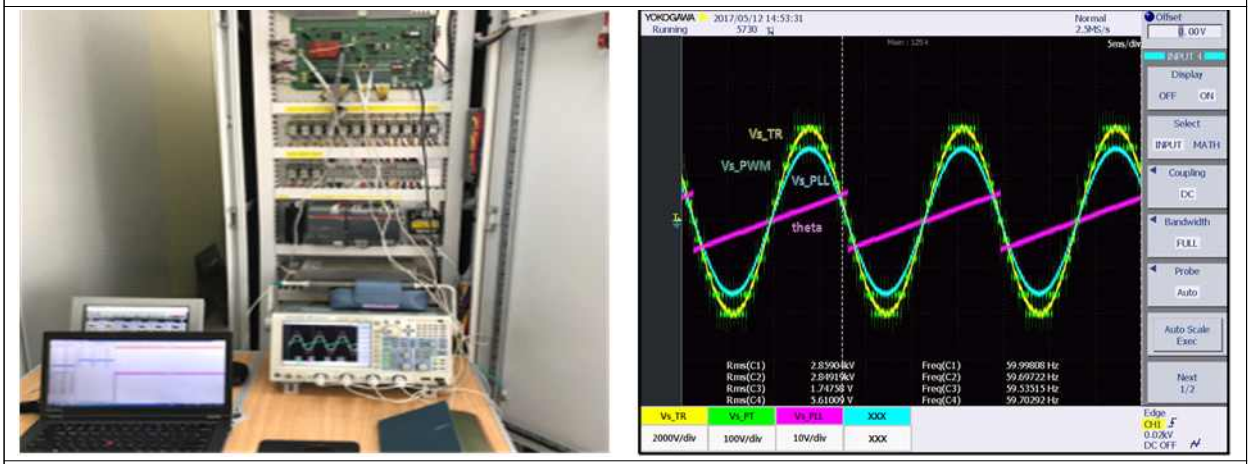
PCS 저압시험 사진



PCS 제어기동작시험 파형



PWM 출력 파형



가선전압 위상동기화 시험 파형

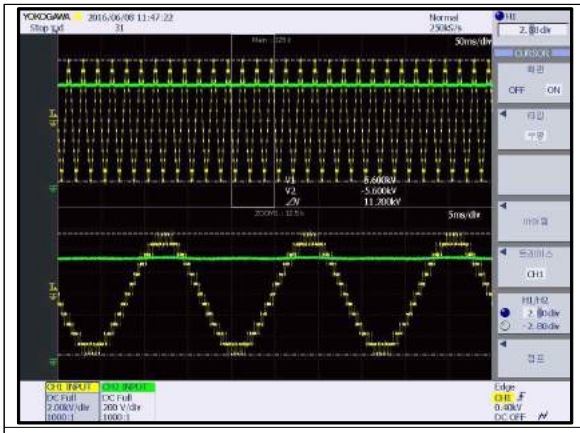
다. 배터리 연계시험

(1) 1차 배터리 연계 현장시험 (보완 전)

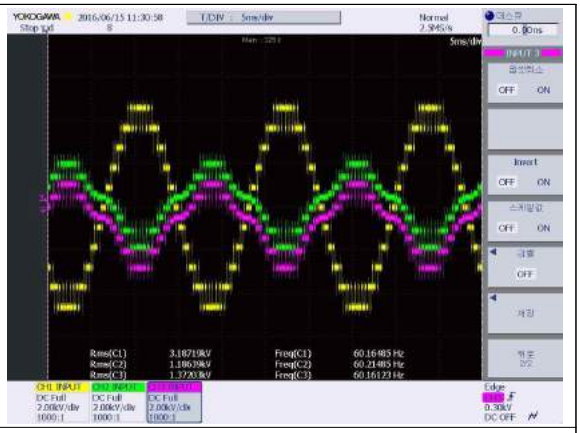
① PCS / Battery 주회로 연계시험

- 배터리 컨테이너 군별 연계 시험 진행
- AC측 open 상태에서 무부하 PCS 출력 파형 확인
- PCS AC출력이 정상적으로 3100Vrms가 출력됨을 확인

PCS - BATTERY CONTAINER 시험/시운전



PCS 출력확인 및 DC주회로 전압



PCS출력에 따른 DC단 접지대비 전위

< 시험결과 >

- BMS정보에 의한 정상 시퀀스 동작 확인
- PCS의 각 DC-link단 전압을 이용한 MMC 출력전압 확인
- 이슈사항

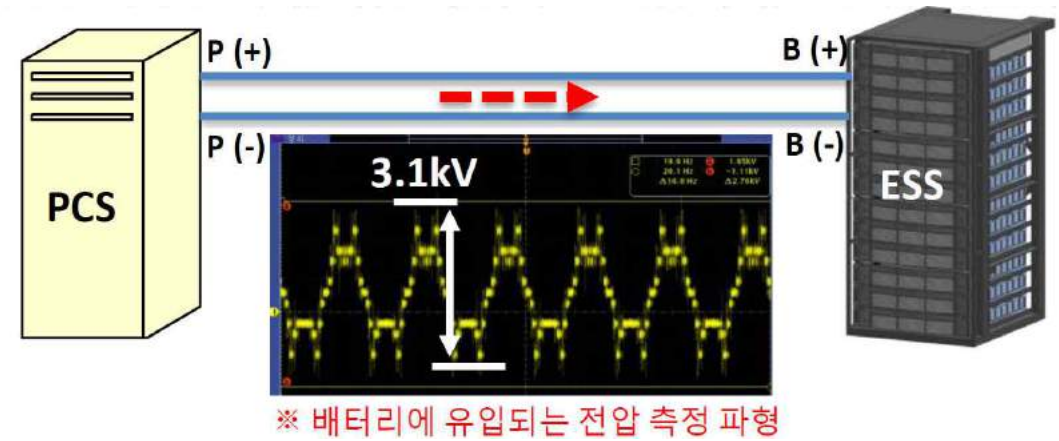
PCS 기동 시 배터리 컨테이너 내부통신(Rack BMS와 System BMS) 에러 발생

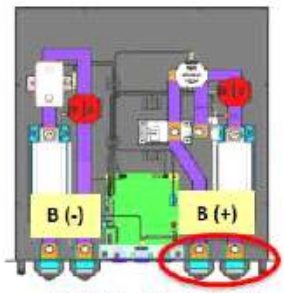
배터리 측 주 회로부와 배터리 프레임 사이에 유기전압 확인

② 배터리 컨테이너 #3 주회로 연계시험 중 장애발생

- 장애 내용 : 배터리 3번 컨테이너 Rack #23번 스위치 기어박스 아크 발생
- 장애 원인 : Rack #23번 스위치 기어박스의 대전류단과 프레임 사이 절연 처리가 되지 않아 기생 캐패시터 성분에 의한 유기전압 발생으로 추정
- 장애 조치 : 장애 발생 스위치 기어박스, 배터리 컨테이너 #3 구성품 전량 회수하여 원인분석 및 구성품 전량 소손 상황 확인 진행

- 장애 대책 : 배터리 각 뱅크별(배터리 트레이/스위치 기어박스) 절연 처리에 따른 시스템 건전성 확인 여부에 따른 시스템 보완





[Switch Gear 내부]

[Switch Gear B(+) 단자대]

Rack #23 (장애발생 스위치기어박스)

(2) 1차 배터리 연계 장애분석 및 시스템 보완

① 장애발생 원인 검증시험

본 시험은 PCS의 AC 출력전압(3100[Vrms]) 생성 시 배터리 내압에 대한 대책을 강구하기 위하여 진행하였다.

- 각 배터리 뱅크 단에서 발생되는 배터리 프레임 대비 정극, 부극간의 전위차를 낮추고자 함
- 기 설치된 배터리는 내압기준 1000V이하로 설비가 설계되어 있음
  (기 설비의 측정전위 : 약 ± 4000[V] / 목표값 : 최대 1000[V] 이하)
- PCS와 같이 배터리를 뱅크 단위로 절연처리 후 시험 진행
- 보완설계 방향의 타당성 검증을 위한 모의시험 : 배터리 트레이 단위 시험 / 렉 단위 시험 (공칭전압 : Tray 59.2[V] / Rack 947.2[V])

<배터리 트레이 단위 시험>

- 목 적

· 배터리 뱅크 별 절연처리에 대한 타당성 검증을 위한 모듈단위 시험

· 시험기간 : 2016. 08. 23 ~ 2016. 09. 23

(1차 : 2016. 08. 23 ~ 2016. 08.26 / 2차 : 2016. 09. 22 ~ 2016. 09. 23)

· 시험장소 : 울산 KTX 변전소 피크전력 저감장치 설치 동

- 시험방법

· 각 배터리 모듈을 지면과 절연판으로 분리

· 스위치 기어에 인가하는 BMS 제어전원은 절연 변압기를 통하여 공급

· 기존 상황을 모의시험 진행

(각 배터리 프레임을 도통시키고, 이를 접지(Grounding) 시킨다.)

· 보완 설계 방향에 맞추어 모의시험 진행 (각 배터리 프레임 및 접지를 분리)

배터리 트레이 단위 시험 구성 및 시험 진행

- 시험결과

· 측정 시 트레이 프레임 대비 배터리의 정극(P), 부극(N)에 대한 결과 동일

· 배터리 프레임과 접지 도통 시 최대 254[Vpp]가 발생되었고, 분리 시 85[Vpp]가 발생

→ 약 3배 저감 되었으므로 보완설계 방향의 타당성 검증

측정위치 - N:배터리 부극 - F:배터리 프레임	조건 : Bat(F)-Earth(G) : 도통		조건 : Bat(F)-Earth(G) : 분리	
	High/Low	ΔV	High/Low	ΔV
Bat1(N-F)	+108 / -146	254	+28 / -52	80
Bat2(N-F)	+107 / -103	210	+27 / -29	56
Bat3(N-F)	+ 69 / - 67	136	+21 / -20	41
Bat4(N-F)	+ 39 / - 26	65	+12 / - 3	15
Bat5(N-F)	+ 74 / - 75	149	+22 / -23	45
Bat6(N-F)	+133 / -133	166	+45 / -40	85

ΔV : Peak to Peak 전압 / 단위는 [V]

<배터리 랙 단위 시험>

- 목 적

· 배터리 뱅크를 랙 단위로 구성함으로서 실제 설치되는 전압과 동일한 상황을 구현하여 시험함으로서 모듈단위의 시험에서의 타당성을 재검증하고, 추가적인 보완사항을 도출하기 위함.

· 시험기간 : 2016. 11. 07 ~ 2016. 11. 09

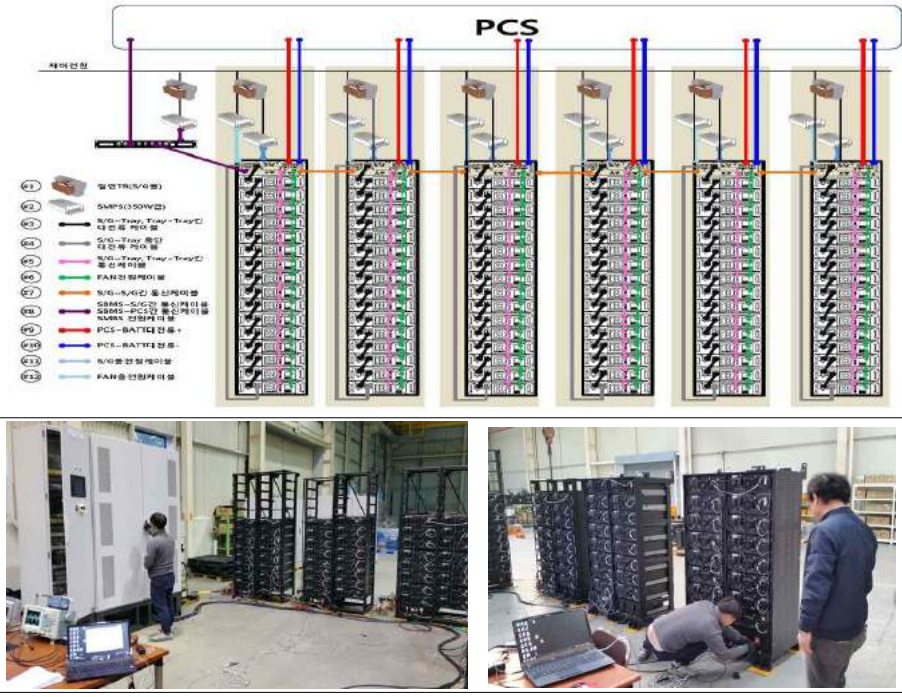
· 시험장소 : ㈜우진산전 2공장

- 시험방법

· 트레이 단위 시험도출 결과에 맞추어 모의시험설비를 구성

· 각 배터리 랙은 지면과 절연판으로 분리(완전 비접지 상태 확인)

· 각 배터리 랙과 시스템 BMS의 제어전원은 절연변압기로 분리



배터리 랙 단위 시험 구성 및 시험 진행

- 시험결과

· 렉 단위 배터리에 의한 출력 AC전압은 현장시험과 같이 3100[Vrms]를 출력

· 측정 시 렉 프레임 대비 배터리의 정극(P), 부극(N) 확인

· 배터리 렉 프레임을 렉 단위로 분리시켜 측정한 결과 최대 229V의 전위가 발생 (이는 기존 발생 유기전압 대비 약 10배 가량 저감된 결과이다.)

측정위치	배터리(P-F)		배터리(N-F)	
	High/Low	ΔV	High/Low	ΔV
RACK #1	+115 / -114	229	+111 / - 99	200
RACK #2	+ 50 / - 47	97	+ 50 / - 45	95
RACK #3	+ 61 / - 46	107	+ 67 / - 67	134
RACK #4	+ 26 / - 26	52	+ 35 / - 27	62
RACK #5	+ 63 / - 67	130	+ 65 / - 71	136
RACK #6	+101 / -105	206	+101 / -105	206

ΔV : Peak to Peak 전압 / 단위는 [V]

② 배터리 컨테이너 하드웨어 보완작업

배터리 트레이 및 랙 단위 시험 결과에 따라 각 뱅크별 배터리 트레이(TRAY BMS)/스위치 기어박스(RACK BMS)/랙 프레임(RACK FRAME)을 접지와 컨테이너 프레임과 구조적으로 절연시키고, 장애가 발생한 #3번 컨테이너의 배터리 트레이와 스위치 기어는 안전성을 고려하여 불용함에 따라 배터리 시스템 용량 재구성함

- 상세 시스템 설계 보완 내용

⇨ 배터리 시스템 용량 최적 구성 방안

· 사용 불가한 배터리 3번 컨테이너를 제외한 실제 사용 가능한 배터리는 768개의 트레이로 재구성하여 사용

· 사용 가능한 배터리를 활용하여 최적의 시스템으로 구성

⇨ 배터리 재구성 시 용량 검토

· 배터리 재구성에 따라 본 과제에서 개발되는 PCS의 출력은 동일

· 배터리 실제 가용용량은 기존 대비 약 57[%]로 줄게 되어 연속적인 출력에 제한

· 이로 인해 초기 목표치인 피크저감률은 목표치인 20[%]에는 미치지 못하고, 약 10[%]의 저감률을 가질 것으로 예상 (전기연구원 알고리즘 분석결과)

울산변전소 배터리 재구성 검토

7.5MVA MTR Specification		
	Type	단상 4권선 변압기
	Power	7.5 [MVA]
	Voltage	55kV : (3300-3200-3100-3000-2900)V
	Current	2419.5[A] (806.5 [A] X 3EA)
	%Z	5 [%]
	Reactor	0.75[mH] X 3EA

PCS Specification				
	Type	Single-phase Multi-level Inverter		
	Power	6 [MW] (2 [MW] X 3EA)		
	Stack num	6	Output level	13
	V_{AC_rms}	2900 [V]	V_{AC_peak}	4101 [V]
	I_{AC_rms}	2069 [A]	I_{AC_peak}	2926 [A]
	MI	0.95	Vbat_min	720 [V]

2.68MWh Battery Specification : 756 Tray (Modules)										기존 : 1152 Tray (4.09MWh)
	Tray (Module) [Cell : 16 SET]		Rack [Tray : 14 SET]		Bank [Rack : 3 SET]		Container [Bank : 6 SET]		System [Container : 3 SET]	
Structure (Tray base)	1 [EA]		14 [EA]		42 [EA]		252 [EA]		756 [EA]	
	1S 1P		14S 1P		14S 3P		14S 18P		14S 54P	
Capacity	60 [Ah]		60 [Ah]		180 [Ah]		180 [Ah]		540 [Ah]	
Vnorm	59.2 [V]		828.8 [V]		828.8 [V]		828.8 [V]		828.8 [V]	
Vmin / Vmax	54.2 [V]	65.6 [V]	759.4 [V]	918.4 [V]	759.4 [V]	918.4 [V]	759.4 [V]	918.4 [V]	759.4 [V]	918.4 [V]
	Charge	Discharge	Charge	Discharge	Charge	Discharge	Charge	Discharge	Charge	Discharge
Crate	2 [C]	2 [C]	2 [C]	2 [C]	2 [C]	2 [C]	2 [C]	2 [C]	2 [C]	2 [C]
Operating Current	120 [A]	120 [A]	120 [A]	120 [A]	360 [A]	360 [A]	360 [A]	360 [A]	1080 [A]	1080 [A]
Average Power	7.104 [kW]	7.104 [kW]	99.456 [kW]	99.456 [kW]	298.368 [kW]	298.368 [kW]	1790.208 [kW]	1790.208 [kW]	5370.624 [kW]	5370.624 [kW]

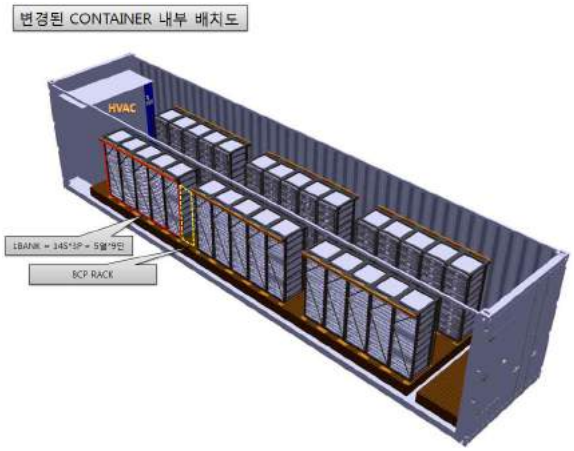
		변경 전	변경 후	비 고
PCS 최대출력		6.0 [MW]	6.0 [MW]	주기1. 참조
배터리	SOC범위	0 ~ 100[%]	14 ~ 100[%]	PCS 변조율(MI) 관계에 의해 SOC 하한 값을 14[%]로 선정
	가용용량	4.09[MWh]	2.34[MWh]	컨테이너 3대 기준용량
	뱅크 구성	16S4P (64tray)	14S3P (42tray)	
	Crate	1.5[C]	2.0[C]	
예상피크저감률		20 [%]	10 [%]이상	전기연구원 분석결과

*주기1. 배터리 용량 감소에 의한 전력량은 감소하나, 개발된 PCS는 용량은 6MW 시스템이 개발 됨

- 배터리 컨테이너 구조 재배치

· 기존 배터리 컨테이너는 6개의 배터리 뱅크가 좌우로 횡배치되어 프레임이 모두 공통 접지(common)됨

· 변경된 컨테이너 구성안으로 6개의 배터리 뱅크가 각각 절연처리 되어 분리되도록 설계



<배터리 컨테이너 내부 변경 배치도>

· 절연 플레이트에 의해 절연된 각 뱅크는 14직렬3병렬로 구성하고, 각 배터리 렉의 전면부는 아크릴 커버를 통하여, 뱅크간 부유 캐패시터에 의한 안전상의 위험요소를 제거

<배터리 뱅크 변경 구성도>

- 시스템 보완 제작 및 재설치 작업

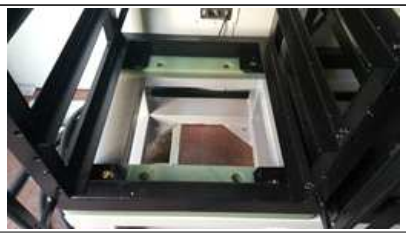
· 배터리 컨테이너 보완 작업

랙 다이 제작 작업	랙 다이 조립 작업

· 배터리 렉 프레임 보완 작업

배터리 랙 프레임 분리 작업	배터리 랙 프레임 보완

· 배터리 뱅크별 절연 처리 작업

	
배터리 랙 프레임 하부 절연용 PLATE	컨테이너 바닥 절연용 PLATE

· 배터리 컨테이너 상차/반입 및 재설치 작업

배터리 컨테이너 상차/반입 작업	배터리 컨테이너 설치 작업
가공지선 분리 작업	가공지선 원상 복구

· 배터리 트레이/스위치 기어박스 반입 및 배선 작업

SG/배터리 트레이 간 주회로/제어회로 배선

③ 배터리 컨테이너 보완 자문회의

- 목 적 : 배터리 컨테이너 설계변경 및 보완사항 검토
- 일 시 : 2017년 4월 14일(금) 10:30 ~ 15:30
- 내 용 :
  · 발　　표 : 과제 개요, 시스템 설명, 배터리 용량 재구성 설명
  · 현장답사 : 울산변전소 시스템 설치 현황 및 배터리 컨테이너 용량 재구성 확인
  · 검토사항 : 배터리 용량변경에 따른 설계변경 타당성 검토
- 자문위원 의견

피크전력저감장치 자문회의 사진

전 문 가	자 문 내 용
김상훈 교수 (강원대학교)	○ 기존 시스템에서는 배터리 시스템의 절연내력이 적절히 확보되어 있지 않아 PCS 출력 전압의 영향이 배터리 시스템의 신뢰성에 상당한 영향을 끼쳤으리라 사료됨 ○ 현재 시스템에서는 배터리 뱅크를 분리 절연하고 그 프레임을 접지에서 분리하였으며, 컨테이너 박스와의 절연내력을 충분히 확보하도록 하는 보완 설계를 통해 기존에 존재한 절연내력 미 확보로 인하여 발생된 문제를 적절히 보완하였다고 사료됨
박상옥 부장 (한국철도시설공단)	○ 밧데리 장애 발생은 스위치 기어박스의 절연 파괴로 인한 것으로 절연상 문제가 있었던 것으로 확인함 ○ 밧데리 뱅크 구성을 당초 16S4P에서 14S3P로 변경 전체적 피크저감 효과는 줄어드나 피크저감 검증에는 영향이 없을 것으로 판단됨 ○ 따라 현장 여건상 밧데리 수급의 어려움 등을 반영하여 시험을 시행하는 것이 바람직할 것으로 사료됨
이재식 부사장 (동산엔지니어링(주))	○ 현재 장애가 발생한 시스템의 설계 보완책으로 6개의 Battery bank를 각각 절연처리하여 Floating한 것은 양호한 대책이라 사료됩니다.

(3) 2차 배터리 연계 현장시험 (보완 후)

현장 설치에 따른 PCS제어기 인터페이스 확인 시험으로 통신 인터페이스 시험 및 제어기 와 연동되는 외부 인터페이스 아날로그/디지털 신호 확인 시험이다.

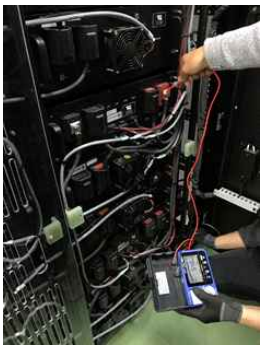
① 배터리 절연저항 측정

- 배터리 컨테이너 절연저항 측정

배터리 컨테이너는 6개의 뱅크로 구성되며, 각 뱅크는 3개의 Rack으로 구성된다. 각각의 뱅크는 PCS로 분리된 DC전원을 공급하기 위하여 절연처리 되도록 하였으며, 절연저항 측정 결과수백~수천㏁ 이상으로 충분한 절연특성을 확보되었음을 확인하였다.

(a) P+ / Bank Frame

(b) P- / Bank Frame


(c) Rack B+ / Bank Frame

(d) Rack B- / Bank Frame

배터리 컨테이너 절연저항 측정사진

② 배터리 연계시험

배터리 컨테이너 절연보완 및 재설치 작업 후 실시한 연계시험으로 시험은 배터리 연계 후 PCS의 AC출력 전압 확인 및 밸런싱 모드 PWM출력 확인 시험으로 진행하였다. 배터리 연계 시험 시 VCB는 개방하고, 무부하 전력으로 운용한다.

배터리 연계시험	

◉ 시험방법

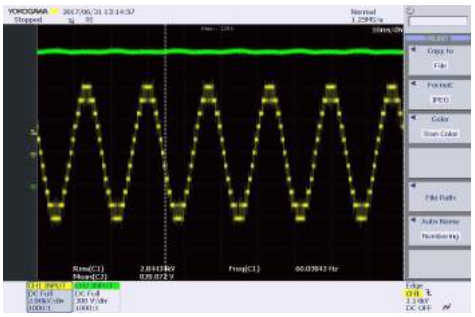
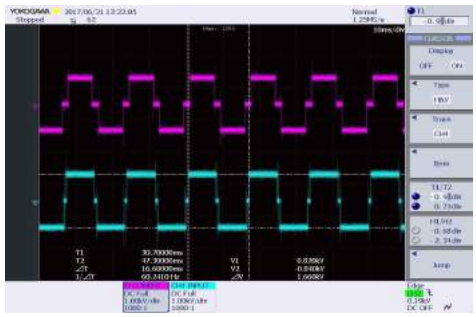
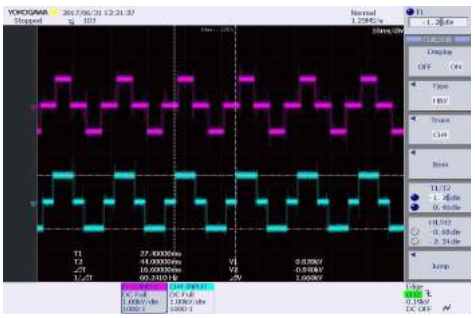
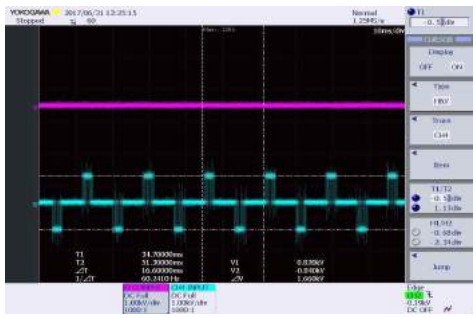
- 배터리 컨테이너의 스위치 기어박스의 DC switch On : PCS 지령에 의해 연동
- Normal/RPR모드에서 각 스택별 AC출력 및 조합 출력 파형 취득 후 정지

◉ 계측장비

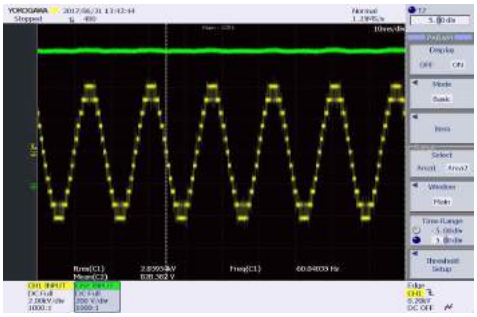
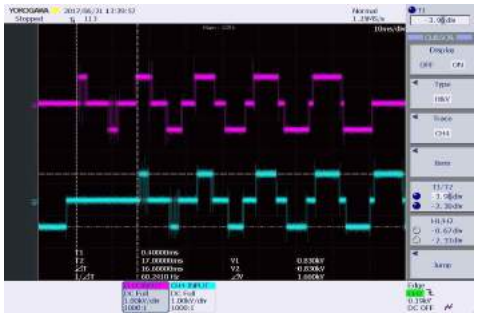
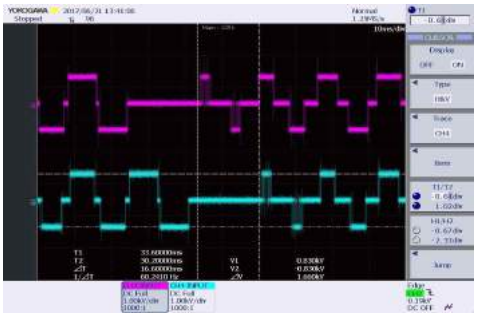
- 오실로스코프 : DL9140 (Sampling : 5GHz / Analog BW : 1GHz)
- 절연프르브 : SI-9010 (±7000V@1000:1 / ±700V@100:1)

◉ 시험결과

- Normal/RPR모드에서 각 스택 출력이 Reference 전압에 맞추어 각 층별로 정상적으로 출력하는 것을 확인함. (RPR 모드 회전 주기 : 10Hz)
- 각 PCS(1~3)에 대하여 모두 출력을 확인 한 결과 정상 출력됨을 확인

	
PCS 출력전압 확인	Stack 1 / Stack 2 출력전압
	
Stack 3 / Stack 4 출력전압	Stack 5 / Stack 6 출력전압

Normal Mode 시 PCS, Stack 출력전압 측정

	
PCS 출력전압 확인	Stack 1 / Stack 2 출력전압
	
Stack 3 / Stack 4 출력전압	Stack 5 / Stack 6 출력전압

RPR Mode 시 PCS, Stack 출력전압 측정

라. PCS 종합 연계시험

(1) 가선전압 투입, 개방 시험

① GIS 투개방 확인 시험

→ 스카다 인터페이스 정상동작 확인

→ GIS투입에 따른 GIS상태 점검

→ TS1, TS2 급전 및 가압 확인

→ Local 조작 및 자동조작(관제 원격조작) 시험 완료

GIS 투입, 개방 시험

② PDS(단로기) 투개방 확인 시험

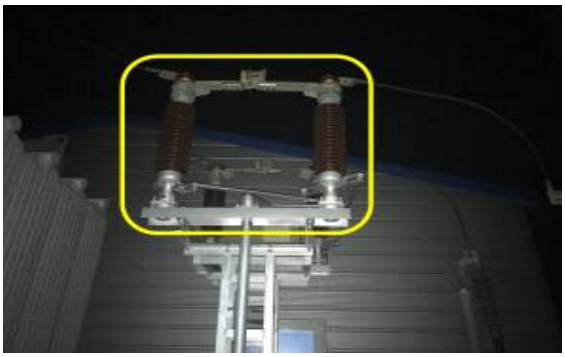
→ 단로기 투입에 따른 PCS측 변압기 입력전압 확인

(PCS변압기 사양 : 7.5MVA 4권선 단상변압기 55kV : 3100V)

→ PDS와 GIS 간 인터락 확인 : PDS 동작 중 GIS 투입 방지

→ PDS Auto/Manual 동작 확인

(단, Manual 동작 시 Local 취급 불가토록 보완)



단로기 투입, 개방 시험

(2) PCS 충전/방전 동작 시험

◉ 시험방법

- 계통 및 배터리, 그리고 PMS를 통한 전체 시스템 조합 후 시험 진행
- PCS의 MMI를 원격모드로 설정하고, EB스위치 해제 및 기동 스위치 ON 취급

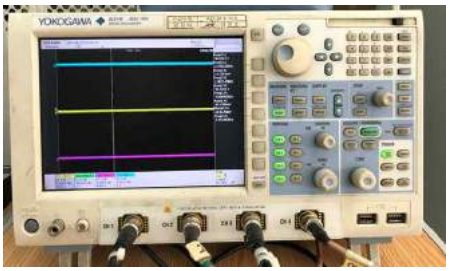
  : PCS는 계통 및 배터리, PCS의 상태확인 후 배터리의 DC스위치를 자동으로 동작시킴.
- PMS설정을 수동모드로 전환하고, 각 PCS에 기동지령 취급 후 PCS의 동작확인

  : 초기충전회로 동작 ⇨ DCB 동작 ⇨ VCB 동작 ⇨ 전력지령수령 대기
- PMS에서 전력지령 값 전송

  : 전력지령은 충전, 방전에 대하여 500kW 단위로 2MW까지 전송하고 파형 취득

◉ 계측장비

- 계측장비는 검교정을 마친 장비를 사용하여 측정하였고, 각 계측장비의 사양은 하기와 같다.

