제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘전기기관차(8200호대) 보조전원장치 실용화 기술개발’(연구개발 기간: 2016.4.29~2018.9.28) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 12. 19.

주관연구기관명 : 한국철도공사 (대표자) 오영식
공동연구기관명 : 이경산전㈜ (대표자) 이을재
㈜앤츠 (대표자) 안태성
한국교통대학교 (대표자) 전문수

주관연구기관책임자: 정휘섭
공동연구기관책임자: 이을재
손기환
김재문

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16RTRP-C113646-01	해당 단계 연구 기간	2017.01.29.~ 2018.09.28	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통 R&D			
	세부사업명	철도기술연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	전기기관차(8200호대) 보조전원장치 실용화 기술개발			
연구책임자	정휘섭	해당단계 참여 연구원 수	총: 51명 내부: 51명 외부: - 명	해당단계 연구개발비	정부:1,420,000천원 기업: 473,334천원 정부 외:- 천원 계:1,893,334천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 91명 내부: 91명 외부: - 명	총 연구개발비	정부:1,900,000천원 기업: 633,334천원 정부 외:-천원 계:2,533,334천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국철도공사 연구원			참여기업명 이경산전㈜, ㈜앤츠, 한국교통대학교	
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명: -	
위탁연구	연구기관명: -			연구책임자: -	

<요약>

본 연구에서는 해외 제작사의 원천 기술에 의존하고 있는 전기기관차(8200호대) 보조전원장치를 완벽히 대체할 수 있는 국산화 기술을 개발하고 사계절, 60,000KM 현차 시험을 통해 실용화 기술을 검증하였다.

본 연구를 통해 기존 보조전원장치와 호환 가능한 90KVA*2급 이중계 보조전원장치와 차량 및 기존장치와 호환되는 통신제어기(SIBCOS)가 개발되었으며, 차량 및 기존장치와의 호환성과 유지보수성을 강화하였다. 개발품은 공장 및 조합시험과 실차 테스트를 통해 성능과 인터페이스 호환성을 확인하였으며, 사계절 및 60,000km 이상의 현차 시험으로 실용화 기술을 검증하였다. 개발된 보조전원장치는 LCC 분석을 통해 하드웨어 신뢰도를 예측하고 LCC 절감방안을 제시하였다.

보고서 면수: 128

〈 국문 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	○ 해외 원천기술에 의존하고 있는 전기기관차(8200호대) 보조전원장치의 **국산화 기술을 개발**하고, 기존 제품을 대체할 수 있는 **실용화 기술을 검증**하는데 본 연구의 목적이 있다. ○ 본 연구에서는 기존장치와 호환 가능한 90KVA*2급 이중계 보조전원장치와 통신제어기(SIBCOS)를 개발하고 장치간 인터페이스 성능을 확인하였으며, 사계절 및 60,000km 이상의 현차시험을 통해 실용화 기술을 검증하였다. 개발된 보조전원장치는 LCC 분석을 통해 하드웨어 신뢰도를 예측하였고 LCC 절감방안을 제시하였다.
연구개발성과	**가) 2중계 보조전원장치 실용화 기술개발** ◦ 기존 장치와 호환 가능한 90KVA*2급 이중계 보조전원장치 실용화 기술개발 ◦ 장치 성능 및 유지보수성 향상 방안 도출, 시제품 보완 제작 ◦ 컨버터/인버터 장치 보완개선 기술개발 ◦ 제어부 및 GDU 장치의 신뢰성 확인 **나) 보조전원장치용 통신제어장치(SIBCOS) 개발** ◦ 전기기관차(8200호대) 보조전원장치 통신제어기술 구축 ◦ 차상컴퓨터에 의한 통신제어 기술개발 ◦ 통신제어에 의한 시퀀스 및 전압/주파수의 가변능력 검증 **다) 보조전원장치와 통신제어장치(SIBCOS) 인터페이스 기술 검증** ◦ 관련 시험기준 검토 및 기술검증 ◦ 90KVA*2급 보조전원장치(SIBCOS 포함) 시험(공장시험, 조합시험, 부하시험) ◦ 보조전원장치 조립체 실차 탑재 검증 ◦ 차량장치 및 부속기기와 인터페이스 성능검증 ◦ 현차 적용시험 (사계절 및 60,000km 이상) 및 실용화 기술 검증 **라) 전기기관차 보조전원장치 LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측** ◦ 개발된 보조전원장치의 하드웨어 신뢰도 예측 ◦ 보조전원장치의 LCC 절감 방안 제시
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	기존 전기기관차 보조전원장치 수입 대체, 유지보수 비용 절감, 차량 운용율 향상

핵심어 (5개 이내)	전기기관차	보조전원장치	전력변환장치	통신제어장치	MVB통신

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The purpose of this study is to develop and verify a practical technology that can fully substitute existing products by localizing the auxiliary power supply technology of an electric locomotive (8200 unit) which is dependent on foreign countries and enhancing the compatibility with the vehicle and maintainability . In this study, we developed 90KVA * 2nd class auxiliary power supply and communication controller (SIBCOS) compatible with the existing auxiliary power supply system, verified the interface performance, verified the practical application technology through the four seasons and the current test over 60,000km.
Results	■ Commercialization technology development of dual system auxiliary Inverter (1) Commercialization technology development of compatible installed auxiliary Inverter(80KVA*2 → 90KVA*2) (2) Performance Improvement of Devise Component & Maintainability technology (3) Supplementation of converter/inverter (4) Reliability verification of GDU ■ Development of SIBCOS for auxiliary Inverter (1) Securing of communication control technology (2) Development of communication control technology mutual CCU/SIBCOS (3) Variable capability verification of sequence, voltage and frequency ■ Interface verification mutual auxiliary Inverter/SIBCOS (1) Test of in factory, combination, and load by prototype (2) Verification of interface linked the main inverter (3) Driving test(4 season, more than 60,000km) ■ Life cycle cost analysis and reliability estimation of hardware (1) hardware reliability estimation of prototype auxiliary Inverter (2) Suggest reduction measures about LCC
Expected Contribution	Substitution of imported auxiliary Inverter devices, Reducing maintanance costs, Enhancing vehicle operation efficiency

Keywords	Electric Locomotive	Auxiliary inverter	Power Transfer Device	SIBCOS	Multifunction Vehicle Bus(MVB)

〈 CONTENTS 〉

Chapter 1 Project Outline ····· 14
Paragraph 1 Purpose and Necessity ····· 14

Chapter 2 Domestic and Foreign Situation of Development ····· 18
Paragraph 1 Domestic and Foreign Trend of Development ····· 18
Paragraph 2 Domestic and Foreign Market Trend and Scale ····· 19

Chapter 3 Contents and Results of R&D ····· 20
Paragraph 1 Purpose and Contents of R&D ····· 20
Paragraph 2 Process of R&D ····· 25
Paragraph 3 Development of dual auxiliary Inverter ····· 32
Paragraph 4 Development of SIBCOS for auxiliary Inverter ····· 72
Paragraph 5 Field Test ····· 86
Paragraph 6 LCC analysis and reliability estimation of hardware ····· 111

Chapter 4 Achievement Ratio & Contribution ····· 121
Paragraph 1 Achievement Ratio ····· 121
Paragraph 2 Contribution to the related fields ····· 122

Chapter 5 Plan to use the result of R&D ····· 124

Chapter 6 Performance of R&D ····· 126

Chapter 7 Reference ····· 127

〈 목 차 〉

제1장 연구개발과제 개요 ····· 14
제1절 연구개발 목적 및 필요성 ····· 14
1. 연구개발 목적 ····· 14
2. 연구개발의 필요성 ····· 15
3. 연구개발 범위 ····· 17

제2장 국내외 기술 개발 현황 ····· 18
제1절 국내외 기술개발 동향 ····· 18

제2절 국내외 시장동향 및 규모 ····· 19

제3장 연구 수행 내용 및 성과 ····· 20
제1절 연구수행 목표 및 내용 ····· 20
1. 연구개발 목표 ····· 20
2. 연구성과 점검기준 ····· 21
3. 연구수행 방법 ····· 22

제2절 연구과제 진행 프로세스 ····· 25
1. 인터페이스 및 실용화 기술 검증 ····· 25
2. 연구수행을 위한 공정회의 및 기술검토 회의 ····· 27
3. 기술 분석을 위한 현차 조사 및 시험 ····· 28
4. 현차시험 시험기준 검토 ····· 29
5. 개발품 실용화 방안 및 절차 ····· 31

제3절 이중계 보조전원장치 실용화 기술개발 ····· 32
1. 장치일반 ····· 32
2. 이중계 보조전원장치 설계 ····· 34
3. 기존 보조전원장치와의 비교 ····· 57
4. 보조전원장치 시제품 제작 ····· 62
5. 보조전원장치 시험용 가변부하장치 설계 및 제작 ····· 67
6. 이중계 보조전원장치의 시험 및 평가 ····· 70

제4절 보조전원장치용 통신제어기(SIBCOS) 실용화 기술개발 ····· 72
1. 보조전원장치 통신제어기 분석 ····· 72
2. 보조전원장치 통신제어기의 제작 및 보완 ····· 78

3. 보조전원장치 통신제어기의 시험 및 평가 ····· 85

제5절 현차시험 ····· 88
1. 현차시험 기술검토 및 심의 ····· 88
2. 차량 인터페이스 및 호환성 시험(조합시험) ····· 93
3. 현차시험 ····· 94
4. 현차시험 결과 ····· 100

제6절 보조전원장치 LCC분석 및 하드웨어 신뢰도 예측 ····· 113
1. 기존품 LCC 분석 ····· 113
2. 개발품 LCC 분석 ····· 116
3. 민감도 분석 및 LCC 절감방안 ····· 118

제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 121
제1절 목표 달성도 ····· 121

제2절 관련 분야 기여도 ····· 122
1. 기존 기술과의 차별성 ····· 122
2. 기존 기술 대비 혁신성 ····· 123

제5장 연구개발성과의 활용 계획 ····· 124
제1절 사업화 계획 ····· 124

제2절 사업화의 기대효과 ····· 125

제6장 연구개발과제의 대표적 연구실적 ····· 126

제7장 참고 문헌 ····· 127

〈 표 목 차 〉

표 1. 보조전원장치의 형식 비교 ····· 18
표 2. 지멘스 전기기관차 EuroSprinter ····· 19
표 3. 전기기관차(8200호대) 운용현황 ····· 19
표 4. 연구개발 방법 ····· 22
표 5. 개발품 제어기능 검사 검사 기준 ····· 25
표 6. SIBCOS 통신 분석 ····· 26
표 7. 개발품 인터페이스 기술 검증 ····· 26
표 8. 공정회의 및 기술검토회의 일시 및 장소 ····· 27
표 9. 기존품 성능 조사(본선 시운전) ····· 28
표 10. 철도차량기술기준 주요장치별 기능 ····· 29
표 11. 개발품과 기존품 사양 비교 ····· 30
표 12. 보조전원장치(개발품) 주요사양 ····· 32
표 13. 보조전원장치 그룹별 부하종류 및 부하용량 ····· 33
표 14. 컨버터회로 입력 설계조건 ····· 34
표 15. 컨버터회로 IGBT 손실계산서 ····· 35
표 16. 인버터회로 입력 설계조건 ····· 38
표 17. 인버터회로 IGBT 손실계산서 ····· 39
표 18. 기존 dv/dt 제한필터 구성품 ····· 42
표 19. dv/dt 제한필터 구성품 ····· 45
표 20. 보조전원장치 GDU 설계사양 ····· 46
표 21. PWM전력스택 전용제어기 구성 카드 종류 및 기능 ····· 49
표 22. PWM전력스택 주요구성품 ····· 55
표 23. 보조전원장치 사양비교(기존품-개발품) ····· 57
표 24. 보조전원장치 전력소자(IGBT) 형상비교 ····· 57
표 25. 보조전원장치 전력소자 특징 비교(기존품-개발품) ····· 58
표 26. 보조전원장치 전력소자 비교결과(기존품-개발품) ····· 59
표 27. 전력스택 냉각장치 형상 및 특징 비교(기존품-개발품) ····· 59
표 28. 전력스택 냉각성능 시뮬레이션 비교(기존품-개발품) ····· 60
표 29. PWM전력스택 전력소자 배치에 따른 특징 비교(기존품-개발품) ····· 60
표 30. 보조전원장치 주요개선사항(기존장치와의 비교) ····· 61
표 31. 보조전원장치 입력회로 구성품 및 송풍기 사양 ····· 63
표 32. PWM전력스택 주요구성품 ····· 63
표 33. PWM전력스택 전용제어기 구성품 사양 ····· 64
표 34. LCR필터(dv/dt제한필터) 구성품 ····· 65
표 35. 가변부하장치 시뮬레이션 결과파형 ····· 68
표 36. 시험용 가변부하장치 구성 및 기능 ····· 69
표 37. 보조전원장치 공장시험 항목 ····· 70
표 38. 보조전원장치 3자 입회시험 주요결과물 ····· 71
표 39. 보조전원장치 공인기관 의뢰시험 결과 ····· 71

표 40. 장치 하드웨어 분석결과 ····· 72
표 41. MVB 사양 ····· 73
표 42. MVB Data Format ····· 74
표 43. MVB Data Format 시뮬레이션 검증 ····· 75
표 44. 외부 커넥터의 Plug Type 정리(예) ····· 75
표 45. MMI 고장코드(일부 발췌) ····· 76
표 46. SIBCOS Signal Analyzer 요구사항, 제작 및 활용 ····· 76
표 47. 제품 구성 및 성능 ····· 77
표 48. PCB 보드 제작 ····· 77
표 49. 외함 3D Modeling, 구성 및 기능 ····· 77
표 50. 전용 프로그램 UI 및 시험 구성 ····· 78
표 51. SIBCOS-M!300 구성의 비교 ····· 78
표 52. SIBCOS-M1300 사양비교 ····· 79
표 53. Input & Output 회로변경 ····· 79
표 54. MVB Control Unit 변경 ····· 79
표 55. Analog Input 회로 변경 ····· 80
표 56. Connector 회로 변경 ····· 80
표 57. PCB 보드 제작 ····· 80
표 58. 외함 설계 및 제품 제작 ····· 80
표 59. 분석대상 정리 ····· 81
표 60. 분석절차 ····· 81
표 61. MVB Port 구성 정리 ····· 82
표 62. MVB 프로토콜 분석 정리(1) ····· 82
표 63. MVB 프로토콜 분석 정리(2) ····· 82
표 64. MMI 고장코드 분석결과 ····· 83
표 65. 시험 장치 및 개요 ····· 85
표 66. 시험항목 및 적용규격 ····· 85
표 67. 전자파적합시험 공인시험성적서 ····· 86
표 68. SIBCOS-M1300 시험기 설계 및 제작, 시험 ····· 87
표 69. 철도차량 현차시험 기술검토 ····· 88
표 70. 개발품 현차시험 기간(한국철도공사 차량내규 제22조) ····· 89
표 71. 현차시험 구분 ····· 89
표 72. 현차시험 항목 ····· 90
표 73. 개발품 점검 주기 및 항목 ····· 91
표 74. 현차시험 위험도 분석 ····· 91
표 75. 현차시험 업무 처리 절차 ····· 92
표 76. 조합시험 ····· 93
표 77. 현차시험 계획 ····· 94
표 78. 정적시험 시험 및 검사 항목 ····· 96
표 79. 구내 시운전 개요 ····· 97
표 80. 구내 시운전 시험항목 ····· 97

표 81. 본선 시운전 개요 ····· 98
표 82. 본선 시운전 시험항목 ····· 98
표 83. 현차시험 영업운전 개요 ····· 99
표 84. 현차시험 시험항목 및 기준 ····· 99
표 85. 현차시험 결과('18.12.1일 기준) ····· 100
표 86. 현차시험 관련문서 ····· 102
표 87. 개발품 설치 및 취부 호환성 시험 결과 ····· 103
표 88. 제어성능 시험 결과 ····· 103
표 89. 정상특성 시험 결과 ····· 104
표 90. 연장급전 제어 및 기능시험 결과 ····· 104
표 91. 고장검지 및 처리 기능 시험 결과 ····· 105
표 92. 보조전원장치 감시 및 기록 시험 결과 ····· 106
표 93. 중련시험 결과 ····· 106
표 94. 고조파 시험 결과 ····· 106
표 95. 정적상태 온도모니터링 결과비교 ····· 108
표 96. 동적상태 온도모니터링 결과비교 ····· 108
표 97. 접지선 칼라 및 배선인입구 기밀 보강 조치결과 ····· 109
표 98. 부하시험기 접지선 설치 조치결과 ····· 109
표 99. 차상컴퓨터 고장기록 ····· 109
표 100. 통신고장 시험방법 및 결과 ····· 111
표 101. 차량전원 방전시험 ····· 111
표 102. 화면표시기 고장 기록 ····· 111
표 103. 전기기관차 고장현황 ····· 114
표 104. 전기기관차 개통별 고장현황 ····· 114
표 105. 보조전원장치의 예방정비비 분석모델 ····· 115
표 106. 보조전원장치 고장률 예측 결과 ····· 117
표 107. 보조전원장치의 형식비교 ····· 122
표 108. 기존장치 대비 개발품의 개선 ····· 123
표 109. 지멘스 전기기관차 차종별 생산년도 및 대수 ····· 124

〈 그 림 목 차 〉

그림 1. 연구개발 목적 및 기대효과 ····· 14
그림 2. 8200호대 신형전기기관차 일반 ····· 15
그림 3. 전기기관차 MVB 통신구성 및 보조전원장치 통신제어기(SIBCOS) ····· 15
그림 4. 전기기관차 주요장치 교체주기 및 운용현황 ····· 16
그림 5. 보조전원장치 국산화에 따른 기대효과 ····· 16
그림 6. 8200호대 전기기관차 보조전원장치 ····· 17
그림 7. 통신제어기 SIBCOS 외형(좌, 기존품), Block Diagram(우, 개발품) ····· 17
그림 8. 국내외 보조전원장치 기술 현황 ····· 18
그림 9. 연구개발 수행체계 ····· 24
그림 10. 하드웨어 인터페이스 조사 ····· 25
그림 11. 공정회의 및 기술검토 회의 ····· 27
그림 12. 개발품의 조합시험(전기기관차 8236호, 2017.9.20.~9.22/제천차량사업소) ····· 28
그림 13. 개발품 선정근거 및 신청, 기술개발확인서 ····· 31
그림 14. 전기기관차 보조전원장치 전력회로 구성 ····· 32
그림 15. 전기기관차(8200호대) 보조전원장치 위치 ····· 33
그림 16. 보조전원장치 그룹별 부하종류 ····· 33
그림 17. 조건별 모듈손실(IGBT + DIODE) 결과비교 그래프 ····· 35
그림 18. 컨버터 제어기 구성도 ····· 36
그림 19. 시뮬레이션파형(1) ····· 36
그림 20. 시뮬레이션파형(2) ····· 37
그림 21. 시뮬레이션파형(3) ····· 37
그림 22. 시뮬레이션파형(4) ····· 37
그림 23. 시뮬레이션파형(5) ····· 38
그림 24. 시뮬레이션파형(6) ····· 38
그림 25. 부하별 모듈손실 결과비교 그래프 ····· 40
그림 26. 인버터 제어기 구성도 ····· 40
그림 27. 인버터시뮬레이션파형(1) ····· 41
그림 28. 인버터시뮬레이션파형(2) ····· 41
그림 29. 인버터시뮬레이션파형(3) ····· 41
그림 30. dv/dt 제한필터의 형태 ····· 42
그림 31. 출력 PWM 전압에 dv/dt필터가 적용된 파형 ····· 43
그림 32. dv/dt 제한 필터의 전기회로 구성 ····· 43
그림 33. dv/dt 제한필터의 출력전압 파형 ····· 44
그림 34. dv/dt 제한필터의 출력전압 FFT 결과파형 ····· 44
그림 35. dv/dt 제한필터 설계도면 ····· 45
그림 36. 보조전원장치 PWM전력스택용 GDU 내부구성도 ····· 46
그림 37. De-Saturation 검출 시 게이트 및 고장의 처리 ····· 48
그림 38. PWM전력스택 GDU 회로 및 PCB 설계도면 ····· 48

그림 39. 입력 및 APF방식의 출력 시뮬레이션파형 ····· 50
그림 40. 제안된 mMA 필터 개념도 ····· 51
그림 41. 입력 및 mMAF 방식의 출력 시뮬레이션파형 ····· 52
그림 42. 제안된 mMAF를 적용한 PLL 제어블록도 ····· 52
그림 43. PWM전력스택 전용제어기 회로설계도면 ····· 53
그림 44. 전용제어기 카드별 배치도 ····· 54
그림 45. PWM전력스택 전용제어기 MCU PCB설계도면 ····· 54
그림 46. PWM전력스택 전용제어기 SIF 및 SMPS PCB설계도면 ····· 54
그림 47. PWM전력스택 하드웨어 3D모델링 ····· 55
그림 48. 보조전원장치 입력회로 설계도면(대표도) ····· 56
그림 49. 보조전원장치 외함 설계도면(대표도) ····· 56
그림 50. 기존IGBT, 80kW정격, 저전압/최대전류/Fs=1.8kHz ····· 58
그림 51. 기존품IGBT와 개발품IGBT의 성능비교 시뮬레이션 ····· 58
그림 52. 전기기관차용 보조전원장치(전면, 후면) ····· 62
그림 53. 보조전원장치 입력회로 및 송풍기 ····· 62
그림 54. 보조전원장치 PWM전력스택 ····· 64
그림 55. PWM전력스택 전용제어기 ····· 64
그림 56. LCR필터(dv/dt제한필터) ····· 65
그림 57. 보조전원장치 주회로도 ····· 66
그림 58. 보조전원장치 제작도면(대표도) ····· 66
그림 59. 피시험체를 포함한 백투백 가변부하시험장치 구성도 ····· 67
그림 60. 백투백 가변부하장치 시뮬레이션회로 ····· 68
그림 61. 보조전원장치 시험용 가변부하장치 제작도면 및 시제품 ····· 69
그림 62. MVB OSI Layer (IEC 61375-3-1) ····· 74
그림 63. 현차시험 기술검토 시행 ····· 88
그림 64 현차시험 차량(전기기관차 8280호) ····· 89
그림 65. 현차시험 위험성 평가 ····· 91
그림 66. 개발품 현차 설치 및 시험 ····· 96
그림 67. 영업시운전 사진 ····· 99
그림 68. 동적시험 주행키로(한국철도공사 KOVIS포털 조회 결과) ····· 101
그림 69. 영업운전 누적 주행키로(2018. 12. 1. 기준) ····· 101
그림 70. 영업운전 누적 주행키로(2018. 9. 28. 기준) ····· 101
그림 71. 정기검수 및 임시검수 내역(한국철도공사 KOVIS 조회 결과) ····· 101
그림 72. 고장검지 및 처리기능 시험 ····· 105
그림 73. 감시 및 기록 시험 ····· 105
그림 74. LCR출력필터 기능확인을 위한 출력파형 비교 ····· 107
그림 75. 절연구간 통과시험(계측 결과 등) ····· 107
그림 76. 방전램프 설치 및 작업 안전표지 부착 ····· 108
그림 77. 열차운행정보전송장치(RTD) 고장기록(8280호, 2018.4.11.) ····· 110
그림 78. 차상컴퓨터 고장기록 ····· 110
그림 79. 보조전원장치 전력스택 고장기록 ····· 110

그림 80. 차량전원 방전시험을 위한 계측장비 ····· 111
그림 81. 차상컴퓨터 고장기록(8280호, 2018.9.14.) ····· 112
그림 82. 방전시험 고장기록 비교 ····· 112
그림 83. 차상컴퓨터 고장기록(보조전원 통신고장, 2018.4.11.~2018.12.01.) ····· 112
그림 84. 전기기관차 PBS ····· 113
그림 85. 년도별 보조전원장치 LCC분석 ····· 115
그림 86. 전기기관차 PBS ····· 116
그림 87. PWM module에 대한 RBD ····· 116
그림 88. PWM 전력모듈에 대한 FT ····· 116
그림 89. 연도에 따른 LCC 및 예방정비비 누적비용 ····· 117
그림 90. 기존품 및 개발품 LCC 분석 ····· 118
그림 91. 기존품에 대한 유지관리비 분석 ····· 119
그림 92. MTBF 증감에 따른 수명주기비용 ····· 119
그림 93. RFID 적용한 의약품 관리운영 프로세스 일례 ····· 120
그림 94. 철도분야 사례(일본) ····· 120

제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발 목적 및 필요성

1. 연구개발 목적

현재 국내의 철도차량과 관련된 전력변환기술은 90년대 이후 지속적으로 발전하여 여객을 주로 운송하는 도시형 전동차 및 고속철도 분야에서는 거의 국산화가 이루어진 반면, 화물운송 및 간선연결용의 전기기관차와 관련해서는 기술의 국산화가 일부 이루어졌으나 실용화 단계에는 이르지 못하였다. 한편 독일에서 도입된 8200호대 전기기관차의 운용기간은 15년(2018년 기준)을 넘어가면서 주요부품의 교체시기가 속속 도래하고 있어 보조전원장치를 비롯한 주요 전장품에 대한 실용화 기술개발이 시급한 실정이다. 통상 해외 제작사들은 예비품 및 보수품의 가격을 차량도입 시의 부품 가격에 비하여 수배에 이르게 하는 영업 전략을 구사하고 있다. 따라서 전기기관차의 전장품 교체 시기가 도래하기 전에 보조전원장치의 실용화 기술 개발을 완료하여 국부의 유출을 막고, 차량의 안정적 운용을도모하고 철도 이용자의 편의와 안전을 향상할 필요가 있다고 판단된다.