	<오실로스코프 : 1EA> - 모델명 : DL9140 Digital Oscilloscope [Yokogawa] - 사 양 : Sampling : 5GHz / Analog BW : 1GHz Channel : 4채널
	<절연 프르브 : 2EA> - 모델명 : SI-9010 [Sapphire Instruments] - 사 양 : ±7000V@1000:1 / ±700V@100:1
	<전류 프르브 : 2EA> - 모델명 : HIOKI-3285 [Hioki] - 사 양 : ±200A @200A:1V / ±2000A @2000A:1V

◉ 시험결과

- 계측기 스케일 정보 : 전압의 경우 절연 프르브를 1000:1로 설정하여 실측하였고, 전류의 경우 2000A:1V로 설정하였다. 전류의 경우 스코프에서 측정된 값에 2000을 곱한 값이 실제 전류의 실효치 이다.
- 각 전력지령에 대하여 PCS가 정상적으로 출력함을 확인

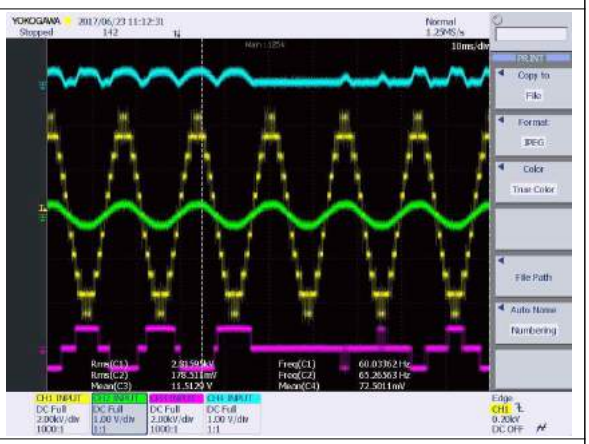
  (cf. 2MW출력의 경우 BMS측 전류 리미트에 의해 다소 제한을 받음)

① PCS#1 충전/방전 시험

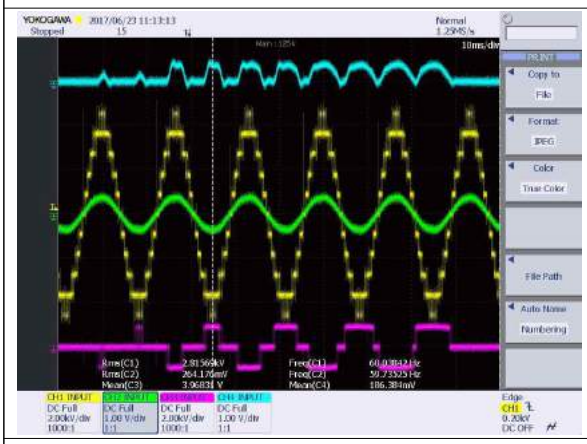
- 충전동작 확인

PMS 상세현황 화면 (충전 시)

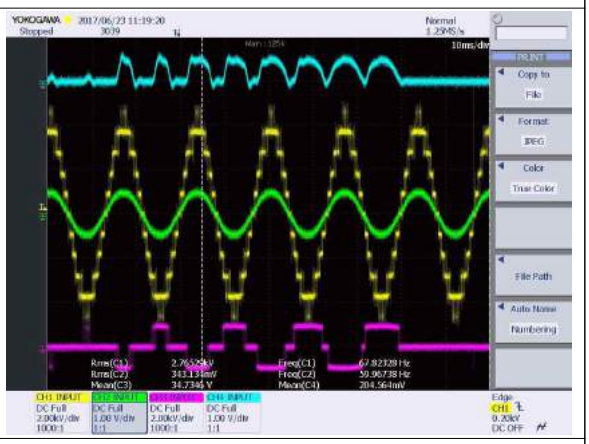
500kW 충전 시



1000kW 충전 시



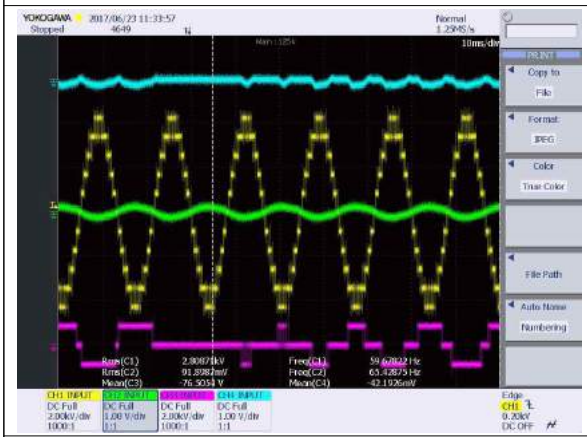
1500kW 충전 시



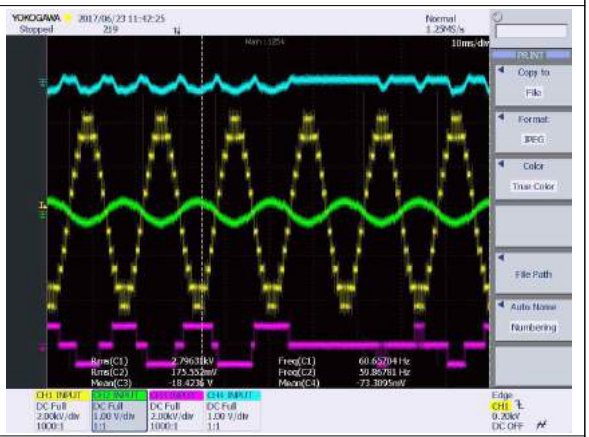
2000kW 충전 시

- 방전동작 확인

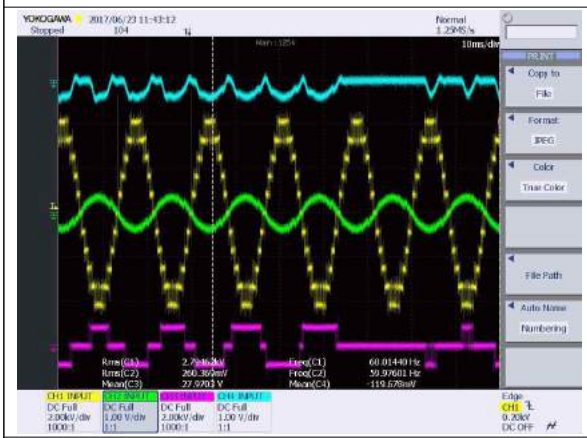
PMS 상세현황 화면 (방전 시)



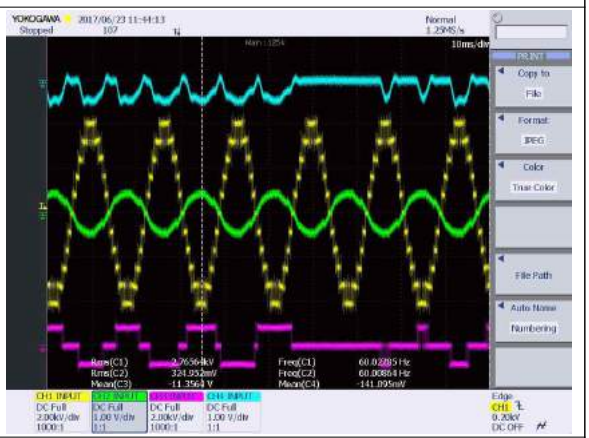
500kW 방전 시



1000kW 방전 시



1500kW 방전 시



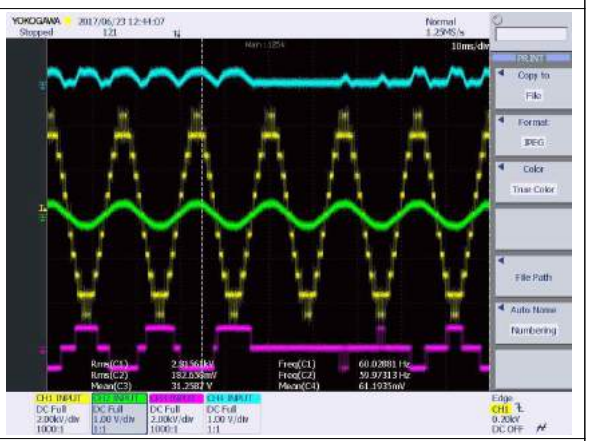
2000kW 방전 시

② PCS#2 충전/방전 시험

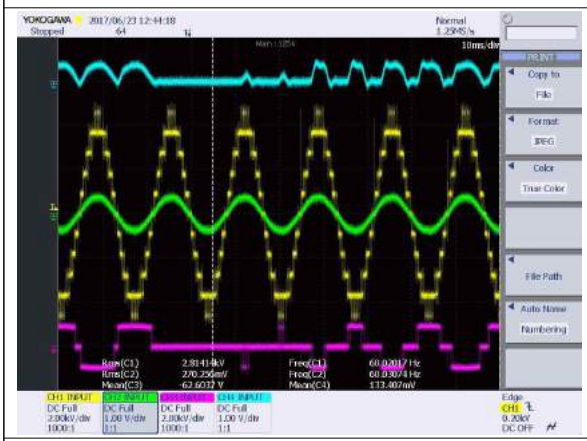
- 충전동작 확인

PMS 상세현황 화면 (충전 시)

500kW 충전 시



1000kW 충전 시



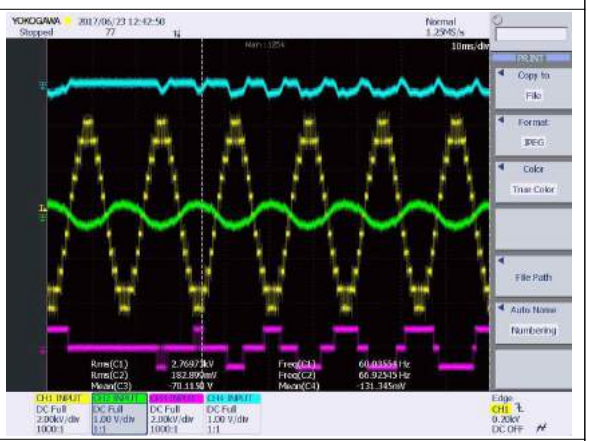
1500kW 충전 시

2000kW 충전 시

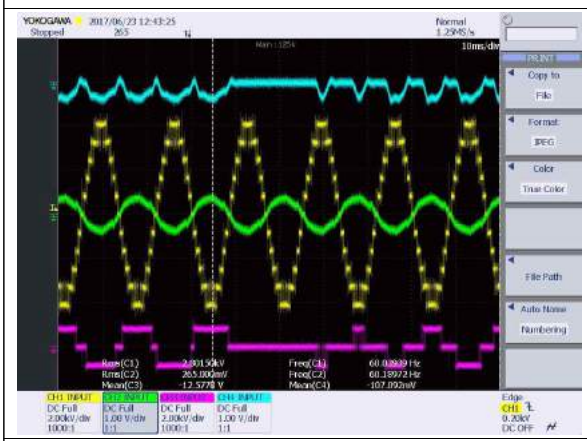
- 방전동작 확인

PMS 상세현황 화면 (방전 시)

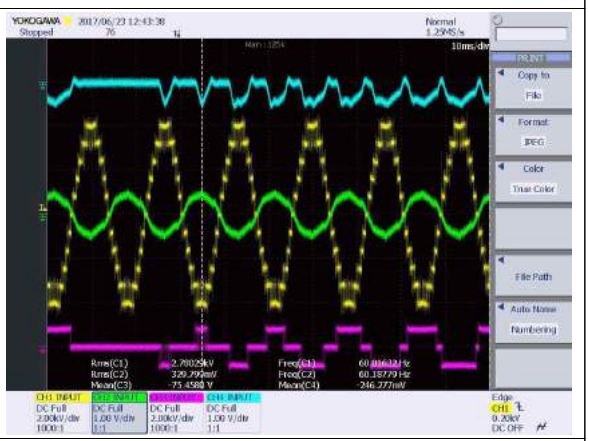
500kW 방전 시



1000kW 방전 시



1500kW 방전 시

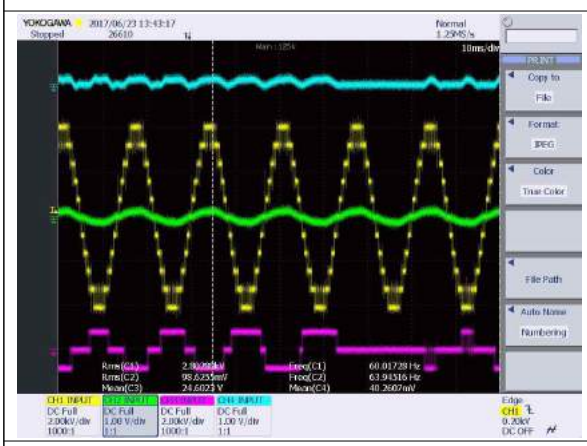


2000kW 방전 시

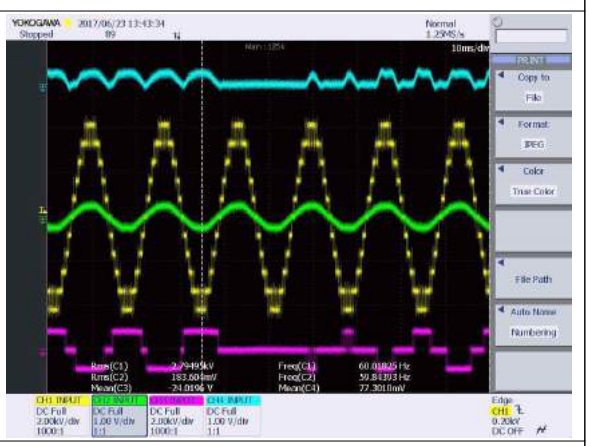
③ PCS#3 충전/방전 시험

- 충전동작 확인

PMS 상세현황 화면 (충전 시)

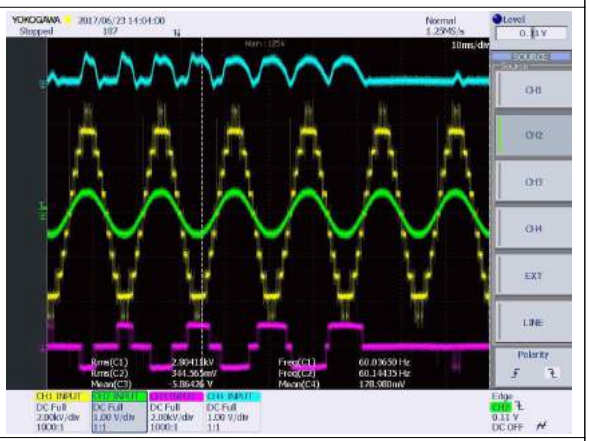


500kW 충전 시



1000kW 충전 시

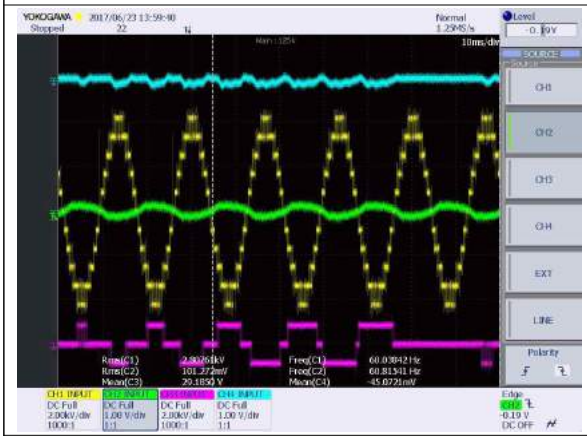
1500kW 충전 시



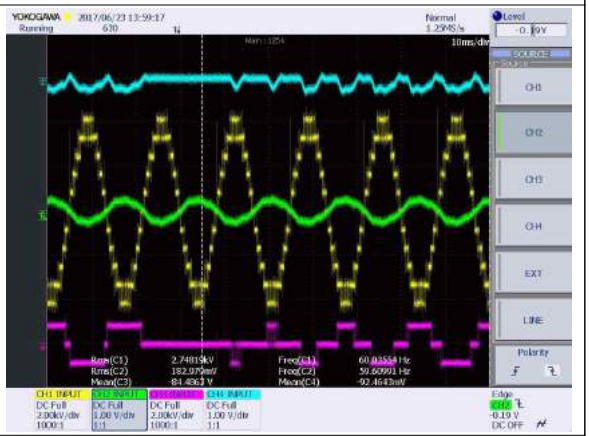
2000kW 충전 시

- 방전동작 확인

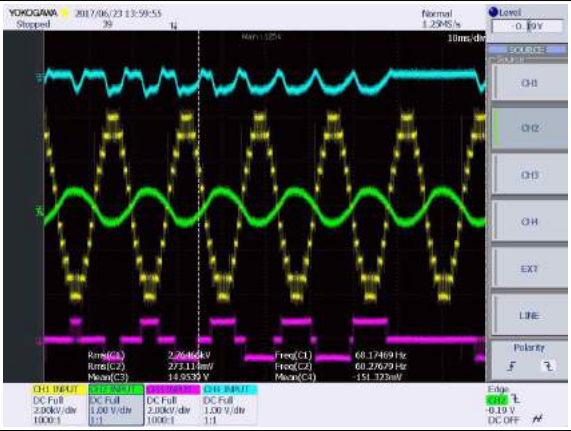
PMS 상세현황 화면 (방전 시)



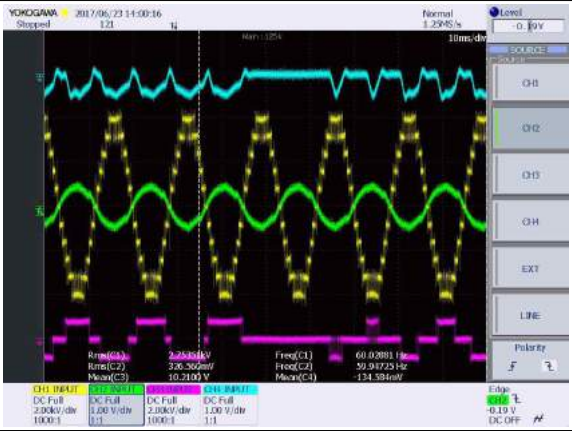
500kW 방전 시



1000kW 방전 시



1500kW 방전 시



2000kW 방전 시

(3) PCS #1~#3 동시 충전/방전 운용시험

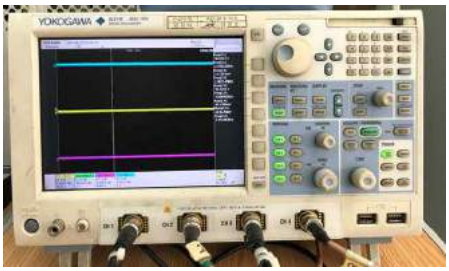
◉ 시험방법

- 5.2절의 PCS의 개별 충전, 방전 동작시험과 같은 방법으로 시험을 진행
- 단, PCS는 3대 동시 기동조건에 의해 EB 스위치와 기동스위치는 동일하게 취급
- PMS에서 전력지령 값 전송

  전력지령은 충전, 방전에 대하여 각 PCS별로 500kW 단위로 2MW까지 전송하고 파형 취득(전체 운용전력은 1.5MW단위로 6MW까지 운용)

◉ 계측장비

- 계측장비는 검교정을 마친 장비를 사용하여 측정하였고, 각 계측장비의 사양은 하기와 같다.

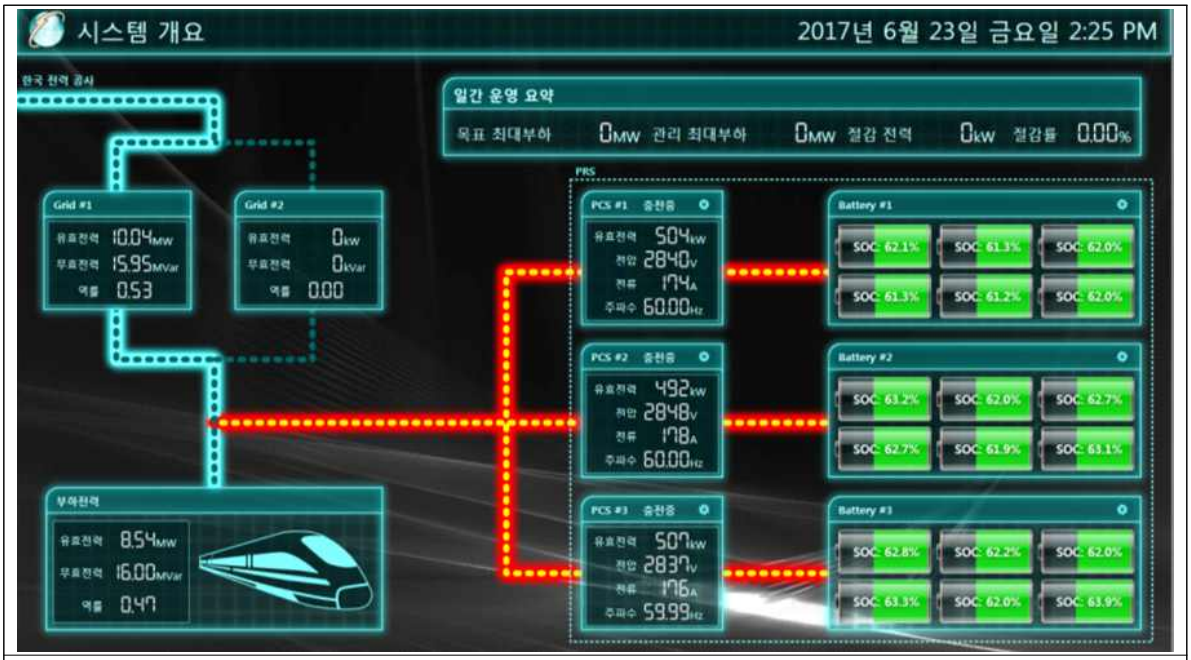
	<오실로스코프 : 1EA> - 모델명 : DL9140 Digital Oscilloscope [Yokogawa] - 사 양 : Sampling : 5GHz / Analog BW : 1GHz Channel : 4채널
	<절연 프르브 : 1EA> - 모델명 : SI-9010 [Sapphire Instruments] - 사 양 : ±7000V@1000:1 / ±700V@100:1
	<전류 프르브 : 3EA> - 모델명 : HIOKI-3285 [Hioki] - 사 양 : ±200A @200A:1V / ±2000A @2000A:1V

◉ 시험결과

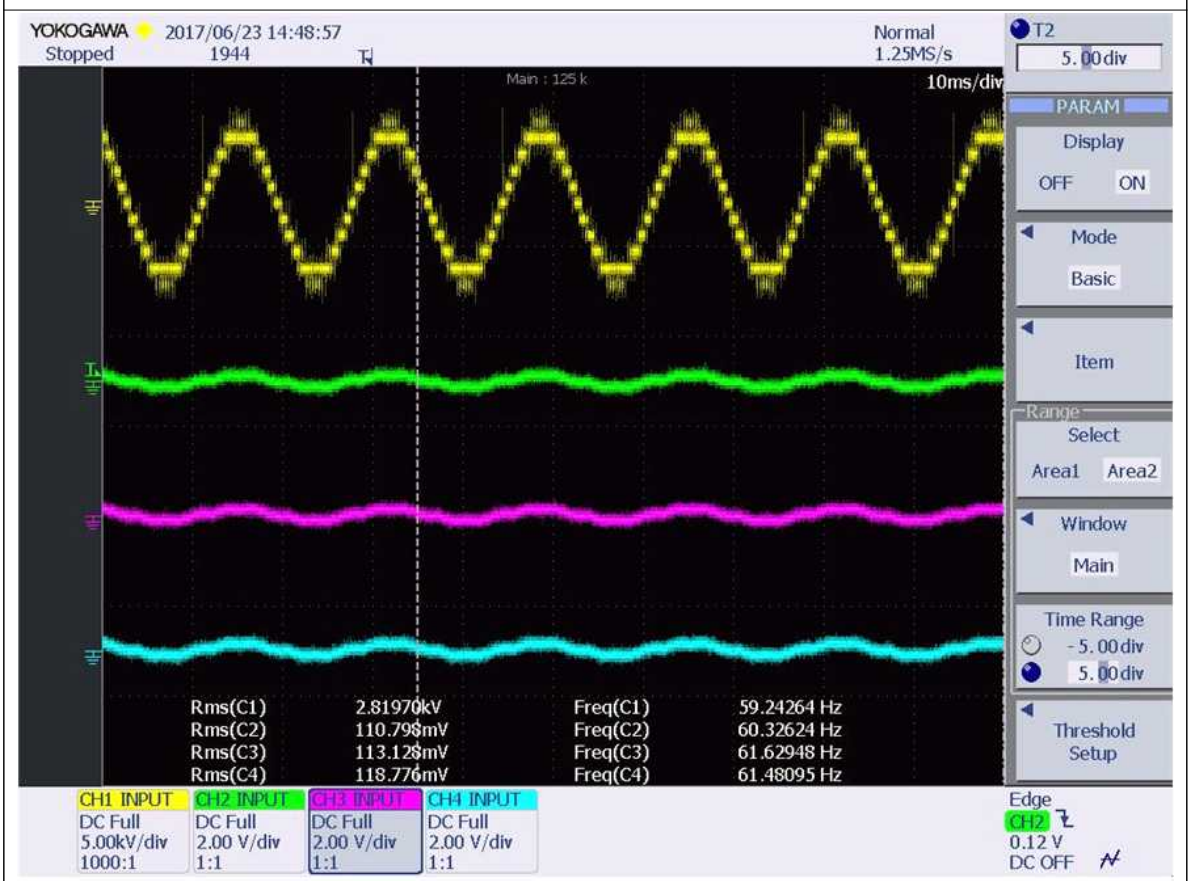
- 계측기 스케일 정보 : 전압의 경우 절연 프르브를 1000:1로 설정하여 실측하였고, 전류의 경우 2000A:1V로 설정하였다. 전류의 경우 스코프에서 측정된 값에 2000을 곱한 값이 실제 전류의 실효치 이다.
- 각 전력지령에 대하여 PCS가 정상적으로 출력함을 확인
- 전체 변압기 1차 측 전력은 PMS를 통하여 조합된 출력 값을 확인
- 전압의 경우 AC단 필터가 변압기 내부에 포함되어 PCS출력 선간전압으로 확인함

① 충전동작 확인

- 1.5MW 충전 동작확인

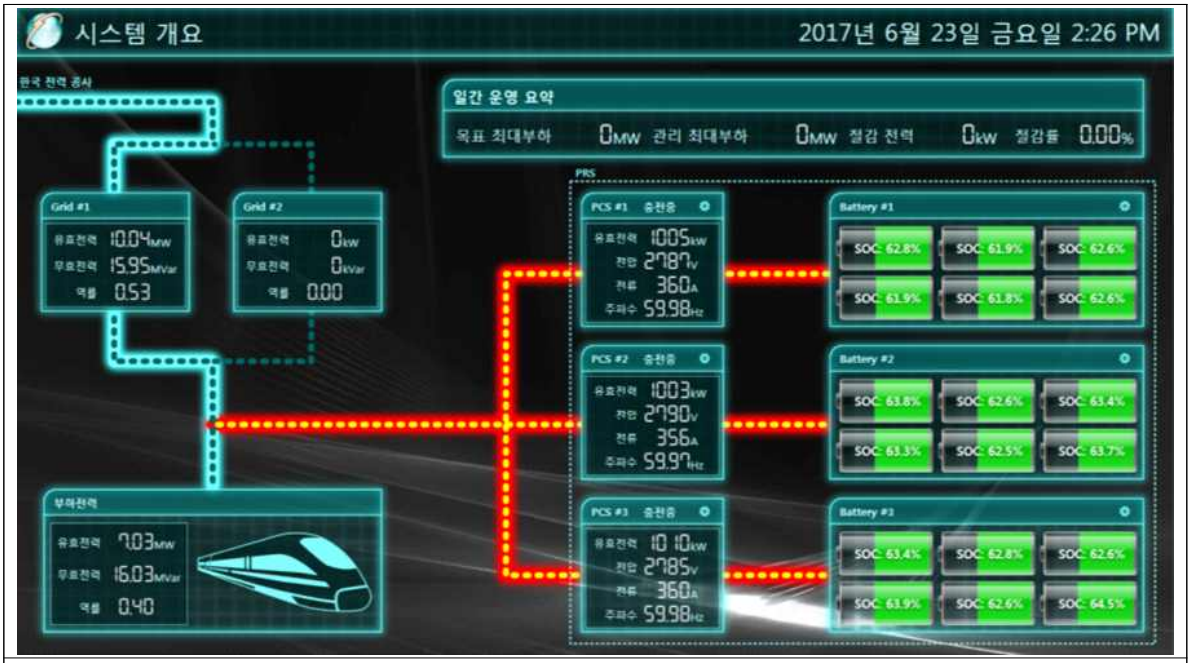


PMS 시스템 동작개요

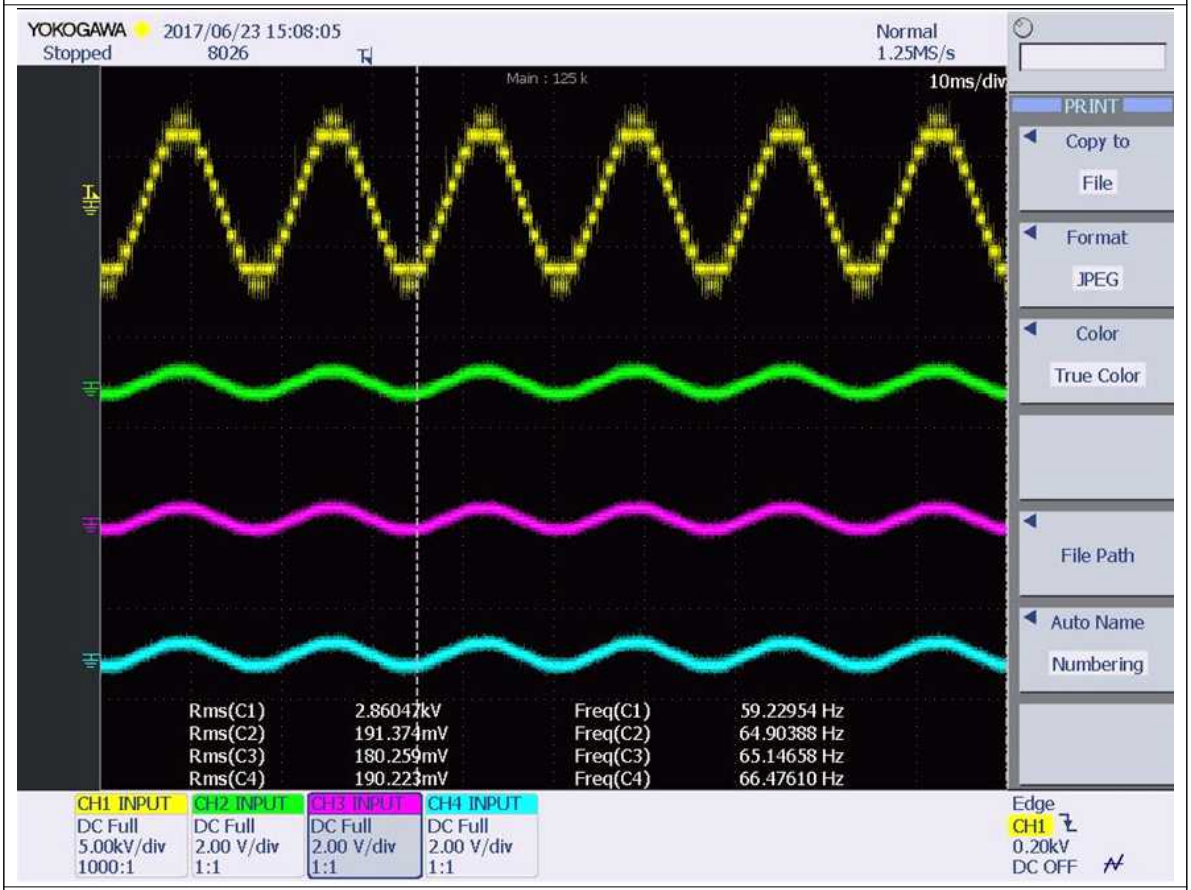


1500kW 충전 시

- 3.0MW 충전 동작확인

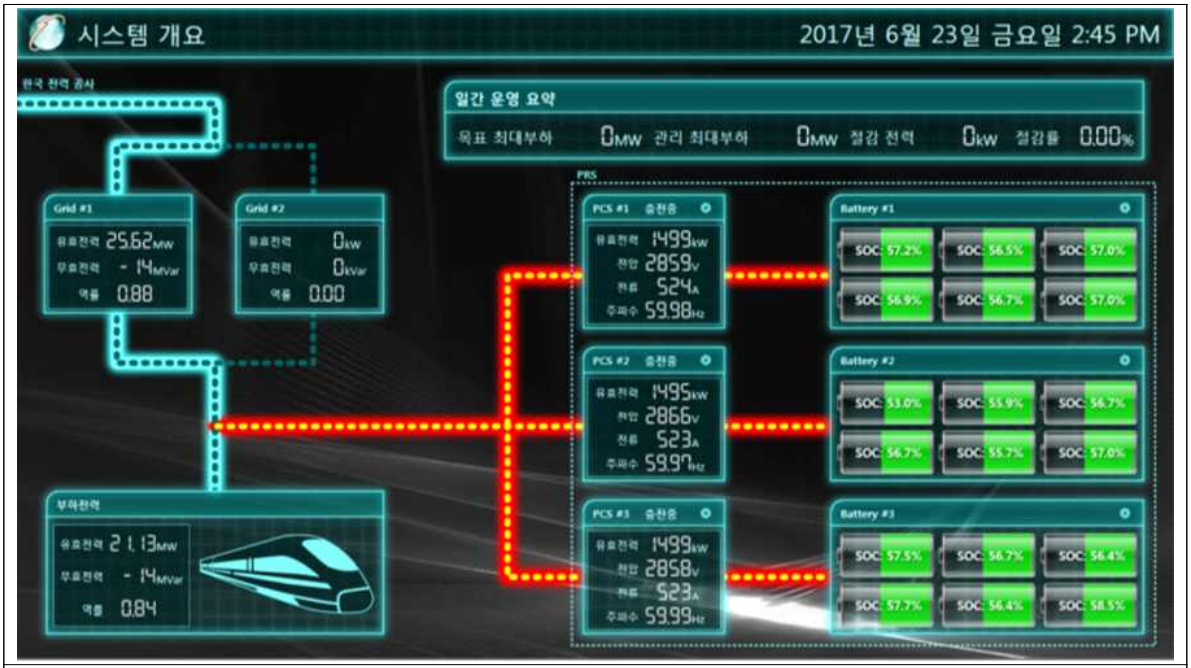


PMS 시스템 동작개요

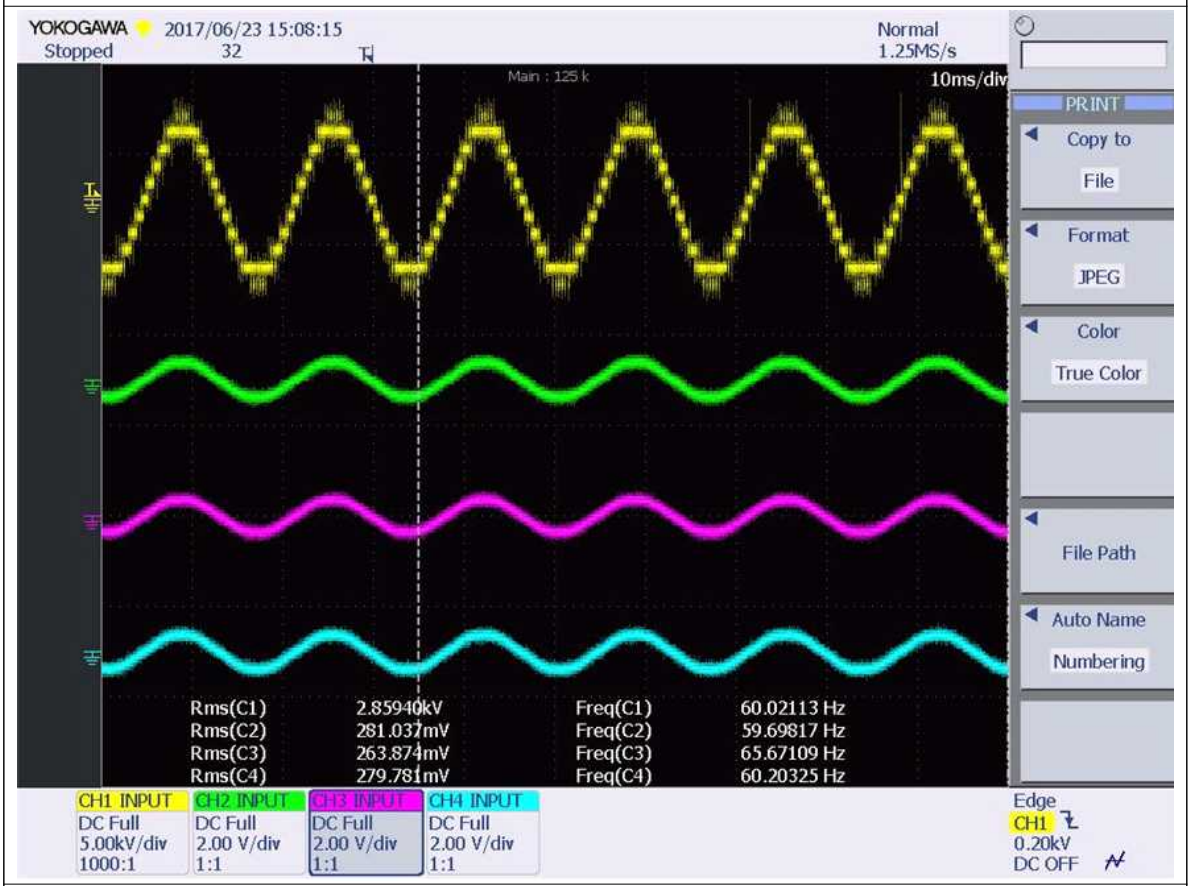


3000kW 충전 시

- 4.5MW 충전 동작확인

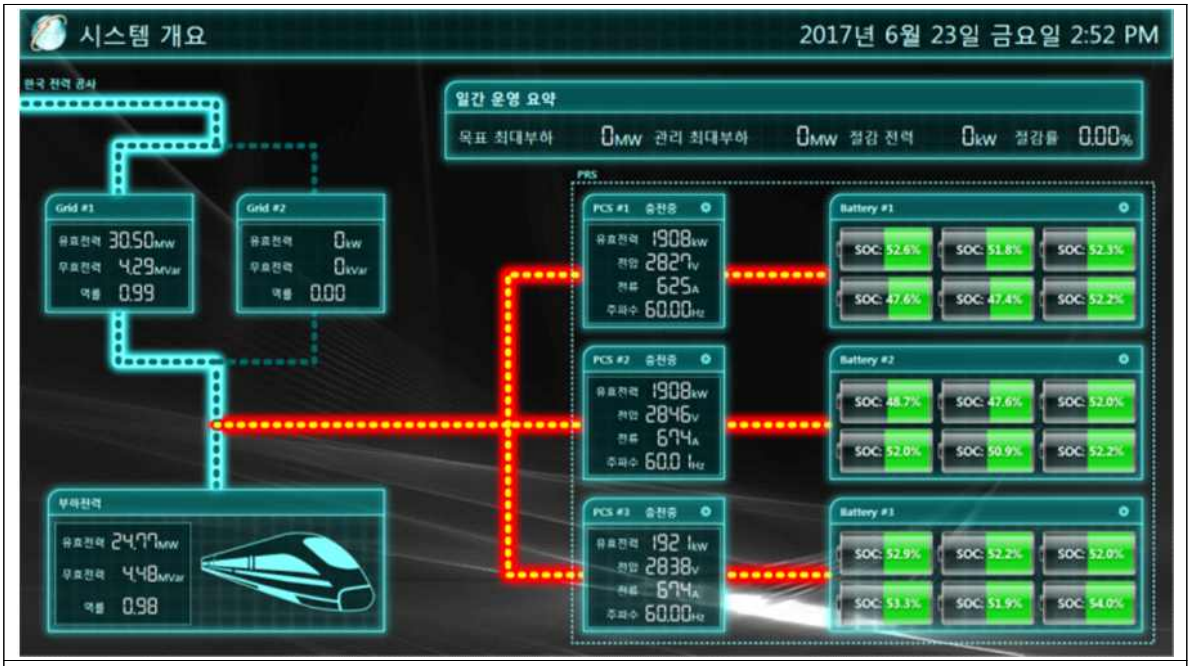


PMS 시스템 동작개요

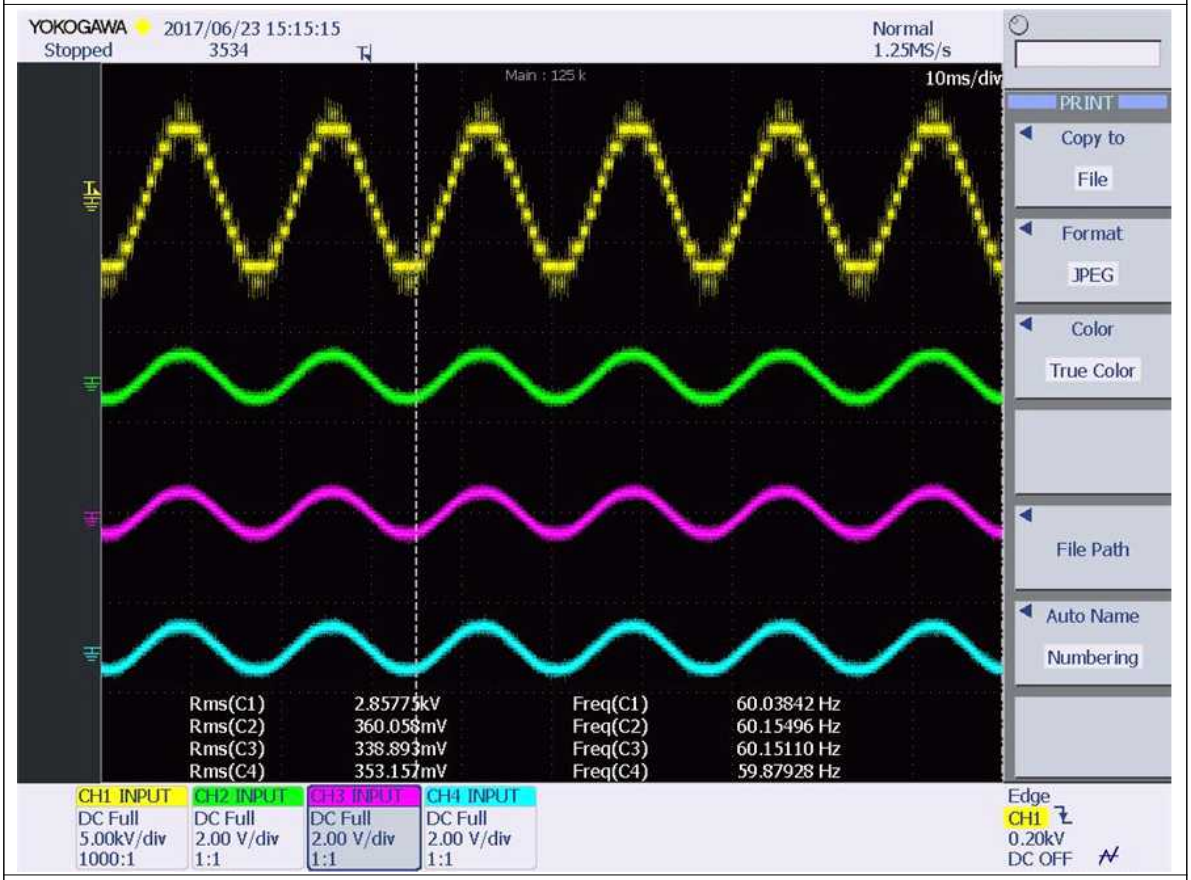


4500kW 충전 시

- 6.0MW 충전 동작확인



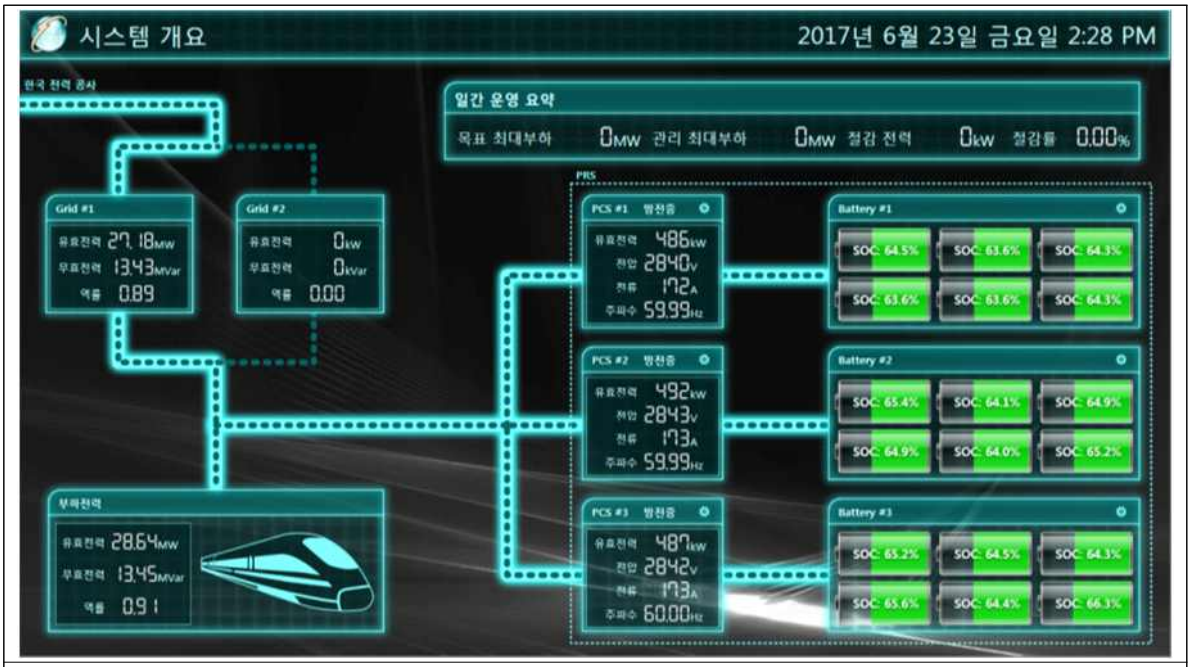
PMS 시스템 동작개요



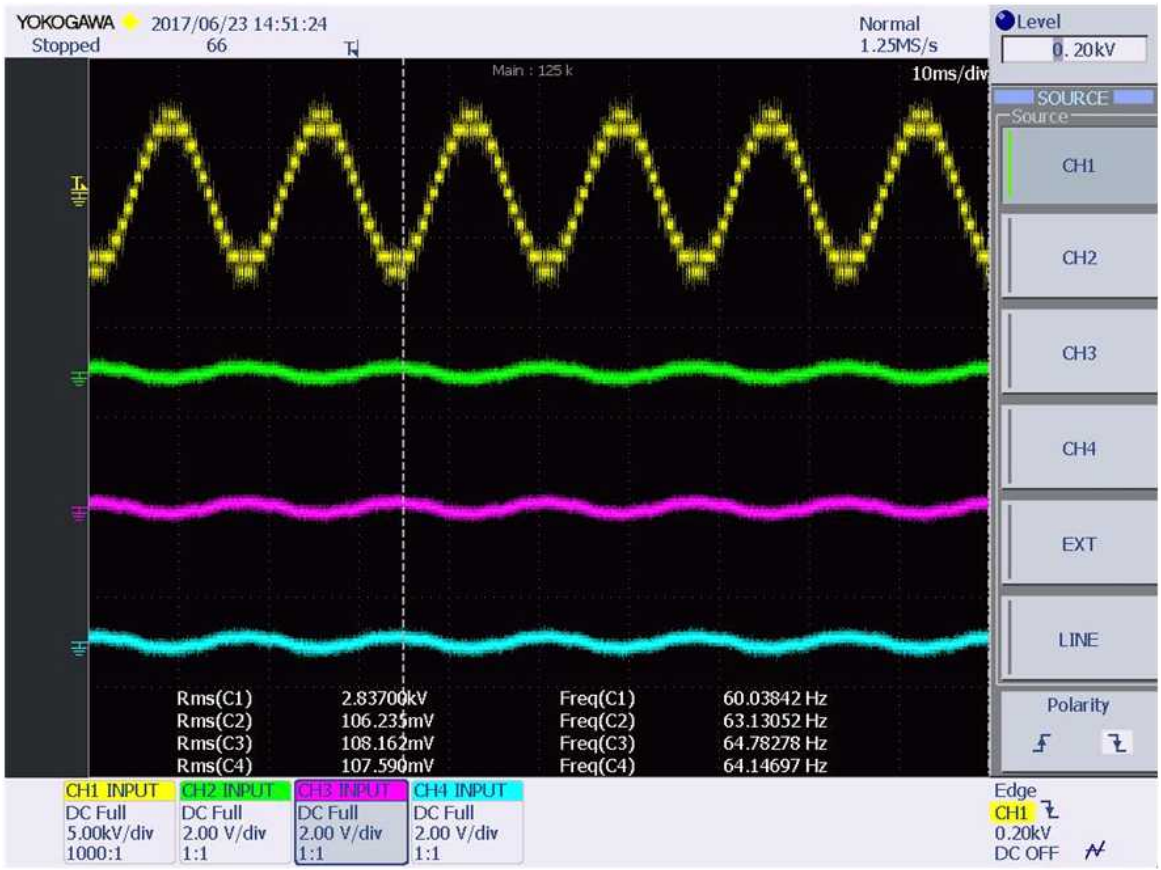
6000kW 충전 시

② 방전동작 확인

- 1.5MW 방전 동작확인

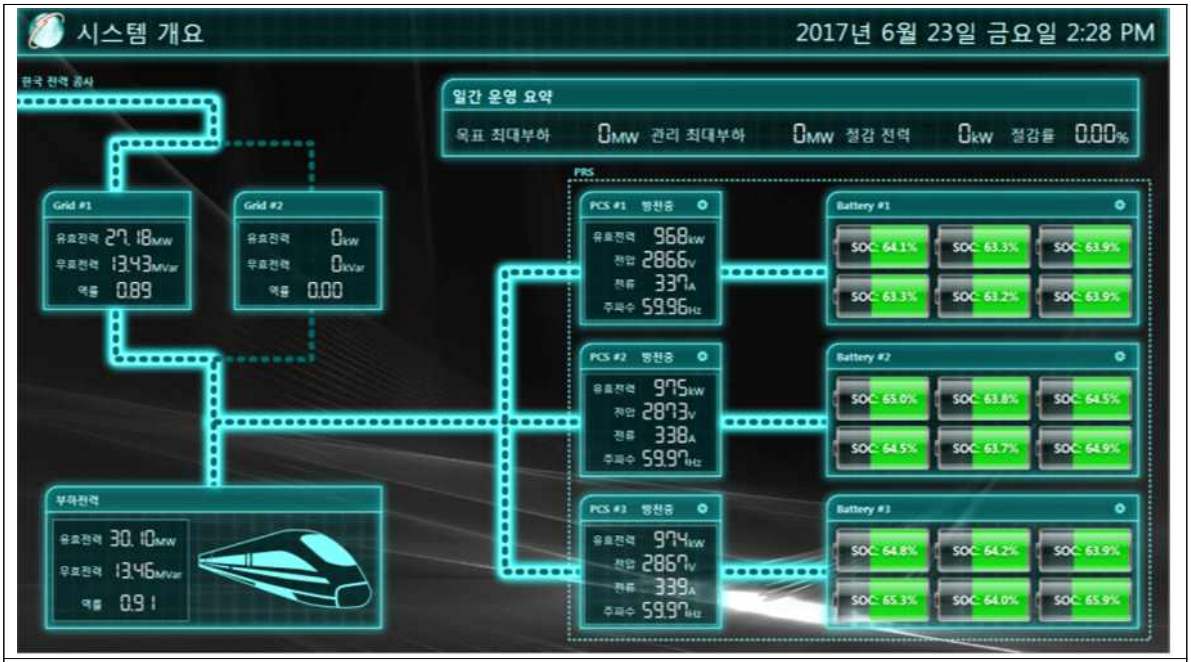


PMS 시스템 동작개요

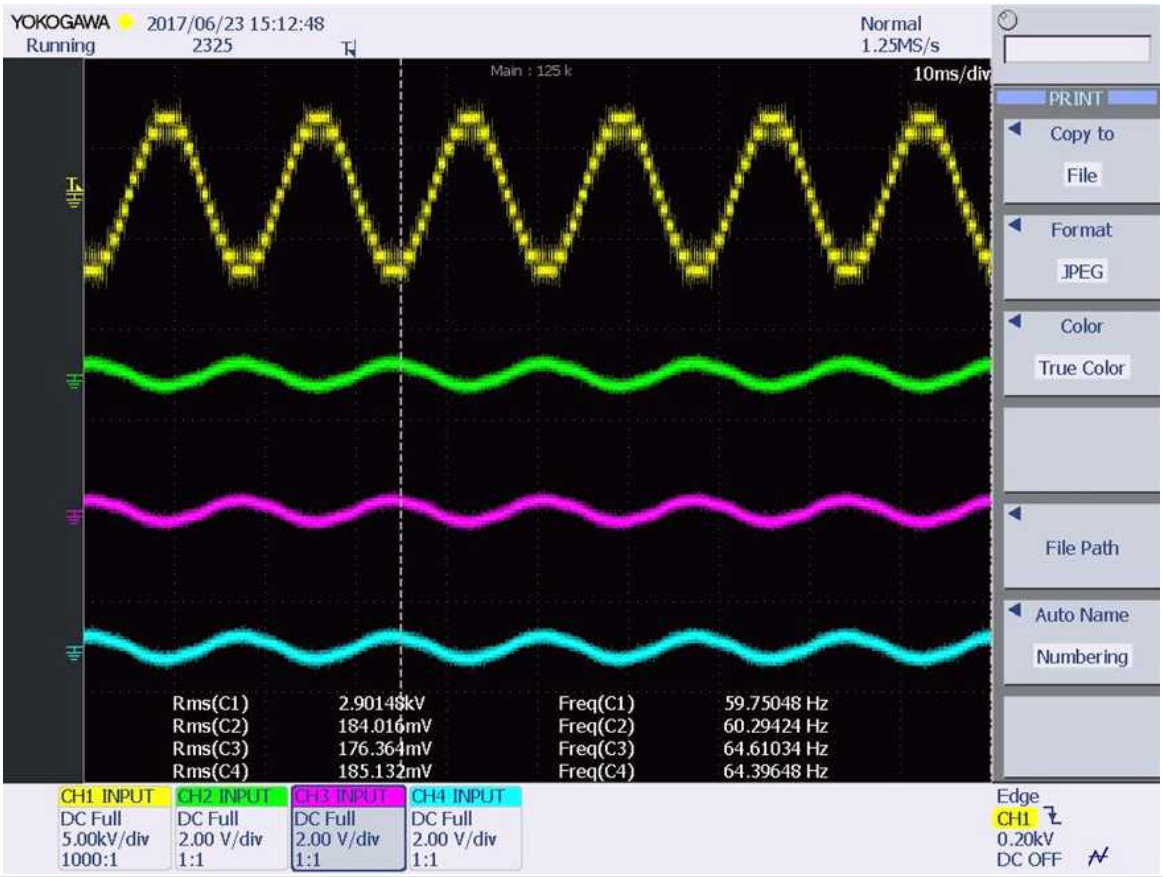


1500kW 방전 시

- 3.0MW 방전 동작확인

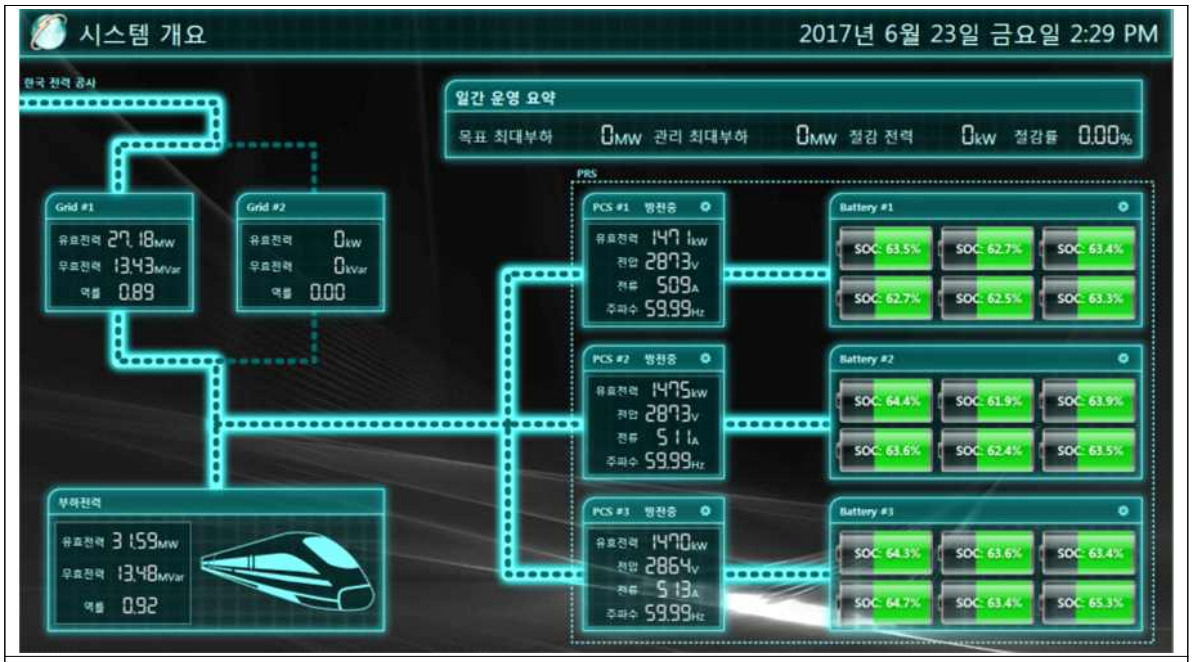


PMS 시스템 동작개요

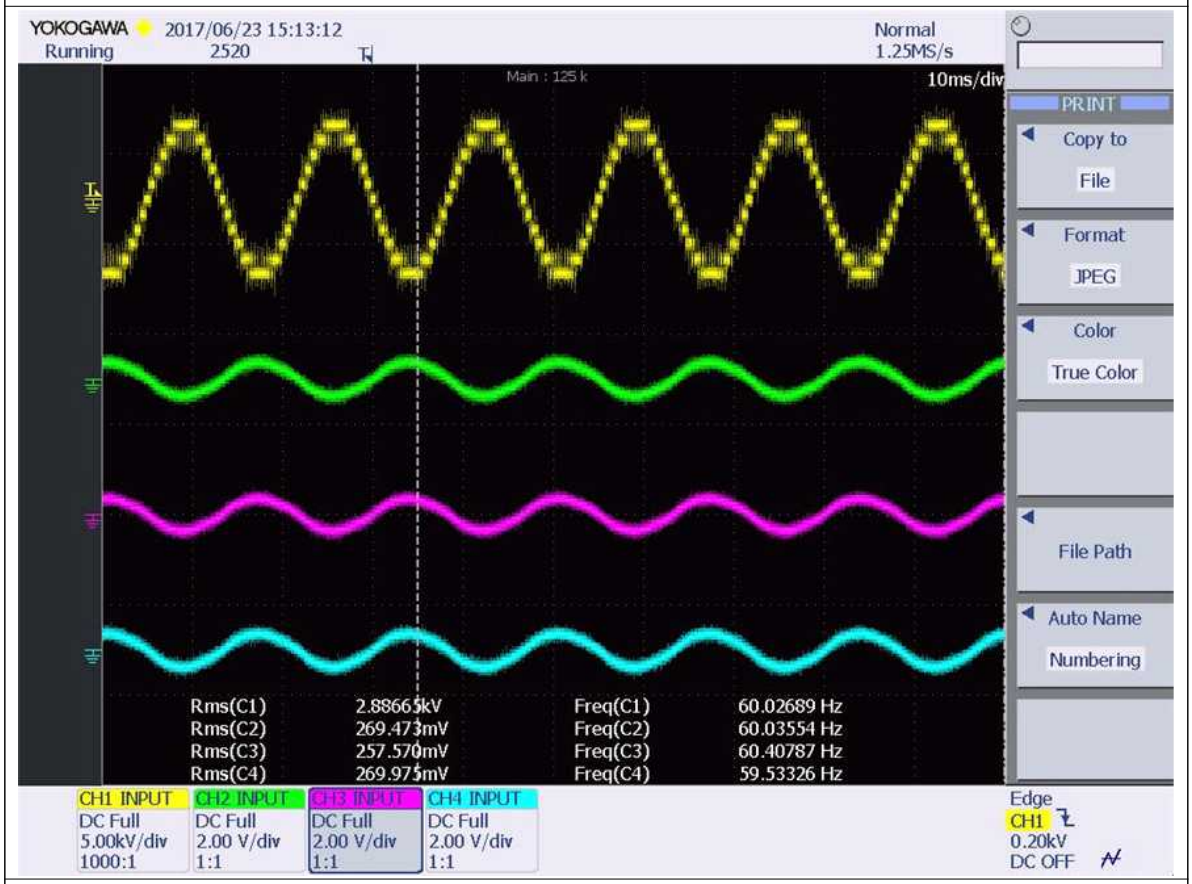


3000kW 방전 시

- 4.5MW 방전 동작확인

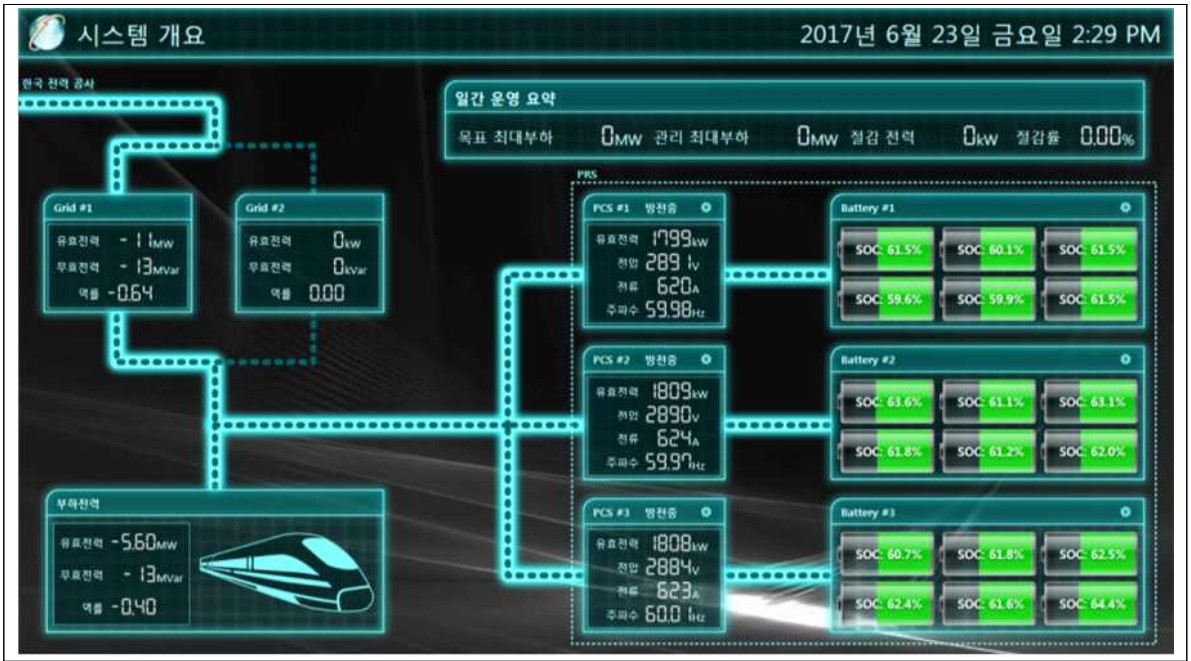


PMS 시스템 동작개요

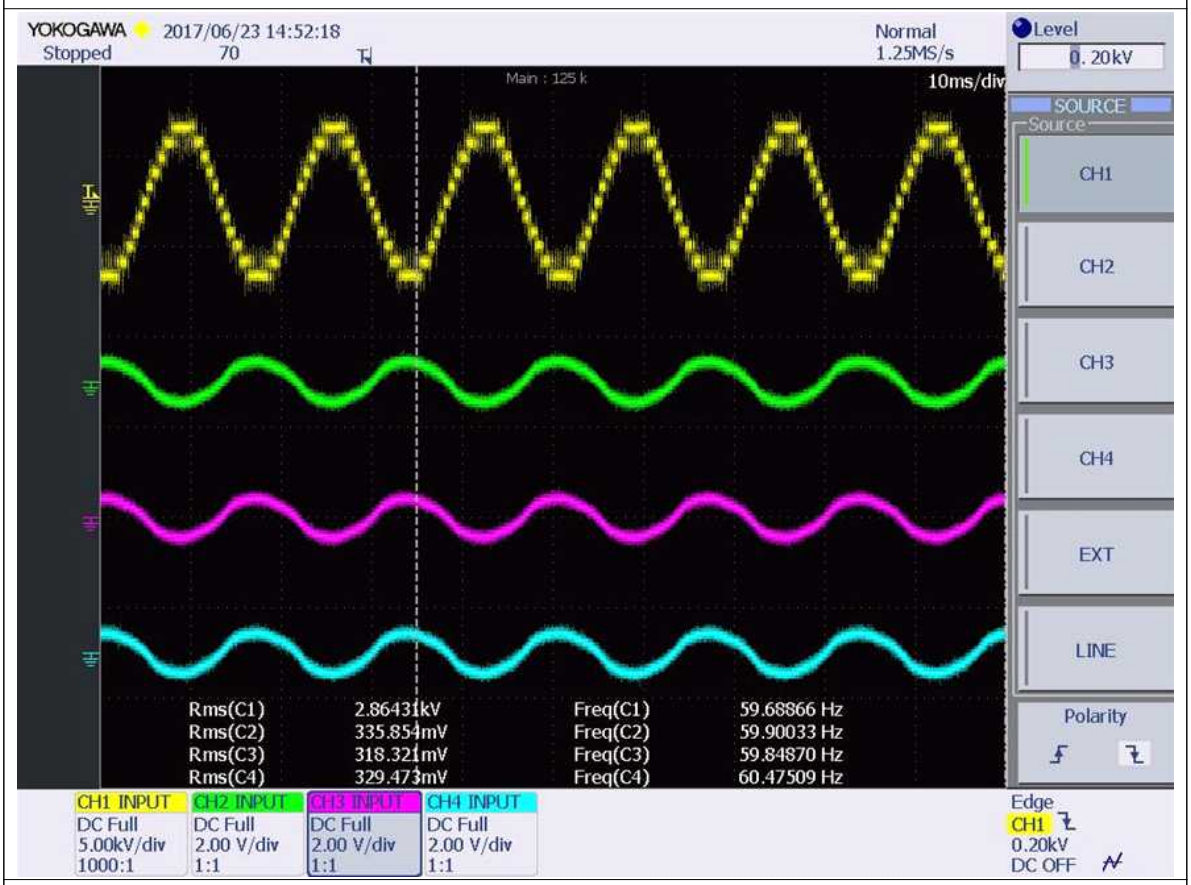


4500kW 방전 시

- 6.0MW 방전 동작확인



PMS 시스템 동작개요

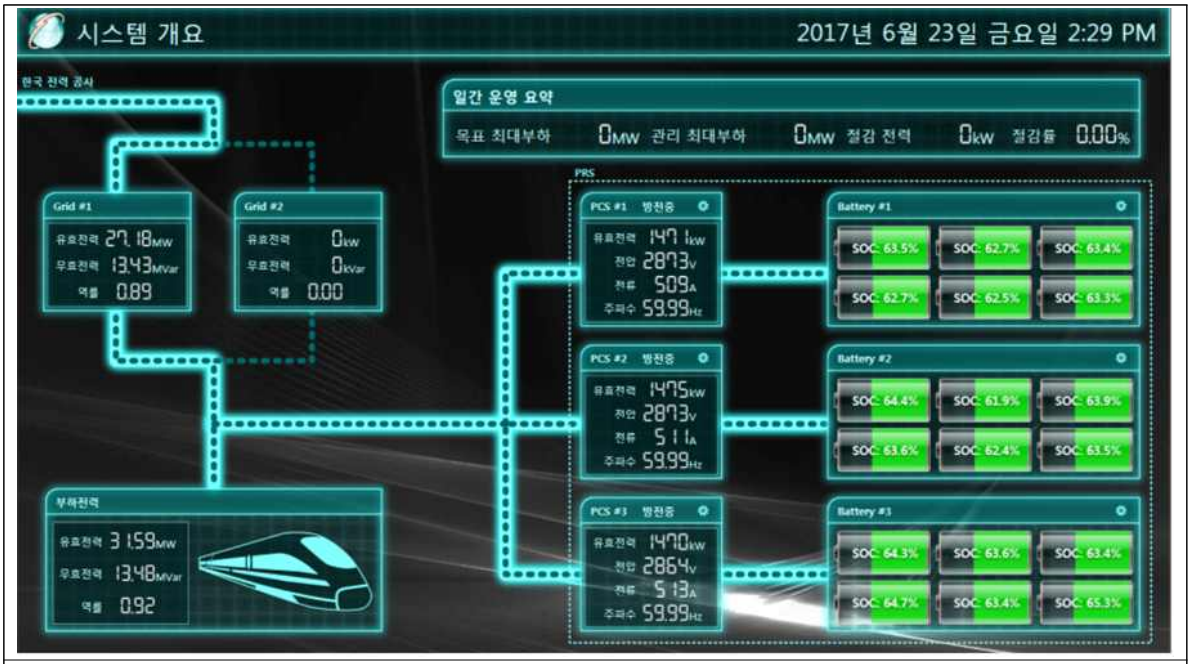


6000kW 방전 시

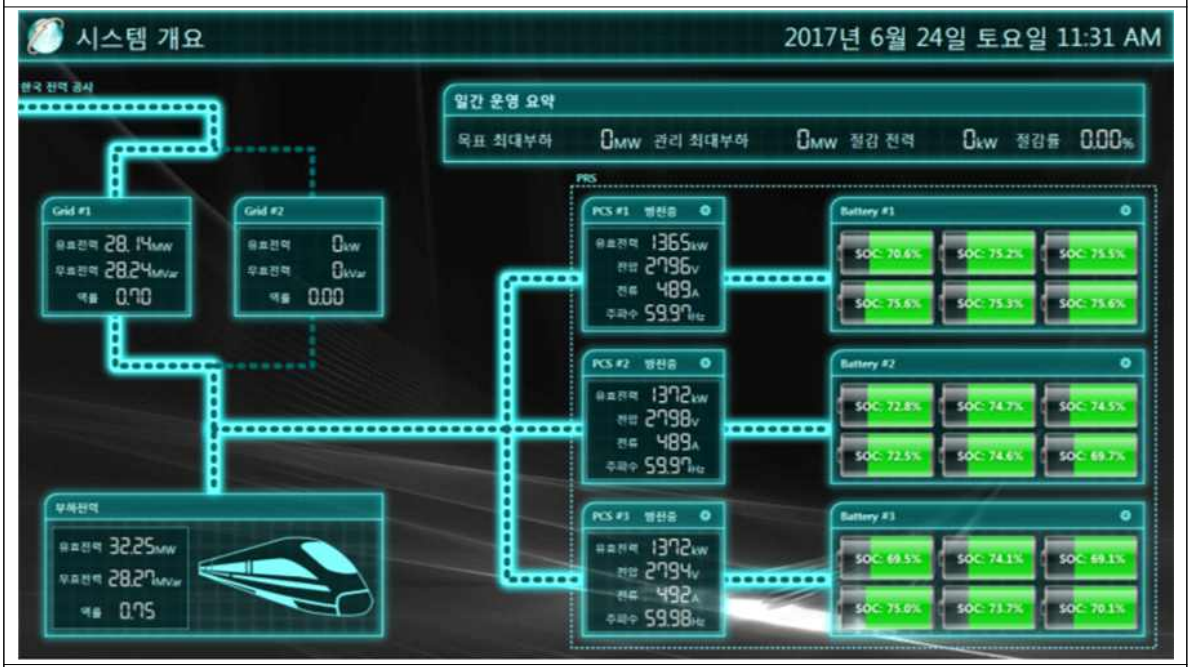
③ PCS운용에 따른 계통변전소의 공급전력 확인

피크전력이 발생 시 PCS를 강제 운용한 결과 변전소의 측정전력이 하기와 같이 변동하였을 확인하였다.

- 부하전력이 약 32MW 발생 시 PCS출력이 약 4 ~ 4.5MW공급함에 따라 변전소의 피크전력은 최대 28MW로 발생되고 있음을 확인 할 수 있다.



PMS 시스템 동작개요 : PCS출력 4,415kW



PMS 시스템 동작개요 : PCS출력 4,109kW

(4) PCS 밸런싱 모드 알고리즘 확인

멀티레벨 인버터인 PCS의 전력 밸런싱 모드 알고리즘은 RPR(Reference Period Rotation) 모드, ASS(Adapted Switching Select)모드로 출력된다.

① RPR Mode 시 출력 시험