국내 철도차량 전력제어기술은 꾸준한 발전을 거듭하여 기술적으로 선진국에 상당히 근접해 있다.전기기관차는 도시형전동차나 고속전철에 비하여 수요가 많지 않아 국내에서는 상대적으로 경제성이 낮은 것으로 판단될 수도 있다. 하지만 경제성만의 이유로 기술개발을 외면한다면, 고비용의 유지보수체계를 계속해야 하고 동력차의 한 축을 이루는 전기기관차에 대해서 세계시장 진출은 요원해 질 수 있다.

전기기관차(8200호대) 보조전원장치 실용화 기술개발은 철도기술연구사업 “철도 핵심부품 및 장치 기술개발 1단계” (2012.12~2014.12) 기술개발 1단계 사업의 성과를 완성시키고 사용자 중심의 부품 개발 체계를 완성시키는 중요한 의미가 있을 뿐 아니라 유지 보수품의 공급기간을 단축시켜 차량 운용을 안정화 시키고 개발 과정에서 발생하는 관련 기술의축적을 통한 국가 기술경쟁력을 높이는 계기가 될 것이며, 중소기업의 육성을 통한 새로운 일자리 창출과 침체된 철도부품시장의 활성화에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

결국 해외 원천기술에 의존하고 있는 전기기관차(8200호대) 보조전원장치 기술을 국산화하고 차량과의 호환성과 유지보수성을 강화하여, 부품 조달의 해외 의존을 탈피하고, 기존품을 완전히 대체할 수 있는 실용화 기술을 개발/검증하는데 본 연구의 목적이 있다.

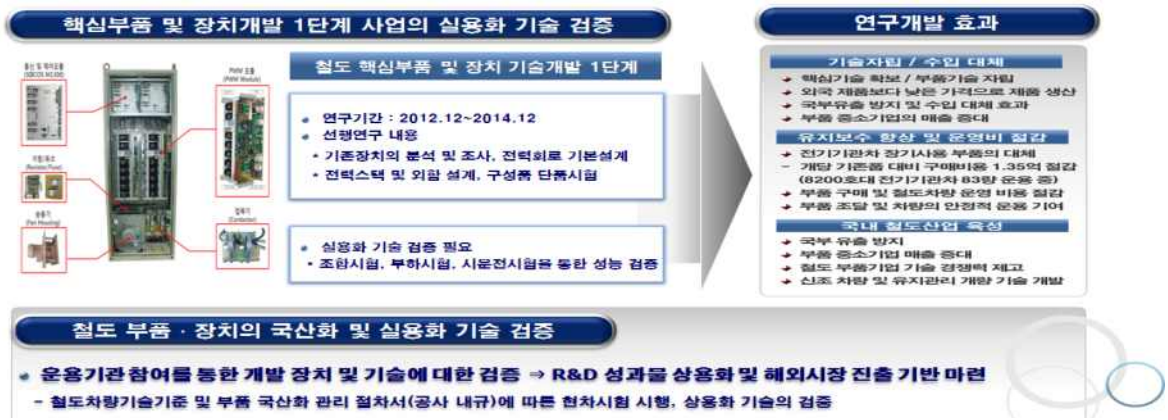


그림 1. 연구개발 목적 및 기대효과

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

최신 소자를 적용한 보조전원장치를 국산화하고 실용화에 이르게 함으로써 원천제작사의 기술종속에 대응하고, 현재의 유지보수 체계를 합리적으로 개선할 수 있다. 해외 기술에 의존하던 보조전원장치의 핵심기술을 구축하고 실제 시험운행을 통한 장치의 신뢰성을 확보하여 유지보수비의 경감, 동일 기능 부품간의 상호 호환성을 제고하기 위한 국산화 개발이 절실히 필요하다.

(1) 부품 및 기술의 해외 의존 탈피

8200호대 전기기관차는 2003년부터 도입되어 운용 중으로 주요 차장장치 및 부품의 부품의 원제작사는 독일 지멘스(Siemens)이다. 원제작사(지멘스)에서는 철도차량의 제어 및 MVB 통신 프로토콜 관련 원천기술을 철도차량의 운용사에 제공하지 않고 있어, 주요 부품 및 장치의 수급과 차량의 안정적 운용에 큰 어려움이 있으며, 장치 및 부품의 국산화가 어려운 실정이다. 8200호대 전기기관차 보조전원장치의 경우 사용자 요구에 따른 소프트웨어 수정, 장치의 고장 및 수리, 부품 조달 등 부품 및 기술 종속에 따른 시간과 비용이 과하하게 소모되어 경제적으로 큰 손실이 발생하고 있어 국산화된 보조전원장치의 개발이 시급한 실정이다.

Type		8100/8200
Year		1998/2002 – 2008
Wheel arrangement		Bo'Bo'
Power system		25 kV/60 Hz
Rating	[kW]	5,200
Starting tractive effort	[kN]	330
Maximum speed	[km/h]	150
Weight	[t]	88
Track gauge	[mm]	1,435
Numbers built		2/83

그림 2. 8200호대 신형전기기관차 일반

(2) 철도차량 통신 및 제어 핵심 기술의 국산화

보조전원장치의 제어장치인 SIBCOS는 MVB 통신 뿐만 아니라, 전원 입/출력, 아날로그 신호 입/출력, 온도입력 등과 같은 여러 가지 신호를 취득하고 이를 처리하여 어떤 상태를 중앙제어장치 및 견인제어장치에 전달하는 기능을 담당한다. 그러나, 현재 외국 기술에 거의 100% 의존하고 있는 실정이고, SIBCOS의 국산화를 위한 노력은 현재 전무한 상태이다. 보조전원장치의 MVB통신 Card를 포함한 통신제어장치(SIBCOS) 개발은 전기기관차의 차량 내 MVB 통신 분석기술을 확보하고, 전기기관차 제어 및 명령 프로토콜을 국내 실정에 맞게 쉽게 수정 보완할 수 있는 차별화된 기술이다. 이를 통해 철도차량 통신 및 제어 분야의 국내 기술력을 상향하고 철도 선진국과의 기술격차를 충분히 줄일 필요가 있다.

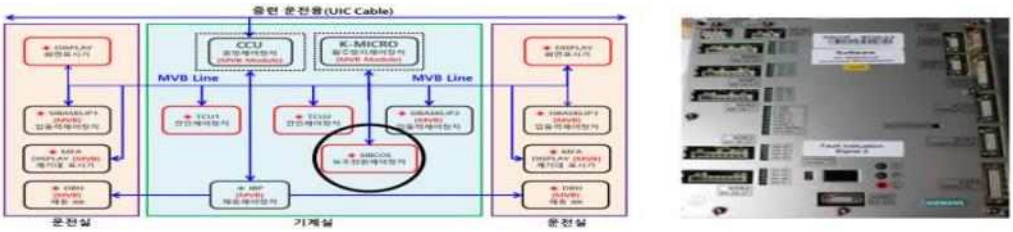


그림 3. 전기기관차 MVB 통신구성 및 보조전원장치 통신제어기(SIBCOS)

(3) 기존 부품의 노후 및 교체 시기 도래

원제작사의 기술 독점으로 인하여 부품의 가격이 지속적으로 상승하여 유지보수비용이 급격히 증가하는 추세이므로 원활한 유지보수 및 부품공급, 성능향상 및 비용절감 등을 위해 국산 실용화 기술개발이 시급한 실정이다. 8200호대 전기기관차 초기 도입차량은 2020년이 되면 사용연수가 17년에 달하게 되므로 이때부터는 개량 및 Overhaul(소손품 교체)이 필요하게 된다. 기존품 개량 작업 시기에 맞춰 국산화 개발품을 적용하기 위해서는 실용화 연구가 조속히 이루어져 안정성 검증, 현차시험을 통한 신뢰성 확보가 시급한 실정이다.

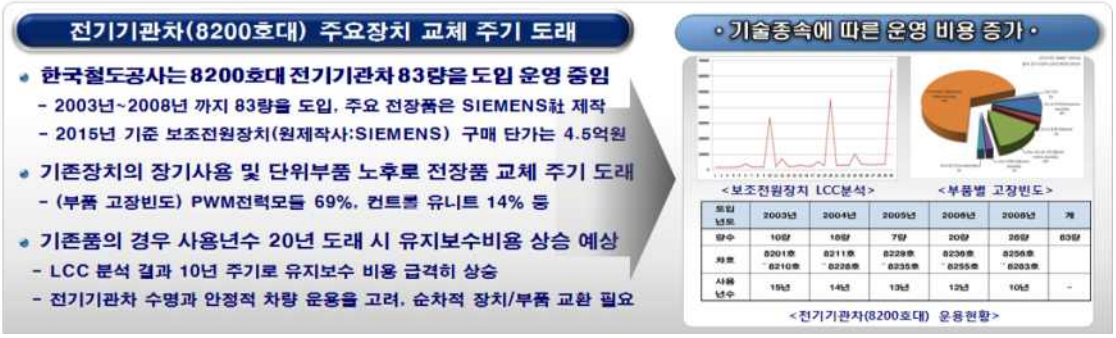


그림 4. 전기기관차 주요장치 교체주기 및 운용현황

(4) 철도차량의 안정적 운용 및 유지보수성 향상

Siemens가 개발한 8200호대 전기기관차용 보조전원장치의 경우 장치의 소형화 및 모듈화에만 집중하여 유지보수 관점에서의 접근이 매우 열악한 구조로 되어 있다. 특히 전력스택(PWM Module)의 경우 모든 전력소자, 캐패시터, 버스바, 센서 및 제어장치가 하나의 스택으로 조립되어 있어서 작은 고장의 경우에도 스택 전체를 교환해야 하는 등 기본적인 합리성이 결여되어 있다.

나. 경제적 측면

(1) 철도부품 산업의 육성 및 국부 유출 방지

전기기관차(8200대)용 보조전원장치 국산화 개발품을 기존 대비 70%의 가격으로 적용함으로써 수입대체 효과에 의한 유지보수 비용을 절감과 부품 조달 기간 단축 등 차량 운용 향상과 유지보수 체계 정립에 기여할 수 있다.

그림 5. 보조전원장치 국산화에 따른 기대효과

3. 연구개발 범위

가. 이중계 보조전원장치 실용화 기술개발

8200호대 전기기관차의 보조전원장치는 주변압기에서 공급되어지는 단상 AC전원을 변환하여 전기기관차의 송풍기 및 다른 보조전력 부하에 가변전원을 공급하는 장치이다. 주요구성은 전력변환모듈(4QC, PWM), 통신제어기(SIBCOS), MVB통신장치 등으로 되어 있으며 PWM 컨버터에 의한 입력역률 제어 및 VVVF 인버터에 의한 가변전압/가변주파수 출력이 특징 컨버터와 인버터가 하나의 전력변환장치(PWM 모듈)으로 구성되어 있고 장치의 고장에 대비하여 각각 80kVA의 변환능력을 갖춘 2중계의 장치로 구성되어 있다. PWM 모듈은 일체형 구조로 되어 있어서 고장 발생시에는 모듈 전체를 교체하는 방법을 사용하므로 차상에서의 유지보수성이 매우 열악한 문제점을 가지고 있다.

그림 6. 8200호대 전기기관차 보조전원장치

나. 보조전원장치 통신제어기(SIBCOS) 실용화 기술개발

보조전원장치의 모든 기능을 총괄하여 통제하는 통신제어기 SIBCOS는 MVB 통신 뿐만 아니라, 전원 입/출력, 아날로그 신호 입/출력, 온도입력 등과 같은 여러 가지 신호 데이터를 취득하고 이를 처리하여 중앙제어장치(CCU) 및 견인제어장치(TCU)에 전송하는 기능을 담당한다. SIBCOS는 다른 장치들과 MVB 통신을 담당하는 MVB 통신부, 모든 신호의 제어를 담당하는 Processor부, 프로그램 및 데이터를 저장하는 메모리부, 외부 장치와 Interface를 담당하는 CAN과 RS232 Interface부, 아날로그 신호 및 디지털 입출력 신호부로 구성된다. MVB 통신부는 CCU 및 TCU로부터 제어명령 및 상태 신호를 수신 받아, 보조전원장치에 MVB 통신을 통해서 전달한다.

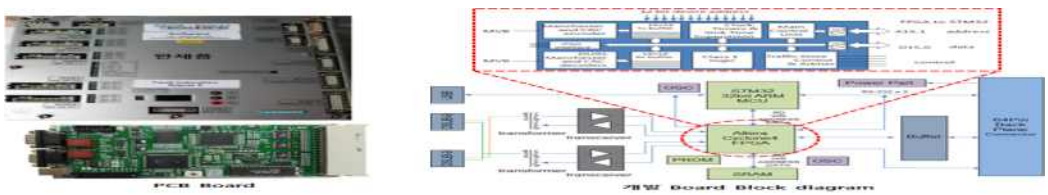


그림 7. 통신제어기 SIBCOS 외형(좌, 기존품), Block Diagram(우, 개발품)

다. 보조전원장치 LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측

본 과제는 8200호대 전기기관차 보조전원장치에 대한 해외 의존도를 낮추기 위하여 국산화 개발을 구현하는 것으로 이에 따른 시스템 개발 및 유지보수비용을 예측할 수 있는 수명주기비용(LCC)분석이 그 어느 때보다 필요하다. 보조전원장치 개발품의 LCC 절감 요소항목을 도출하고 유지보수비용의 효율성 극대화를 통해 총 소요비용을 절감할 수 있는 방안을 제시할 수 있을 것이다.

제2장 국내외 기술 개발 현황

제1절 국내외 기술개발 동향

전기기관차량용 보조전원장치는 현대 로템에서 License를 받아 공급한 8200호대(지멘스)용과 8500호대(도시바)용이 있으나 모두 국내 원천기술이 아니다. 보조전원장치와 관련된 기술은 선진국 대비 80~85% 수준으로 현재까지도 90년대에 개발된 기본기술에 주요 소자만 업그레이드한 장치가 대부분 사용되고 있다.

전기기관차(8200호대) 보조전원장치는 철도기술연구사업 “철도 핵심부품 및 장치 기술개발 1단계” (2012.12~2014.12) 기술개발을 통하여 장치의 시작품을 연구 하였으나 실용화 단계까지는 이르지 못하였으며, 현재 전량 해외수입에 의존하고 있는 상황이 이어지고 있다.

국내 철도차량용 보조전원장치에 대한 개발 실적을 살펴보면 이경산전㈜가 KTX 객차인버터를 개발하였고, ㈜우진산전이 전동차 보조전원장치를 개발하는 등 설계 제작 노하우를 축적하고 있다.

표 1. 보조전원장치의 형식 비교

비교항목	일반철도용 APU	전기기관차용 APU
H/W 구성	Converter + Inverter(Static)	Converter + Inverter(VVVF)
출력전압	3상 380V(440V)/60Hz 고정	3상 전압가변/주파수가변
부하장치	컴프레서, 냉난방기, 승객편의 장치	주로 기계실 내의 전동기류
적용 예	전동차(EMU), 트램, KTX 고속철도차량 등	8200호대, 8500호대 전기기관차량

유럽의 메이저 회사들의 경우 다양성의 충족을 위해 내부 장치를 모듈화 하고 용량과 입출력을 변화시키는 기술을 개발 중에 있다. 일본은 국내 사정과 유사하지만 신뢰성 향상에 많은 노력을 기울이고 있다. 예를 들면 SIV의 부분 2중계화 등 신뢰성 증대를 위한 주요 연구 등이다.

그림 8. 국내외 보조전원장치 기술 현황

철도차량용 MVB 통신장치의 경우 국내 개발 및 적용 사례는 없으며, 보조전원장치의 통신제어장치(SIBCOS) MVB 통신 프로토콜을 분석하고, 보조전원장치용 MVB통신모듈 시제품을 개발하여 시뮬레이션을 통하여 보조전원장치와의 기본 동작 시험을 국내에서 유일무이하게 ㈜앤츠에서 확인하였다. 또한, 아직 국내에서는 전기기관차(8200호대) 보조전원장치의 통신제어장치(SIBCOS)에 대한 기술개발이 진행된 사례는 없다.

제2절 국내외 시장동향 및 규모

철도차량과 관련된 전장품 기술은 차량 제작의 기술적 우위 및 경험이 풍부한 유럽(지멘스, ABB, 알스톰, 봄바르디아 등)과 아시아권에 집중적으로 진출한 일본(히타치, 미쓰비시, 도시바 등)의 제작사가 주도적으로 시장을 이끌고 있다. 최근에는 해외 기술을 도입하던 중국도 자체 전장품 개발에 적극적으로 나서고 있으며 개발도상국을 대상으로 한 철도차량 부품 수출에 열을 올리고 있다. 특히 중국남차와 중국북차가 합병되어 거대한 차량 제작회사가 탄생됨에 따라 지속적으로 연구개발을 확대하고 있다.

한편 전 세계적인 불황의 여파로 신규차량의 도입보다 기 도입된 차량의 성능개선을 원하는 이른바 차량 및 시설 개조사업(Overhaul, Refurbishment) 등도 틈새시장(수십만 달러에서 수억 달러 규모)을 형성하고 있다.

현재 국외로부터 도입된 8200호대 전기기관차의 운용기간이 12년을 넘어가면서 주요부품의 교체시기가 속속 도래하고 있어 보조전원장치를 비롯한 주요 전장품에 대한 실용화 기술개발이 시급한 실정이다. 통상 해외 제작사들은 예비품 및 보수품의 가격을 차량도입 시의 부품 가격에 비하여 수 배에 이르게 하는 영업 전략을 구사하고 있다.

표 2. 지멘스 전기기관차 EuroSprinter

차 종	생산대수	생산년도
EuroSprinter 64F(8200호대)	170	1996 ~ 2001
EuroSprinter 64F4	100	2003 ~
EuroSprinter 64U	360	2000 ~

☞ 출처: http://en.wikipedia.org/wiki/Eurosprinte

8200호대 전기기관차는 2003년 초기 도입분 10량을 시작으로 2008년 까지 총 83량이 도입・운용되고 있다. '16. 3월을 기준으로 할 때 초기 도입분 10량은 사용년수가 13년에 도달하였고 2020년이 되면 17년에 달하게 되어, 주요 부품의 순차적 교체 등이 예상된다.

- 부품 수입대체에 따른 원가절감 및 국제수지 개선
  8200호대 보조전원장치는 약 373억원의 국비유출 방지효과가 있음
  (450백만원×1대×83량 = 37,350백만원, '15년 외자조달 금액 기준)
- 국내 중소기업 제작사의 매출 증대 및 국내시장 활성화
  8200호대 보조전원장치는 약 261억원의 매출이 발생
  (450백만원×70%×1대×83량 = 26,145백만원, 국산화시 수입가격의 약 70%적용)

표 3. 전기기관차(8200호대) 운용현황

차호	8201호 ~8210호	8211호 ~8228호	8229호 ~8235호	8236호 ~8255호	8256호 ~8283호	계	
도입 년도	2003년	2004년	2005년	2006년	2008년	-	비고
량수	10량	18량	7량	20량	28량	83량	
사용 년수	13년	12년	11년	10년	8년	-	' 16.3.기준
	17년	16년	15년	14년	12년	-	**' 20.3.기준**

제3장 연구 수행 내용 및 성과

제1절 연구수행 목표 및 내용

1. 연구개발 목표

구분	내용
최종 목표	○ 2중계 보조전원장치 실용화 기술개발 ○ 보조전원장치용 통신제어장치(SIBCOS) 개발 ○ 보조전원장치와 통신제어장치(SIBCOS) 인터페이스 기술 검증 ○ 전기기관차 보조전원장치 LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측
세부 목표	○ 2중계 보조전원장치 실용화 기술개발 - 보완 개선된 전력스택을 탑재한 보조전원장치 제작 - 동작특성을 고려한 보조전원장치 시험용 가변부하장치 제작 - 공장시험/현장적용 시험에 의한 실용화 기술 검증 ○ 보조전원장치용 통신제어장치(SIBCOS) 개발 - 전기기관차(8200호대) 보조전원장치 통신제어기술 구축 - 차상컴퓨터에 의한 통신제어 기술, 시퀀스 및 전압/주파수 가변능력 검증 - 보조전원장치용 통신제어장치(SIBCOS) 검증용 시험기 개발 * 통신제어장치의 입출력 신호 확인용 보드 개발 및 제작 * 통신제어장치의 고장코드 및 상태표시 기능을 담당하는 보드 개발 및 제작 * 기능 확인용 Main Board 및 Sub Board 개발(펌웨어, FPGA, S/W등) ○ 보조전원장치와 통신제어장치(SIBCOS) 인터페이스 기술 검증 - 관련 시험기준 검토 및 기술검증 - 90KVA*2급 보조전원장치(SIBCOS 포함) 시험(공장시험, 조합시험, 부하시험) - 보조전원장치 조립체 실차 탑재 검증 - 주변환장치와 연계시험 및 부속기기와 인터페이스 성능검증 - 현차 적용시험(사계절 및 60,000km 이상) ○ 전기기관차 보조전원장치 LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측 - 개발된 보조전원장치의 하드웨어 신뢰도 예측 - 보조전원장치의 LCC 절감 방안 제시