RPR모드는 인버터 출력 지령값을 주기로 스위칭 패턴을 회전시켜 줌으로서 PCS와 연결된 각 뱅크의 SOC의 편차가 작은 경우 사용함으로서 각 배터리 뱅크의 전력을 균등하게 사용하기 위한 모드이다. RPR모드의 경우 특이사항이 없을 경우에 상시로 운용되는 모드로서 시험 시 RPR모드 동작상황에서 배터리의 뱅크별 SOC의 분포가 일정하게 유지됨을 확인하였다. (단, SOC 보정구간에서는 편차가 발생되어 ASS모드로 전환되었다.)

RPR 모드출력 : 충전 시

RPR 모드출력 : 방전 시

② ASS Mode 시 출력 시험

ASS모드의 경우에는 배터리 뱅크의 SOC 편차가 크게 분포되는 경우 사용되는 모드로 SOC의 분포에 따라 전력을 재분배하여 운용하는 모드이다. ASS모드의 경우 정상운용모드에서는 거의 사용되지 않으며, 비상상황에서 주로 사용된다. RPR모드와 ASS모드 전환을 확인하기 위하여, ASS모드 전환 SOC편차 설정은 1%에서 동작되고, 0.5%에서 해지되도록 설정하였다. 실제 운용 시에는 SOC오차 범위를 감안하여 7%설정, 2%해지 조건이 반영된다.

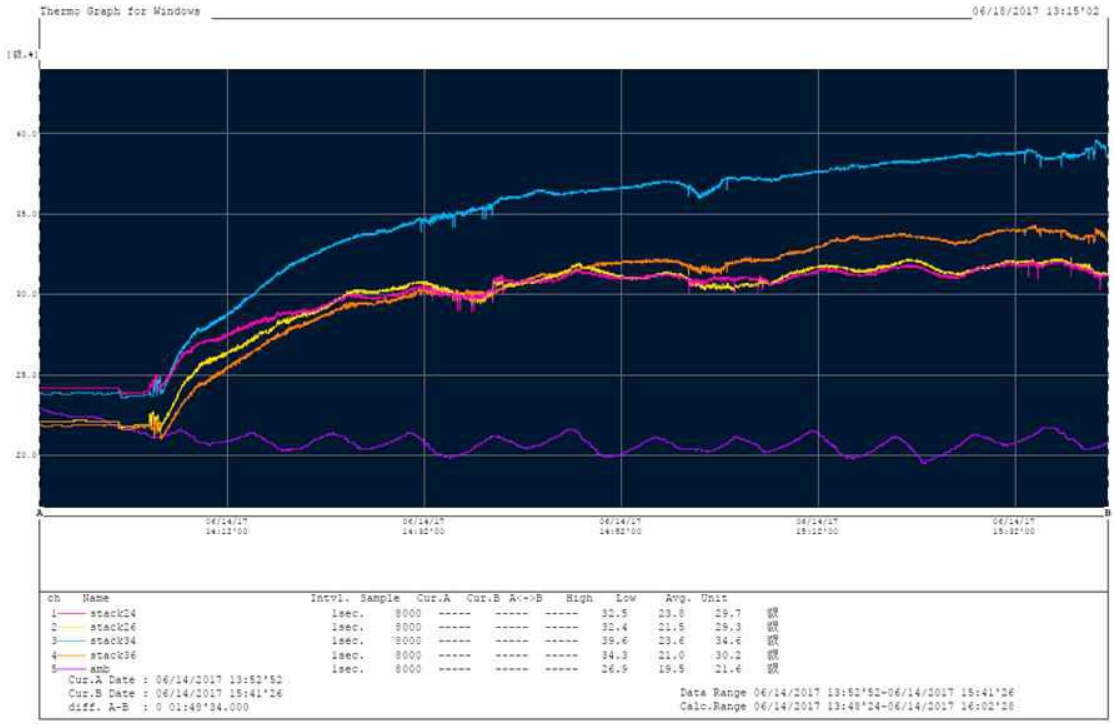
시험결과 충전, 방전 시 SOC편차에 대하여 각 뱅크의 출력전류의 비율을 다르게 하여 운용하고 있음을 확이 하였고, 또한 0.5%에서 RPR모드로 복귀하여 정상운용됨을 확인하였다.

ASS 모드출력 : 충전 시

ASS 모드출력 : 방전 시

(5) PCS 온도포화 시험

① 500kW 충전/방전 시 온도포화시험



온도포화시험 : 500kW 충전/방전 시

② 2000kW 충전/방전 시 온도포화시험

온도포화시험 : 2000kW 충전/방전 시

마. 피크전력저감 알고리즘에 따른 시스템 운용 시험

전기연구원에서 개발한 피크전력저감 알고리즘에 따른 전체 피크전력저감 시스템의 성능 검증하기 위하여 하기와 같이 시험을 진행하였다.

(1) 피크전력저감 알고리즘 연동 시험

전기연구원에서 개발된 피크전력저감 알고리즘은 한국전력공사에서 제공되는 울산변전소의 전력사용데이터와 KTX 운행패턴 등을 분석하여 매일 00:00을 기점으로 그 날의 피크전력저감장치의 운용 스케줄 패턴을 만들어 주는 알고리즘이다. 이 알고리즘에 의한 스케줄 패턴은 IDC센터에 설치되어 있는 서버를 통하여 울산변전소에 PMS로 전송되고, PMS는 전달된 스케줄러와 운영자의 강제충전조건을 고려하여 PRS로 운전지령을 전송한다.

피크전력저감 알고리즘에 따른 시스템 운용시험

◉ 시험방법 (모든 설비는 원격으로 자동운전 될 수 있도록 설정)

- 배터리 컨테이너 #1 ~ #3의 BMS전원을 모두 ON하고, 공조설비 및 소방설비를 컨테이너 환경에 따라 자동운전 될 수 있도록 설정
- PCS#1 ~ #3의 MMI에서 Remote로 설정 후 Start 스위치 ON / EB 스위치 해지
- PMS의 제어판에 시스템 운영모드를 스케줄 기반 통합 운영으로 선택
- PMS의 수동 충/방전 스케줄 관리에서 06:00 ~ 08:30 2400kW로 강제충전 될 수 있도록 설정 (cf. 00:00 ~ 06:00 : 시운전 기간동안 PRS 운전 정지시간)

◉ 시험결과 취득방법

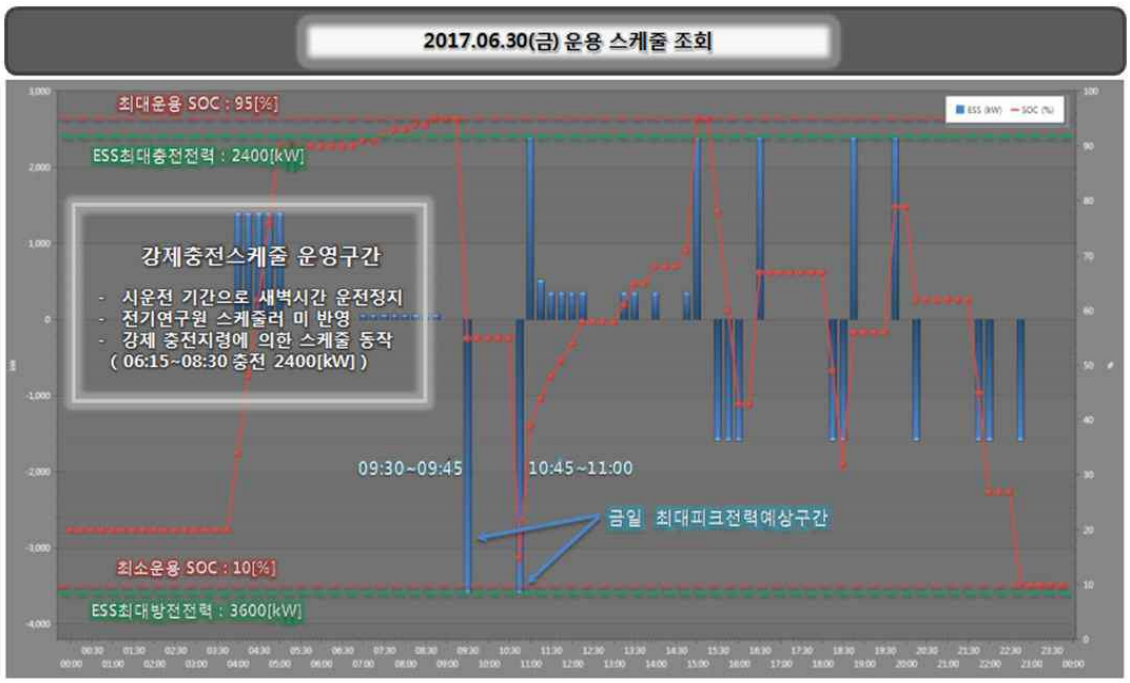
시험결과는 PMS의 각 창을 통하여 취득한다.