2. 연구성과 점검기준

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	성과지표
1차 연도 (2016)	보조전원장치 인터페이스 검증	실용화 기술개발을 위한 기술검토	공정회의 및 기술검토 회의	보고서
			성과물 및 기술자료 검토	보고서
			고장분석	분석서
		인터페이스 검증	검사·시험항목 선정	검토서
			구성품 기능 시험	성적서
	2중계 보조전원장치 실용화 기술개발	전력스택 개발	전력스택 회로 설계	설계서
			기능 및 보호동작 시험	성적서
		냉각장치 기술개발	냉각장치 설계	설계서
			냉각장치 제작	시제품
		GDU 기술개발	IGBT 일체형 GDU 회로 설계	설계서
			IGBT 일체형 GDU 제작	시제품
		제어유닛 기술개발	제어 PCB 설계 및 제작	시제품
		보조전원장치 설계	외함설계	설계서
			입출력 필터회로 설계	설계서
		가변부하장치 설계	가변부하장치 설계	설계서
	통신제어부 (SIBCOS) 기술개발	MVB 통신분석장치 개발	Portable MVB 분석장치 개발	시제품
		회로도 및 신호분석	입출력 신호 및 MMI Signal 분석	보고서
		SIBCOS 회로도 및 기구설계	SIBCOS 설계	보고서
		SIBCOS 시제품 제작	SIBCOS 시제품 제작 검토	보고서
		SIBCOS 검증용 시험기 제작	검증용 시험기 설계	보고서
	LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측	기존 보조전원장치 LCC 분석	주요부품 고장이력 분석	보고서
			비용분류구조(CBS)분석	보고서
2차 년도 (2017~2018)	보조전원장치 인터페이스 검증	실용화 기술개발을 위한 기술검토	공정회의 및 기술검토 회의	보고서
		인터페이스 검증	보조전원장치와 SIBCOS간 조합시험	보고서
			정적/동적 시험	성적서
		실용화 기술 검증	현차시험 (사계절, 60,000km)	결과보고서
	2중계 보조전원장치 실용화 기술개발	보조전원장치 시제품 제작	90KVA×2급 보조전원장치 시제품 제작	시제품
		가변부하장치 제작	동작특성을 반영한 가변부하장치 제작	시제품
		보조전원장치 공장시험	성능 사양 검증	성적서
	통신제어부 (SIBCOS) 기술개발	통신프로토콜 분석	프로토콜분석 및 시뮬레이션 검증	보고서
		SIBCOS 시제품 제작	통신제어기(SIBCOS) 시제품 제작	시제품
		SIBCOS 공장시험	성능사양 검증	성적서
		SIBCOS 검증용 시험기 제작	검증용 시험기 제작	시제품
	LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측	보조전원장치 개발품의 하드웨어 신뢰도 및 수명주기비용 예측	보조전원장치 개발품 하드웨어 신뢰도 및 수명주기 비용 예측	보고서

3. 연구수행 방법

표 4. 연구개발 방법

구분		세부기술 및 방법
보조전원 인터페이스 기술 검증	실용화 개발을 위한 기술검토 및 성능시험	- 관련 시험기준 검토 및 기술검증 - 90KVA*2급 보조전원장치(SIBCOS 포함) 공장시험, 조합시험, 부하시험
	인터페이스 검증	- 보조전원장치 조립체 실차 탑재 검증 - 차량장치 및 부속기기와 인터페이스 성능검증
	실용화 기술 검증	- 현차 적용시험(사계절 및 60,000km 이상)
이중계 보조전원장치 실용화 기술개발	전력스택 기술개발	- 방열성능향상을 위한 IGBT 회로설계 및 제작 - 전력스택 기능 및 보호동작시험 - 컨버터/인버터 장치 보완개선 기술개발 - 보호 및 인터페이스 회로설계 및 제작
	보조전원장치 전력스택용 냉각장치 기술개발	- 개선된 냉각장치 설계/제작 - 냉각장치 성능시험
	IGBT 게이트제어유닛(GDU) 기술개발	- IGBT 일체형 게이트드라이버 회로설계 및 제작 - IGBT 고장감지 및 보호회로 설계 - PWM 동작시험 및 게이트 저전압/과전압 시험
	보조전원장치 제어유닛 기술개발	- 32bit DSP를 적용한 전력변환기 제어용 A/D 회로설계 및 제작 - 유지보수향상을 위한 제어기 설치위치 변경 - 내노이즈 향상을 위한 제어PCB 설계 제작
	시험용 가변부하장치 제작	- 보조전원장치 시험용 가변부하장치 회로설계 및 제작 - 보조전원장치 시험용 부하장치 제작
통신제어기 개발	SIBCOS 전용 MVB 통신 분석 장치개발	- 휴대 및 적용이 편리한 Portable Type MVB 분석 장치 개발 - 통신분석 및 프로토콜 생성기능을 포함한 전용 소프트웨어 개발 - 분석 및 운용 매뉴얼 작성(제품사양서)
	SIBCOS용 MVB 통신 프로토콜 분석	- 1단계결과물의 미완성된 프로토콜 분석 및 확인 작업 - 리버스 엔지니어링을 통한 시뮬레이션 검증 - 통신제어장치(SIBCOS)용 MVB 통신 프로토콜 분석서 작성
	SIBCOS 기본 회로도 및 기구 설계	- 보조전원통신제어장치 입출력 신호분석을 통한 입출력 회로 설계 - 보조전원장치 MVB통신 프로토콜 분석을 통한 MVB 통신 회로 설계 - 입출력 신호 및 MVB 통신을 포함하는 통신제어장치 기구 설계 - 보조전원장치의 제어부 전체 회로도 설계 - 보조전원장치의 통신제어장치(SIBCOS) 회로도 및 기구부 수정보완
	SIBCOS 시제품 제작	- 보조전원장치의 통신제어장치 보드 제작, 기구부 제작 및 조립 - 보조전원장치의 통신제어장치 디버깅, Firmware 개발 및 시험
	검증용 시험기 제작	- 시험기 전자/기구 설계 및 Firmware 개발 - 조합시험 및 검증을 위한 소프트웨어 개발
LCC 분석	보조전원장치 기존품 LCC 분석	- 수명주기비용 분석기법 자료 수집 및 조사 - 기존 보조전원장치의 LCC 분석, 비용분류 구조(CBS) 작성
	보조전원장치 개발품 LCC 분석	- 비용평가 모델 및 관계, LCC profile개발 - 보조전원장치 개발품 PBS 도출민감도 분석 및 최적 가치 대안 선택 - 보조전원장치 개발품의 LCC 예측
	보조전원장치 LCC 향상 방안 도출	- 기존품 및 개발품의 LCC 비교 분석, 개발품 주요부품의 고장율 분석 - LCC절감을 위한 요소항목 제시, 유지보수비용 절감을 위한 방안 제시

가. 주관연구기관(한국철도공사)

(1) 보조전원장치와 통신제어장치(SIBCOS) 인터페이스 기술 검증

- 보조전원장치 작동과 제어 및 통신 검증을 위한 공장시험(공인기관 입회 시험)
- 정적/동적 시험을 통한 기능확인 및 통신 성능 검증 시험
- 구내시운전시험을 통한 입출력 확인시험
- 실용화 검증을 위한 본선 시운전 (한국철도공사 현차시험 규정에 따름)

(2) 실용화 기술검증

- 본선시운전 시험을 통한 동작상태 확인 검증시험
- 사계절 및 60,000Km이상 시운전 시험을 통한 기술 검증

나. 공동연구기관(이경산전)

(1) 보조전원장치 시제품 제작

- 시작품(1단계 결과물)으로부터 개선된 전력스택 개발
- 방열성능향상을 위한 IGBT 회로.설계 및 제작
- 컨버터/인버터 장치 보완개선 기술개발, 보조전원장치 외함 설계 및 제작

(2) IGBT 게이트제어유닛(GDU) 기술개발

- IGBT일체형 게이트드라이버 회로설계 및 제작
- IGBT 고장감지 및 보호회로 설계, On/Off 비대칭 전류제어 기술개발
- PWM 동작시험 및 게이트 저전압/과전압 시험

(3) 보조전원장치 제어유닛 기술개발

- 32bit DSP를 적용한 전력변환기 제어용 아날로그/디지털 회로 설계 및 제작
- 유지보수 향상을 위한 제어기 설치위치의 변경
- 내노이즈 향상을 위한 제어 PCB 설계 및 제작

(4) 보조전원장치 전력스택용 냉각장치 기술개발

- 냉각용 Pipe와 기존 히트싱크를 결합한 개선된 냉각장치 설계 및 제작
- 히트싱크 전체의 평균적 냉각효과 상승방법 도출, 냉각장치 성능시험

(5) 시험용 가변부하장치 제작

- 보조전원장치 부하시험용 가변부하장치 제작

(6) 공장시험, 현차 적용 시험 및 본선 시운전

- 보조전원장치 성능 사양 검증을 위한 공장시험
- 정적/동적 시험을 통한 기능확인 및 SIBCOS와의 인터페이스 검증 시험
- 구내시운전시험을 통한 입출력 확인시험 지원(시험주관 : 한국철도공사)
- 실용화 검증을 위한 본선 시운전 준비

(7) 실용화 기술검증

- 본선시운전 시험을 통한 동작상태 확인 검증시험 지원
- 사계절 및 60,000Km이상 시운전 시험을 통한 기술 검증 지원

다. 공동연구기관(앤츠)

(1) 보조전원장치의 통신제어장치(SIBCOS)용 MVB 통신 프로토콜 분석

(2) 보조전원장치의 통신제어장치(SIBCOS) 검증용 시험기 제작
- 신호 입출력 및 통신제어신호 검증을 위한 보드설계 및 Firmware 개발
- 조합시험 및 검증을 위한 소프트웨어 개발

(3) 통신제어기(SIBCOS) 시제품 제작
- 보조전원장치의 통신제어장치 보드 제작, 기구부 제작 및 조립
- 보조전원장치의 통신제어장치 디버깅, Firmware 개발 및 시험

(4) 공장시험, 현차 적용 시험 및 본선 시운전
- 통신제어기(SIBCOS) 성능 사양 검증을 위한 공장시험
- 정적/동적 시험을 통한 기능확인 및 보조전원장치와의 인터페이스 검증 시험
- 구내시운전시험을 통한 입출력 확인시험 지원(시험주관 : 한국철도공사)
- 실용화 검증을 위한 본선 시운전 준비

(5) 실용화 기술검증
- 본선시운전 시험을 통한 동작상태 확인 검증시험 지원
- 사계절 및 60,000Km이상 시운전 시험을 통한 기술 검증 지원

라. 공동연구기관(한국교통대학교)

(1) 전기기관차 보조전원장치 LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측
- 기존 보조전원장치 수명주기비용 분석
- 기존 보조전원장치 주요부품 고장이력 분석, 기존 보조전원장치 비용분류구조(CBS) 분석
- 기존 보조전원장치의 수명주기비용 절감 방안 제시

(2) 보조전원장치 개발품의 수명주기비용 예측
- 보조전원장치 개발품 수명주기비용 profile model 개발
- 민감도 분석 및 최적 가치 대안 선택, 보조전원장치 개발품 하드웨어 신뢰도 예측

그림 9. 연구개발 수행체계

제2절 연구과제 진행 프로세스

1. 인터페이스 및 실용화 기술 검증

가. 기구 설계 및 하드웨어 인터페이스

개발품의 치수와 전체 중량은 기존품(700kg)과 동일하게 설계되어 이에 따른 중량 변화에 따른 영향은 없을 것으로 판단되나, 개발품 제작 공차 및 취부방식 등에 대한 현차상태를 확인하여 호환성에 대하여 조사 및 시험하였다.

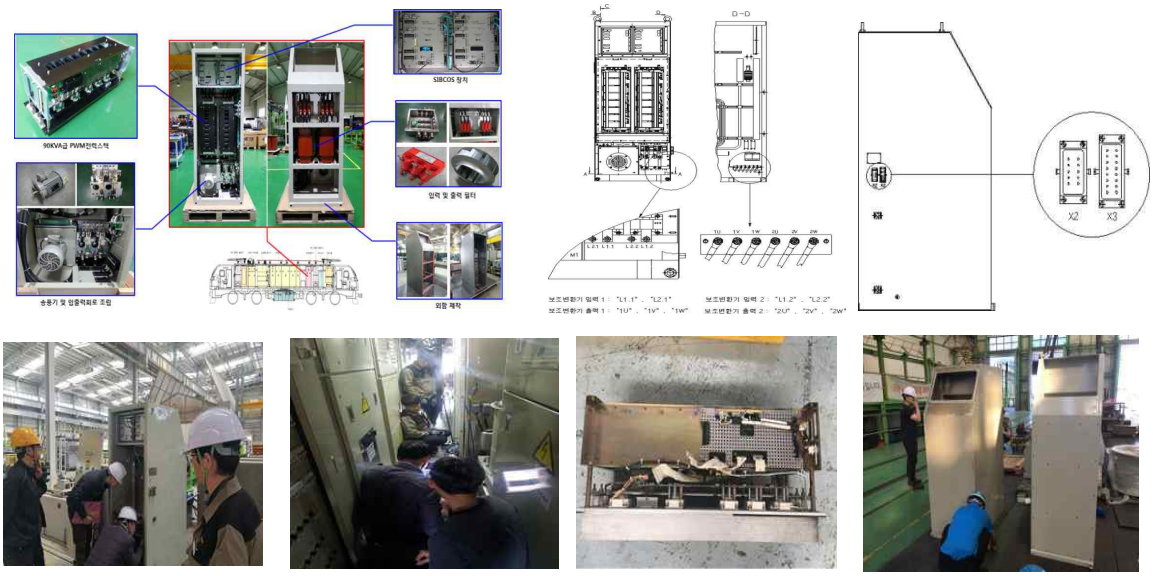


그림 10. 하드웨어 인터페이스 조사

나. 보조전원 제어 및 동작성능

차량의 정상적 동작절차에 의거하여 차량을 기동, 보조전원장치의 기능을 확인한다. 보조전원장치는 기동 된 이후에 동작하는 보조전원계통의 기기를 규정된 순서대로 동작시키며 보조전원장치의 동작을 확인하여 이상이 없어야 한다. 개발품이 정상적으로 기동 된 상태에서 출력주파수를 최대 및 최소로 가변하며 입출력 전압, 전류 및 주파수를 측정하고 기존품과의 성능을 비교・검증 하였다.

표 5. 개발품 제어기능 검사 기준

검사항목	검사기준	관련사진(고장검지/기록)
제어시험	신호 및 통신 연결, 접촉기 제어 성능	
기동 및 차단시험	보조전원장치 기동 및 차단	
정상특성시험	상태표시, 주파수 가변, 전원 위상	
연장급전 시험	보조전원 1, 2, HEP 차단, 자동연장급전	
고장검지 및 처리	고장현지, 검지 및 처리, 재기동 성능	
감시 및 기록	보조전원장치 고장 표시/기록	
중련운전	보조전원 제어 성능	

다. 통신 분석 및 호환성 시험

전기기관차(8200호대)의 SIBCOS-M1300에 적용된 I/F와 통신프로토콜을 분석하여 개발품 보조전원장치가 기존 시스템(SIBAS32)과 완벽하게 연동하여 구동하는데 가장 핵심 연구 활동이라 할 수 있으며, 기존품에 대한 기술분석과 현차 시험을 통해 호환성을 검증하였다.

표 6. SIBCOS 통신 분석

분석대상	분석내용	분석활동	시험기준
보조전원제어장치 (SIBCOS-M1300)	MVB 외부 신호 내부 신호	기술자료 검토, 파형분석, 포트검색 MVB 프로토콜 분석, 외부신호 관계, CAN 프로토콜	정적/동적 시험 절차서

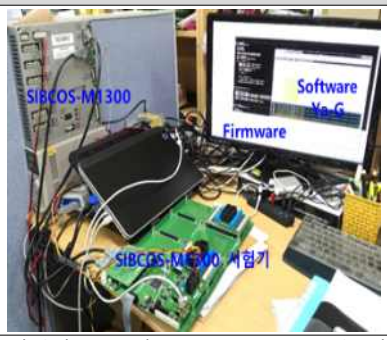
기존품 분석	현차시험	운전실화면표시기 검증
	파악된 기능을 현차시험을 통해 통신 데이터의 변화 값을 취득하여 데이터가 의미하는 프로토콜 분석	시험기와 기존품을 연결하여 분석된 프로토콜을 전송, 화면표시기(CCU MMI)의 화면변화를 통해 검증
	실험실분석	현차시험 검증
		
기술문서, 기존품 분석을 통해 인터페이스 사양, 기능 확인	시험기를 통해 SIBCOS-M1300에 할당된 포트에 값을 송신하여 응답하는 값을 취득 및 정리	운전실 화면표시기에서 점증이 되지 않는 신호(내부신호)를 현차 검증

표 7. 개발품 인터페이스 기술 검증

구분	시험내용	시험방법	평가기준/결과
기구 설계	개발품 조립체 취부 호환성 Binary, Analog, MVB, 입력/출력 전원 연결	* 개발품 차내 설치 * 설치 레일/스터드 볼트 조립 * 통신 및 전원 연결	정적시험절차서/성적서
통신	차내 통신 상태 및 기능	* 차량 전원(DC110V) 투입 * 통신 및 감시기능 시험	SIBCOS 통신분석서 조합시험 절차서/성적서
제어 감시	기동 및 차단절차, 주파수 변경, 정상/연장급전 SIBCOS 및 CCU 고장기록, 현시	* 가선전압(AC25KV), MCB 투입 * 제어 및 성능 등 시험/계측 * 감시/기록(SIBAS moni)	정/동적 시험절차서/성적서 보조전원 고장코드표
안전	방전시간 방전표시등 기능 등	* 계측 및 확인	정적시험절차서

2. 연구수행을 위한 공정회의 및 기술검토 회의

연구 개발품의 원활한 현차 적용 시험 수행을 위하여 기존품의 관련 문헌 및 기술자료를 토대로 하드웨어 및 소프트웨어 사양을 분석하고, 현차시험 목표 달성과 개발품 실용화 성능 향상을 위한 시스템 요구사항 및 유지보수 측면의 사용자 요구사항을 도출하였다.

- ○ 전기기관차 보조전원장치 개발품 설계 및 시험 기준의 검토 및 보완
- ○ 현차시험을 위한 기술검토 및 안전성 검증 등
- ○ 공장시험 및 제3자 입회시험 시험절차 및 기준 마련
- ○ 보조전원장치와 통신제어기(SIBCOS) 통신 검증 및 조합시험 시행 절차 및 방법
- ○ MVB 통신 분석 및 검증용 시험기 개발을 위한 신호 및 시스템 요구사항 등
- ○ 보조전원장치 및 부품별 고장 통계 및 분석
- ○ 전기기관차 통신프로토콜 분석 및 현차조사를 위한 업무 협의
- ○ 전기기관차 보조전원장치 운용 절차 및 사용 조건에 대한 검토
- ○ 현차시험 사전점검 및 기술검토, 개발품 점검 및 유지보수 방안 등
- ○ 개발품 현차시험 모니터링 및 성능검증 방안 결과 검토 및 하절기 관리방안

그림 11. 공정회의 및 기술검토 회의

표 8. 공정회의 및 기술검토회의 일시 및 장소

순번	회의구분	일시	장소	주요사항
1	공정회의	2017.03.30.~ 03.31.	한국철도공사 제천	연구과제 계획 점검, 실용화 검증방안 등
2	기술회의	2017.04.12.~ 04.13.	한국철도공사 제천	현차시험 기술검토
3	공정회의	2017.04.27	한국철도공사 본사	연구공정 및 실용화 기술검증 방안 협의
4	기술회의	2017.05.18.~ 05.19	한국철도공사 제천	현차시험 사전조사 및 기술검토 회의
5	기술회의	2017.06.01	한국철도공사 제천	SIBCOS 개발품 현차시험 관계자 회의
6	공정회의	2017.06.30	이경산전(주) 연구소	개발품 시험 및 실용화 기술검증
7	기술검토	2017.07.13.~ 07.20.	한국철도공사 본사	현차시험 항목 및 시험 기준 등 기술검토
8	기술검토	2017.09.11.~ 09.22.	한국철도공사 제천	보조전원장치 조합시험 및 기술 보완 등
9	공정회의	2017.11.23.~ 11.24	한국철도공사 제천	연구개발 중간보고회 및 기술 현안 등 논의
10	기술회의	2018.01.02.~ 01.22	한국철도공사 제천	개발품 현차 설치 및 현차 시험 시행
11	기술회의	2018.2.8.~ 9.29(3회)	한국철도공사 제천	개발품 정기검수 및 기능 검사 결과 등
12	공정회의	2018.10.29	한국철도공사	연구개발 최종 보고 및 현차시험 결과

3. 기술 분석을 위한 현차 조사 및 시험

실용화 기술을 완성적으로 개발하기 위하여 보조전원장치 기존 제품의 성능, 호환성과 인터페이스를 현차 조사 및 시험을 통해 분석하였다.

- ○ 보조전원장치 신호 및 입출력 배선 등 하드웨어 인터페이스
- ○ 전기기관차 보조전원장치 성능 및 동작 상태 현차 조사
  - 차량 기동 및 정지 시 CCU ↔ SIBCOS ↔ 보조전원장치 전력스택 통신 데이터 분석
  - 보조전원장치 입출력전압/주파수 가변 후 동작상태, 연장급전 시 전력흐름 등
- ○ 전기기관차 현차 실측 및 통신프로토콜 수집/분석
  - 외부신호와 CAN 및 MVB 통신 상관관계 파악, SIBCOS-M1300 데이터 분석
  - 보조전원장치 고장 감시 및 처리, 기록 성능, MVB 및 CAN 통신 데이터 채취
- ○ SIBCOS-M2000, SIBCOS-M1300 외부 신호관계 및 장치간 신호 파악
  - 외부신호와 CAN 및 MVB 통신 상관관계 파악
  - CCU에 영향을 미치는 신호파악 및 외부 인자와의 관계 파악
- ○ 보조전원장치 및 SIBCOS 연결상태 및 관련신호, 상관관계 파악
  - 기동 및 운행, 절연구간 통과, 연장급전 시험 등, 운행 패턴에 따라 파악
  - 운행 중 차량 신호에 따른 통신 데이터 채취, MVB통신에 따른 CAN 데이터 채취/분석
  - 통신제어장치 G5, G6의 Digital Output 동시 신호 채취를 위한 상관관계 분석
- ○ 시운전 및 계측을 통한 기존품 성능 조사
  - 실시간 MVB 및 CAN 통신데이터 채취
  - 임의 조건(HEP출력장치 차단 시)에 따른 MVB 및 CAN 통신데이터 채취

표 9. 기존품 성능 조사(본선 시운전)

시험항목	운행패턴	선로조건(구간거리)
기동 및 운행시험	정지 → 최대견인 → 30km/h → Notch off(2초) → B1(0)	평탄구간(0.5Km)
	정지 → 최대견인 → 50km/h → Notch off(2초) → B3(0)	평탄구간(0.8Km)
	정지 → 최대견인 → 70km/h → Notch off(2초) → B5(0)	평탄구간(1.2Km)
	정지 → 최대견인 → 70km/h → Notch off(2초) → B7(0)	평탄구간(0.7Km)
절연구간	정지→최대견인→80km/h→사구간 진입→통과 후 MCB 투입→B7(0)	절연구간(1.5Km)
연장급전 시험	정지 → APS 1차단 → 최대견인 → 80km/h → Notch off(5초) → B7(0)	경사도 7‰이내(1.3Km)
	정지 → APS 2차단 → 최대견인 → 80km/h → Notch off(5초) → B7(0)	경사도 7‰이내(1.3Km)
	정지 → APS 1, 2차단 → 최대견인 → 80km/h → Notch off(5초) → B7(0)	경사도 7‰이내(1.3Km)
	정지 → HEP 출력장치 차단 → 최대견인 → 80km/h →Notch off(5초) → B7(0)	경사도 7‰이내(1.3Km)

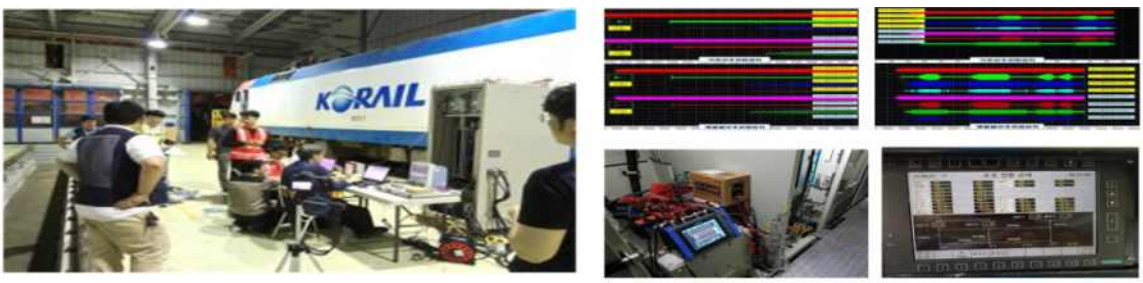


그림 12. 개발품의 조합시험(전기기관차 8236호, 2017.9.20.~9.22/제천차량사업소)

4. 현차시험 시험기준 검토

국가 R&D 철도기술연구사업「전기기관차(8200호대) 보조전원장치 실용화 기술개발」연구과제 최종 성과물의 성공적 현차시험 목표 달성을 위한 개발품 시험 기준의 적성성 및 현차 시험 관리 절차를 한국철도공사 관련 내규에 따라 검토하고, 차량의 운행 안전성 확보를 위한 관련 사항을 마련하였다.