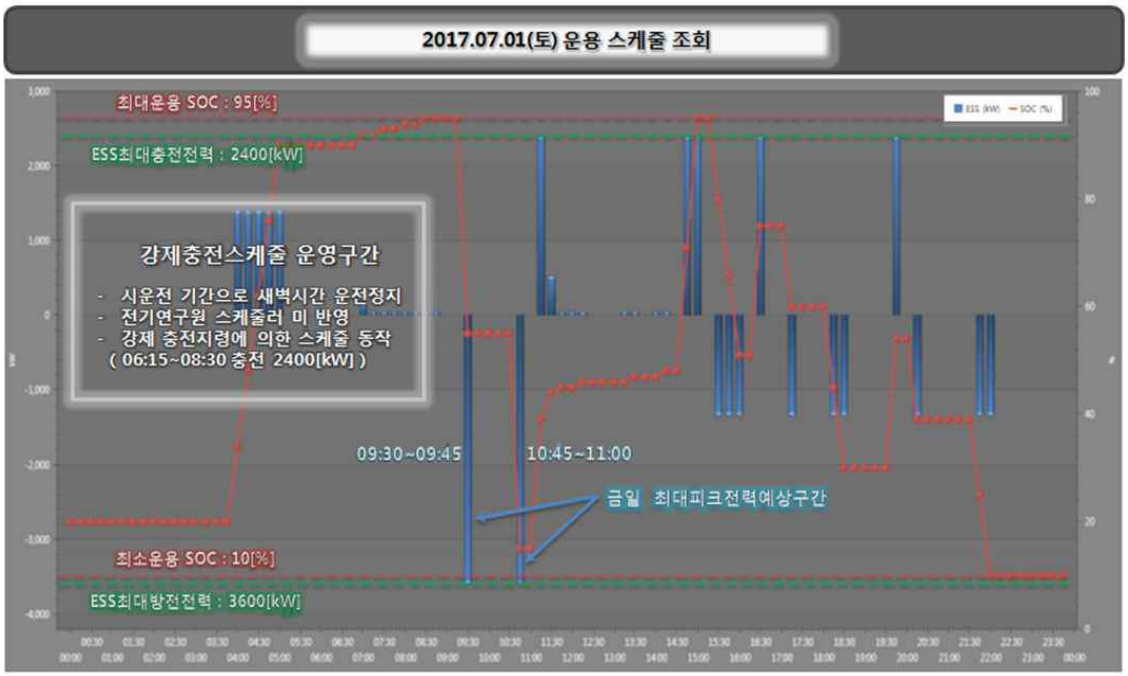
- 운영 스케줄 조회: 당일 운전패턴 분석
- ESS 운영 분석 : 전기연구원의 운용 스케줄과 실제 PCS의 출력 비교분석
- 시스템 운영상황 : 스케줄에 의한 PRS 운전에 따른 당일 출력결과 분석
- 시운전 기간 중 가장 큰 부하분포를 가지는 금요일, 토요일 데이터를 분석

(2) 피크전력저감 알고리즘 연동 시험 결과분석

1) 운용스케줄조회 분석

PMS에서 조회한 하기의 PRS 운영 스케줄러는 전기연구원 피크전력저감 알고리즘에 의한 스케줄러로서 IDC센터에서 전송된 데이터이다. 스케줄러의 강제충전 스케줄 운영구간은 시운전 기간에만 운용되는 구간으로 상시운전 시에는 기존 전기연구원 스케줄러에 의해 동작된다. 스케줄러에서 보는 것과 같이 배터리의 SOC 10~95[%]에 해당하는 운전범위에서 운용된다. 또한 하기의 금요일, 토요일의 경우 PRS의 최대방전전력은 3600[kW]이고, 최대충전전력은 2400[kW]로 운용된다. 예상 발생 피크전력은 09:30부터 09:45 사이, 그리고 10:45부터 11:00 사이에 발생할 것으로 알고리즘은 예측하고 있다.





2) PRS운영 분석

PRS운영 분석은 스케줄러에 의한 PRS의 충전, 방전 전력 지령값에 대한 실제 PRS의 출력을 비교와 스케줄러 동작에 의한 배터리의 SOC예측과 실제 SOC의 값을 비교 분석하기 위한 것이다. 시험 분석 결과에 각 글상자는 다음과 같은 원인에 의해 발생된 이벤트를 표기한 것이다.

① 충전 시 스케줄러의 지령값과 실제 출력 편차가 발생하는 경우 (붉은색 글상자)

충전 시 스케줄러의 지령값과 실제 출력 간 편차는 배터리를 관리하는 BMS의 다단충전 알고리즘에 의해 발생된다. 하기의 표는 SOC에 따른 BMS의 충전전류 제한값을 확인한 결과이다.

	SOC	충전전력제한값
배터리 관리를 하는 BMS는 여러 가지 배터리 주변에 상황에 따라 배터리 운용가능 전력의 제한치를 PCS에 전송하고, PCS는 PMS의 지령값에 대하여 제한값을 반영하여 출력한다. **(우측에 SOC에 따른 충전전력 제한값은 현장 시험을 통하여 확인한 결과로 참고치 이다.)**	약 60% ~	약 2100 [kW]
	약 70% ~	약 1500 [kW]
	약 80% ~	약 750 [kW]
	약 90% ~	약 375 [kW]

② 방전 시 스케줄러의 지령값과 실제 출력 편차가 발생하는 경우 (파란색 글상자)

방전 시 각 PCS는 6개의 분리된 배터리 뱅크의 SOC를 관리하기 위하여 균등하게 배터리 뱅크의 전력을 이용하는 RPR모드 동작하게 된다.(RPR모드에서 SOC보정연산이 없는 경우 각 뱅크는 2[%]이하의 편차로 운용된다.) 하지만 어떠한 이유에서든 6개의 뱅크간 SOC의 편차가 7[%]이상 발생하게 되면, 비상 밸런싱 모드인 ASS모드로 동작시켜 배터리 뱅크의 전력의 차등을 두어 운용하도록 알고리즘이 반영되어 있다. ASS모드 시 각각의 배터리 뱅크는 서로 다른 전력으로 운용이 되고, 이때 안정적인 운용을 위하여 BMS에 의한 배터리 리미트 전류의 50% 전력(약 800kW ~ 1000kW)으로 운용시킨다. 만약 이렇게 줄어든 리미트 전력의 값이 지령치 보다 작은 경우에는 PCS가 지령값에 대하여 충분히 공급할 수 없게 된다.

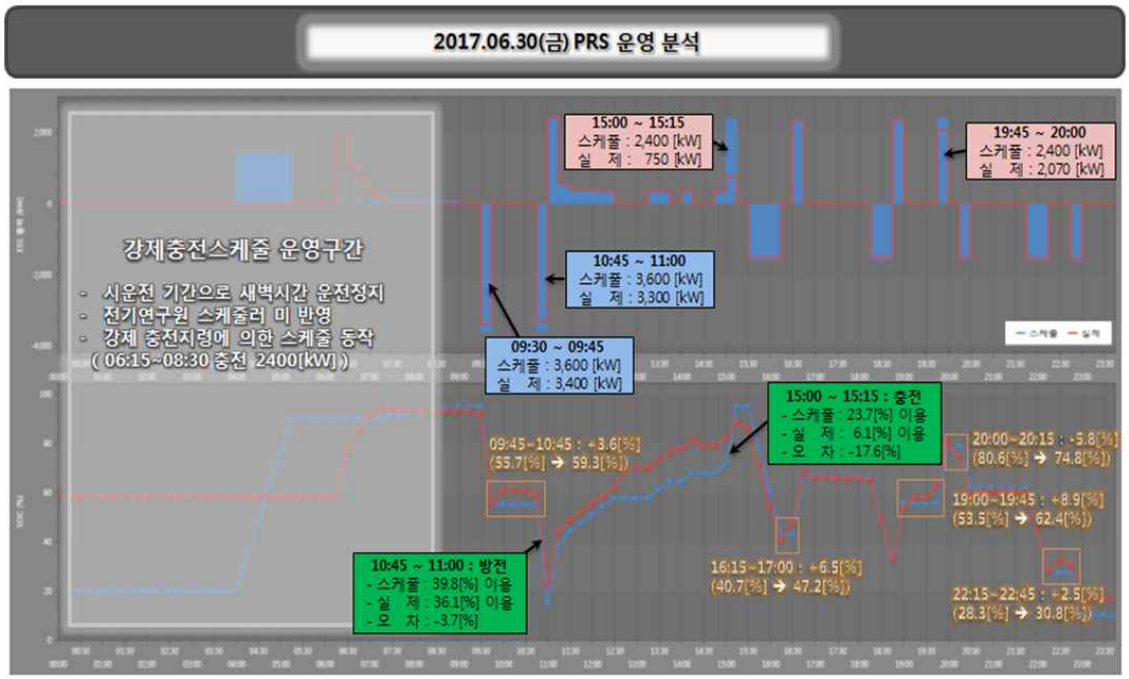
③ 충전/방전 시 스케줄러와 실제 SOC간 편차가 발생하는 경우 (초록색 글상자)

충전 시 스케줄러와의 SOC편차는 ①항의 BMS의 충전 전력 제한값에 의해 나타나고, 방전 시는 ②항의 PCS의 출력모드 변경에 의해 나타난다. 초록색 글상자는 이러한 이유에서 발생되는 스케줄러와 실제 SOC간 편차를 분석한 결과이다.

④ 휴지(Rest time) 시 스케줄러와 실제 SOC간 편차가 발생하는 경우 (노란색 글상자)

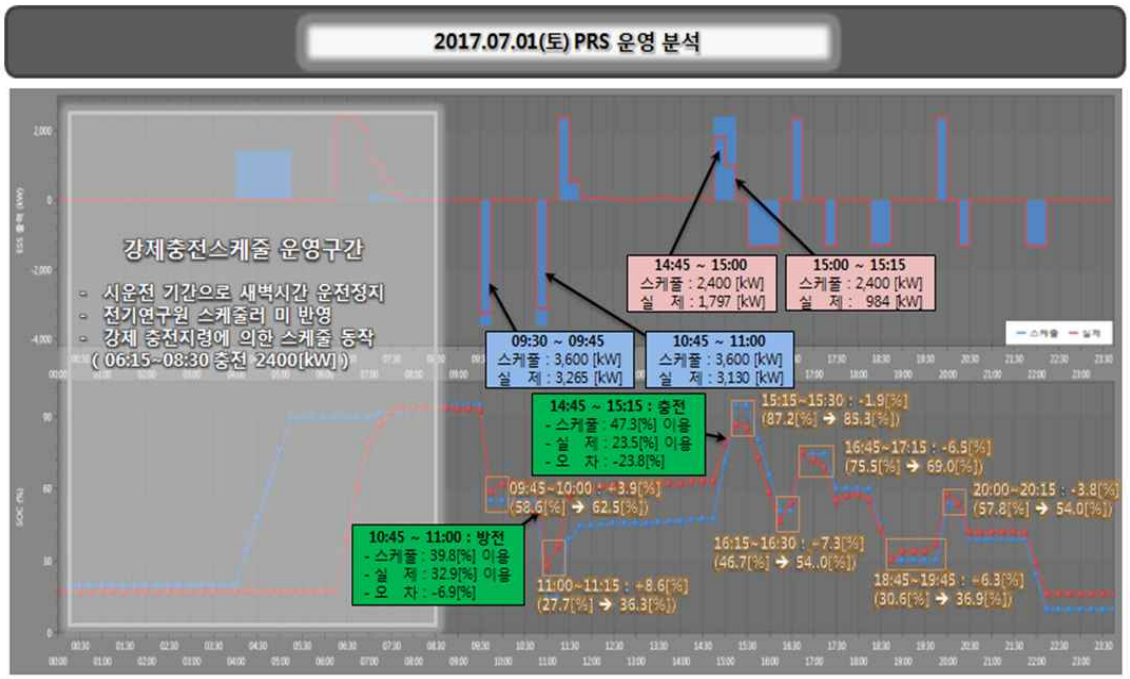
BMS는 배터리 휴지 시(충전/방전을 하지 않는 구간) 3분을 주기로 SOC 보정연산 기능을 수행한다.

- 금요일(17.06.30) PRS 운용 분석



시 간	이 벤 트	비 고
09:30 ~ 09:45	② 방전전력 편차발생	-200[kW]
09:45 ~ 10:45	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : +3.6[%]
10:45 ~ 11:00	② 방전전력 편차발생	-300[kW]
	③ 충/방전 시 SOC편차발생	배터리 3.7[%] 적게 방전
14:45 ~ 15:00	② 충전전력 편차발생	-1650[kW]
	③ 충/방전 시 SOC편차발생	배터리 17.6[%] 적게 충전
16:15 ~ 17:00	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : +6.5[%]
19:00 ~ 19:45	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : +8.9[%]
19:45 ~ 20:00	② 충전전력 편차발생	-330[kW]
20:00 ~ 20:15	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : -5.8[%]
22:15 ~ 22:45	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : +2.5[%]

- 토요일(17.07.01) PRS 운용 분석



시 간	이 벤 트	비 고
09:30 ~ 09:45	② 방전전력 편차발생	-335[kW]
09:45 ~ 10:00	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : +3.9[%]
10:45 ~ 11:00	② 방전전력 편차발생	-470[kW]
	③ 충/방전 시 SOC편차발생	배터리 6.9[%] 적게 방전
11:00 ~ 11:15	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : +8.6[%]
14:45 ~ 15:15	② 충전전력 편차발생	- 603[kW]
15:00 ~ 15:15	② 충전전력 편차발생	-1416[kW]
14:45 ~ 15:15	③ 충/방전 시 SOC편차발생	배터리 23.8[%] 적게 충전
15:15 ~ 15:30	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : -1.9[%]
16:15 ~ 16:30	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : +7.3[%]
16:45 ~ 17:15	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : -6.5[%]
18:45 ~ 19:45	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : +6.3[%]
20:00 ~ 20:15	④ 휴지 시 SOC 편차발생	SOC 보정 : -3.8[%]

PRS 운용데이터에서 보는 것과 같이 운용전력 지령값에 대하여 실제 출력값이 잘 추종되고 있음을 확인하였다. 몇 개의 구간에서 충전, 방전 전력 및 SOC의 스케줄과의 편차가 발생하는 것은 배터리의 SOC보정구간 및 리미트 운용구간에서 나타남을 확인하였다. 추후에 이러한 부분의 개선을 위해 보상 알고리즘이 반영되면 더욱 정밀하게 스케줄에 의한 PRS 응동이 될 것으로 사료된다.

3) 시스템 운영 상황 분석

시스템운영상황 분석은 울산변전소에서 PMS로 전송된 가선의 전력운용상황과 부하전력, 그리고 피크 전력 저감 장치의 운용상황을 취합하여 분석된 데이터이다. 피크전력저감 시스템은 변전소의 피크전력관리를 위한 EMS운용알고리즘과 이를 반영하여 운용하기 위한 단상 13레벨 전력변환장치의 개발이 주목적으로서 각각의 알고리즘 및 시스템개발에 대한 검증은 전기연구원과 우진산전에서 시뮬레이션과 실증시험을 통하여 검증하였다. 하기의 내용은 이렇게 검증된 두 시스템을 조합하여 운용한 결과를 보여주고 있다.

피크전력저감에 따른 금일 저감률 계산은 하기와 같이 계산된다.

$$f(n_{\max}) = \frac{S(n_{\max})}{P(n_{\max})} \times 100$$

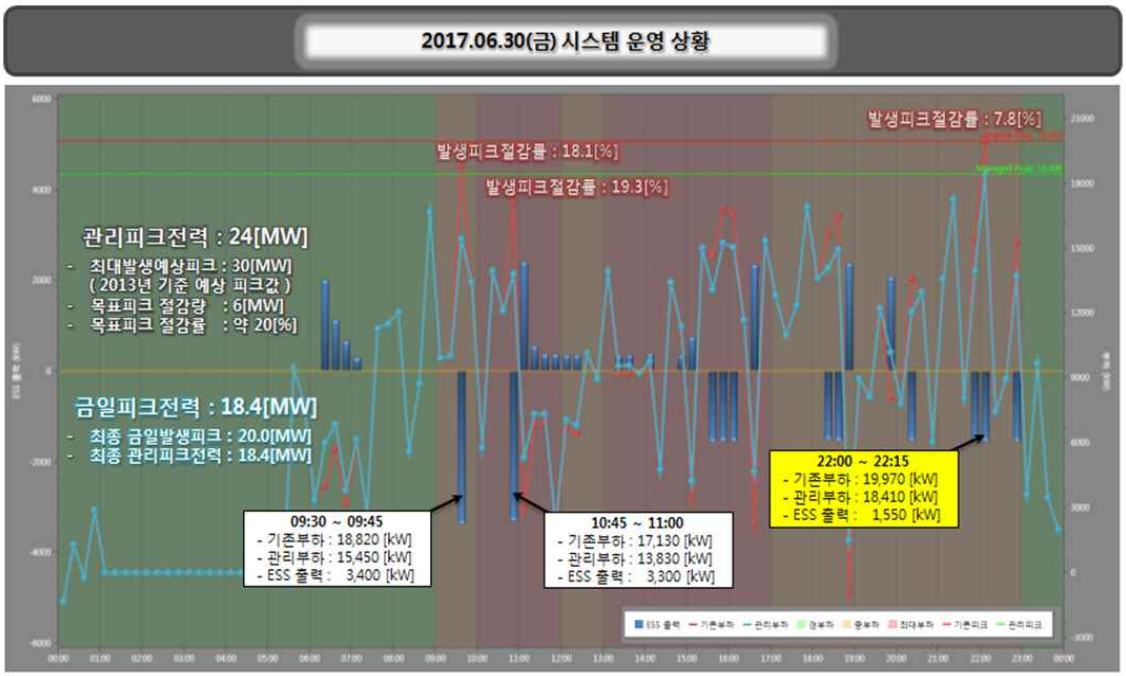
여기서, $n_{\max}$는 일일 15분단위 96개구간 중 최대 발생 피크전력 발생구간이고, $P(n_{\max})$는 최대 발생 피크전력 발생구간에서의 피크전력저감장치의 전력공급 전 발생예상전력, $S(n_{\max})$는 이때 피크전력저감장치에 의해 공급된 전력, $f(n_{\max})$는 최대 발생 피크전력에 따른 저감률이다.

또한 년간 피크전력저감장치의 운용저감률은 위 식에서 일일 96개구간이 아닌 한전의 피크전력관리 구간(약 6개월 : 7 ~ 9월 / 12 ~ 2월)에 대하여 $n_{\max}$가 반영되며, 관리목표피크는 전기연구원의 알고리즘에 의해 연산된다. 전기연구원의 관리목표피크는 전년데이터를 토대로 약 30[MW] 정도의 피크전력이 발생될 것으로 예측되고 있으며, 이에 따라 관리목표피크는 발생예상피크전력인 30[MW]의 20[%]수준인 24[MW]로 선정된다.

조합시험 시 EMS의 목표피크는 24MW로 선정하여 운용하였고, 최대 피크전력 발생이 일어나는 금요일, 토요일 부하에 대하여 운용한 결과를 분석하였다. 분석결과에서 알 수 있듯이 금요일, 토요일 피크전력이 피크전력저감장치가 운용됨에 따라 목표치인 24MW를 넘지 않고 관리되고 있음을 확인 할 수 있다. 이 결과는 년간 초기 목표피크 예상치인 20[%]내에서 운용되고 있고, 또한 일일 피크전력저감량은 위 계산식으로부터 금요일은 7.8[%], 토요일의 경우에는 12.7[%]로 관리되고 있음을 확인할 수 있다.

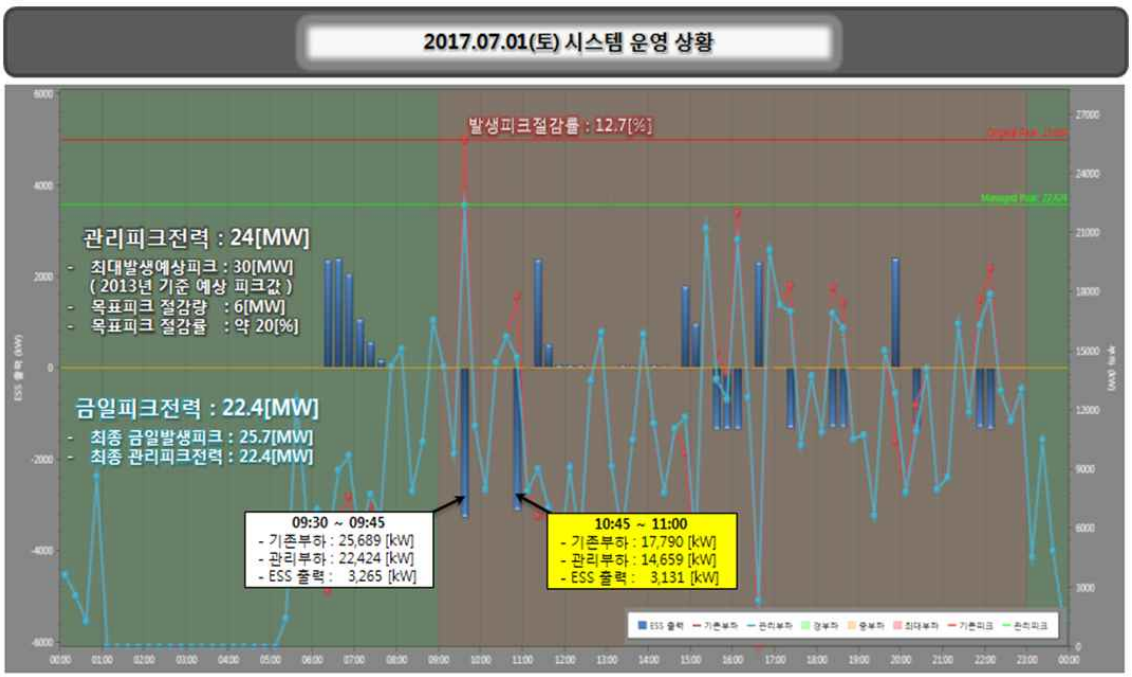
① 금요일(17.06.30) 시스템 운용 상황 분석

- 관리 전 피크전력 : 20.0 [MW]
- 관리 후 피크전력 : 18.4 [MW] / 목표피크치인 24[MW]를 넘지 않음



② 토요일(17.07.01) 시스템 운용 상황 분석

- 관리 전 피크전력 : 25.7 [MW]
- 관리 후 피크전력 : 22.4 [MW] / 목표피크치인 24[MW]를 넘지 않음



바. 실증시스템 운용효과 극대화 운전방안

실증운전을 위한 실제 ESS 용량이 당초 6MW/4MWh에서 60% 수준인 3.6MW/2.4MWh로 감소됨에 실증운전을 위한 ESS 운전방안 변경에 대한 검토내용을 간략히 기술하였다.

- 기본요금 산정시 중요한 하계(7월~9월), 동계(12월~2월) 피크전력을 살펴보면 2016년 하계기간 피크는 23,050kW(9월)로 낮은 수준이나, SRT 운행이 시작된 2016년 12월에는 32,010kW를 기록함. 이후 2017년 1월~2월 동안의 피크전력도 30,000kW 수준으로 발생하였고, 향후에도 동계기간에는 32,000kW~30,000kW 수준의 피크가 발생할 것으로 예상됨.

- 향후 발생될 것으로 예상되는 피크전력 수준과 ESS 정격용량을 고려할 때, 2017년 하계부터 연간 피크전력 목표치는 28,400kW~26,400kW 수준으로 설정하는 것이 합리적임.

- 2017년 3월부터 5월까지 피크전력 수준이 26,163kW~28,762kW이고, 향후에도 하계 및 동계를 제외한 나머지 기간에 비슷한 수준이 유지된다면, 결국 ESS를 이용하여 피크관리를 하지 않더라도 실제 피크가 목표치 이하로 유지될 가능성이 높음. 이는, 이 기간에 ESS를 이용하여 월 피크를 저감하였다 해도 실제 기본요금 계산시 요금적용전력 저감에 영향을 미치지 못함.

- 이러한 전제조건과 같을 경우, 실증운전 시 하계 및 동계기간에는 ESS를 이용하여 적극적으로 피크관리를 수행하고, 나머지 기간에는 피크관리 모드가 아닌 한전의 ESS 전기요금 할인제도에 맞추어 운영하는 것이 더 효율적임.

*출처) 한전 ESS 전기요금 할인제도 설명자료

그림 17. 한전 ESS 요금 할인제도

■ 한전 ESS 전기요금 할인제도는 2016년 4월 처음 시행되었고, 할인혜택을 더 확대하여 2017년 1월부터 개정시행하고 있음. 계시별 요금을 적용받는 일반용·산업용(갑)II, 일반용·산업용·교육용(을) 중 피크저감을 위해 ESS를 설치한 고객에 한해 전기요금을 추가로 할인해 주는 제도로서, 최대부하시간대에 ESS가 방전한 전력을 기준으로 기본요금을 할인해 주고 있음. 현 제도에서는 매일 고정된 충방전 계획을 통해 기본요금 할인을 받을 수 있음.

요금적용 ('17.1.1~'19.12.31)

구 간	개편 전	개편 후
경부하 충전전력량요금	10%할인	50%할인
기본요금	피크감축량*×기본요금단가	개편 전의 8배 할인

차등할인 ('17.1.1~'19.12.31)

계약전력대비 ESS 설비용량	5% 미만	5 ~ 10%	10% 초과
차등 적용	할인금액의 0.8배	할인금액의 1.0배	할인금액의 1.2배

*출처) 한전 ESS 전기요금 할인제도 설명자료

그림 18. 한전 ESS 전기요금 할인제도 개정 전후 비교

■ 결론적으로 실증시스템 운전방안은 다음과 같이 제안함.

- 동계기간에 30,000kW 이상의 피크가 발생하고 나머지 기간에는 대략 26,000kW~28,000kW 수준으로 피크가 발생하는 패턴이 유지된다면, 기간에 따라 운전모드를 변경하여 운영하는 것이 효율적임.
- 다만, SRT 정식운행이 지난 12월부터 시행되어 부하데이터가 충분하지 못한 상황을 고려할 때, 2018년 2월까지는 피크저감 운전을 지속시행하고, 그 후 부하패턴을 분석한 후 기간별 운전모드 변경 방식을 적용하는 것이 합리적이라고 판단됨.

  · 1단계 운영(~ 2018년 2월)
    : 피크저감 운전
  · 2단계 운영(2018년 3월 이후, 부하패턴 분석 후 최종결정)
    : 하계(7월~9월) 및 동계(12월~2월) 기간 : 피크저감 운전
    : 춘계(3월~6월) 및 추계(10월~11월) 기간 : ESS 할인제도 운전

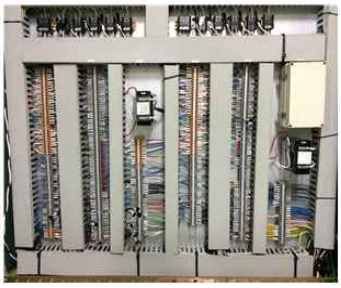
2. 능동형 고조파 저감장치

가. 현장 시험 준비 및 시스템 인터페이스 시험

(1) 현장 시험 준비

▹ 각 기기별 현장 설치 최종 점검 및 구성품 정상 상태 확인 시험 진행

- 신규 고조파 저감장치 각 기기별(PLC, 제어반, IGBT, ACL, ACB) 최종 점검
- 기존 / 신규 고조파 저감장치 인터페이스 라인 점검 및 보완

	
보완 전	보완 후

▹ 신규 고조파 저감장치 사전 시험 준비 및 점검

- PLC 반 점검 항목 및 내용
  - · 신/구 AHF설비 PT/CT입력 신호확인 및 Shot-bar 해제
  - · 스카다 연계소스 Common작업 (EPTCOM1/EPTCOM2/EPMCOM1/EPMCOM2)
  - · 신규 PLC반 온도메터/HMM 결선 및 설정확인
- 제어반 점검 항목 및 내용
  - · GIS 인터페이스 신호 확인
  - · 가선전압 및 부하단 전류(SumCT)입력확인
  - · 통신 인터페이스 확인 (GP모니터/IGBT반 IF)
- IGBT반 점검 항목 및 내용
  - · Vs(가선전압)신호 스케일 및 PLL제어기 튜닝
  - · Is(부하단전류)신호 스케일 및 PLL제어기 튜닝
  - · Vdc(DC-link전압) 신호확인 및 스케일 보정
  - · Iapf1~3(AHF 스택전류) 신호확인 및 스케일 보정
  - · 디지털 입/출력 인터페이스 확인
  - · 수냉각기 수위 및 누수 확인, 수냉각기 동작 상태 확인
- ACB/ACL반 점검 항목 및 내용
  - · PF필터 차단기(Q2) 개방
  - · PreCharger 동작시험(Q1-차단기는 투입상태 유지), ACB 동작 시험
  - · ACL 온도 디스플레이, 팬, 히터 동작 확인

(2) 시스템 인터페이스 시험

▹ 기존 AHF 장치 SCADA 연계 포인트(제어, 상태) 구성

- T좌 SCADA 연계 포인트(제어, 상태) 리스트 : M좌 동일

▹ SCADA 연계 포인트(제어, 상태) 확인 시험 : 야간 단전 시간 진행

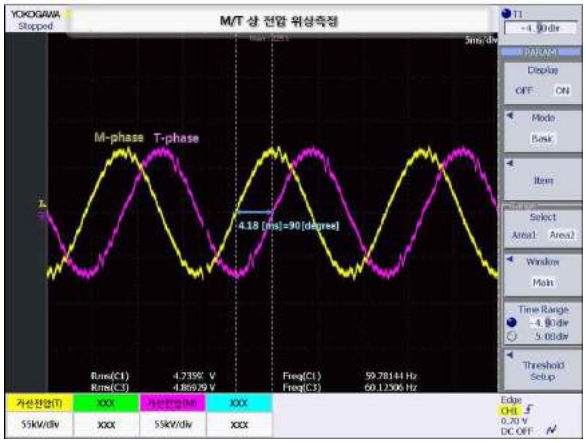
- T좌, M좌 각 상별 연계 포인트 확인 완료 및 미결선/오결선 라인 보완 완료

Core Name		num	Numbering	Description	TB Interface				SCADA 결선확인	Remarks
					PLC-New		PLC-Old			
T1	T:GCB-IF1 (10core-2.5sq)	1	110P_N		TB3P	(01)	TB2	(24)	O	
		2	89T1_N	89AFT1(T1단로기) 상태	TB3P	(04)	TB2	(23)	O	
		3	110P_N		TB3P	(05)	TB2	(26)	O	
		4	89T2_N	89AFT2(T2단로기) 상태	TB3P	(06)	TB2	(25)	O	
		5	110P_N		TB3P	(07)	TB2	(28)	O	
		6	52AFT_N	GCB 상태	TB3P	(08)	TB2	(27)	O	
		7	110P_N		TB3P	(09)	TB2	(30)	O	
		8	86AFT_N	GCB Fault : Lockout	TB3P	(10)	TB2	(29)	X	
		9								
		10								
T2	T:GCB-IF2 (10core-2.5sq)	1	110P_N		TB3P	(12)	TB1	(19)	X	구 PLC : F1411과 110P Common
		2	F1412_N	52F1 : Feeder1 GCB상태	TB3P	(13)	TB1	(20)	X	
		3	F2411_N	52F2 : Feeder2 GCB상태	TB3P	(14)	TB1	(21)	X	구 PLC : F1412와 F2411 Common
		4	F2412_N		TB3P	(15)	TB1	(22)	X	
		5	52TCL1_N	GCB- Closing Interlock	TB3P	(17)	TB2	(31)	X	
		6	52TCL2_N	GCB- Closing Interlock	TB3P	(18)	TB2	(33)	X	
		7	52TTP1_N	GCB-Trip	TB3P	(19)	TB2	(35)	X	구 PLC 미사용
		8	52TTP2_N	GCB-Trip	TB3P	(20)	TB2	(36)	X	구 PLC 미사용
		9								
		10								
T3	T:HTR-IF (10core-2.5sq)	1	110P_N		TB4P	(05)	TB1	(71)		
		2	T26A_N	26Q (Alarm) : HTR 온도	TB4P	(06)	TB1	(66)	O	
		3	T26T_N	26Q (Trip) : HTR 온도	TB4P	(08)	TB1	(62)	O	구 PLC : T63T로 인터페이스 됨
		4	T33A_N	33Q (Alarm) : HTR 유면검출	TB4P	(10)	TB1	(68)	O	
		5	T96A_N	96B (Alarm) : HTR 부츠홀츠	TB4P	(12)	TB1	(67)	O	
		6	T96T_N	96B (Trip) : HTR 부츠홀츠	TB4P	(14)	TB1	(64)	O	
		7	T63T_N	62T : HTR 유압고장	TB4P	(16)	TB1	(63)	O	구 PLC : T26T로 인터페이스 됨
		8	T63PU_N	63GP-U : HTR 유압(U)	TB4P	(18)	TB1	(69)	O	
		9	T63PV_N	63GP-V : HTR 유압(U)	TB4P	(20)	TB1	(70)	O	
		10								
T4	T:SCA-IF1 (10core-2.5sq)	1	SCT01_N	52SAFT1 : T1 ACB ON	TB5P	(01)	TB3	(18)	O	
		2	SCT02_N	52SAFT2 : T2 ACB ON	TB5P	(02)	TB3	(19)	O	
		3	SCT03_N	52SAFT3 : T3 ACB ON	TB5P	(03)	TB3	(20)	O	
		4	SCT04_N	HFT1 RUN : T1 AHF RUN	TB5P	(04)	TB2	(67)	O	
		5	SCT05_N	HFT2 RUN : T2 AHF RUN	TB5P	(05)	TB2	(68)	O	
		6	SCT06_N	HFT3 RUN : T3 AHF RUN	TB5P	(06)	TB2	(69)	O	
		7	SCT07_N	T1 PRECHAR ON	TB5P	(07)	TB2	(70)	O	구 PLC 미사용
		8	SCT08_N	T2 PRECHAR ON	TB5P	(08)	TB2	(71)	O	구 PLC 미사용
		9	SCT09_N	T3 PRECHAR ON	TB5P	(09)	TB2	(72)	O	구 PLC 미사용
		10	SCTCOM_N		TB5P	(10)	TB2	(65)		구 PLC-TB2(64) Scada SCTCOM 메인소스

(3) 가선 측 전압 및 부하전류 센서입력 확인

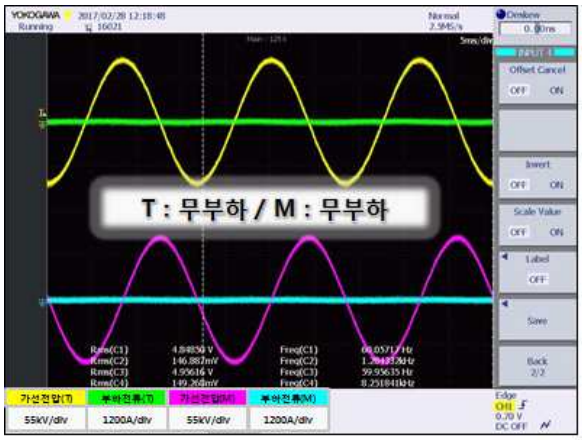
▹ M좌, T좌 전압확인

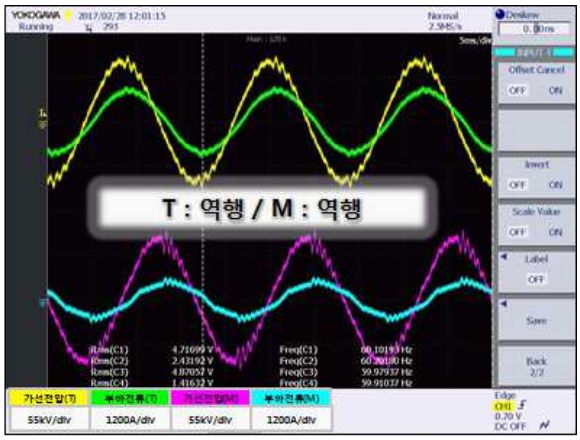
- 고속철도 변전소의 경우 한전으로부터 3상 154[kV]를 수전 받아, 스콧변압기의 스콧결선을 통하여 90도 위상차가 나는 단상 55[kV]를 만들어 이를 AT변압기를 통하여 가선에 공급
- 변전소의 TS측의 PT(M좌, T좌)를 통하여 고조파 저감 설비로 들어오는 센싱전압 확인

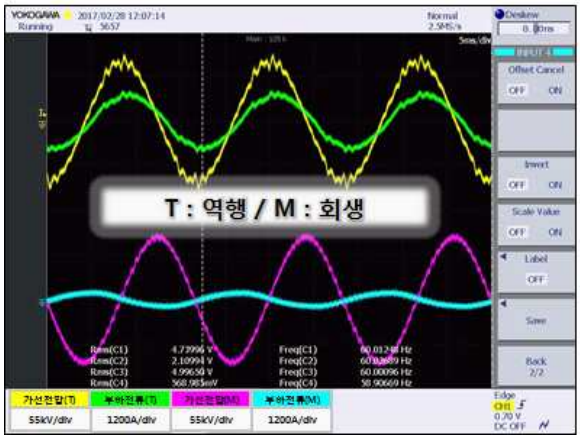


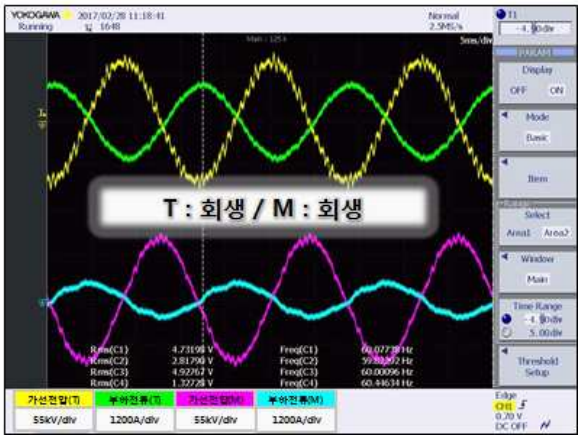
▹ M좌, T좌 전압 및 부하전류 확인

- 각 좌별 전압 센서 : AHF 변압기 1차측 센서사용 (55kV:110V)
- 부하전류 : Feeder1~4번 전류센서 사용 (1200A:5A)
  a. T좌 부하전류 : Feeder1, 2전류를 SumCT를 통하여 인출
  b. M좌 부하전류 : Feeder3, 4전류를 SumCT를 통하여 인출
  c. SumCT사양 (5A+5A:1A)
- 각 좌별 부하상태(역행/회생/타행)에 따른 상태확인







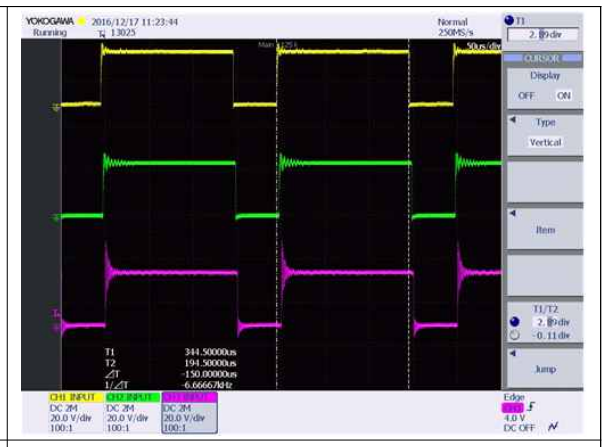


나. 신규 AHF 주회로 동작 시험

(1) IGBT반 PWM 출력시험

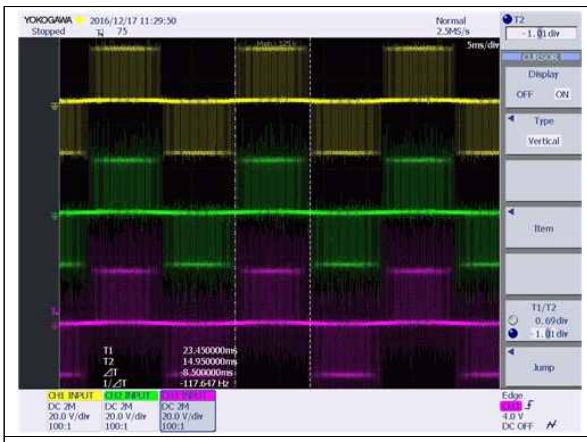
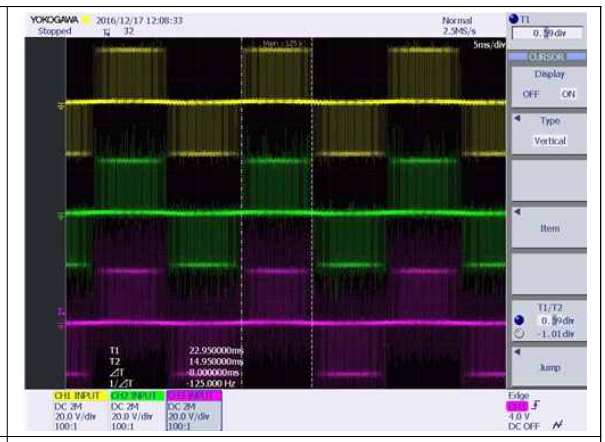
▹ DC Link Chopper PWM 출력시험

- 고조파 저감설비 운용에 따른 DC-link전압의 상승을 보호하고, 비상시 DC-link단을 방전시키는 용도로 활용
- 각 IGBT반 별로 3개의 Chopper Stack으로 구성되어 있으며, 전체 수량은 M좌/T좌 18set로 구성됨

	
Duty Ratio 출력 = 15% (30us)	Duty Ratio 출력 = 75% (150us)

▹ Inverter PWM 출력시험

- Inverter는 고조파를 저감하는 기능을 수행하는 유닛으로 DC-link단에 저압(24Vdc)인가 후 단상 선간전압 출력을 확인
- 각 IGBT반 별로 3개의 단상 Inverter Stack으로 구성되어 있으며, 전체 수량은 M좌/T좌 18set로 구성됨

	
T좌 Inverter Stack 출력확인	M좌 Inverter Stack 출력확인

(2) 기동 및 차단 시퀀스 시험

▹ ACB반의 초기충전회로 및 ACB투입 및 개방 시퀀스

- 기동 시퀀스 :

a. PLC반의 PLC를 통하여 AHF측 GIS, 단로기의 투입상태 및 계통 측 각 보호요소 체크후 각 제어반(M좌/T좌)으로 기동 준비신호 전송 : 하드와이어 인터페이스

b. 각 제어반은 기동 준비완료 신호 및 전면판넬 기동스위치 상태를 IGBT반으로 전송 : 통신 인터페이스

c. 각 IGBT반은 이를 인식하여, ACB반의 초기충전회로를 동작시킴

d. IGBT반에서는 초기충전회로 동작 후 DC-link전압이 450[Vdc]이상이면, ACB반의 ACB투입 신호를 전송하고, ACB는 투입

- 개방 시퀀스 :

a. 제어반의 기동스위치를 OFF하고, ES(Emergengy Stop)스위치를 인에이블 시킴

b. 제어반의 스위치 상태는 각 IGBT반으로 전송

c. 각 IGBT반은 이를 인식하여, ACB반의 ACB를 차단

d. ACB차단 후 IGBT반의 DC-link전압이 15V이하가 될 때까지 쵸퍼가 동작하여 방전 : 비상정지 스위치에 의한 쵸퍼 동작은 시비율 0.75로 방전

- 실험결과

→ PLC인식 및 보호요소 확인완료

→ 각 장치별 인터페이스 확인완료 : PLC반/제어반/IGBT반/ACB반

→ 초기충전회로에 의한 충전시간 : 16.3[s]

→ 쵸퍼동작에 의한 방전시간 : 17.1[s] (쵸퍼의 시비율 0.75인 경우)

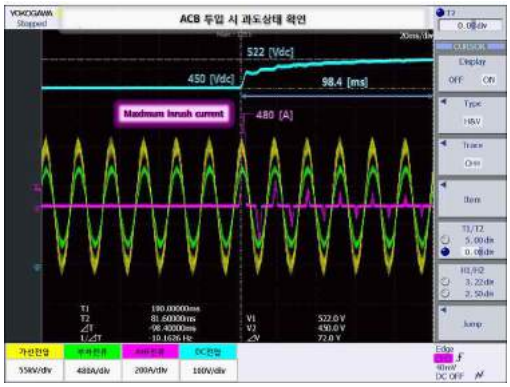
▹ ACB투입 시 DC-link 과도상태확인

- 초기 충전회로 동작 후 DC-link전압이 450[Vdc]가 되면 ACB가 투입되어 AC단의 정류전압이 유지가 됨

- 이 때 DC-link단의 과도상태 특성

: 정상상태 도달시간 : 98.4[ms]

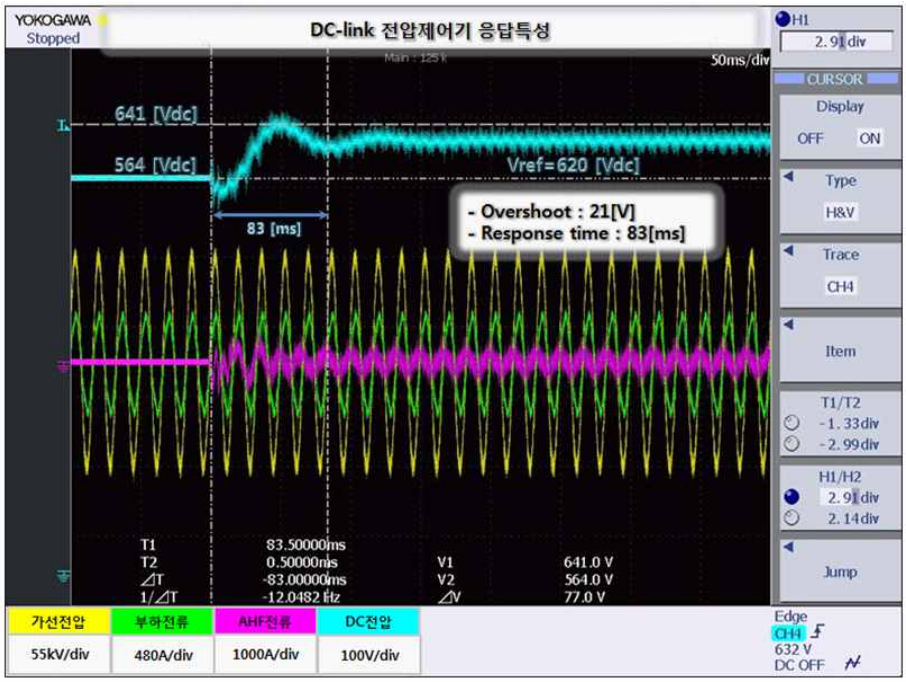
: AC단 과도상태 전류 : 단상 정류회로 전류 발생(최대 피크값 480[A])



(3) AHF 무부하 기동시험

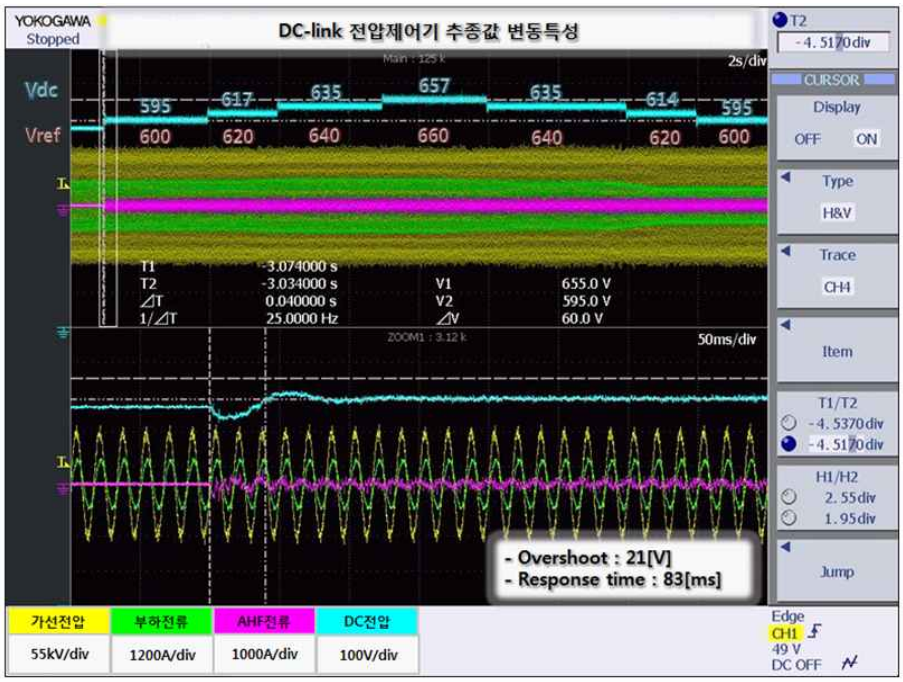
▹ AHF 무부하 기동에 따른 DC-link전압제어기 응답특성

- ACB투입 후 AHF를 기동 : 기동시 DC-link전압 지령값 620[Vdc]
- 응답특성 : 오버슈트 21[Vdc] / 응답속도 83[ms]



▹ DC-link전압제어기 추종값 변동에 따른 응답확인

- DC-link전압 추종값을 600~620Vdc로 상승/하강 시켰을 때 응답확인 (20V단위로 가변)
- 각 단계별 스텝응답에 대하여 정상동작 확인

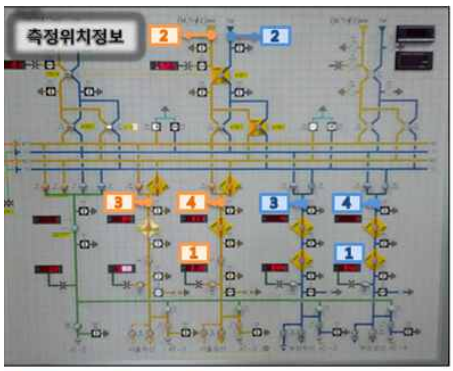


다. 신규 AHF 고조파 저감 시험

(1) 계측기 설치

▹ 계측장비 : 데베트론(전력분석), 오실로스코프(파형분석), 절연프르브 및 전류센서.

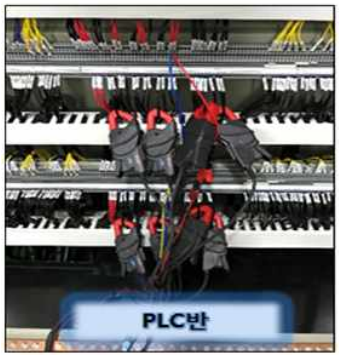
▹ 변전소 계측기 설치 : TS측과 각 Feeder라인의 전압, 전류를 측정



상	번호	측정 위치	단 자	스케일
M	1	52F3, CB 2차측 M상	PTT.20	55[kV]:110[V]
	2	52TS2, GCB 1차측 M상	CTT.26	1500[A]:5[A]
	3	52F3, GCB 1차측 M상	CTT.29	1200[A]:5[A]
	4	52F4, GCB 1차측 M상	CTT.30	1200[A]:5[A]
T	1	52F1, CB 2차측 T상	PTT.18	55[kV]:110[V]
	2	52TS2, GCB 1차측 T상	CTT.25	1500[A]:5[A]
	3	52F1, GCB 1차측 T상	CTT.27	1200[A]:5[A]
	4	52F2, GCB 1차측 T상	CTT.28	1200[A]:5[A]

▹ 신규 AHF실 계측기 설치

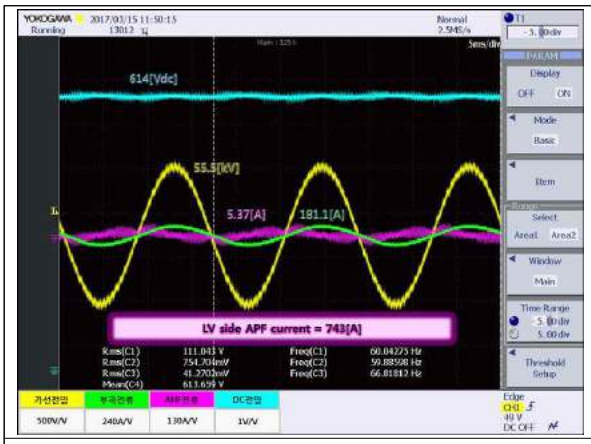
- 데베트론 : TS측과 Feeder측의 전력분석 및 비교
- 오실로스코프 : 가선측과 AHF장치의 전류파형 분석