가. 개발품 시험 기준에 대한 적정성

(1) 철도차량기술기준 일반철도차량 전기기관차 기술기준 4.6.1항 보호기능

(가) 보조전원장치는 이상전압 또는 과도전류에 대한 보호기능을 가져야 하며, 일시적 기능 이상의 경우 초기화 기능에 따라 정상 동작이 회복될 수 있어야 한다.

(2) 철도차량기술기준 일반철도차량 전기기관차 기술기준 4.6.2항 연장급전

(가) 보조전원장치에 고장이 발생한 경우 해당 보조전원장치는 전기적으로 분리되고 정상으로 작동하는 보조전원장치로부터 연장급전이 가능하여야 한다.

(나) 보조전원장치는 연장급전이 동작한 경우 차량 내 주요 회로 및 장치에 전원을 공급할 수 있는 용량을 확보하여야 하며, 과부하를 방지하기 위하여 차량 운행에 지장이 없는 보조전원계통의 부하가 차단될 수 있어야 한다.

(3) 주요장치별 기능(보조전원장치)은 철도차량기술기준 (KRTS-VE-PART46, 일반 철도차량(전기기관차)) 기술기준에 의해 시행하여야 한다.

표 10. 철도차량기술기준 주용장치별 기능

관련항목	내용	비고
4.주요장치별 기능 4.6 보조전원장치	4.6.1 보호기능	공장시험/현차시험
	4.6.2 연장급전	현차시험

(4) 개발품의 진단목록에 대하여, 기술사업화 단계에서 국제표준으로 제시하고 있는 목록을 조사하고 철도차량용 전기기기 요구사항 및 IEC 등 국제표준을 규격에 반영하고 COVERAGE에 대해 시험 분석이 필요하다고 판단된다.

나. 철도차량 부품국산화 업무 절차서(공사 차량내규) 기술검토 및 보완

(1) SIBCOS-M1300는 MMI(Man-Machine Interface)를 통해 보조전원장치의 결함발생 유무, 고장코드(또는 고장내역), 프로세서 데이터를 표시하고, 고장내역을 삭제하는 기능을 가지도록 설계되었다. 개발품의 성능 확보를 위하여 보조전원장치 관련 통신포트 및 비트별 통신프로토콜 사양을 정의하고 호환성을 확인할 필요가 있다.

(2) 개발품 설계 기준에 따라 개발품의 고장을 분류하고, 각 고장에 대한 설명, 검지기준, 처리절차 및 조치방법 등을 포함한 고장코드집을 문서로 작성하고 현차시험을 통해 그 성능을 검증하여야 한다.

(3) 보조전원장치 자체 고장이나, 부하 장치의 기능고장에 의한 자동연장급전 시험, SIBCOS 통신제어기의 통신사양서 마련 및 성능 검증 방안 추가 등 검증, 정적 및 동적시험 절차 및 기준의 적정성 보완이 필요할 것으로 사료된다.

(4) 차량의 운행 안전성 확보 및 작업자 보호를 위한 사항의 검토 및 보완이 요구된다.

표 11. 개발품과 기존품 사양 비교

항 목		기존품 (2003년도입/지멘스)	개발품	비고
정격용량		80kVA×2	90kVA×2	독립 2중계
역률		0.95이상	0.97이상	전원품질 향상
효율		90%	92% 이상	
하드웨어 구성		4Q PWM CONV + INV	좌동	
냉각방식		강제풍랭식	좌동	냉각효율 상향 (온도변위, 최고온도)
인터페이스		RS232	RS232, RS485	
입력	정격전압	단상 AC 334V(가선 2.5kV)	좌동	
	주파수	60Hz	57 ~ 63Hz	
출력	전압	3상 0~440V	좌동	
	주파수	2 ~ 60Hz	0.1 ~ 100Hz	분해능 향상
	전압 형태	펄스폭 변조(PWM)파형	좌동	
	정격출력 용량	80KVA	90KVA	부하용량 증대
제어기		22bit MCU	32bit DSP	제어성능 강화
GDU		일체형 보드	독립 모듈형	유지보수성 향상
유지보수성		어려움	용이	스택 모듈화
MVB Interface		Baud rate:1.5Mbps, EMD	좌동	
MVB Controller		Siemens MVBCS1	Altera Cyclone4 이상	고성능 FPGA
SIBCOS MCU		SAF-C167/20MHz/16bit	STM32/168MHz /32bit	성능향상
SIBCOS MEMORY		2MB Flash-EPROM / 1MB SRAM	4G Flash / 2MB SRAM	용량상승
SIBCOS MMI Display		LED Display (Four-digit alphanumeric)	16x2 LCD	성능향상 (표시추가)
SIBCOS Interface		RS232, CAN, MVB	RS485, CAN, MVB	
기능		온도측정기능, 아날로그인풋기능, 아날로그출력기능 등	좌동	

5. 개발품 실용화 방안 및 절차

8200호대 전기기관차는 2003년 초기 도입분 10량을 시작으로 2008년 까지 총 83량이 도입・운용되고 있으며, '18.12월 기준 초기 도입차량의 경우, 사용 년수가 16년에 달하고 있다. 차량의 내구 연한과 장기 사용 부품의 노후 등을 고려할 때 향후 보조전원장치를 포함한 차량의 주요 장치에 대한 순차적 교체 등이 필히 요구된다. 주요 장치의 경우 사용연수 15년을 기준으로 한 시점에서 주요 부품의 대수선이 시행될 것으로 예상되어지며, 국산화 개발품으로 대체한다면 수입대체에 따른 비용 절감 효과 뿐 만 아니라, 안정적 부품 조달에 따른 차량 운용의 효율 향상, 부품 조달의 기간 단축, 유지보수 편의 향상 등의 간접적인 효과 또한 기대된다. 한국철도공사에서는 「공공기관의 개발선정품 지정 및 운영에 관한 기준」(기획재정부 고시 제2010-33호)에 따라, 개발 선정품 지정업무 절차와 관련한 위원회의 구성과 운영 등에 관한 사항을 “”한국철도공사 재무 제2017-2호(개발선정품 운영위원회 운영기준)으로 규정하고 있으며, 철도기술연구사업으로 수행 중인 “전기기관차(8200호대) 보조전원장치 실용화 기술개발” 연구과제의 성공적 목표 달성와 실용화 기술의 충분한 검증이 담보된다면, 철도차량부품 국산화 업무 관리 절차서에 따른 국산화 추진(실용화)이 가능할 것으로 사료된다.

가. 관계규정

(1) 개발선정품 운영위원회 운영기준(한국철도공사 재무 제2017-2호)

(2) 철도차량 부품국산화업무 관리 절차서(한국철도공사 제2012-01호, 2012.10.17.일 개정)

나. 주요내용 및 절차

(1) 개발선정품 운영위원회 운영기준 제12조(개발품 신청 및 접수) ① 중소기업이 철도공사 연구원과 공동으로 철도용품 국산화를 위한 연구개발을 완료하고 해당 개발품의 개발 선정품 지정을 원하는 경우에는 별지 제1호 서식에 의한 개발선정품 지정 신청서를 작성하여 연구원에 제출한다.

(2) 개발선정품 운영위원회 운영기준 제20조(개발선정품의 우선구매) ① 공사 활용부서에서는 「공공기관의 개발선정품 지정 및 운영에 관한 기준」제8조 및 「공기업・준정부기관 계약사무규칙」제8조제5호에 따라 개발선정품 지정일부터 3년 이내에 수의계약으로 구매할 수 있다.

(3) 철도차량 부품국산화업무 관리 절차서 제14조(공사규격서 제정)

부품국산화 추진과제의 성공적인 완료 시 엔지니어링부서는 아래와 같은 요청에 따라 공사 규격서를 제정한다. <개정 2012.04.10.>

그림 13. 개발품 선정근거 및 신청, 기술개발확인서

제3절 이중계 보조전원장치 실용화 기술개발

1. 장치일반

가. 장치사양 및 구성

표 12. 보조전원장치(개발품) 주요사양

항 목		규 격	비고
정격용량		90kVA×2	
역률		0.97이상	
하드웨어 구성		4Q PWM CONV + INV	
냉각방식		강제풍랭식	
인터페이스		RS232, RS485	동작시
입력	정격전압	단상 AC 334V(가선 2.5kV)	
	주파수	60Hz	
출력	전압	3상 0~440V	
	주파수	2 ~ 60Hz	
	전압 형태	펄스폭 변조(PWM)파형	
	정격출력 용량	90KVA	
제어전압		DC 110V	
특징		- 독립모듈형 IGBT GDU장착 - 전력스택의 블록화	

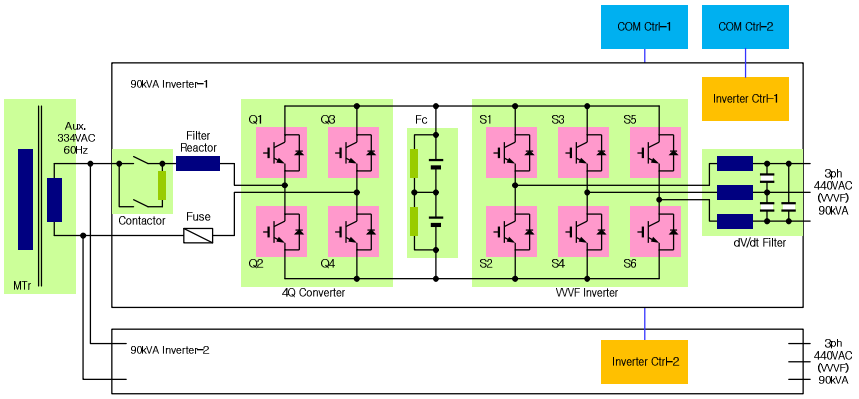


그림 14. 전기기관차 보조전원장치 전력회로 구성

전기기관차용 보조전원장치는 C/I형태의 Auxiliary Power Supply(APS)시스템으로 전기기관차의 송풍기, 공기압축기 그리고 다른 보조 전력부하에 전원을 공급한다. 전기기관차 1량당 1개의 보조전원장치가 탑재된다. 보조전원장치에는 각각 90KVA정격 출력을 갖는 두 개의 동일한 인버터가 내장된다. 따라서 1개의 보조전원장치를 탑재한 전기기관차는 2 × 90KVA의 출력을 갖는다. 위의 그림과 같이 기본적인 구조는 입력 측에 4상한 IGBT 컨버터와 출력 측에 3상 IGBT 인버터로 구성된다. 4상한 IGBT 컨버터는 주접촉기, 승압용 리액터, 충전회로, 휴즈 등을 통해 단상 교류권선에 연결되어 있으며, 3상 IGBT 인버터의 출력에는 L-C-R 필터회로를 사용하여 dv/dt를 제한한다.

나. 보조전원장치 설치위치

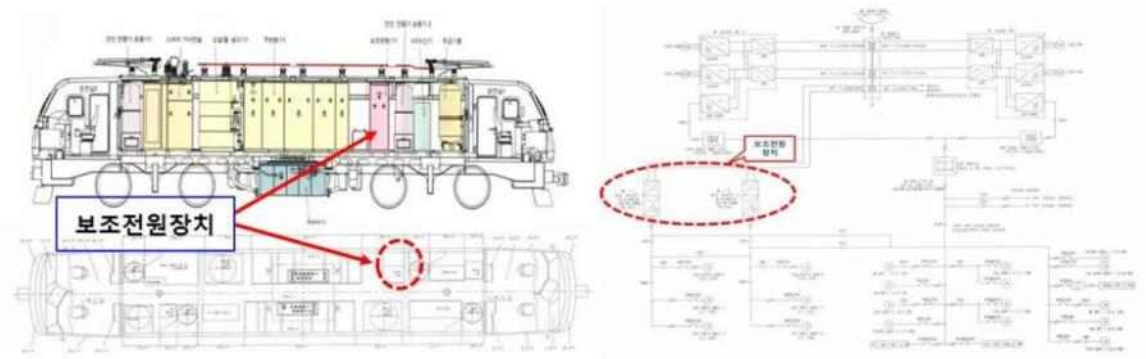


그림 15. 전기기관차(8200호대) 보조전원장치 위치

다. 기능 및 부하용량

보조전원장치는 전기기관차(8200호대)의 송풍기 및 공기압축기, 기타 다른 보조기기들의 전원을 공급하는 장치로 출력은 요구하는 대로 가변 또는 고정전압으로 공급할 수 있다. 부가적으로 교류부하들을 다시 그룹을 만들어 보조기기의 연장급전을 가능하게 한다.

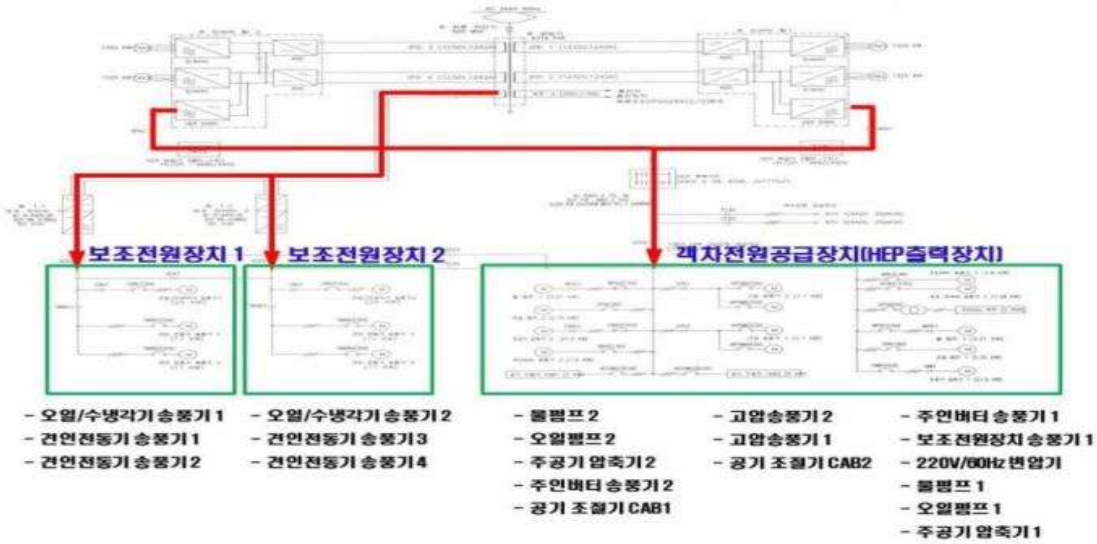


그림 16. 보조전원장치 그룹별 부하종류

표 13. 보조전원장치 그룹별 부하종류 및 부하용량

보조그룹	전원공급 (정상운용시)	부하종류	부하용량	비고
AUX L.1 (그룹 1)	보조전원장치 1.1	견인전동기 송풍기1, 견인전동기 송풍기2, 오일/수 냉각기 송풍기1	47KW	가변주파수 부하
AUX L.2 (그룹 2)	보조전원장치 1.2	견인전동기 송풍기3, 견인전동기 송풍기4, 오일/수 냉각기 송풍기2	47KW	가변주파수 부하

2. 이중계 보조전원장치 설계

가. 보조전원장치 PWM 컨버터 회로설계

(1) 설계조건

표 14. 컨버터회로 입력 설계조건

항 목	내 용	비 고
H/W 형식	4Q PWM IGBT 컨버터	승압
동작주파수 범위	60Hz (47 ~ 65Hz)	
정격입력전압	334Vac / 270A	90kW
입력저전압	230Vac	90kW
입력과전압	400Vac	90kW
출력전압	620Vdc / 145A	인버터 입력전압

(2) PWM 컨버터 기본설계

(가) IGBT 선정

① 저전압/과부하 조건을 고려한 최대 입력전류를 계산하면,

90kW * 1.3 / 230V = 509A

② 입력전압 최대는 400Vac, 출력전압은 620Vdc이므로 1200V급 IGBT를 사용하면 전압범위에 만족.

③ 단시간(10초) 과부하를 포함하여 IGBT는 1200V/450A급부터 사용 가능하지만 안전을 위해 1200V/600A급 이상으로 제한하였음

④ 기존장치에 사용된 62mm 모델 및 다른 형태의 IGBT를 검토하여 장단점 비교 후 최적의 IGBT 선정하였음

(나) IGBT 손실계산 조건

① 최근 출시된 저손실/고효율 4세대 IGBT를 대상으로 손실 계산 수행

② 손실계산은 IGBT 제조사(Infineon)의 시뮬레이션 툴(IPOSIM) 이용

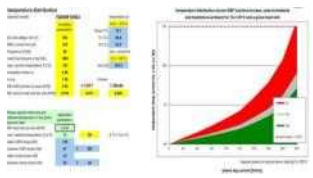
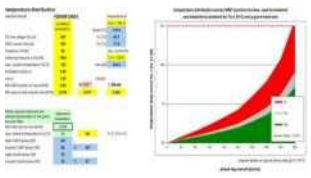
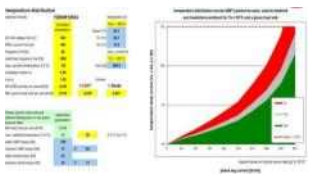
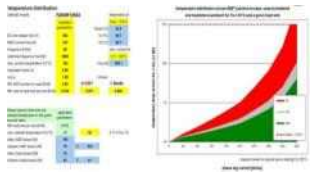
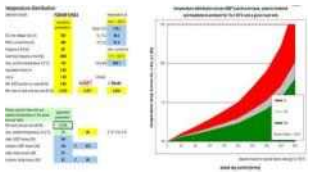
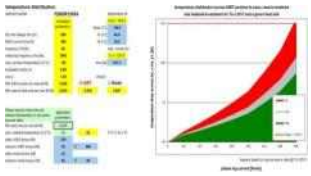
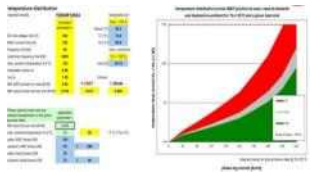
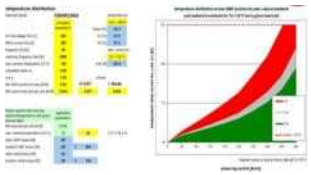
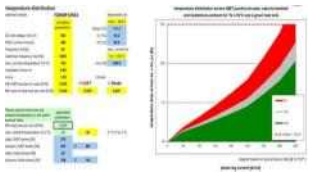
③ 정격전력은 90KW로 가정, 정격전압과 저전압조건(최대전류조건)에서 수행

④ 600A급 및 900A급 IGBT에 대하여 손실 계산

⑤ 외기온도는 50℃, 케이스 온도는 80℃로 가혹한 조건으로 계산 수행

(다) IGBT 손실계산서

표 15. 컨버터회로 IGBT 손실계산서

구분	600A급 IGBT 정격입력/정격부하 (조건 1)			600A급 IGBT 저전압입력/최대부하 (조건 2)			900A급 IGBT 저전압입력/최대부하 (조건 3)		
1.8kHz									
3.0kHz									
5.0kHz									
정격손실	1.8kHz	3.0kHz	5.0kHz	1.8kHz	3.0kHz	5.0kHz	1.8kHz	3.0kHz	5.0kHz
IGBT손실(W)	202	233	285	421	475	564	351	400	481
Diode손실(W)	44	61	90	67	89	124	73	98	142
모듈손실(W)	246	294	375	488	564	688	424	498	623
상대손실(P.U)	1.0	1.20	1.52	1.0	1.16	1.41	1.0	1.17	1.47

(라) 손실계산 결과

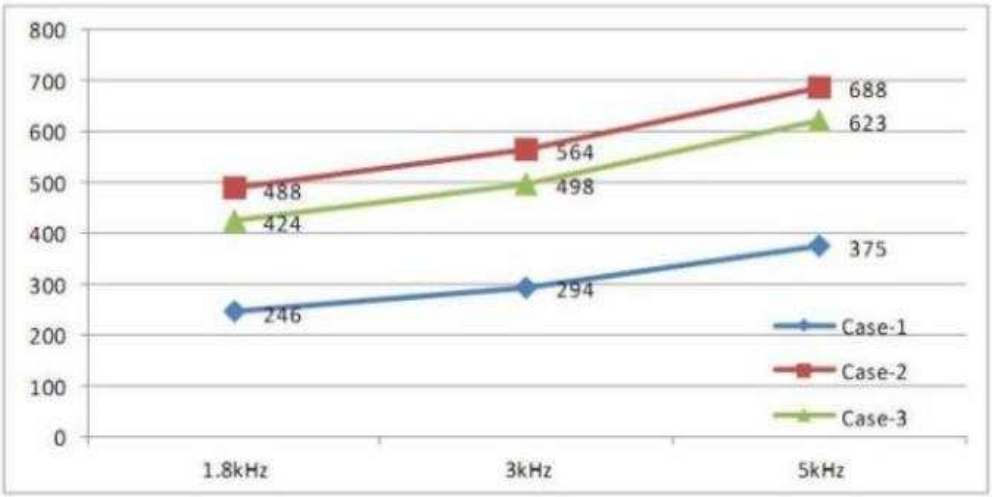


그림 17. 조건별 모듈손실(IGBT + DIODE) 결과비교 그래프

컨버터부의 IGBT 손실계산 결과를 정리하면 아래와 같다.

① IGBT 용량선정 : 손실 시뮬레이션 결과에 따르면 4세대 600A급 모델 IGBT를 사용할 때 5kHz의 스위칭 주파수에서도 최대접합면 허용온도에 약 20℃의 마진을 보장할 수 있음.

② 동작주파수 : 방열판의 크기를 고려하여 1.8kHz 스위칭 주파수로 선정

③ 최대손실 : 564W/module @509Ain (저전압이며 130% 부하조건, 600A급 사용)

(3) 전력회로 시뮬레이션

(가) 시뮬레이션 제어기 구성

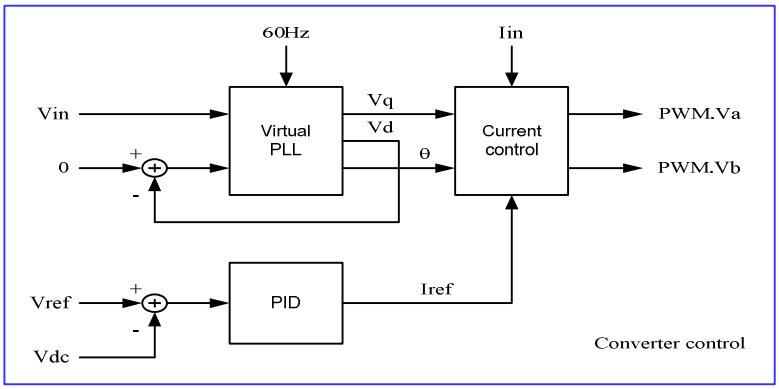


그림 18. 컨버터 제어기 구성도

(나) 시뮬레이션 조건

① 단상 입력에 대한 PFC 제어를 수행하기 위하여 가상 PLL 제어기를 사용

② 입력전류 고조파 저감을 위해 컨버터 A군과 B군에 대하여 Uni-polar PWM을 수행

③ 스위칭 주파수는 기존장치(1.8kHz)를 포함하여 1.5kHz ~ 5kHz 이내의 주파수를 선정

④ 현차시험 분석결과와 비교하여 유사도 및 개선된 효과 확인

⑤ 승압용 리액터는 1.5mH로 가정(기존 3.9mH)

⑥ DC Link 필터 캐패시터는 기존과 유사한 18mF으로 설정(기존 18.8mF)

(다) 시뮬레이션 파형

① 입력저전압 260V, 출력전압 620Vdc, fs=1.8kHz, Li=1.5mH, Fc=18mF, 50%부하

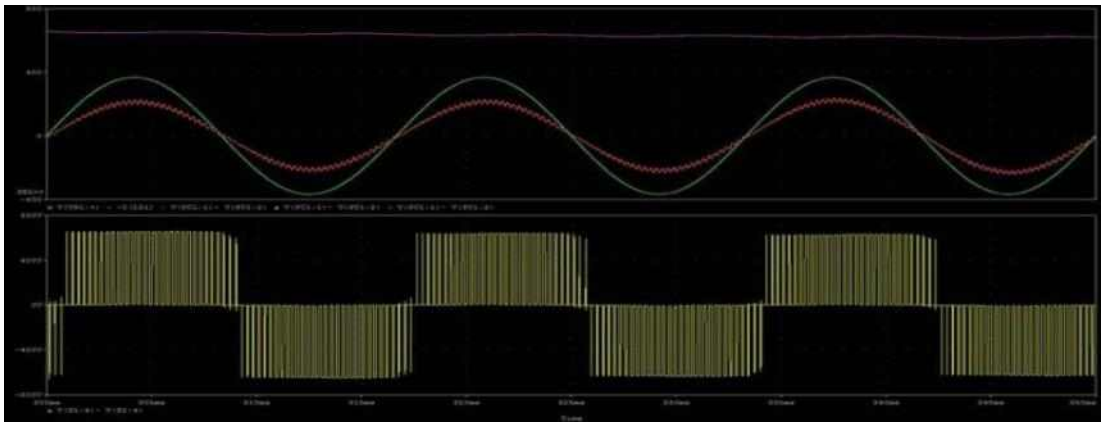


그림 19. 시뮬레이션파형(1)

② 입력저전압 260V, 출력전압 620Vdc, fs=1.8kHz, Li=1.5mH, Fc=18mF, 100%부하

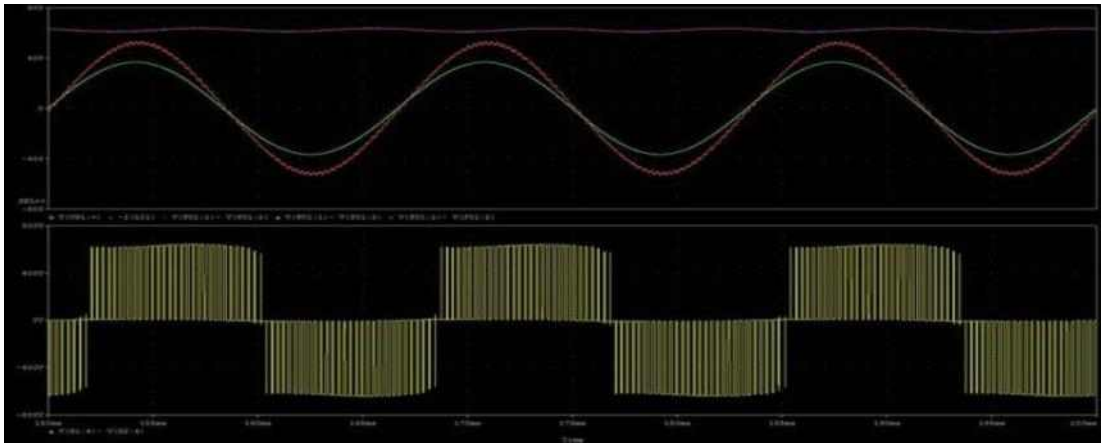


그림 20. 시뮬레이션파형(2)

③ 입력정격전압 334V, 출력전압 620Vdc, fs=1.8kHz, Li=1.5mH, Fc=18mF, 50%부하

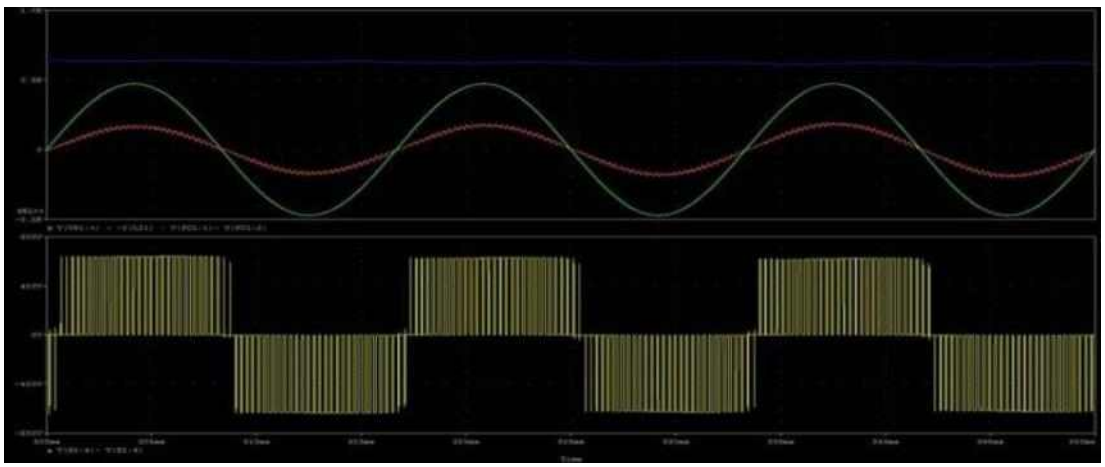


그림 21. 시뮬레이션파형(3)

④ 입력정격전압 334V, 출력전압 620Vdc, fs=1.8kHz, Li=1.5mH, Fc=18mF, 100%부하

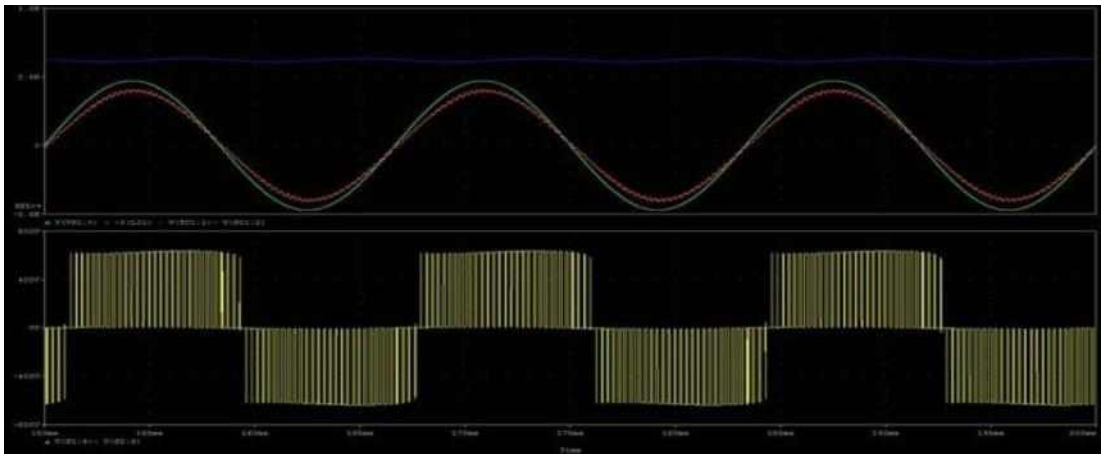


그림 22. 시뮬레이션파형(4)

⑤ 입력고전압 380V, 출력전압 620Vdc, fs=1.8kHz, Li=1.5mH, Fc=18mF, 50%부하

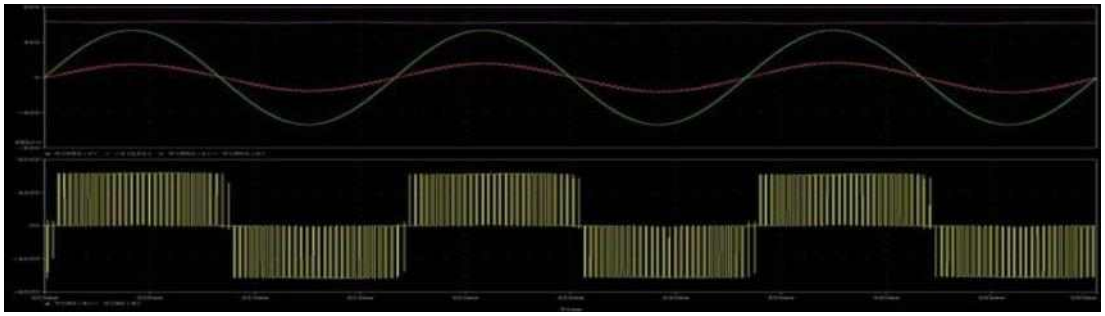


그림 23. 시뮬레이션파형(5)

⑥ 입력고전압 380V, 출력전압 620Vdc, fs=1.8kHz, Li=1.5mH, Fc=18mF, 100%부하

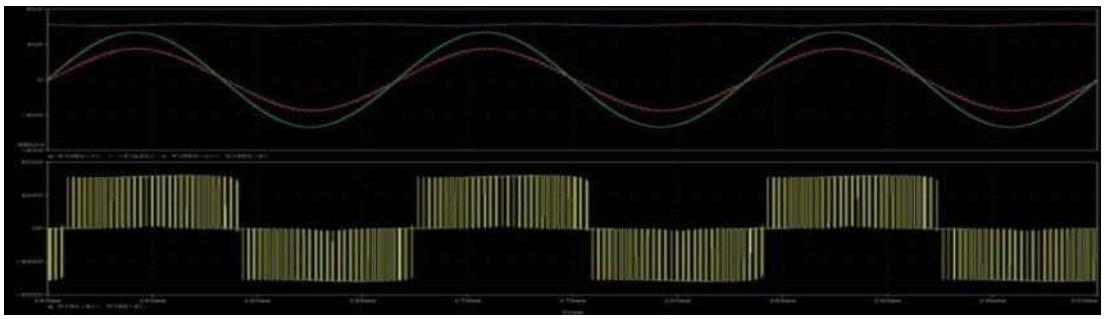


그림 24. 시뮬레이션파형(6)

(라) 시뮬레이션 결과

컨버터부의 PWM주파수를 1.8kHz로 선정하면 정격부하일 때 입력전류의 THD를 5% 이내로 제어하면서도 승압 리액터의 크기는 기존장치의 50%정도로 하는 것이 가능하다.

나. 보조전원장치 인버터 회로설계

(1) 설계조건

표 16. 인버터회로 입력 설계조건

항 목	내 용	비 고
H/W 형식	SVPWM IGBT 인버터	3상 교류전압
동작주파수 범위	1 ~ 60Hz	가변전압, 가변주파수
정격출력전압	3 phase, 440Vac / 118A / 60Hz	90kVA at PF=0.85(lag)
출력전압 범위	0 ~ 440Vac	V/F 커브
입력전압	620Vdc / 145A	컨버터 출력전압

(2) 인버터 기본설계

(가) IGBT 선정

① 정격부하 조건을 고려한 최대 출력전류를 계산하면,

90KVA*1.3/440V/√3=153.5Arms

② 입력전압 최대는 750Vdc, 출력전압은 440Vac이므로 1200V급 IGBT를 사용하면 전압범위에 만족됨

③ 단시간(10초) 과부하를 포함하여 IGBT는 1200V/150A급부터 사용 가능하지만 안전을 위해 1200V/400A급 사용하였음

④ 기존장치에 사용된 62mm 모델 및 다른 형태의 IGBT를 검토하여 장단점 비교 후 최적의 IGBT 선정하였음

(나) IGBT 손실계산 조건

① 최근 출시된 저손실/고효율 4세대 IGBT를 대상으로 손실계산 수행

② 손실계산은 IGBT 제조사(Infineon)의 시뮬레이션 툴(IPOSIM) 이용

③ 정격전력은 90kVA로 가정(PF=1.0), 정격전압(최대전류조건)에서 수행

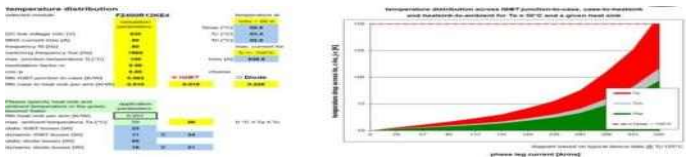
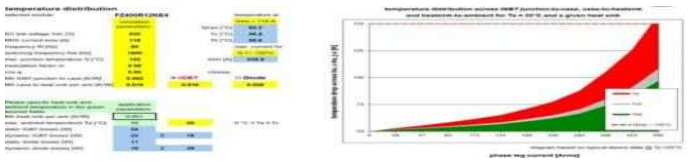
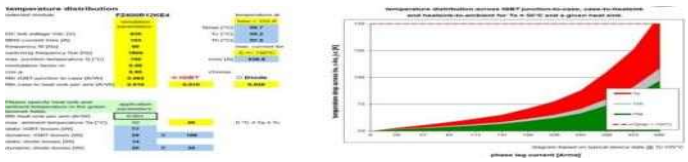
④ 400A급 IGBT에 대하여 손실 계산

⑤ 외기온도는 50℃, 케이스 온도는 80℃로 가혹한 조건에서 계산 수행

⑥ 인버터 출력은 기존장치와의 호환성이 필요하므로 PWM 주파수는 기존과 동일한 1.8kHz로 고정

(다) IGBT 손실계산서

표 17. 인버터회로 IGBT 손실계산서

구분	400A급 IGBT 정격전압 / Fs=1.8kHz		
50%부하			
100%부하			
130%부하			
정격손실	50%부하	100%부하	130%부하
IGBT손실(W)	34	76	106
Diode손실(W)	21	29	35
모듈손실(W)	55	105	141
상대손실(P.U)	0.52	1.0	1.34

(라) 손실계산 결과

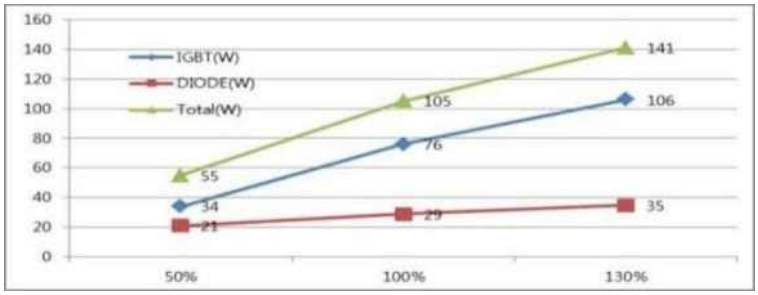


그림 25. 부하별 모듈손실 결과비교 그래프

인버터부의 IGBT 손실계산 결과를 정리하면 다음과 같다.

① IGBT 용량선정 : 손실 시뮬레이션 결과에 따르면 4세대 400A급 IGBT를 사용할 때 1.8kHz의 스위칭 주파수에서도 최대접합면 허용온도에 약 70도 이상의 마진을 보장할 수 있음
② 동작주파수 : 기존 부하장치와의 호환을 고려하여 1.8kHz 스위칭 주파수 선정(기존 900Hz일 때와 유사한 손실 발생할 것으로 추정)
③ 최대손실 : 141W/module @154Arms(정격전압이며 130% 부하조건, 400A급 사용)
④ 손실합계 : 105W*6=630W(Inverter total) at 100% 정격출력

(3) 전력회로 시뮬레이션
(가) 시뮬레이션 제어기 구성

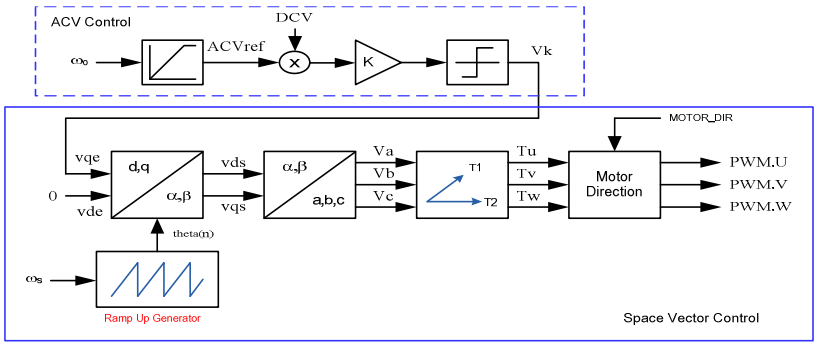


그림 26. 인버터 제어기 구성도

(나) 시뮬레이션 조건
① Feed forward 방식에 의한 출력전압 크기 제어
② 공간벡터제어(Space Vector Control) PWM을 수행
③ 스위칭 주파수는 기존장치(1.8kHz)를 포함하여 1.5kHz ~ 5kHz 이내의 주파수를 선정
④ 현차시험 분석결과와 비교하여 유사도 및 개선된 효과 확인
⑤ dv/dt 제한용 리액터는 40uH로 가정
⑥ dv/dt 제한용 캐패시터는 0.022uF으로 가정
⑦ dv/dt 제한용 댐핑저항은 33Ω으로 가정

(다) 시뮬레이션 파형

① 입력전압 620Vdc, 출력전압 196.8Vac, fo=27.1Hz, fs=1.8kHz, 20%부하

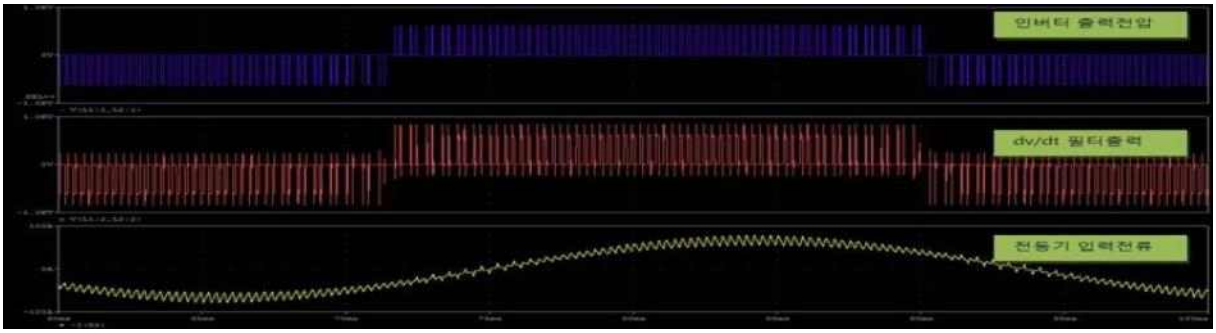


그림 27. 인버터시뮬레이션파형(1)

② 입력전압 620Vdc, 출력전압 311.4Vac, fo=42.5Hz, fs=1.8kHz, 50%부하

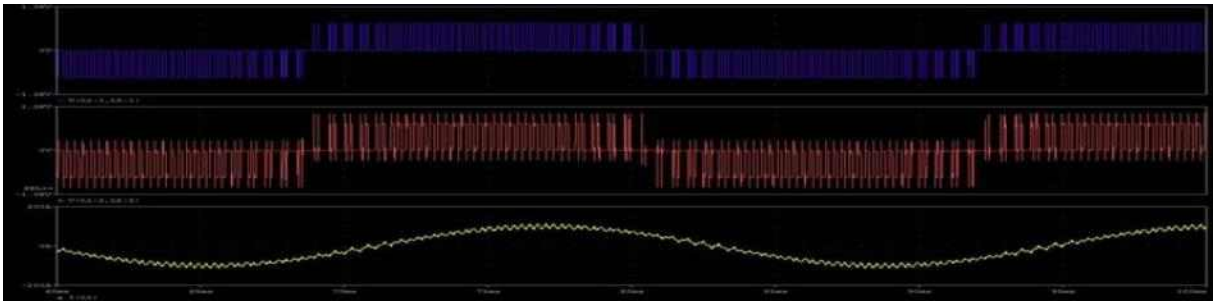


그림 28. 인버터시뮬레이션파형(2)

③ 입력전압 620Vdc, 출력전압 440Vac, fo=60Hz, fs=1.8kHz, 105%부하

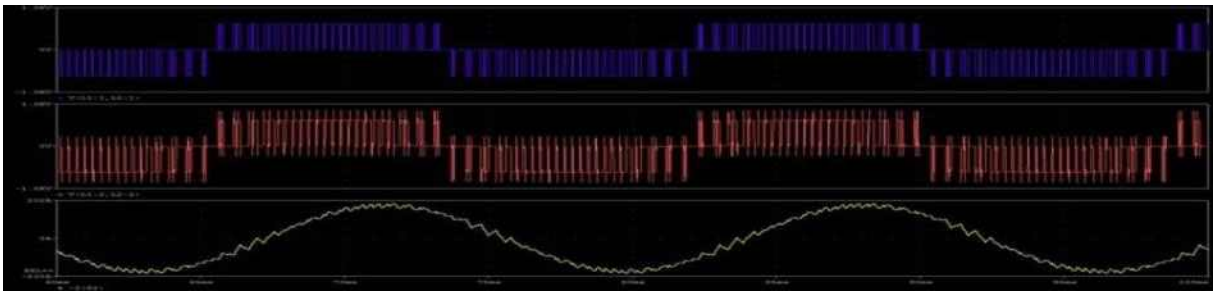


그림 29. 인버터시뮬레이션파형(3)

(라) 시뮬레이션 결과

① dv/dt 제한용 필터회로가 전 부하대역에서 정상적으로 동작하고 있다.

② 1.8kHz 스위칭 주파수를 사용하는 경우, 차량의 부하조건에 대하여 기존장치와 동일한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

③ PWM 주파수를 높이면 전류파형은 향상되지만 고주파 노이즈가 증가하므로 역효과 있음

다. 보조전원장치 dv/dt 제한필터 설계

(1) dv/dt 제한필터의 기능

인버터의 부하로 전동기가 주로 사용되고 있으며 전동기 부하의 경우에는 고정자의 인덕턴스가 충분하므로 별도의 sine 필터를 사용하지 않아도 인버터의 출력전류는 sine 형태가 유지된다. 하지만 인버터의 출력전압은 PWM 파형이며 각 펄스의 기울기는 이론적으로 수직에 가까우므로 펄스의 dv/dt가 매우 크다. 이렇게 커다란 dv/dt 기울기는 과도한 고주파수를 유도할 수 있어서 근접한 신호기기 등의 부하에 영향을 미칠 수 있고 전선의 절연에도 영향을 끼칠 수 있으므로 dv/dt 제한용 필터회로가 사용되었다. 필터의 간략한 특징은 아래와 같다.