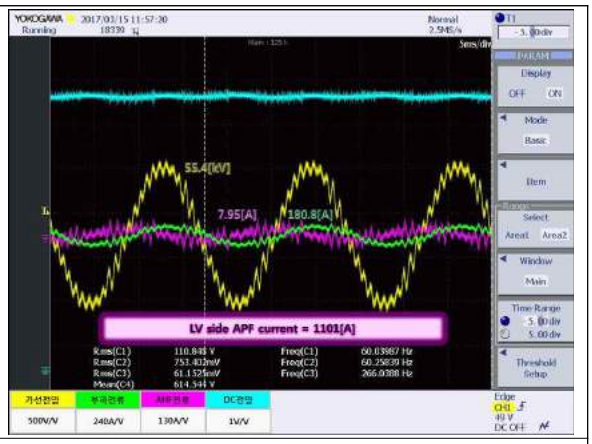
(2) 오실로스코프 측정결과

▹ 역행 시 분석결과 : 동일 역행부하전류 시 고조파 성분의 유무에 따른 AHF 출력분석

- 역행 시 각 부하전류에 대하여 AHF는 무효분 전류와 역고조파를 비례적으로 공급

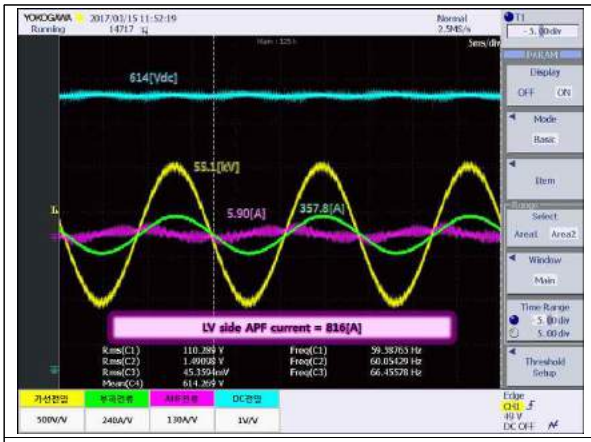


(a) 고조파 전류가 적은 경우

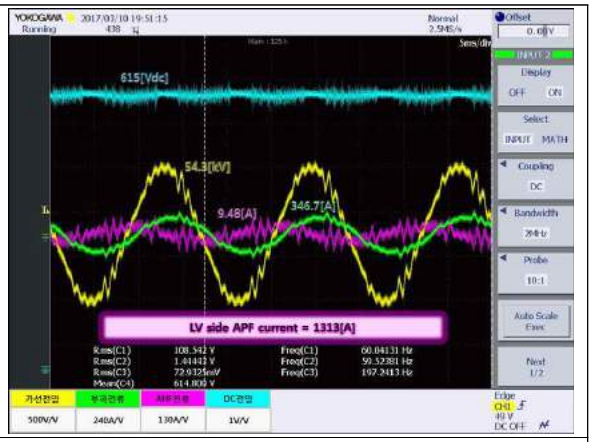


(b) 고조파 전류가 많은 경우

역행 시 180A부하 전류

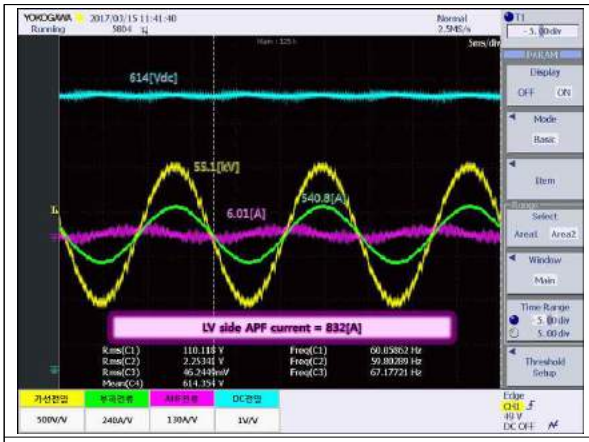


(a) 고조파 전류가 적은 경우

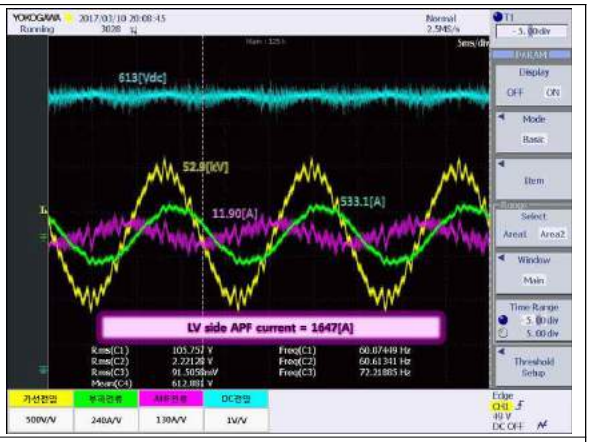


(b) 고조파 전류가 많은 경우

역행 시 350A부하 전류



(a) 고조파 전류가 적은 경우

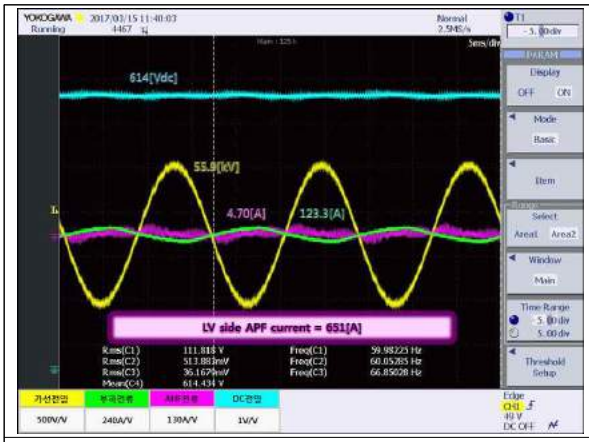


(b) 고조파 전류가 많은 경우

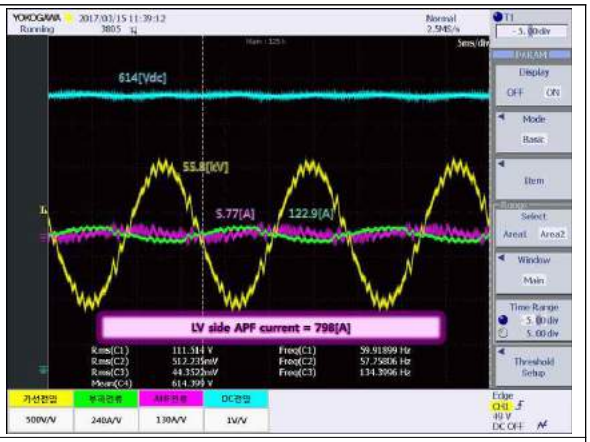
역행 시 540A부하 전류

▹ 회생 시 분석결과 : 동일 회생부하전류 시 고조파 성분의 유무에 따른 AHF 출력분석

- 회생 시 각 부하전류에 대하여 AHF는 무효분 전류와 역고조파를 비례적으로 공급

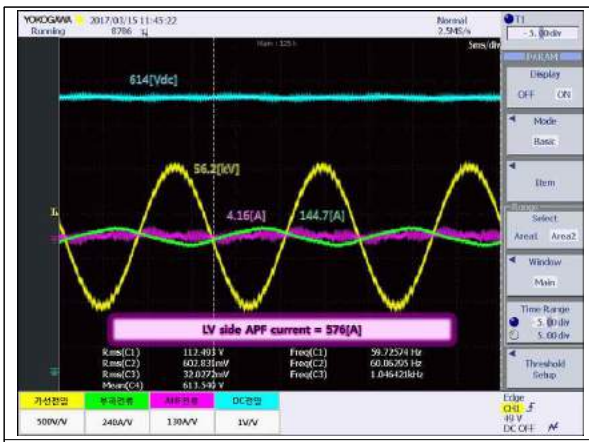


(a) 고조파 전류가 적은 경우

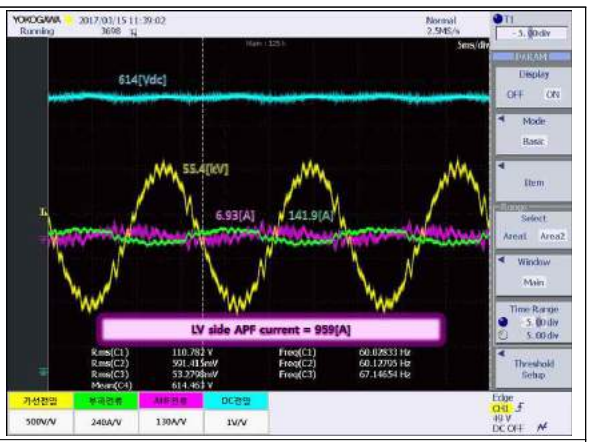


(b) 고조파 전류가 많은 경우

회생 시 120A부하 전류

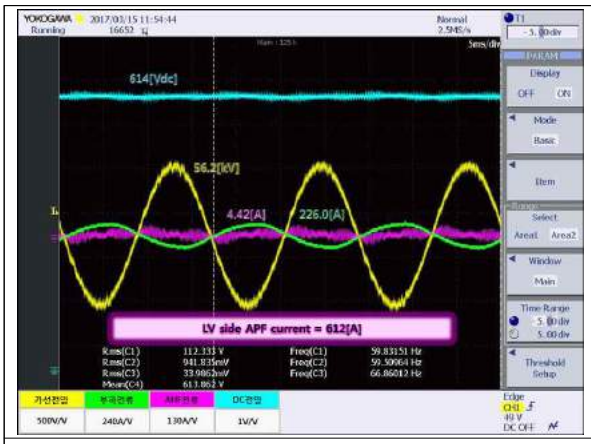


(a) 고조파 전류가 적은 경우

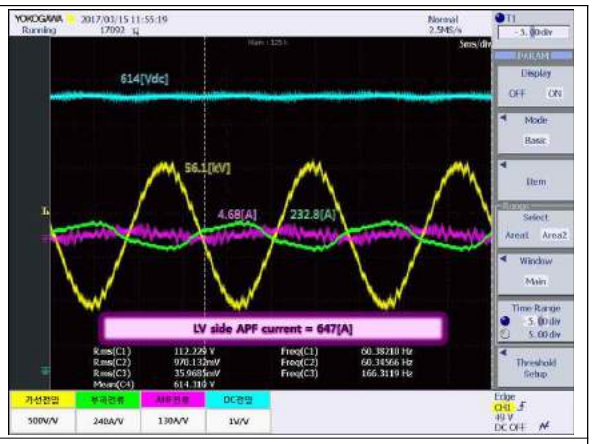


(b) 고조파 전류가 많은 경우

회생 시 140A부하 전류



(a) 고조파 전류가 적은 경우



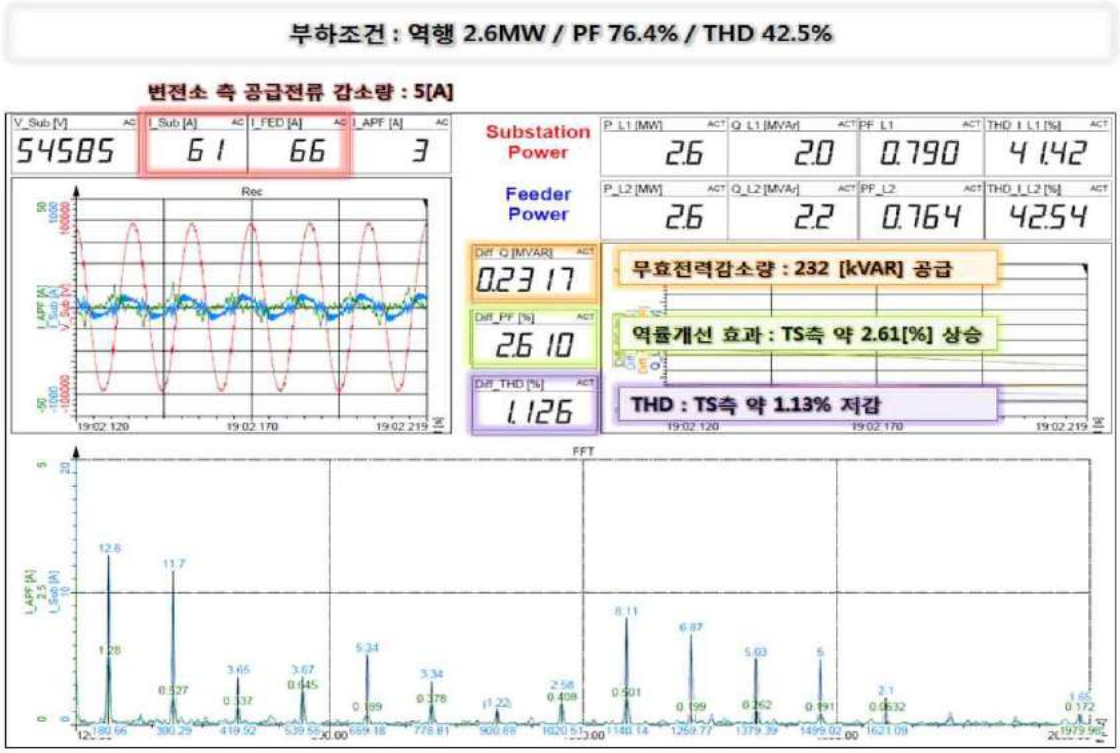
(b) 고조파 전류가 많은 경우

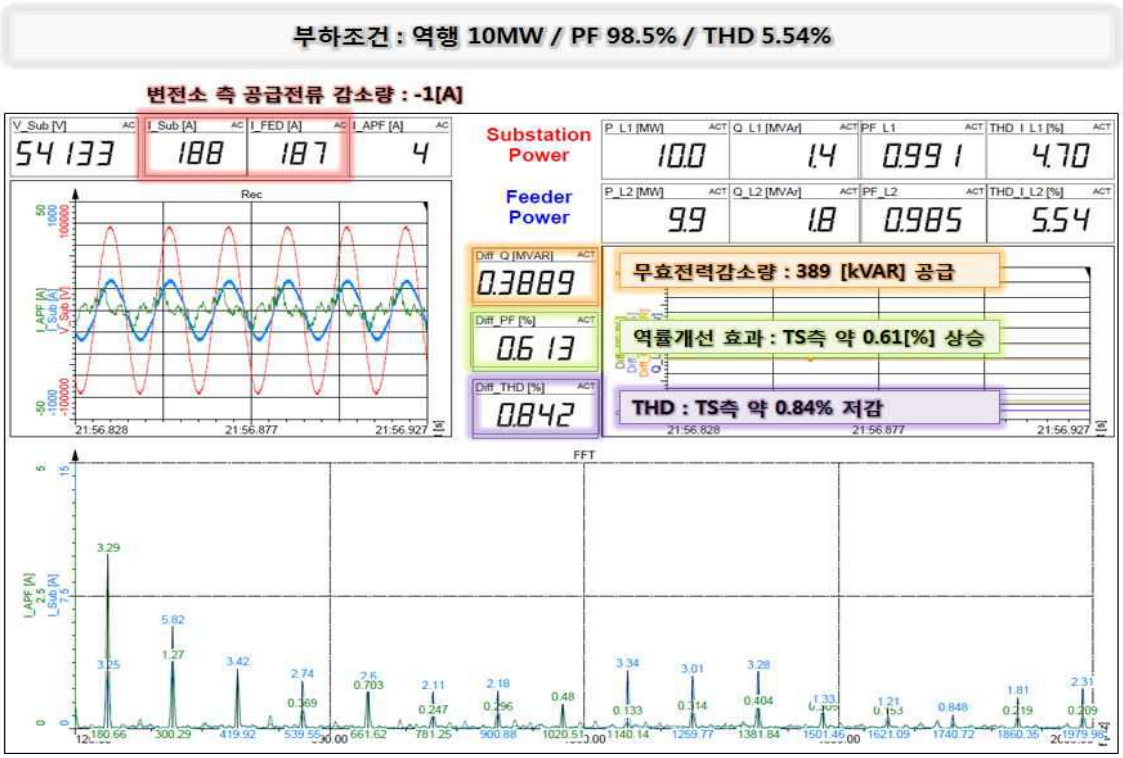
회생 시 230A부하 전류

(3) 데베트론(전력분석장치) 측정결과

▹ 역행 시 분석

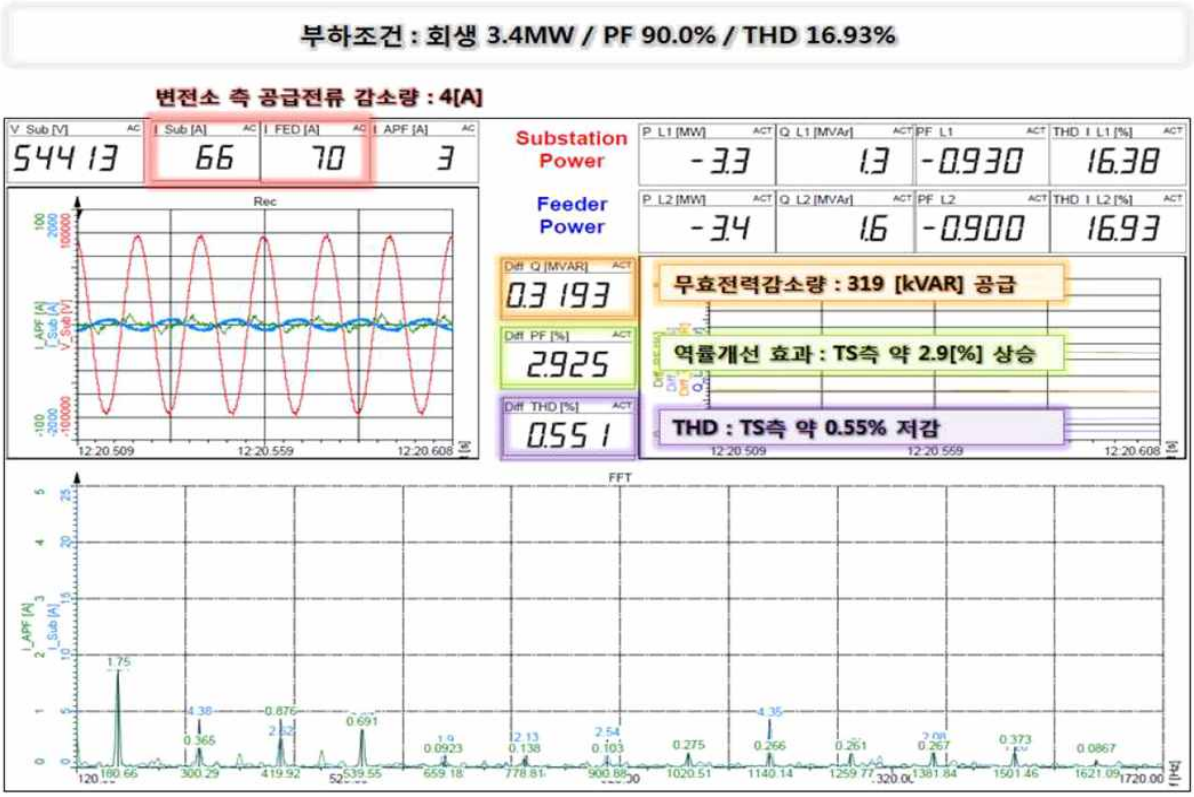
- 피상전력 저감에 따른 변전소 공급전류 감소확인
- 무효전력 저감량과 역률 개선효과 확인
- THD 및 차수별 고조파 분석

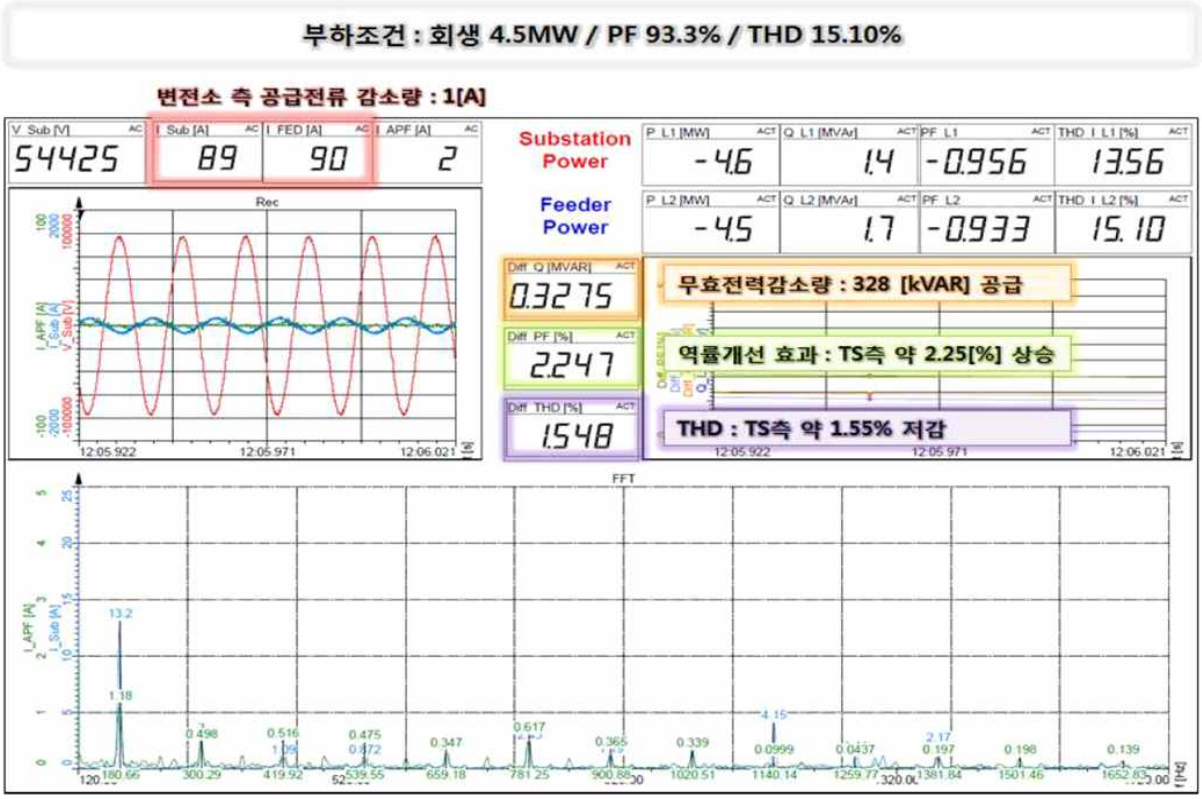




▹ 회생 시 분석

- 피상전력 저감에 따른 변전소 공급전류 감소확인
- 무효전력 저감량과 역률 개선효과 확인
- THD 및 차수별 고조파 분석



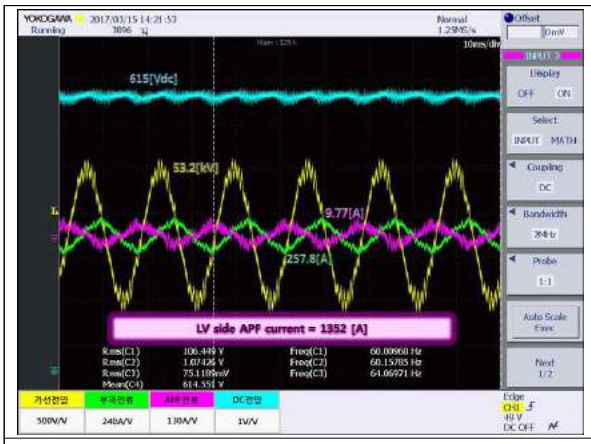


라. 신규 AHF 정상 운영

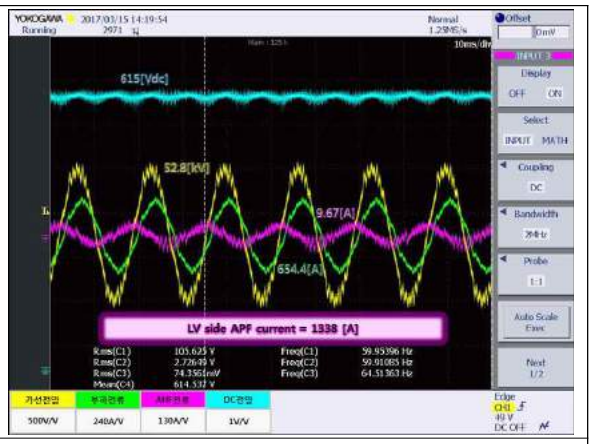
▹ 신규 AHF 정상 운영 및 운영 데이터 취득

- 오실로스코프와 전력분석장치를 통하여 운영 데이터 확보
- 장치 정상 운용을 통한 장치의 안정성 및 신뢰성 검증

AHF 정상운용 시 시험사진

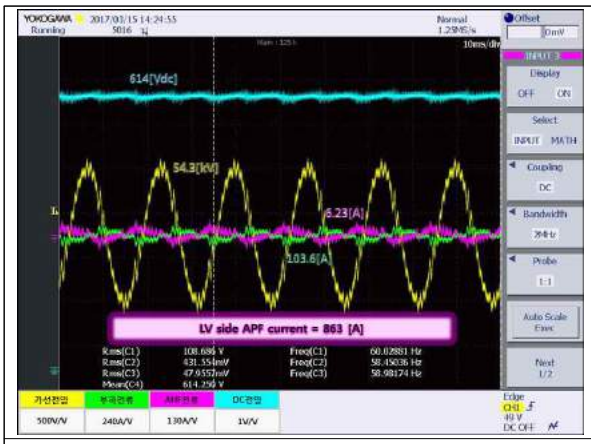


(a) 경부하 시

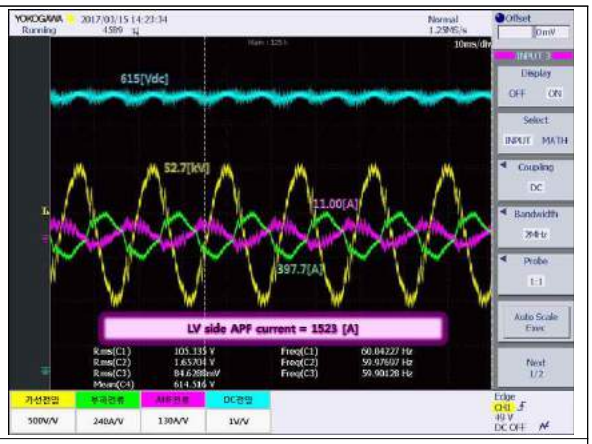


(b) 중부하 시

역행 부하 시 조건에 따른 특성



(a) 경부하 시

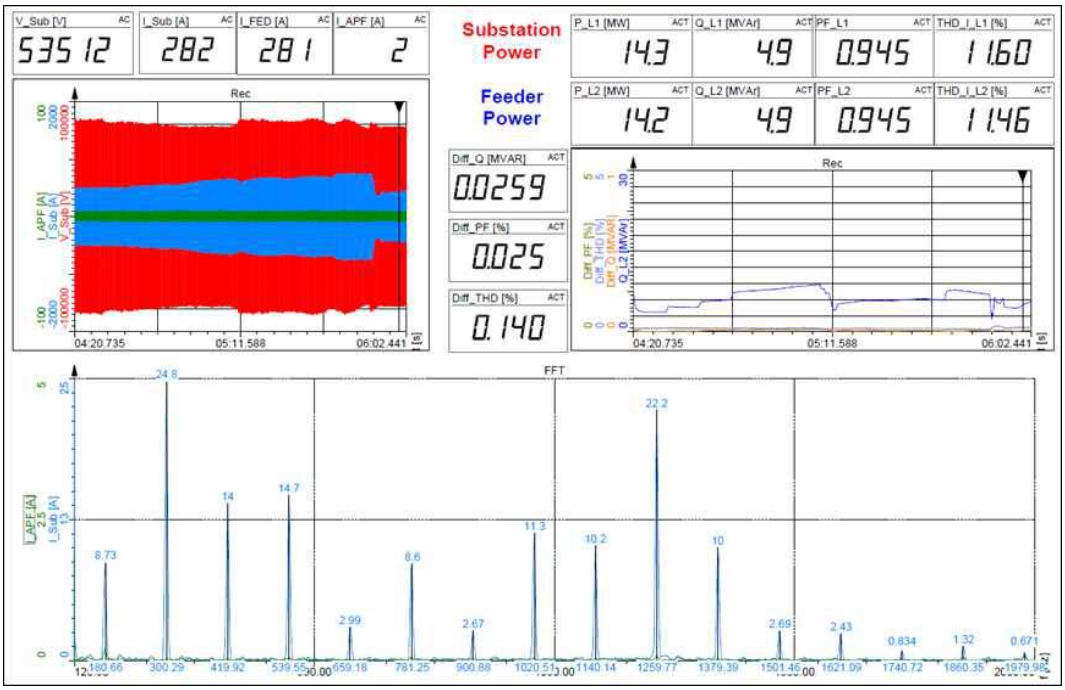


(b) 중부하 시

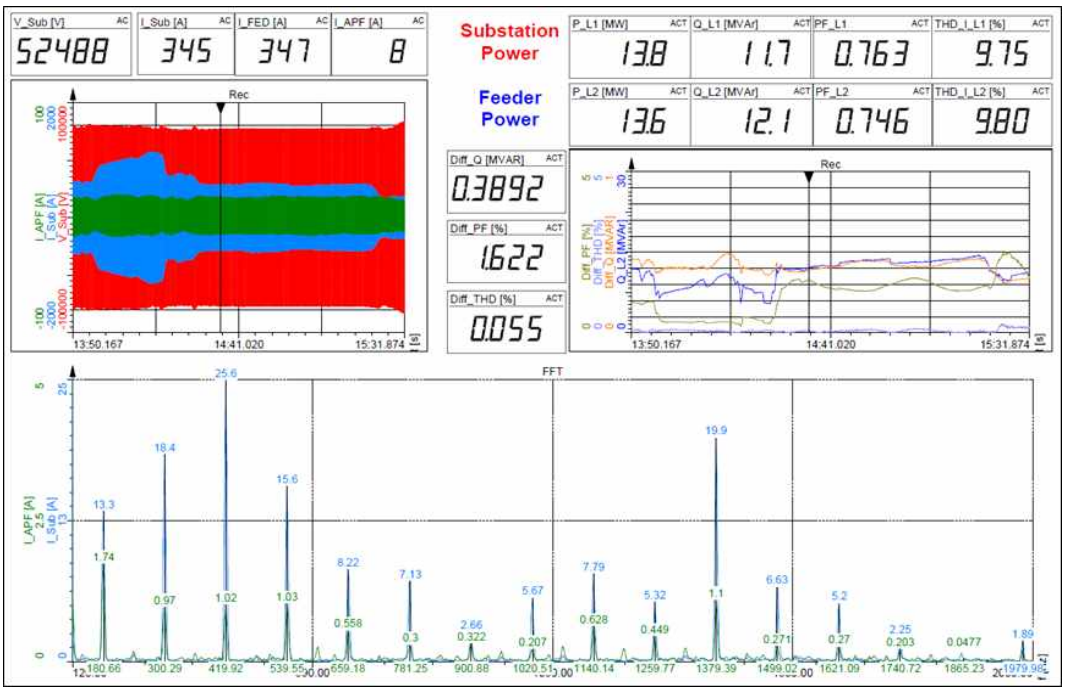
회생 부하 시 조건에 따른 특성

▹ AHF 기동 전, 후 측정

- AHF 기동 전, 후에 따른 변전소 측과 부하 측의 전력비교
- 시험결과 : AHF 기동 전/후 그림에서 보는 것과 같이 발생 부하단 무효전력에 대하여 기동전에는 변전소 측 전력과 차이를 보이지 않지만, AHF기동 후에는 무효전력, 역률, THD가 부하패턴에 맞추어 비례적으로 줄어 들고 있음을 확인