(가) Sine 필터보다 작은 dv/dt 제한용 필터회로를 사용함으로써 출력회로의 경량화가 가능
(나) PWM 인버터에서 발생하는 전압의 급격한 dv/dt를 제한함으로써 인접기기에 대한 고주파 간섭을 회피할 수 있음

(2) 기존장치 분석

(가) 형태 및 구성품

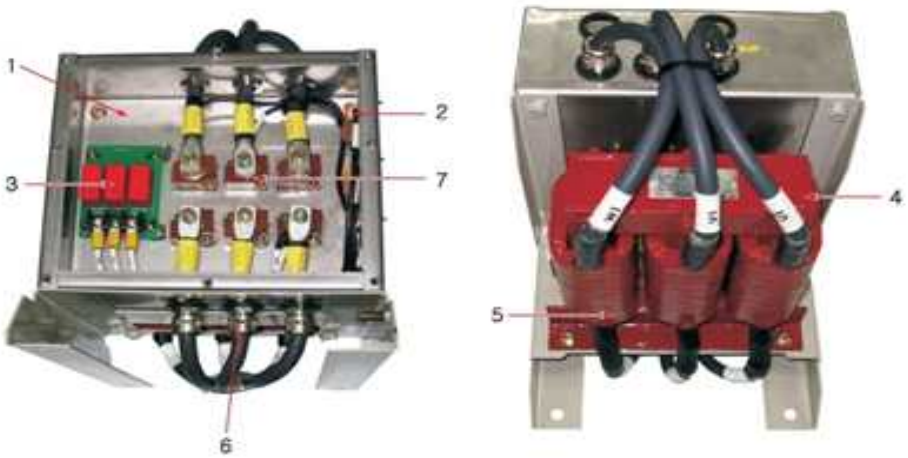


그림 30. dv/dt 제한필터의 형태

표 18. 기존 dv/dt 제한필터 구성품

구성품	특 징
필터 외함	스테인레스 외함
필터 저항	메탈커버 저항 33Ω / 50W
필터 캐패시터	3상 델타, 0.022uF / 1100V
필터 인덕터	3상 인덕터, 40uH / 105A
케이블 Grand	30SQ

(나) 기존 필터회로의 전압파형

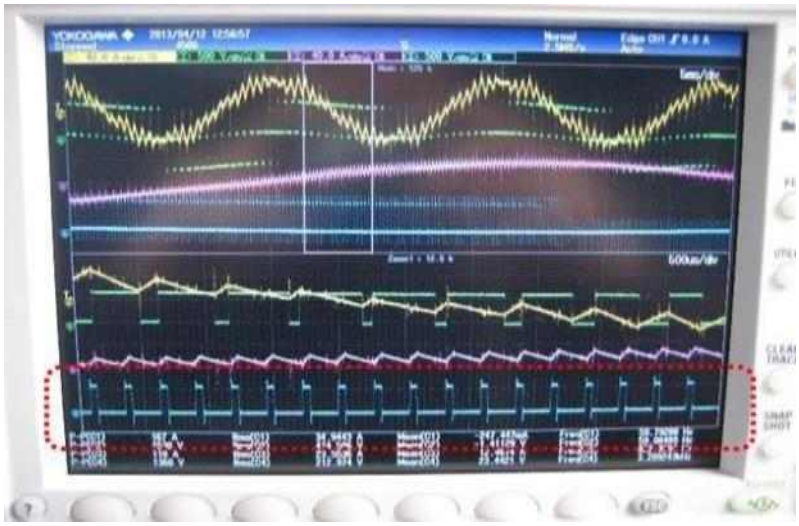


그림 31. 출력 PWM 전압에 dv/dt필터가 적용된 파형
(8200호대 전기기관차의 보조전원장치의 출력전압)

(3) dv/dt 제한필터의 설계

(가) 회로구성

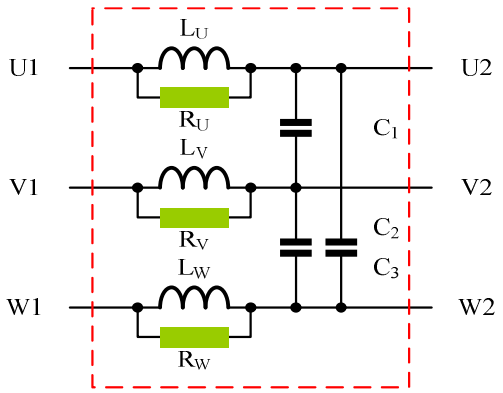


그림 32. dv/dt 제한 필터의 전기회로 구성

(나) 전달함수

3상 필터를 단상으로 환산하여 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{j\omega L \cdot R}{j\omega L + R} + \frac{1}{j\omega C}}$$

이 함수의 경우 분모의 항에 독립적인 R항이 포함되므로 진동이 발생하여도 감쇄가 일어남을 직관적으로 알 수 있으며, 주파수가 증가할수록 $jwL \cdot R/(jwL+R)$ 항은 거의 저항 R에 비례하여 증가하므로 전달함수의 크기가 점차 감소함을 알 수 있다. 단, R이 너무 커지게 되면 $jwL \cdot R \gg (jwL+R)$이 되므로 R에 의한 감쇄효과가 감소한다.

(4) 시뮬레이션

Pspice를 사용하여 시뮬레이션을 실시한 결과 dv/dt 제한 필터의 출력전압 파형은 기존품 시운전 시험결과와 유사하게 얻어졌다. 출력전압 파형에서는 설명한 바와 같이 R에 의한 댐핑 특성에 의해서 LC에 의한 고주파수 공진이 빠르게 감소하여 진동이 억제되고 있음을 볼 수 있다.

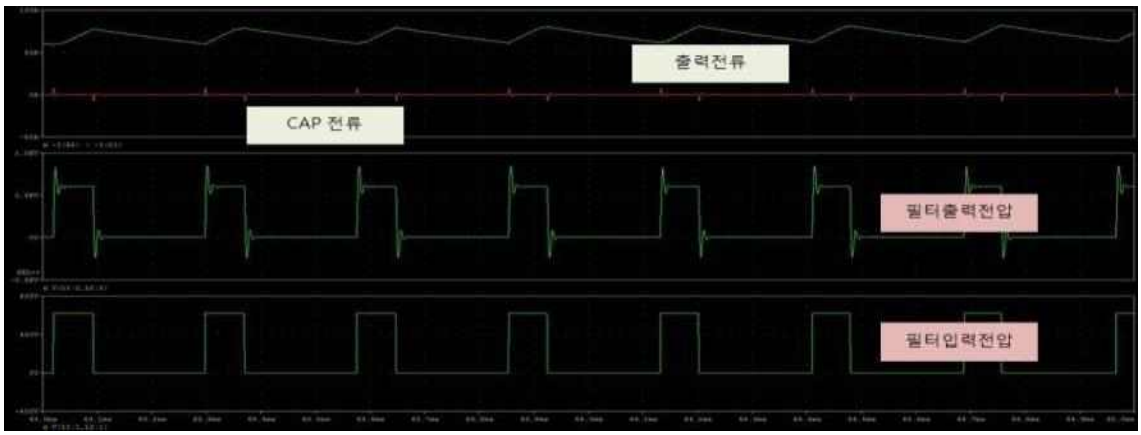


그림 33. dv/dt 제한필터의 출력전압 파형

또한 주파수 특성의 조사를 위해 필터의 입출력전압에 대한 FFT를 계산한 결과에서 보면 필터 출력의 경우 약 125kHz 까지는 입력보다 고조파가 약간 증가되었으나 125kHz 이상부터는 감소하기 시작하여 250kHz 이상에서는 거의 발생하지 않고 있으나 입력의 경우 500kHz 이상까지도 계속해서 고조파가 존재함을 알 수 있다. 즉, dv/dt 제한 필터에 의하여 고주파수에 대한 감쇄가 의도한 바와 같이 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 34. dv/dt 제한필터의 출력전압 FFT 결과파형

따라서 회로의 구성은 인덕터와 병렬로 저항을 연결한 L-C LPF(Low Pass Filter)로 구성하고, 회로에 의한 dv/dt제한은 유효하며 고주파수 대역(125kHz 이상)의 고조파가 제거된다. 병렬저항 R에 의하여 댐핑이 얻어지므로 신뢰성 있는 무유도 저항을 사용하여야 한다. 또한, 필터를 사용하지만 출력 전류파형에는 변형이 거의 발생하지 않는다.

(5) dv/dt 제한필터 하드웨어 구성 및 설계

표 19. dv/dt 제한필터 구성품

품 명	사 양	수 량
출력필터용 리액터	0.04mH / 120A (3상)	2
필터저항	33Ω/ 50W	6
필터캐패시터	0.022uF / 1500V(3상 델타)	6
필터 외함	스테인레스 외함	2

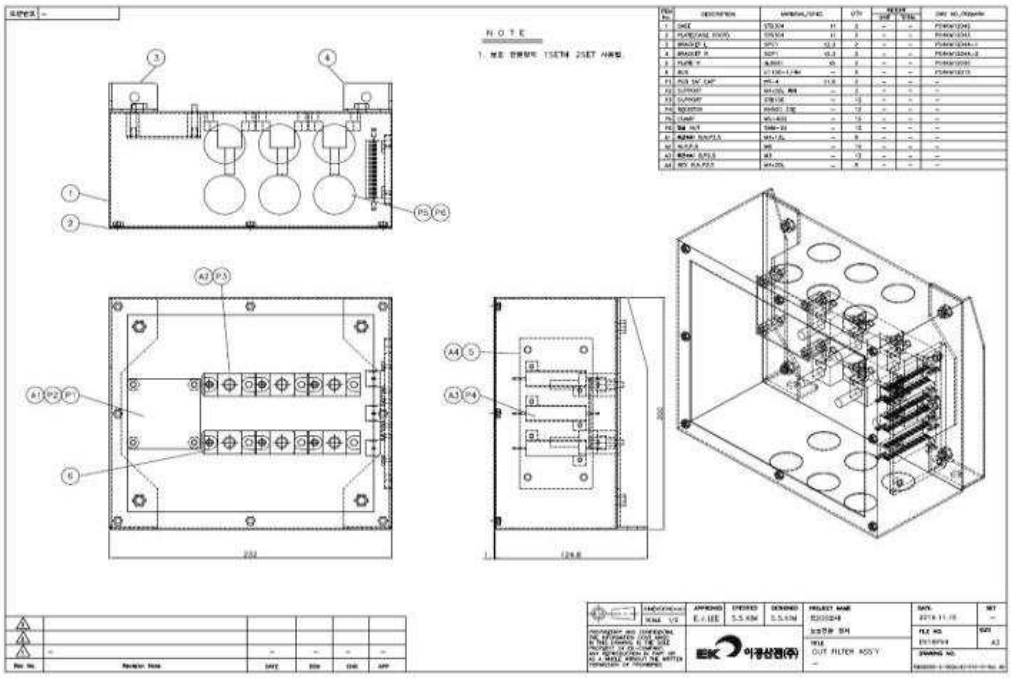


그림 35. dv/dt 제한필터 설계도면

라. 보조전원장치 GDU(Gate Drive Unit) 설계

(1) 설계사양 및 구성

표 20. 보조전원장치 GDU 설계사양

항 목	내 용	비 고
적용 IGBT	1200V/200A ~ 1200V/1200A 까지	컨버터, 인버터 모두 적용
회로 구성	1SMPS + 2Gate Amp	단일 PCB에 적용
내전압 사양	2500VAC/1분간/10mA 누설이하	
SMPS 사양	24Vdc_in, 25Vdc_out 2채널, 5Vdc	5V는 내부 제어전원
Gate Amp	IGBT 과전류 보호, 제어전원 이상 검출, 게이트 과전압 보호, Miller 효과 보호, On/Off 개별 전류제어,	IGBT 보호
동작 범위	-40도 ~ +70도	
최대주파수	20kHz/500nS minimum pulse	

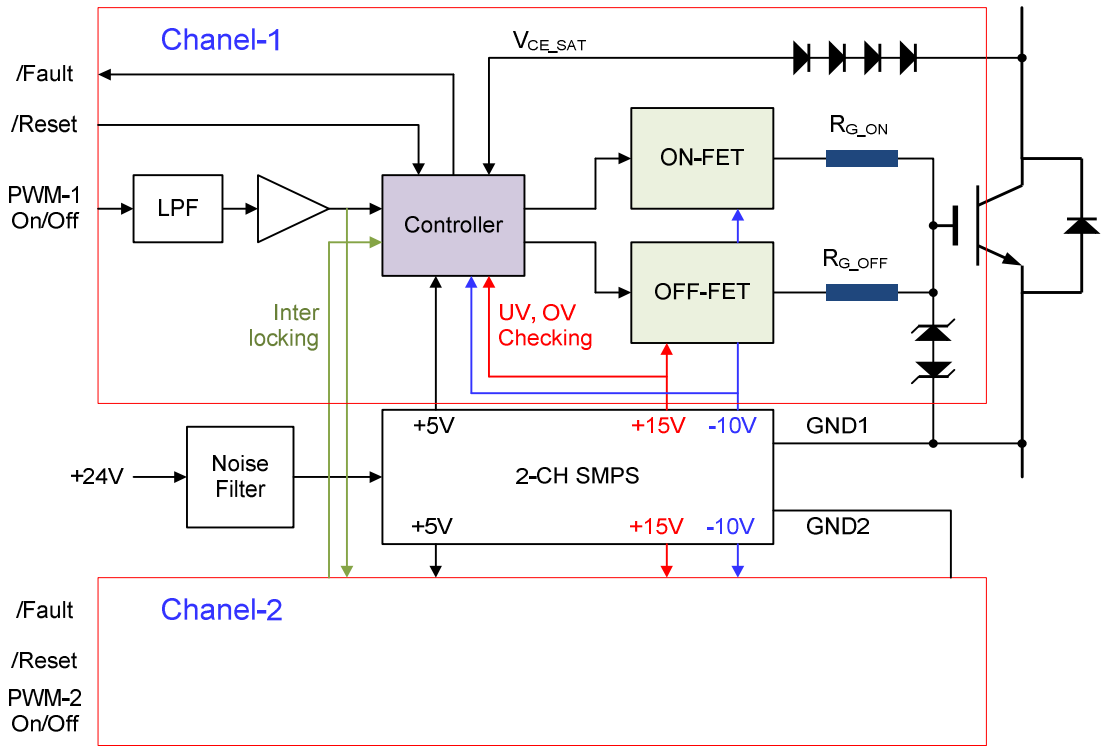


그림 36. 보조전원장치 PWM전력스택용 GDU 내부구성도

(2) 기능구현

(가) 입력 PWM 신호 잡음제거

GDU에 입력되는 신호는 광절연 신호 또는 TTL 레벨의 디지털 논리 신호가 입력된다. 신호라인의 길이와 동작조건에 의하여 신호선에는 잡음성 노이즈가 혼재하므로 이를 충분히 방지하기 위하여 PWM 입력단에는 전류의 shunt를 위한 신호감지용 저항이 신호입력과 병렬로 적용된다. Shunt되는 전류의 크기는 최소한 10mA 이상이어야 한다. 한편 션트저항의 양단전압을 검지하는 회로에는 저항과 캐패시터로 이루어진 저역통과필터를 설치하여 신호에 섞인 노이즈 성분을 가능한 완전히 제거한다.

(나) 절연된 PWM 신호입력

입력 PWM 신호는 제어 IC 내부에서 광신호에 의하여 절연된다. 입출력간의 과도절연전압 레벨은 1분간 2500V에서 견디도록 설계한다.

(다) 상하 암(Arm) PWM 신호의 단락방지

2개의 IGBT가 하나의 암(Arm)으로 동작하는 경우 많은 경우에서 이유를 알 수 없는 단락이 종종 발생한다. 주된 원인으로는 허용되지 않는 입력논리(동시에 1 입력)의 경우와 노이즈 등에 의한 순간적인 논리의 변화 등이 알려져 있다. 본 설계에서는 상기의 두 가지 모두의 경우를 방지하기 위하여 임의의 순간에 상하의 IGBT에는 반드시 1과 0(혹은 0과 1)으로만 동작하도록 인터록(Interlock) 회로를 적용하여 기기를 보호하도록 한다.

(라) 게이트 저전압 감지

IGBT 게이트 전압이 충분하지 않는 경우(약 12.3V 이하) GDU 장치는 저전압 고장을 발생시키고 출력을 Off 상태로 유지한다.

(마) 게이트 과전압 방지

IGBT 게이트에는 과도상태시 게이트의 전압이 제어전압보다 높은 경우 방전을 위한 보호다이오드가 부착되어 있다. 이 다이오드는 과도 상태시 IGBT가 IGC 전류에 의한 Miller 효과를 방지하는 기능을 제공하여 IGBT를 보호한다.

(바) On/Off 비대칭 전류제어

IGBT의 입력은 FET로 되어 있으므로 On/Off 특성은 게이트에 연결되는 전류의 주입속도에 의하여 결정된다. 사용자가 원하는 dv/dt, di/dt 특성을 수용할 수 있도록 전류제어를 위한 On/Off 전류의 변경이 가능하도록 설계되어야 한다.

(사) 콜렉터 과전류에 의한 De-Saturation 검출

IGBT는 기본적으로 Transistor의 기능을 가지고 있어서 콜렉터 전류가 증가하면 VCE 전압이 비례하여 증가된다. 콜렉터 전류가 과도하게 흘러 VCE 전압이 특정 레벨(7.2V)을 넘으면 De-Saturation 방지에 의한 과전류제한 기능이 동작한다.

De-Saturation 검출시간은 약 10us이며 이 시간동안 과전류가 해소되지 않으면 GDU는 급작스런 dv/dt의 증가를 방지하기 위한 Slow Off 기능을 수행하여 IGBT를 Off시켜야 한다.

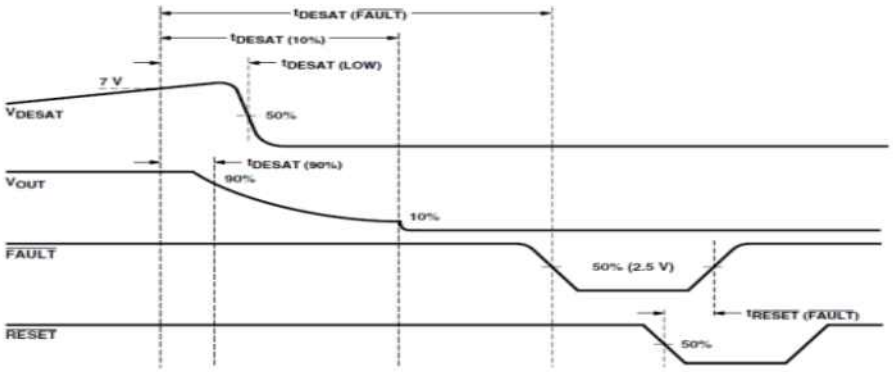


그림 37. De-Saturation 검출 시 게이트 및 고장의 처리

(아) 절연된 고장감지 신호

게이트 제어장치가 고장을 발견하면 즉시 출력은 오프상태가 되고 고장이 발생되었음을 알리는 신호가 필요하다. 본 설계에서는 절연된 TTL 부논리를 적용하여 고장이 발생되면 0신호를 발생시키도록 회로를 구성한다.

(자) 절연된 제어 IC 리셋신호

고장을 감지하여 Off된 게이트 제어장치를 회복시키기 위하여 절연된 리셋 신호가 사용되어야 한다. 리셋 신호는 부논리의 TTL 신호를 적용한다. 노이즈 등에 의하여 임의의 순간에 오작동을 방지하기 위한 필터회로를 사용한다.

(차) 표시장치

GDU의 동작을 직관적으로 알 수 있도록 표시용 LED를 설치한다. 설치되는 LED의 종류는 입력 PWM 신호, 고장 발생 신호, 전원표시 등이다.

(3) 설계도면

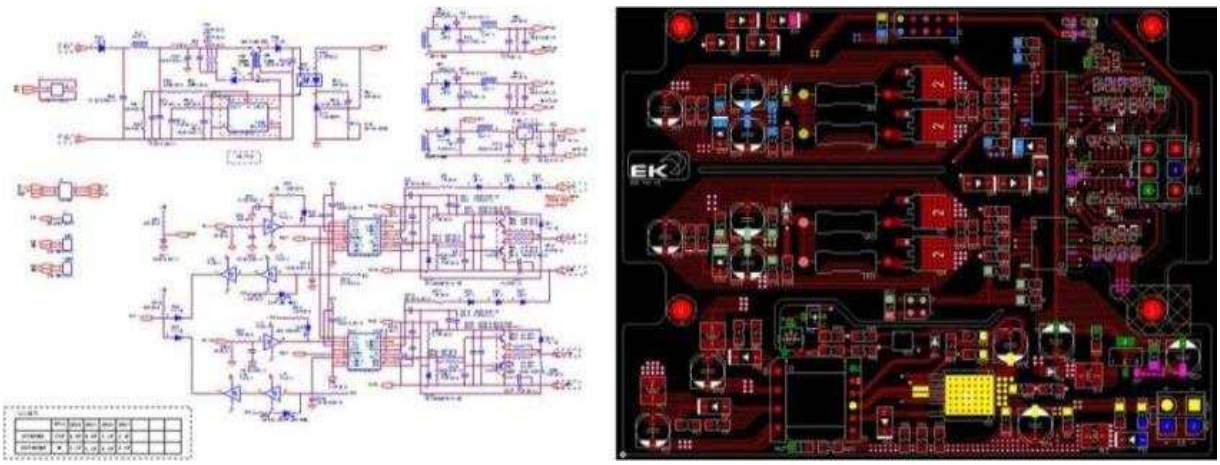


그림 38. PWM전력스택 GDU 회로 및 PCB 설계도면

마. PWM전력스택 전용제어기 설계

(1) PWM전력스택 전용제어기 구성 및 기능

보조전원장치 PWM전력스택 전용제어기는 전력스택의 측면부에 위치하며 입력필터를 포함하여 총 4개의 카드로 구성된다.

표 21. PWM전력스택 전용제어기 구성 카드 종류 및 기능

	카드 이름	기 능	총 수
1	MCU (DSP+DIO)	인버터의 제어를 관장한다. IGBT의 ON/OFF를 수행하고 각 센서로부터 입력된 아날로그 값 및 디지털 데이터를 처리하여 인버터가 정상적으로 동작될 수 있도록 제어 프로그램을 수행한다.	4
		디지털 입출력 및 절연된 직렬통신을 관장한다. 입출력 전압은 저압 5V부터 고압 110V까지 다양하다. DSP와는 PCB-to-PCB 커넥터로 연결되어 있으며 저압 3.3V 및 5V를 사용한다.	
2	SIF	아날로그 신호를 처리하기 위한 인터페이스를 제공한다. 입출력전압(440V) 및 전류(5V)를 인터페이스 하므로 고전압에 대한 절연확보가 필요하고 노이즈 침입에 대비한 회로구성이 필요하다.	2
3	입력필터 SMPS	DC110V를 입력하여 절연된 +5V, +/-15V, +24V를 출력한다. 릴레이 구동 및 접점신호 입력을 위한 필터링된 DC110V도 출력된다.	2

(2) PWM전력스택 제어기법(컨버터용 PLL기법)

(가) 개요

8200호대 전기기관차는 단상 교류전원을 이용하므로 보조전원장치에 적용된 PWM 컨버터 장치는 입력전원의 주파수, 전압 및 위상을 연속적으로 추적하기 위한 PLL(Phase Locked Loop) 장치가 필수적으로 필요하다. PLL을 구현하는 방식은 하드웨어와 소프트웨어를 이용한 여러 가지 방식이 소개되어 있으나 최근에는 프로세서의 연산능력을 활용한 소프트웨어적인 방식이 대부분 적용되어 있다. 본 연구에서는 전역통과필터(APF) 방식 등에서 필요한 복잡한 오프라인(Off-line)연산을 사용하지 않고 단순한 방법을 이용한 8200호대 보조전원장치의 PWM 컨버터용 PLL 제어기법을 적용한다.

(나) APF 방식의 PLL기법

일반적으로 많이 사용되는 단상 교류전원의 동기화를 위한 PLL 기법은 크게 무적용 방식, 제로위치 검출방식(Zero Cross Detection, ZCD), 저역통과필터(Low Pass Filter, LPF)에 의한 지연방식, 전역필터(All Pass Filter, APF) 방식 등이 알려져 있다. 무적용 방식은 입력전압 자체의 정보를 이용하여 전류파형을 제어하는 방식으로 구현이 매우 간단하여 저용량 SMPS(Switch Mode Power Supply) 등에서 흔히 사용되는 방식이지만 입력전압의 왜곡이 고스란히 전달되므로 노이즈 환경에서는 사용하기 힘든 단점이 있다. ZCD 방식은 오래전부터 구현된 방식으로 교류전압의 제로지점을 추적하고 적절한 피드백을 통해 동기화된 신호를 얻을 수 있으나 제로지점 내의 변화에 대해서는 반영이 되지 않는 약점이 있다. 이에 반하여 APF 방식은 프로세서의 향상된 연산능력을 이용하여 왜곡이 최소화된 비교적 정확한 지연파형을 얻을 수 있으므로 최근의 컨버터에서 많이 채택되고 있다.

APF에 의한 PLL은 아래의 이산식을 사용하여 구현이 가능하다. 먼저 APF의 아날로그 전달함수를 살펴보면,

$$V_i = E_i \angle -\theta, \quad \theta = 2\tan^{-1}\omega RC \tag{1}$$

$$H(s) = \frac{s-\alpha}{s+\alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{2\pi RC} \tag{2}$$

$$V_o = V_i H(s) \tag{3}$$

로 구해진다. 이를 Z-Transform을 사용하여 이산식으로 변환하면,

$$y[n] = \beta y[n-1] + \beta x[n] - x[n-1] \tag{4}$$

단, $\beta = \dfrac{1-\dfrac{\alpha T}{2}}{1+\dfrac{\alpha T}{2}}, \alpha = \dfrac{1}{RC}, T = \dfrac{1}{f_s}$

이 된다. 여기서 Vi와 Vo는 각각 APF의 입력과 출력값이고, RC와 fs는 각각 위상지연을 위한 아날로그 상수값 및 샘플링 주파수이다. 지연각(Θ)를 위한 아날로그 RC 상수값이 결정되면 샘플링 주파수가 적용된 β를 계산한 후 프로세서에서 식 (4)를 사용하여 실시간 연산으로 지연된 cos값을 얻어낸다. 이렇게 얻어진 cos값과 원래 파형에 대해 dq 연산을 수행함으로써 3상전원에서와 동일하게 정확한 위상과 주파수 정보를 얻을 수 있게 된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 APF 방식을 이용한 PLL 기법에서는 지연하고자 하는 위상각(Θ)를 미리 지정하여야 하는데 이 과정에서 식 (1)에 나타난 바와 같이 입력주파수가 고정되는 한계가 있다. 또한 다소 복잡한 삼각함수와 나눗셈을 사용하여야 하고 이를 다시 Z-Transform을 적용하여 이산식으로 변환해야 한다. 실용적으로는 통상 오프라인으로 각각의 변수를 계산한 후 제어프로세서에서는 단순화된 이산식 연산을 수행하는 방식이 사용된다. 이에 따라 입력주파수의 범위가 넓거나 노이즈가 많이 입력되는 환경에서의 적용이 쉽지 않다.

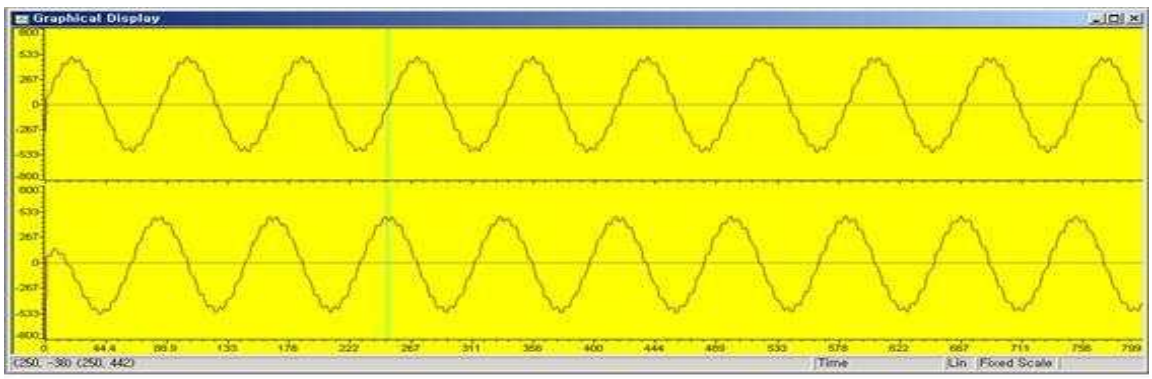


그림 39. 입력 및 APF방식의 출력 시뮬레이션파형

(다) 제안된 mMA Filter를 적용한 새로운 PLL 기법

제안된 mMA(modified Moving Average) Filter를 이용한 Cosine 합성방식은 APF에서처럼 지연각의 설정 및 이에 따른 필터변수를 계산하는 과정이 필요하지 않으므로 연산이 단순화될 수 있다. MA 필터는 일종의 FIR 필터로 임의의 출력샘플값을 구하기 위하여 윈도우 기간 동안 입력값의 평균을 제공하는 Convolution 함수이다. MA 필터 함수의 원형은 식 (5)와 같다.

$$y[n] = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} x[n-k]w[n] \qquad (5)$$

여기서 w[n]은 윈도우 함수로 출력의 특성을 결정한다. w[n]=1이라 가정하면 방형파 윈도우가 적용된 것이므로 이때에 y[n]은 N 구간 동안의 평균값이 구해짐을 의미한다. 하지만 함수원형은 매 출력샘플에 대하여 N 구간만큼의 입력샘플의 덧셈과 한번의 나눗셈을 필요로 하므로 샘플의 수가 많은 경우 연산시간이 증가된다. 예를 들어 10kHz의 샘플링 주파수를 사용하고 60Hz의 입력전압에 이 함수를 적용한다면 매 100us 마다 167개 샘플에 대한 덧셈이 필요하다. 한편 입력전압의 주파수와 크기가 급격히 변화하지 않는다고 가정하면 이 함수를 입력전압의 반주기 또는 한주기에 대하여 적용하는 것을 고려할 수 있다. 이 경우 수정된 필터의 식은 다음과 같다.

$$v_o[m] = \frac{1}{N_m}\sum_{k=0}^{N_m-1} \left|v_i[n-k]\right| \qquad (6)$$

식 (6)은 m번째 주기에 대한 입력전압 Vi의 평균값을 의미한다. 입력전압의 주파수는 대체로 변동하지 않으나 노이즈나 sag 등이 발생하는 경우를 고려한다면 주기 N은 변동될 수 있는 것으로 가정해야 한다. 식 (6)은 식 (5)와는 달리 컨벌루션을 수행하지 않으므로 입력 1주기 동안 한번만 수행하면 된다. 덧셈의 경우도 한번에 Nm회를 수행하는 것이 아니라 매 샘플기간 동안 한 번씩 실행되면 되므로 연산에 따른 부담이 거의 없다. 한편 주기가 변동한다면 이를 고려해야 하므로 주기 정보를 아래와 같이 관리한다.

$$0.9N_{m-1} \le N_m < 1.1N_{m-1} \qquad (7)$$

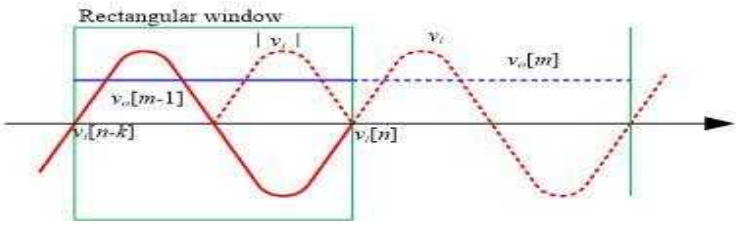


그림 40. 제안된 mMA 필터 개념도

식(7)은 입력전압의 주기가 급격히 변동할 수 없다는 가정 하에 연산된 m번째 주기값이 과거값(m-1번째)에 비하여 10% 이상 변동하는 경우 비정상으로 간주하여 크기를 제한하는 과정이다. 수정된 MA 필터에 대한 개념은 위의 그림과 같다.

mMAF 방식을 사용하려면 주기정보 즉, 입력주파수에 대한 연속적인 궤환이 필요하며 이것은 PLL의 고유 기능을 사용하여 얻을 수 있다. APF를 적용한 경우와 비교해보면 dq 연산을 수행하는 것은 동일하고 단지 1주기 동안 이미 연산된 Vo[m] 값을 사용하여 cos값을 사용하는 것에 차이가 있다. 아래 그림은 제안된 mMA 필터를 적용하여 PLL을 구현하였을 때의 시뮬레이션 파형을 나타낸 것이다. 물론 평균값을 사용하므로 전압 크기에 대해서 약간의 오차가 발생하지만 PLL의 또다른 입력인 VisinΘ로부터 실시간 전압이 입력되므로 오차의 크기가 작아진다. 주파수와 위상정보는 PLL 고유 기능에 의하여 오차가 발생하지 않는다.

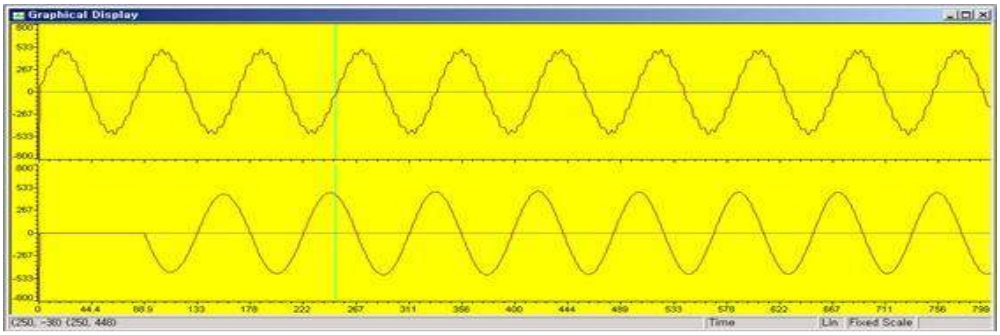


그림 41. 입력 및 mMAF 방식의 출력 시뮬레이션파형

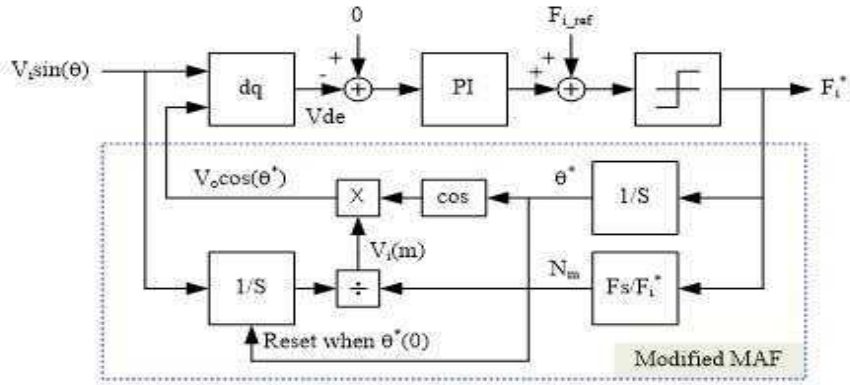


그림 42. 제안된 mMAF를 적용한 PLL 제어블록도

(라) 결 론

제안된 mMAF 방식은 APF 방식에서처럼 복잡한 오프라인 연산이 필요치 않으며 입력주파수의 변화나 노이즈환경 하에서도 강인한 동기화가 가능한 장점이 있다. 제안된 PLL 방식은 8200호대 전기기관차의 보조전원장치에 사용되는 PWM 컨버터에 적용한다.

(3) 전용제어기 회로설계

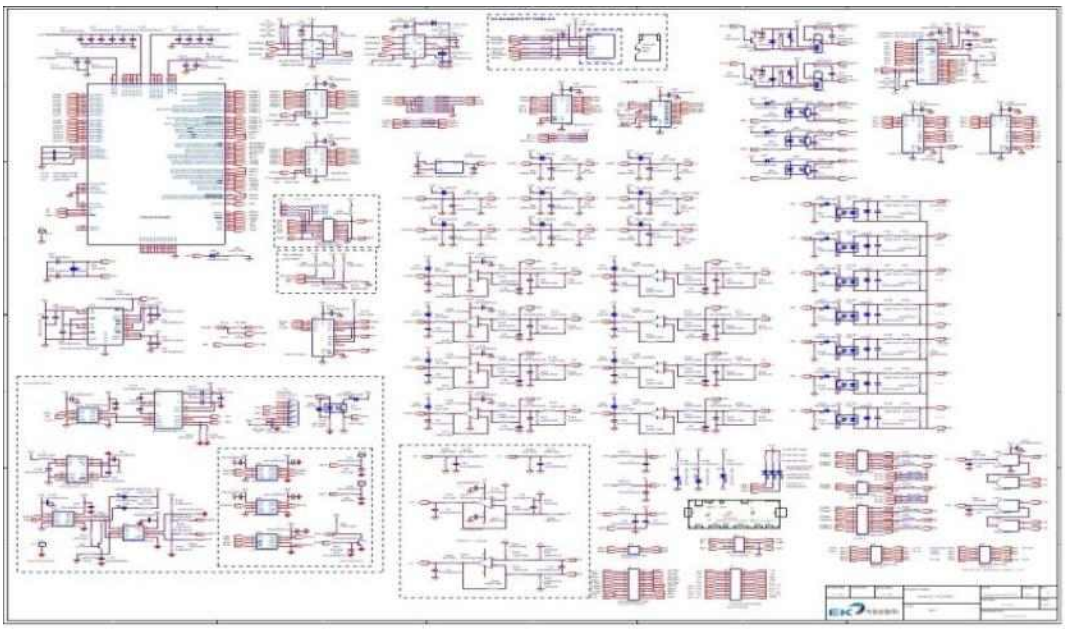


그림 43. PWM전력스택 전용제어기 회로설계도면

(4) 전용제어기 하드웨어 설계

(가) 카드별 하드웨어 설계규칙

① MCU(Main Control Unit)

- DSP에 연결되는 J-TAG 커넥터는 장치가 완성된 후 커넥터의 꼬임이 없이 연결될 수 있도록 방향을 주의해야 한다.
- microSD 카드의 소켓은 PCB가 장착되고 난 후 쉽게 접근이 가능한 곳에 배치해야 한다.
- PCB to PCB 커넥터는 상대 PCB에 연결되는 pin 번호를 확인하여 꼬임이 없도록 해야 한다.
- TPS70251PWP IC는 열이 많이 발생하므로 IC의 주변 및 후면에 열 발산용 PAD를 반드시 배치해야 한다.
- 클록 발생용 Crystal의 주변에는 반드시 ground pad로 둘러싸서 고주파수 노이즈가 외부로 발산되는 것을 최소화 하여야 한다.
- 출력용 Relay회로 및 입력용 Photo coupler 회로는 110V 또는 220V의 고압이 흐르므로 절연에 유의하여야 한다.
- 저전압(5V) 회로와 고전압 회로는 분리하여 배치한다.

② SIF(Sensor Interface)

- 아날로그 신호 입력용 On-board PCB의 크기는 40(L)x10(H)로 하고 고절연(입출력 절연 1000V)이 되도록 부품을 유의하여 배치하여야 한다.
- On-board PCB의 1층은 절연전압 센서와 연산증폭기 및 수동소자를 절연에 유의하여 배치하고 2층은 절연공급용 SMPS IC를 절연에 유의하여 배치한다.
- 각각의 On-board PCB 및 분압용 저항은 길게 배치하고 특히 분압용 저항에 연결되는 배선은 신호간의 절연에 유의하여야 한다.
- 전압센싱용 커넥터에는 고전압이 인가되므로 반드시 배선간의 절연에 유의하여야 한다.

③ SMPS(Switching Mode Power Supply)

- 입출력 회로간에는 확실한 구역 구분을 두어 2500V이상의 절연이 확보되어야 한다.
- PWM IC(TOP250Y)에는 30(L)x20(H)mm 이상의 방열판이 부착되어야 하며 부품과 방열판 사이에는 절연용 실리콘 패드를 삽입해야 한다.
- 저압 전원용(+5V,+15V,-15V) 전력회로와 GDU용 24V 전력회로는 1500V 이상의 절연이 확보되어야 하며, 사용된 소자가 배치된 구역이 완전히 분리되어야 한다.

(나) 전용제어기 카드별 배치

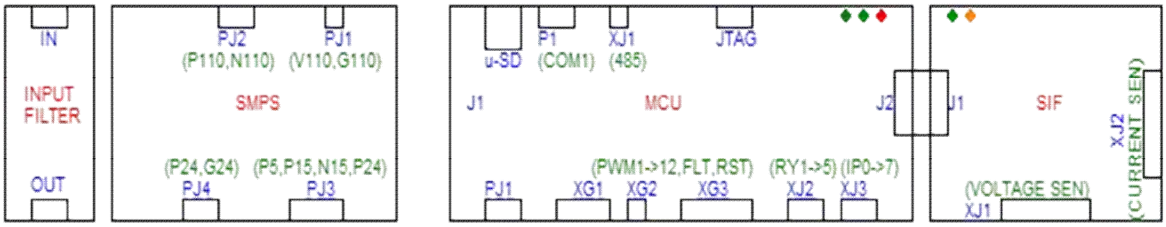


그림 44. 전용제어기 카드별 배치도

(다) 카드별 PCB설계

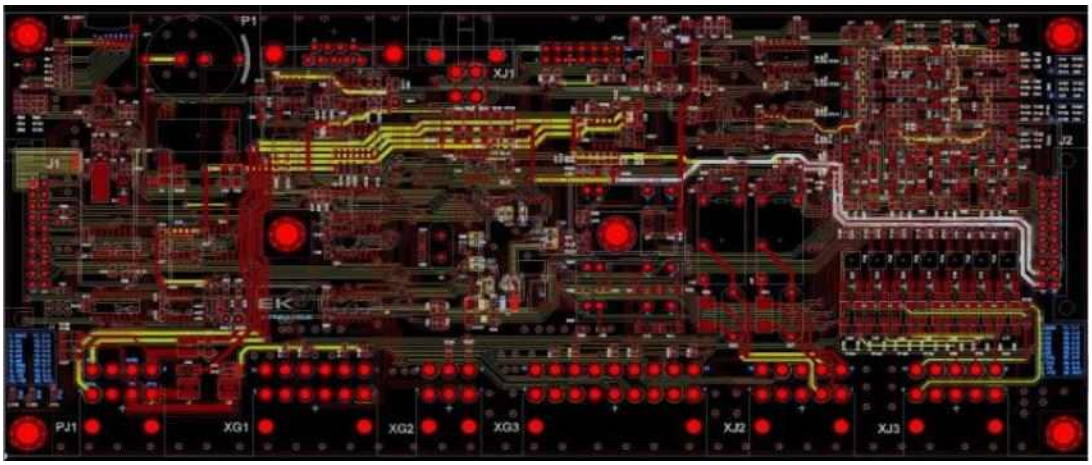


그림 45. PWM전력스택 전용제어기 MCU PCB설계도면

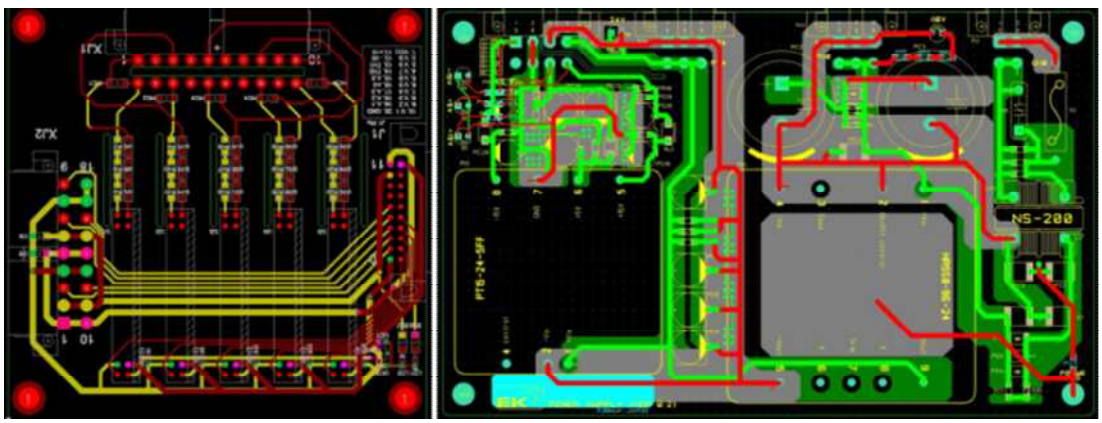


그림 46. PWM전력스택 전용제어기 SIF 및 SMPS PCB설계도면

바. PWM전력스택 하드웨어 설계

(1) PWM전력스택 하드웨어 구성

표 22. PWM전력스택 주요구성품

품 명		사 양	수 량	비 고
IGBT	컨버터부	1200V / 600A	2	
	인버터부	1200V / 600A	3	
입력 CT		600A(펄스 ± 1800A)	1	
출력 CT		200A	3	
스너버 캐패시터		4.7uF / 1700V	5	
DC Link 캐패시터		4700uF / 400V	16	
Gate Drive Unit(GDU)		PWM전력스택 IGBT 전용 (EK개발품) - IGBT 고장감지 회로 탑재 - IGBT 일체형으로 불필요한 배선 제거	5	

(2) PWM전력스택 하드웨어 3D모델링 및 설계

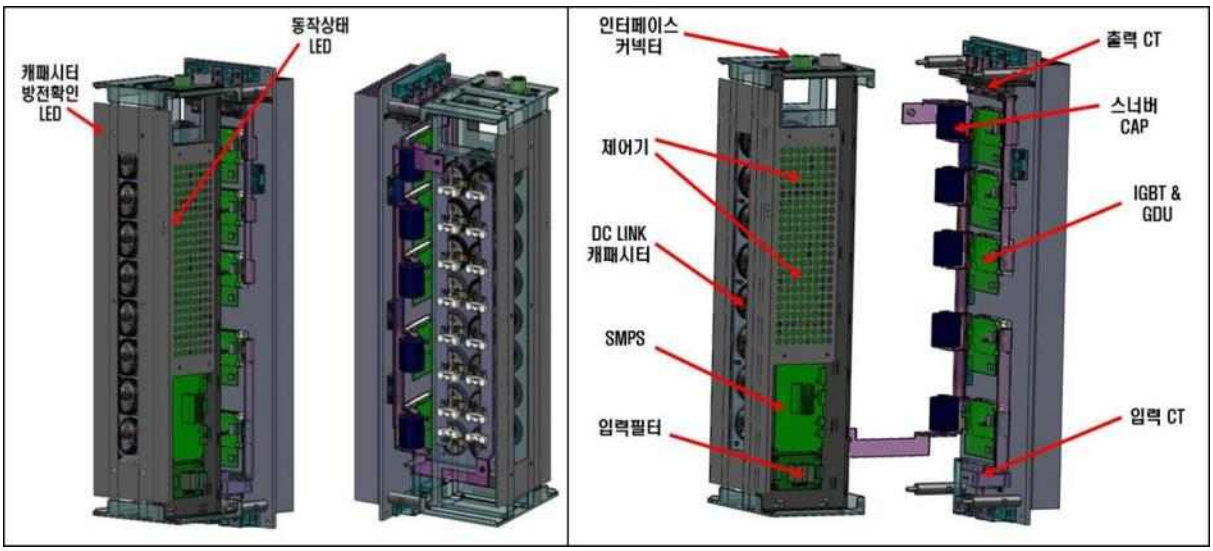


그림 47. PWM전력스택 하드웨어 3D모델링

사. 보조전원장치 입력회로 및 외함 설계

(1) 보조전원장치 입력회로 설계

보조전원장치의 입력회로는 입력전원의 차단 및 투입을 위한 회로이며 휴즈, 주접촉기, 보조접촉기, 초기충전저항, 입력필터용 리액터로 구성된다. 보조접촉기 및 저항을 통해 DC LINK 초기충전을 한 다음 주접촉기를 투입하여 보조전원장치에 전원을 공급한다.