AHF 기동 전 측정결과



AHF 기동 후 측정결과

제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

- 1차년도

구분 개발내용	연구내용	진도(%)
○ 전력시스템 설계	▪ 보호시스템 및 시장치 설계 ▪ LSM용 전력 컨버터설계 ▪ 에너지 세이버 설계	100
○ 인버터설계	▪ P.S 기술 조사 및 분석 ▪ 인버터 분석 및 설계 ▪ 출력용 변압기 설계	100
	총 진도율	100

- 2차년도

구분 개발내용	연구내용	진도(%)
○ 교류용 에너지 저장장치 개발	▪ 운영설비와 인터페이스 설계 ▪ 시제품 제작 및 시험 ▪ 주요부품 구매 후 실험실 테스트 ▪ 제어알고리즘 검증	100
○ 고조파 저감 능동형 필터 개발	▪ 운영설비와 인터페이스 설계 ▪ 시제품 제작 및 시험 ▪ 주요부품 구매 후 실험실 테스트 ▪ 제어알고리즘 검증	100
○ 최적화 운전 프로그램 개발	▪ 최적화 운전모형개발 ▪ 프로그램 프레임 설계 ▪ 데이터구조설계 및 코어연산모듈 구현 ▪ 프로그램 구현	100
○ 용량설계 프로그램 개발	▪ 용량산정 알고리즘 개발 ▪ 프로그램 프레임 설계 ▪ 데이터 구조설계 및 코어연산모듈 구현 ▪ 프로그램 구현	100
○ 피크전력 저감 장치 MMI 개발	▪ 운영설비와 인터페이스 설계 ▪ 주요부품 구매 후 실험실 테스트 ▪ 시제품 제작 및 시험 ▪ 제어알고리즘 개발 검증	100

○ 피크전력 저감 장치 BMS 개발	▪ 운영설비와 인터페이스 설계 ▪ 주요부품 구매 후 실험실 테스트 ▪ 시제품 제작 및 시험 ▪ 제어알고리즘 개발 검증	100
○ 변전소 전력 데이터분석	▪ ESS · APF 위치선정 및 인터페이스 기술 검토 ▪ 시제품 평가 및 검토 ▪ 실증단지 전력품질 측정	100
○ RAMS 분석	▪ SW 설계 산출물 검토 ▪ RAMS 분석 ▪ LCC 자료 정리	100
총 진도율		100

- 3차년도

구분 / 개발내용	연구내용	진도(%)
○ 실증단지 구축	▪ 실증단지 구축 협의 및 기초공사 ▪ 시스템 실증시험/평가 계획 수립 ▪ 시스템 실증장소 운송 및 설치	100
○ 시스템 성능시험	▪ 시스템 인터페이스 시험 및 성능시험 ▪ 시스템 운용 평가 (RAMS활동 포함) ▪ 실용화 계획 수립	100
○ 시스템 최적화	▪ 시스템 최적화 운영 방안 구축 ▪ 시스템 운용데이터 분석 및 운용 알고리즘 최적화	100
○ 실증시스템 효과분석 및 프로그램 고도화	▪ 온라인 모의운영 및 분석 환경 구축 ▪ 실증시스템 모의운영 및 결과 분석 ▪ 알고리즘 및 프로그램 수정	100
○ 운용 및 유지보수	▪ 시스템 운용방안 구축 ▪ 시스템 유지보수 방안 구축 ▪ 개발 시스템 종합 유지보수 매뉴얼 작성	100

2. 관련 분야 기여도

가. 기술적 파급 효과

○ 세계 최초의 교류(AC) 철도 급전구간의 에너지저장시스템 기술 확보

- 특고압 충/방전 기술 확보(직류 및 교류 철도 변전 시스템에 적용이 가능하므로 전기 철도 산업의 전반적인 에너지 절감 기대)
- 전력의 안정적 공급 및 고품질의 전기공급기술 확보
- 환경 친화적인 변전소 시스템 기술 확보
- 전력의 역률개선 등 전차선로 시스템에 안정적인 전원 공급 가능
- 고속열차의 전력형 능동소자(IGBT)에 의한 고조파 발생 시 본 시스템 사용으로 감소
- 전철변전소 용량 적정성 및 전압강하 프로그램을 통한 안정적인 전원 공급에 기여
- 전력설비에서의 사고로 인한 영향을 극소화시킴으로써 안정적인 전력시스템 운용 실현
- 송전선로의 전력흐름을 자유롭게 제어함으로써 전력수송설비의 총체적인 설비이용률 향상 및 발전 예비율 저하 가능
- 송전용량을 제한하거나 기기고장을 일으킬 수 있는 전력시스템의 불안정 현상 억제
- 높은 신뢰도로 송전선로의 열용량 한계 근처까지 전송용량 증대 가능
- 전압변동억제 및 사고 긴급대처 등을 통한 전력품질 및 신뢰도 향상
- 기술개발과정에서 전기, 제어 분야의 고급 기술이 요구되므로 본 연구 분야의 인력양성 및 배출의 효과를 얻을 수 있음.
- 따라서, 국가 자체 기술력 확보와 국내 관련 산업체의 기술적 파급효과가 기대됨.

나. 경제적 파급 효과 (시장 경쟁력)

○ 정량적 효과(예상) : 에너지절감률 20%

(단, 4MWh급 시스템 구축 시, 순시최대수요전력 20% 저감 예상)

▪ 코레일 전철변전소 2011년 전기요금 : 187,776백만원 ※ 직류구간 전기요금 효과 : 전체요금의 10% 달성 (대전, 광주지하철 운용 중) ▪ 교류구간 전기요금 절감 목표 : 전체요금의 2% 이상 (구축설비 고려, 향후 변동 가능)

○ 화석연료 고갈 및 원자력발전 운용의 문제점을 고려한 전기에너지 절감 시스템 개발

- 에너지 절감, Peak-Shift 효과, CO_2 배출 삭감, 건설비 절감 등의 경제적/산업적 효과에 기여

○ 회생에너지 활용에 의한 에너지 절감

- 고속열차 등 전기 차량의 회생에너지는 차량속도를 감속할 때 많은 양이 발생하여 가선으로 유입되지만, 전차선에서 회생에너지 활용은 극히 적고, 다만 출발 전동차와 회생 전동차의 운행이 동시에 이루어질 경우에만 활용되어 활용성이 떨어지고 있는 실정에 따라,
- 전차선로에서 발생한 회생 에너지를 저장, 전력 소비 시 공급하여 획기적인 전력비용 절감 가능

○ 피크전력 전력 저감을 통한 전력비용 절감

- 최저 부하 사용시간대에 저장된 에너지를 최대 수요 시간에 공급하여 철도 운영기관의 피크전력 전력 요금의 매년 절감 가능(획기적인 요금 절감)

○ 에너지 절감에 의한 CO_2 배출 삭감

- 본 시스템은 고속열차 운행에 필요한 전기를 절약할 수 있어 지구 온난화 주범인 CO_2 배출 가스 삭감 기여 및 삭감된 CO_2 배출가스는 탄소 배출권으로 획득이 가능하여 범국가적 차원의 전력비용 가능

○ 역률개선에 기여

- 양방향 지능형 전력 소요 추정을 통해 소모전력 예상 및 고속철도 운행구간의 전차선로 역률개선에 별도의 직병렬콘덴서 불필요

○ 급전시스템 전력품질 향상을 위한 능동형 전력 필터를 국산화 하게 되면 기술자립을 통하여 외국의 기술로 설치되어 온 전력품질 보상기기를 대체할 수 있고 설치된 시설의 유지 보수 또한 가능하여 외화의 지출을 줄일 수 있음.

제5장 연구개발성과의 활용계획

1. 분석 기술 활용 계획

○ 에너지 저장 시스템의 국내 확대 보급 정책 수립에 활용

- 새로운 정책 제안, 제도개선, 경제성 평가 등의 기술적 근거 자료 제공
- 지능형 전력 저장 시스템을 적용한 신개념 전력 시스템 개발

○ 능동형 고조파 필터 국산화 기술 개발

- 기술자립을 통하여 외국의 기술로 설치되어 온 능동형 고조파 필터를 대체할 수 있고 설치된 시설의 유지 보수 또한 가능하여 외화의 지출을 줄일 수 있음.

2. 제품 상용화 시 활용 계획

○ 고속철도 변전시스템의 안정적 전력 공급 활용

- 전차선로 급전시스템 모니터링과 연축전지와 LiB의 활용으로 고속열차 안정적 운행을 위한 솔루션 제공
- 상시 전원이 필요한 소전력 중요 부하의 상시 전백업 전원 공급

○ 교류(AC)구간의 지능형 하이브리드 에너지저장시스템 구축

- 고속철도 운행구간 등 대용량 부하에 접목하여 안정적인 전원 공급 및 도시철도 구간에도 실용화 가능
- 낮은 전력 예비율에 대비한 전원 Back-Up시스템으로 활용 가능.

3. 연구결과의 활용방안

가. 고속철도 변전시스템의 안정적 전력 공급 활용

○ 전차선로 급전시스템 모니터링과 연축전지와 LiB의 활용으로 고속열차 운행을 위한 솔루션 제공

○ 상시 전원이 필요한 소전력 중요 부하의 상시 전백업 전원 공급

나. 교류(AC)구간의 지능형 에너지저장시스템 구축

○ 고속철도 운행구간 등 대용량 부하에 접목하여 안정적인 전원 공급 및 도시철도 구간에도 실용화 가능

○ 낮은 전력 예비율에 대비한 전원 Back-Up시스템으로 활용 가능.

다. 에너지 저장 시스템의 국내 확대 보급 정책 수립에 활용

○ 새로운 정책 제안, 제도개선, 경제성 평가 증의 기술적 근거 자료 제공

○ 지능형 전력 저장 시스템을 적용한 신개념 전력 시스템 개발

라. 능동형 고조파 필터 구축

○ 고속선 구간에 내구연한이 도래된 고조파 필터 교체

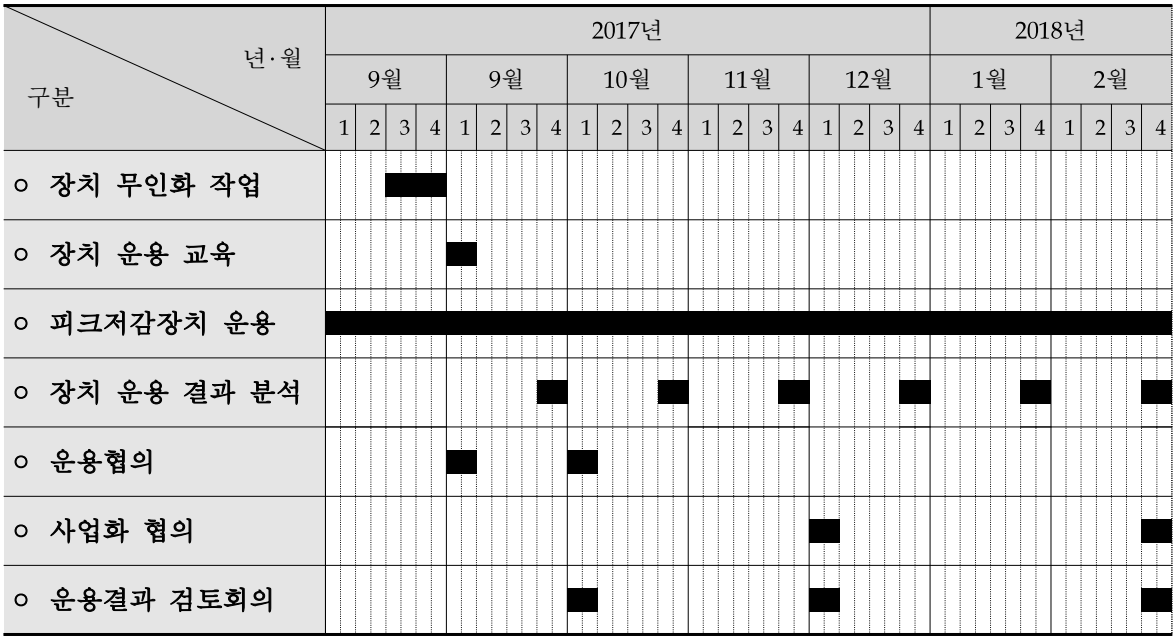
4. 연구성과물 운용계획

가) 연구성과물 운용을 위해 한국철도공사와의 협의체계 유지

- ○ 피크전력 저감장치에 대한 운용 매뉴얼 작성
- ○ 변전소 운영기관에 개발 장치에 대한 장치 운용교육 진행
- ○ 피크전력 저감장치 실용화 및 사업화 추진을 위해 지속적인 협의진행
- ○ 장치운용을 통해 나타나는 결과에 대해 장치운용 효과 추가분석 작업을 통한 신뢰성 및 안정성 확보 (2018년 2월까지 추가효과 검증 진행예정 : 철도공사와 협의 진행 중)

나) 연구성과물의 신뢰성 및 안전성 확보를 위한 추가운용 세부계획

- ○ 장치운용결과는 매달 분석과정을 통하여 한국철도공사와 협의예정
- ○ 시범운영기간을 통한 효과 검증 결과에 따라 향후 사업화를 추진
- ○ 과제 종료이후 시범운영 세부계획



5. 실용화 및 사업화 계획

가. 국내외 시장 사업화 계획

□ 국내 시장 현황 분석

○ 국내 철도 노선 현황 및 고속철도 운행노선

○ 국내 고속선의 변전소 시장 규모

- 고속선 변전소 : 총 16개소 설치 가능

(경부 고속선 : 9개소, 호남 고속선 : 5개소, 수서 고속선 : 2개소)

- ESS 사업 추진 비용 : 16개소 × 50억원 = 800억원

(시스템 개발 비용 적용에 따른 투자비용은 약 50억원임)

- APF 사업 추진 비용 : 16개소 × 32억원 = 512억원

(시스템 개발 비용 적용에 따른 투자비용은 약 32억원임)

○ 국내 일반선(KTX 운행)의 변전소 시장 규모

- 일반선 변전소 : 총 13개소 설치 가능

(공항철도 : 2개소, 경부선 : 6개소, 경전선 : 1개소, 전라선 : 4개소)

- ESS 사업 추진 비용 : 13개소 × 50억원 = 650억원

(시스템 개발 비용 적용에 따른 투자비용은 약 50억원임)

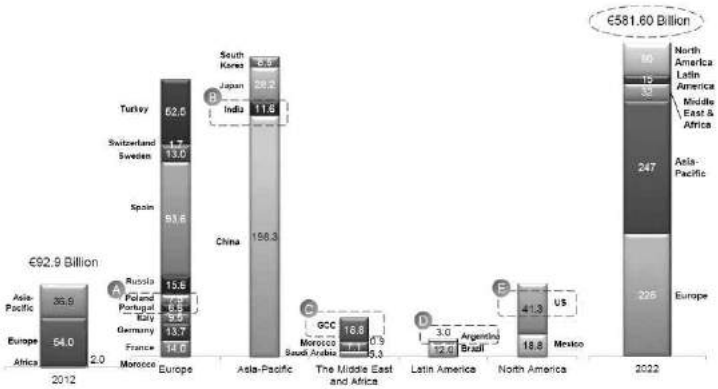
- APF 사업 추진 비용 : 13개소 × 32억원 = 416억원

(시스템 개발 비용 적용에 따른 투자비용은 약 32억원임)

○ 국내 고속선 및 일반선 변전소 예상 시장규모 : 약 2,378억원

□ 국외 시장 현황 분석

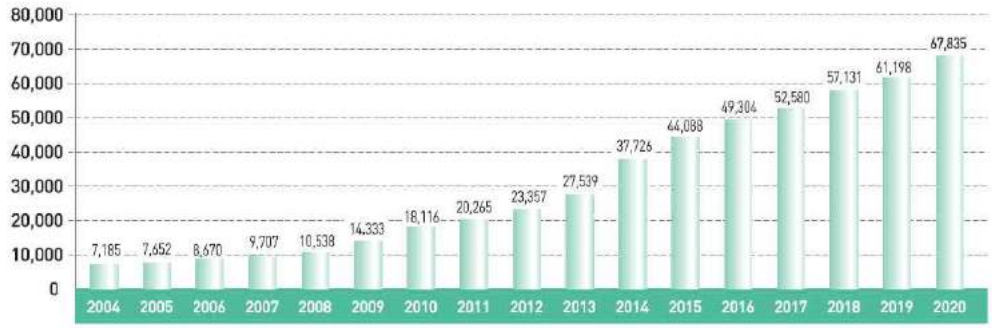
○ Frost & Sullivan은 '22년 세계 고속철도 인프라 시장규모를 5,816억 유로로 전망



자료 : Rail Outlook Study 2013-2022, paradigm Dhift Towards Intermodal Mobility Boosts Growth in All Rail Segments, Frost&Sullivan, 2013

<권역별 고속철도 인프라 시장 전망 ('12~22년)>

○ 세계 고속철도 노선 연장은 '14년 기준 37,726km이며, '20년에는 67,835km로 증대될 전망



자료 : SCI Verkehr, UIC 자료, 국가별 노선연장 계획 자료 재구성, 2015

* 1964년 일본의 신칸센 노선을 시작으로 전 세계에 건설된 고속철도 노선의 누적 데이터

<연도별 세계 고속철도 노선 누적 연장(단위 km, 설치기준)>

○ 국외 시장 예상 규모 산정

- 고속철도 변전소의 경우 변전소의 간격이 50~70km 정도임 (경부 고속선 기준)
- '14년 기준으로 37,726km 노선에 필요한 변전소가 약 538개 정도로 산정됨
  (가정 : 보수적으로 70km당 변전소를 한 개 건설하는 것으로 가정함)
- '20년에는 67,835km로 증대될 경우 노선에 필요한 변전소가 약 969개 정도로 산정됨

○ 국외 고속선의 변전소 시장 규모

- 고속선 변전소 : 약 969개소 설치 가능('20년 기준)
- ESS 사업 추진 비용 : 969개소 × 50억원 = 4조 8,450억원
  (시스템 개발 비용 적용에 따른 투자비용은 약 50억원임)
- APF 사업 추진 비용 : 969개소 × 32억원 = 3조 1,008억원
  (시스템 개발 비용 적용에 따른 투자비용은 약 32억원임)

○ 국외 고속선 변전소 예상 시장규모 : 약 7조 9,458억원

나. 사업화 확대 방안

□ 시장의 다변화

○ 고속철도 운행구간 이외의 국내 도시철도 및 일반전력 변전소에도 제품의 다변화를 통해 시장 확대 (단, 시스템 설치 용량에 따라 시장 규모는 변동 가능함.)

- 국내 도시철도 변전소 시장 규모 (참조 : 통계로 보는 한국철도 2012)

구분	도시철도 변전소 수량
일반철도	52
서울메트로	42
서울도시철도	46
서울9호선	9
부산	13
대구	15
인천	7
광주	7
대전	7
부산김해	4
신분당선	1
계	203

- 국내 일반전력 변전소 시장 규모 (참조 : 제86호 2016년 한국전력통계)

지역	일반전력 변전소 수량					합계
	765kV	345kV	154kV	66kV	22kV	
서울		2	47			49
남서울		4	56			60
인천		13	46	1		60
경기북부	1	10	42	1		54
경기	1	10	78			89
강원	1	5	43		1	50
충북		5	31		1	37
대전충남	2	11	59			72
전북		5	32		1	38
광주전남		11	58	1		70
대구경북		17	89		1	107
부산	1	11	65			77
경남	1	7	44			52
제주			15			15
계	7	111	705	3	4	830

제6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제7장 연구개발성과의 보안등급

- 일반과제

제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
		해당사항 없음						

제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- 해당사항 없음

제10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적

1. 특허출원 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허 출원	고속철도 변전소용 에너지저장장치	우진산전	주관	대한민국		2013		
2	특허 출원	피크저감용 전력저장시스템의 용량 설계장치 및 그 용량 설계방법	한국전기연구원	공동	대한민국		2013		
3	특허 출원	인터리브드 구조의 능동형 고조파 필터장치	우진산전	주관	대한민국		2014		
4	특허 출원	교류기반 고속철도 변전소용 에너지 저장장치	우진산전	주관	대한민국		2017		
5	특허 출원	고속철도용 피크전력 저감장치	우진산전	주관	대한민국		2017		
6	특허 출원	고속철도 변전소 피크 부하 제어 방법, 그 방법을 수행하는 장치 및 컴퓨터 프로그램	한국전기연구원	공동	대한민국		2016		
7	특허 출원	에너지저장설비 모니터링 시스템	앤츠	공동	대한민국		2016		
8	SW 등록	고속철도 변전소 피크저감용 전력저장시스템 운전계획 프로그램	한국전기연구원	공동	대한민국		2016		
9	SW 등록	고속철도변전소 피크저감용 전력저장시스템 설계 프로그램	한국전기연구원	공동	대한민국		2016		
10	SW 등록	피크전력 저감장치용 맨머신인터페이스 테스트	앤츠	공동	대한민국		2016		

2. 논문게재 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문 게재	고속철도 변전소 피크부하 저감용 ESS 용량 산정 및 경제성 분석	한국전기연구원	공동	대한민국		2014		
2	논문 게재	PC기반의 철도 온도환경에 적합한 모니터링 장치구현	앤츠	공동	대한민국		2014		
3	논문 게재	비주거용 소비자 전력요금최소화 목적 BESS 최적운영 및 경제성 평가	우진산전(건국대)	주관(용역)	대한민국		2016		
4	논문 게재	고속철도 변전소 피크부하 저감용 ESS 일간 운전 프로그램 개발	한국전기연구원	공동	대한민국		2016		

3. 논문발표 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문 발표	스파스 메트릭스 컨버터로 구동되는 유도전동기를 위한 모델 예측제어기반의 속응성 향상기법	우진산전	주관	대한민국		2013		
2	논문 발표	고속철도 전철변전소 피크전력 저감방안 연구	한국철도공사	위탁	대한민국		2013		
3	논문 발표	최대수요전력저감 기술연구	우진산전	주관	대한민국		2013		
4	논문 발표	선로 임피던스에 따른 분산전원 기반의 인버터 병렬 운전 드룹 방식 연구	우진산전	주관	대한민국		2013		
5	논문 발표	고속철도 변전소 피크부하 저감용 ESS 최적용량 산정	한국전기연구원	공동	대한민국		2014		
6	논문 발표	A Study on the Energy Storage System Application Cases according to Customer Load Patterns	한국전기연구원	공동	국외		2014		
7	논문 발표	전철변전소 최대수요전력 예측을 위한 고속열차 전력품질 분석	한국철도공사	위탁	대한민국		2014		
8	논문 발표	UPS 시스템의 신뢰성 향상을 위한 멀티레벨 인버터의 중성점 제어 기법	우진산전	주관	대한민국		2014		
9	논문 발표	다출력 기능을 갖는 간접 매트릭스 컨버터 시스템	우진산전	주관	대한민국		2014		
10	논문 발표	고속철도 변전소용 고조파 저감시스템 기술개발	우진산전	주관	대한민국		2014		
11	논문 발표	고속철도 피크전력보상을 위한 단상 멀티레벨 인버터	우진산전	주관	대한민국		2014		
12	논문 발표	전압 레벨 증가를 위한 Cascaded H-bridge 멀티레벨 인버터 개발	우진산전	주관	대한민국		2014		

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
13	논문 발표	고속철도 피크전력 저감장치 및 능동형 고조파 필터의 RAMS 분석에 관한 연구	우진산전	주관	대한민국		2015		
14	논문 발표	피크전력 저감장치의 실증단지 구축 적합성 분석	우진산전	주관	대한민국		2015		
15	논문 발표	고속철도 전철변전소 피크전력 저감을 위한 기술개발 연구	우진산전	주관	대한민국		2015		
16	논문 발표	FMECA 및 FTA를 통한 고속철도 피크전력 저감장치 신뢰도 분석 연구	우진산전	주관	대한민국		2015		
17	논문 발표	고조파저감설비 위상제어를 통한 역률 향상에 관한 연구	한국철도공사(우진산전)	위탁(주관)	대한민국		2015		

제11장 기타 사항

- 없음

제12장 참고 문헌

1. KS Q ISO 9001(2008) 전환해석
2. TSI(Technical Specification For Inter Operability)
3. KS Q ISO 10005(1999) : 품질경영-품질계획서에 대한 지침
4. KS Q ISO 10006(2003) : Guide Line for Project Management)
5. ISO TS 16947
6. 차세대고속열차 기술개발사업 기획보고서
7. 차세대고속열차 기술개발사업 1단계 보고서
8. KS C IEC 61133
9. 철도안전법 시행규칙
10. 철도차량 성능시험 시행지침
11. 철도차량 제작검사 시행지침
12. 고조파 가이드북, PQ Tech, 2008
13. 분전반 내장형 영상 고조파 필터, 디지털파워, 2013
14. 효율적 교류급전 전기철도 고조파 저감방안 II, 신용주(2008), 전기설비 기획보고서
15. 전기철도 급전시스템 능동형 전력품질 보상장치 개발, 한국철도공사, 2008
16. 에너지 저장 소재 및 시스템 분야 특허 동향, 특허청, 2008
17. ESS산업 동향 및 향후 발전 전망, 한국에너지기술평가원, 진창수, 2011
18. Energy Storage Systems for Ancillary Services, PIKE RESEARCH, 2011
19. 에너지 저장 기술개발 및 산업화 전략(K-ESS 2020), 지식경제부, 2011
20. 대용량 전력저장장치 보급 촉진 방안, 지식경제부 주관 관계부처 합동, 2012
21. European Large Scale Energy Storage Market and Opportunities from Growth in Renewable Energy, Frost&Sullivan, 2011
22. 배전계통 고조파 관리기준, 한국전력공사, 2009
23. IEC 60068-2-1
24. IEC 60068-2-2
25. IEC 61000-4-4:2004
26. IEC 61000-4-5: 1995 +A1:2000
27. IEC 61000-4-6: 2003 +A1:2004
28. KRCS_C146-03_제어반 : 전철원격감시제어장치
29. 전자유니트(PCB ASSY 부품) 에이징 시험 절차서, 현대로템, 2012
30. 철도차량 사용내구연한 및 정밀진단지침 분석연구, 한국철도기술연구원, 2010
31. 전기시스템 엔지니어링 기술개발, 2단계 2차년도 연차보고서, 한국전기연구원, 2001
32. 차량 진단 처리 및 열차 제어 시스템 개발 최종 보고서, 현대중공업, 2002
33. 차량 진단 처리 및 열차 제어 시스템 개발 최종 보고서, 현대중공업, 2002
34. 이상기후 특별보고서, 기상청, 2010.
35. What is Environmental Testing, ESPEC TECHNOLOGY REPORT No. 1, 1996
36. 철도용 전자기기의 온도환경(내한성, 내열성)에 대한 시험검사 절차에 대한 분석연구, 김진환, 양도철, 2011

37. Zigbee 모듈을 이용한 실시간 센서 모니터링 시스템 구현, 김광현, 2011
38. 컴포넌트 기반 환경정보모니터링시스템 개발, 예성빈, 양수영, 정희택, 2011
39. 풍력발전기 운영시스템의 설계, 양수영, 권준아, 김원중, 2011
40. Intelligent condition monitoring of railway signaling in train detection subsystems, Journal of Intelligent & Fuzzy System, 2013
41. Research on thermal characteristics and on-chip temperature-controlling for silicon micro-gyroscope, IEEE International Conference, 2011
42. Impact of Temperature on Test Quality, IEEE International Conference, 2010

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.