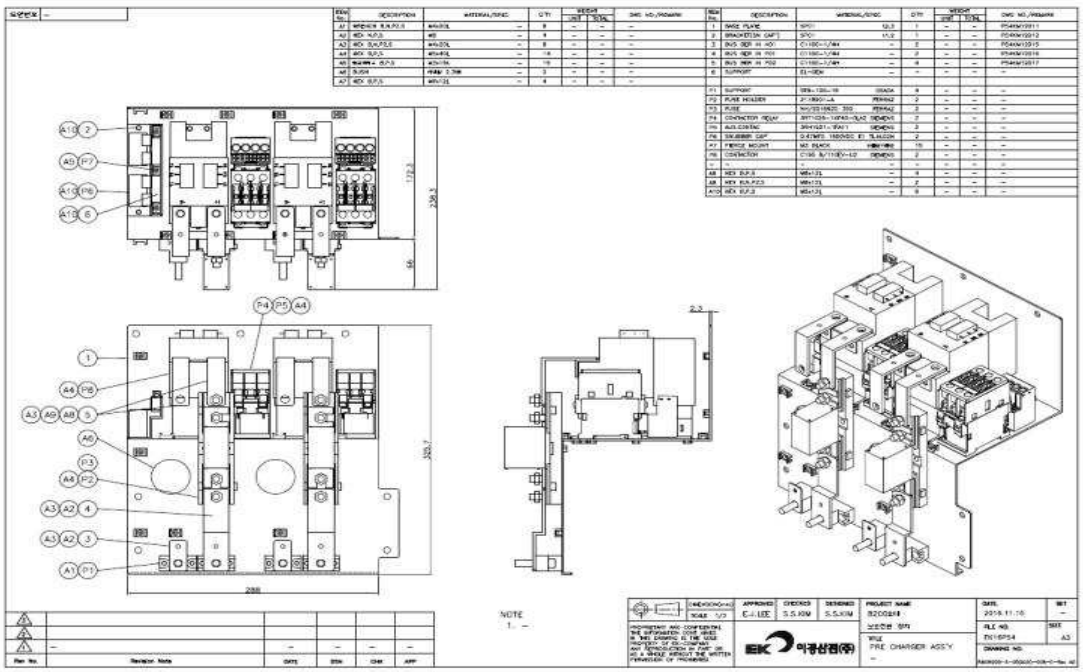


그림 48. 보조전원장치 입력회로 설계도면(대표도)

(2) 보조전원장치 외함 설계

8200호대 전기기관차에 적용되는 보조전원장치 외함은 입력회로 및 송풍기, PWM 전력스택, 출력필터회로, SIBCOS장치 등의 부품이 장착되므로 추후에 변형이 발생하지않도록 적절한 보강재를 사용하여야 하며, 외부로부터 습기나 먼지의 침입이 최대한 발생하지 않도록 방진, 방습구조로 설계하여야 한다. 또한 기존장치와의 호환이 가능하도록 취부 홀이나 크기가 동일하여야 한다.

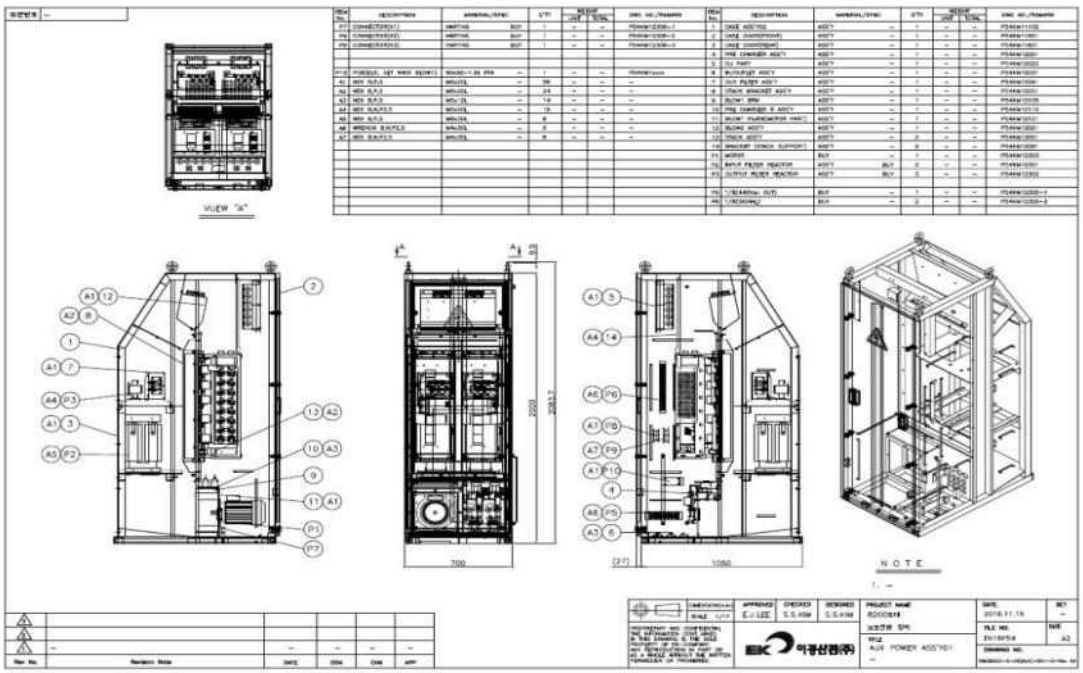


그림 49. 보조전원장치 외함 설계도면(대표도)

3. 기존 보조전원장치와의 비교

가. 주요사양비교

표 23. 보조전원장치 사양비교(기존품-개발품)

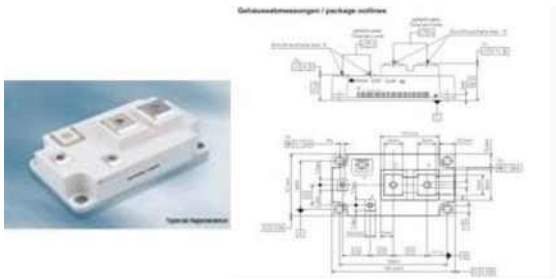
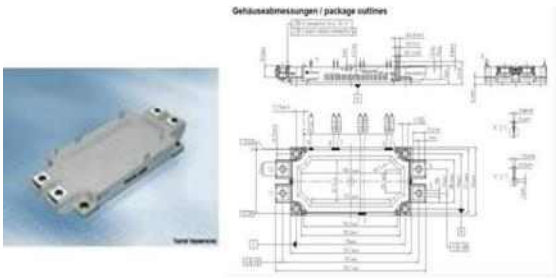
항 목		기존장치	개발장치	비 고
정격용량		2 x 80kVA	2 x 90kVA	주변압기 권선용량 제약
역률		0.95 이상	0.97 이상	
냉각방식		강제공기식	좌동	FAN 구동
입력	정격전압	단상 334VAC	좌 동	가선 2.5kV
	정격주파수	60Hz	좌 동	가선전압주파수
출력	전압	3상 0~440VAC	좌 동	2~60Hz(가변주파수)
	전압형태	PWM	좌 동	
통신방식		CAN	RS232C, RS485	MVB통신(상위제어기)
제어전압		110VDC	70~160VDC	
주위온도범위		-35°C~45°C	좌 동	

나. 기존품과 개발품의 전력소자(IGBT) 비교

(1) 전력소자(IGBT) 형상 및 특징 비교

(가) 전력소자(IGBT) 형상

표 24. 보조전원장치 전력소자(IGBT) 형상비교

	
기존품 IGBT (62mm Type) 형상	개발품 IGBT (EconoDUAL3 Type) 형상

(나) 전력소자(IGBT) 특징 비교

표 25. 보조전원장치 전력소자 특징 비교(기존품-개발품)

검토 IGBT	내부 구조	특징	비 고
62mm (기존품)	Single	-보편적인 사용 가능 하나 Arm구성은 복잡 -방열성능은 우세 -신규 설계에는 더 이상 사용안함(주로 보수품에 적용)	
EconoDUAL3 (개발품)	Dual	-인버터, UPS 등 산업용으로 많이 사용 -냉각방식의 선정이 중요(적음 바닥면적) -버스바의 형상 단순해짐, 일체형 GDU 사용	산업용으로 많이 사용

(2) 전력소자(IGBT) 성능비교

(가) 기존 IGBT 손실계산

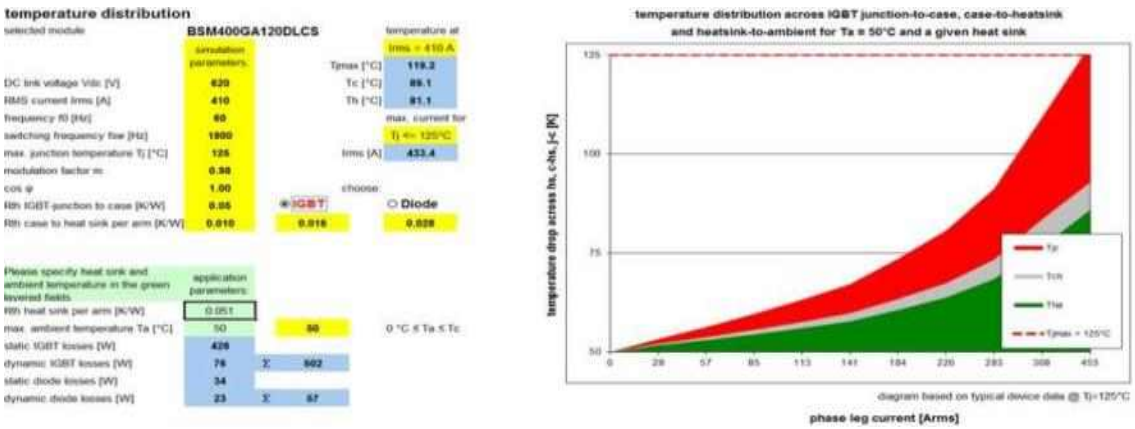


그림 50. 기존IGBT, 80kW정격, 저전압/최대전류/Fs=1.8kHz

(나) 성능비교 시뮬레이션

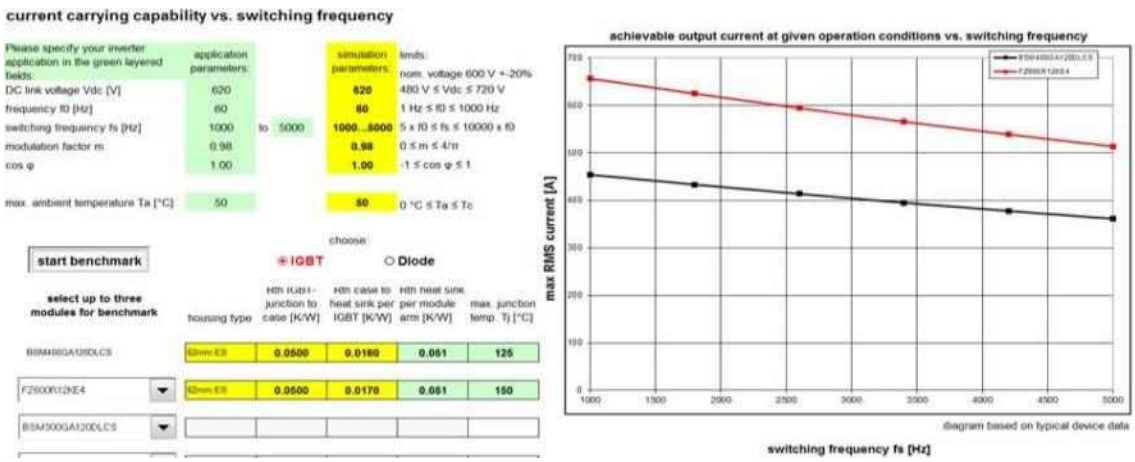


그림 51. 기존품IGBT와 개발품IGBT의 성능비교 시뮬레이션

(다) 비교결과

표 26. 보조전원장치 전력소자 비교결과(기존품-개발품)

비교 항목	기존품 IGBT	개발품 IGBT
형명	BSM400GA120DLCS	FF600R12ME4
제조사	eupec	Infineon
정격	400A /1200V	600A / 1200V
특징	2세대 IGBT, 시판(1997) 당시 최대전류 용량, 전류 마진이 충분하지 않음.	4세대 IGBT, 동일용량에서 2세대 IGBT에 비하여 15% 이상 감소됨.
IGBT 온도여유(마진)	기존 400A급 IGBT는 80kVA 조건일 때 최대 전류조건에서 접합부 온도마진이 거의 없는 것으로 보임(약 6도 여유).	선정된 600A급 IGBT에서는 용량증대를 포함한 최대조건에서도 약 20도 이상의 여유 있음.
스위칭 주파수	1.8kHz를 초과할 수 없는 한계 조건 근접.	5kHz까지 상향이 가능.

다. 냉각장치 성능비교

(1) 전력스택 냉각장치 형상비교

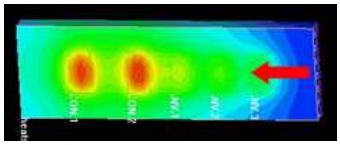
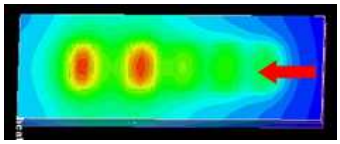
표 27. 전력스택 냉각장치 형상 및 특징 비교(기존품-개발품)

항목	냉각장치 형상	특징
기존품		- 기존 전력스택 방열판 - 핀수량 22개, 핀두께 4mm / 핀간격 7mm - 냉각판 및 핀두께로 인해 다소 무거움
개발품		- 핀수량 27개(본딩타입 핀) - 핀두께 3mm / 핀간격 6mm - 방열면적을 충분히 확보 - 타 냉각장치에 비해 가격이 저렴함

(2) 전력스택 냉각장치 성능비교

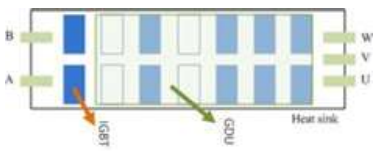
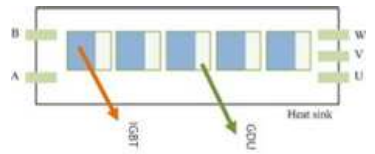
기존품과 개발품의 전력스택 냉각장치를 방열시뮬레이션을 이용한 열해석을 수행하여 제품별로 냉각성능을 비교분석하였다.

표 28. 전력스택 냉각성능 시뮬레이션 비교(기존품-개발품)

항목	방열시뮬레이션	열해석 결과
기존품		- 최고온도 : 85.2 ℃ - 최저온도 : 60.1 ℃ - 최대온도변위량 : 45.2 ℃
개발품		- 최고온도 : 73.5 ℃ - 최저온도 : 56.3 ℃ **- 최대온도변위량 : 33.5 ℃**

라. 전력소자 및 GDU 배치비교

표 29. PWM전력스택 전력소자 배치에 따른 특징 비교(기존품-개발품)

항목	IGBT 배치형태	특징
기존품		- IGBT를 마주보도록 배치. - 각각의 IGBT는 복잡한 Bus bar로 연결되어 있음. - 매우 큰 단일 PCB에 모든 게이트 드라이버 회로를 위치시킴.(유지보수비용 증가)
개발품		- IGBT를 동일방향 배치. - Bus bar의 구조가 기존장치에 비하여 단순해 짐. - 각arm에 대하여 개별GDU로 구성.(유지보수성 향상)

마. 주요개선사항

표 30. 보조전원장치 주요개선사항(기존장치와의 비교)

No	비교 항목	기존장치	개발장치
1	정격용량	80KVA * 2	90KVA * 2로 성능 증대
2	전력소자	Single 타입 2세대 IGBT 사용 최대전류조건에서 온도마진 거의 없음	Dual 타입 4세대 IGBT 사용 최대전류조건에서 온도마진 20도 이상 여유
3	주 회로 및 구성의 간편성	Single 타입 IGBT 적용으로 복잡한 구성과 단일 PCB형태의 GDU사용	Dual 타입 IGBT 적용으로 회로구성 간단 하나의 arm에 대한 1개의 GDU로 구성(유지보수비용 절감)
4	현장 적응성	현장변경 불가능	모든 제어성능은 Software로 구현되어 현장에서 파라메터의 변경만으로 원하는 성능구현이 가능함(전류/전압, 보호동작기준, 동작시간 등)
5	표시 및 고장기록	장치의 동작에 대한 명확한 표시 부족 몇 개의 단순LED 및 고장코드만 현시되어 고장발생 시 직관적 확인이 어려움	MCB 및 보조전원장치 상태(입출력전압, 주파수)를 표시하여 동작상황을 쉽게 알 수 있음 고장내역 현시 및 고장 발생 시 장치상태를 저장하여 고장원인분석에 매우 효과적임
6	유지/보수 기능	동작상태 및 방전표시 없음 전력스택 분리 어려움	유지보수 시 전력스택의 동작상태 및 DC Link 캐패시터 방전표시등이 있어 작업안정성 확보 전력스택의 모듈화로 제어부와 전력부의 분리가 용이하여 현장보수성 향상

4. 보조전원장치 시제품 제작

전기기관차에 적용되는 보조전원장치는 입력회로 및 송풍기, PWM전력스택, LCR필터(dv/dt 제한필터), MVB통신 및 모니터링을 위한 SIBCOS장치 등으로 구성되어 있으며, 보조전원장치 함에는 각각 90KVA 정격출력을 갖는 두 개의 동일한 인버터가 내장된다. 따라서 한 개의 보조전원장치를 설치한 기관차는 2×90KVA의 보조전원 출력을 갖는다. 보조전원장치의 모든 부품을 취부하는 외함은 추후에 변형이 발생하지 않도록 적절한 보강재를 사용하였으며, 외부로부터 습기나 먼지의 침입이 최대한 발생하지 않도록 방진, 방습구조로 제작되었다.

그림 52. 전기기관차용 보조전원장치(전면, 후면)

가. 입력회로 및 송풍기

그림 53. 보조전원장치 입력회로 및 송풍기

보조전원장치의 입력회로는 입력전원의 차단 및 투입을 위한 회로이며 휴즈, 주접촉기, 보조접촉기, 초기충전저항, 입력필터용 리액터로 구성된다. 보조접촉기 및 저항을 통해 초기충전을 한 다음 주접촉기를 투입하여 전원을 공급한다. 또한 장치에 문제가 발생한 경우 접촉기를 차단하여 장치를 보호한다. 송풍기는 전력스택 및 입력 리액터, LCR필터(dv/dt제한필터)의 온도 상승을 제한하기 위한 냉각장치이다. 주요 구성품의 사양은 다음과 같다.

표 31. 보조전원장치 입력회로 구성품 및 송풍기 사양

품 명	사 양	수 량	비 고
휴즈	700V / 350A	2	
주접촉기	1200V / 450A	2	3병렬 결선
보조접촉기	440V / 20A	2	3병렬 결선
초기충전용 저항	4.7Ω / 300W	2	
입력필터용 리액터	2.0mH / 310A	2	
송풍기	3상 440V	1	

나. PWM전력스택

PWM전력스택은 보조전원장치 안에 두 개가 취부되며, 주요 구성품으로는 IGBT, GDU(Gate Drive Unit), 스너버 캐패시터, DC Link 캐패시터, 입출력CT(Current Transducers) 등으로 전력스택의 각 소자들은 전용방열판에 취부 및 조립이 용이하도록 배치하였으며, 냉각효율을 높일 수 있는 구조로 제작된다.

표 32. PWM전력스택 주요구성품

품 명		사 양	수 량	비 고
IGBT	컨버터부	1200V / 600A	4	2set 기준
	인버터부	1200V / 600A	6	
입력 CT		600A(펄스 ± 1800A)	2	
출력 CT		200A	6	
스너버 캐패시터		4.7uF / 1700V	10	
DC Link 캐패시터		4700uF / 400V	32	
Gate Drive Unit(GDU)		- PWM전력스택 IGBT전용 - IGBT 고장감지 회로 탑재 - IGBT 일체형으로 불필요한 배선 제거	10	

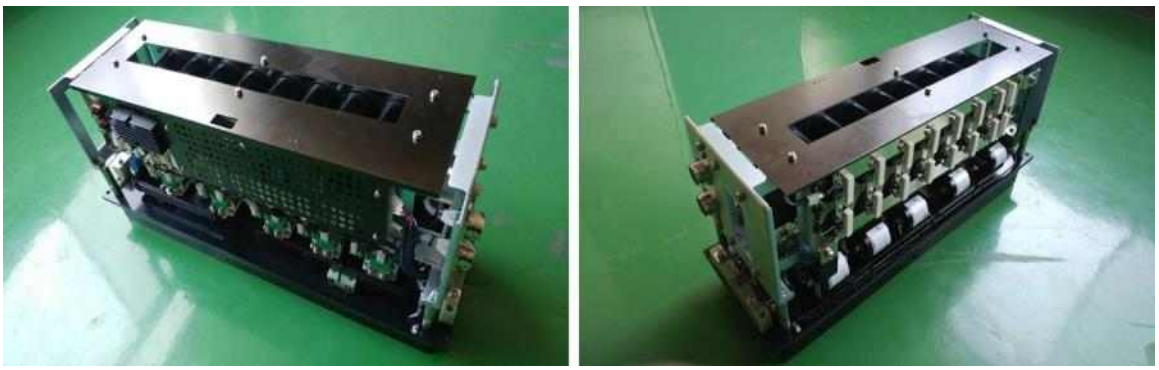


그림 54. 보조전원장치 PWM전력스택

다. PWM전력스택 전용제어기

PWM전력스택 전용 제어기는 전력스택의 DC Link 캐패시터 뱅크에 각각 취부되며, 제어전원 공급용 SMPS(Switching Mode Power Supply)와 전압/전류 센서의 아날로그 신호처리에 필요한 SIF(Signal Interface Unit), 장치제어 및 상태정보 수집과 함께 디지털 입출력 신호처리용 DIO(Digital In/Out Unit)가 통합된 MCU(Main Control Unit)로 구성된다.

그림 55. PWM전력스택 전용제어기

표 33. PWM전력스택 전용제어기 구성품 사양

품 명	사 양	수 량	비 고
SMPS (입력필터포함)	- 입력전원 : DC 110V(40~140V) - 출력전원 : DC 24V, DC ±15V, DC 5V - 정격출력 : 20W(최대)	2	2set 기준
MCU (DIO통합)	- 32bit DSP를 사용한 일체형 PCB구조 - RS232C를 이용한 모니터링 통신기능 - 16채널, 10bit ADC 회로 내장 - 동작 및 고장정보 기록을 위한 메모리 - 절연된 디지털 입력 포트 8채널 - 절연된 디지털 출력 포트 5채널 - 입출력 확인용 LED - 절연 CAN 통신 및 485통신 포트 내장	2	
SIF	- 고압/대전류 아날로그 신호처리 포트 내장	2	

라. LCR필터(dv/dt제한필터)

LCR필터는 PWM전력스택을 통해 발생하는 출력전압의 급격한 dv/dt를 제한함으로써 인접 기기에 대한 고주파 간섭을 회피할 수 있는 장치이며, dv/dt제한필터라고도 한다. 구성품은 출력필터용 리액터, 필터저항, 필터캐패시터이다.

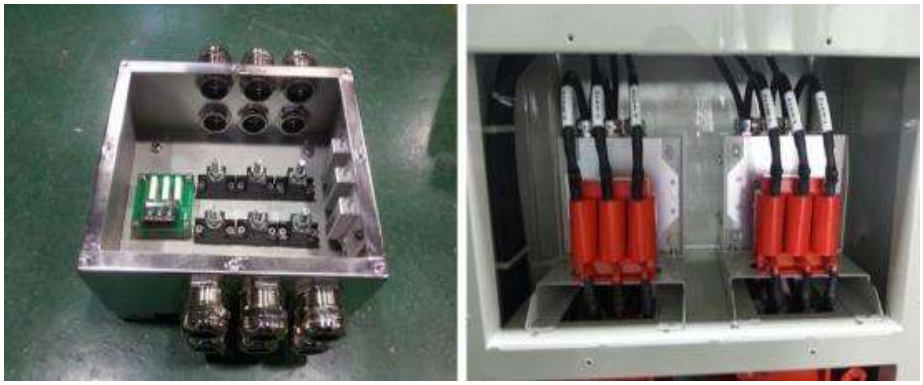


그림 56. LCR필터(dv/dt제한필터)

표 34. LCR필터(dv/dt제한필터) 구성품

품 명	사 양	수 량	비 고
출력필터용 리액터	0.04mH / 120A (3상)	2	2set 기준
필터저항	33Ω/ 50W	6	
필터캐패시터	0.022uF / 1500V(3상 델타)	6	
필터 외함	스테인레스 외함	2	

마. 관련 대표도면

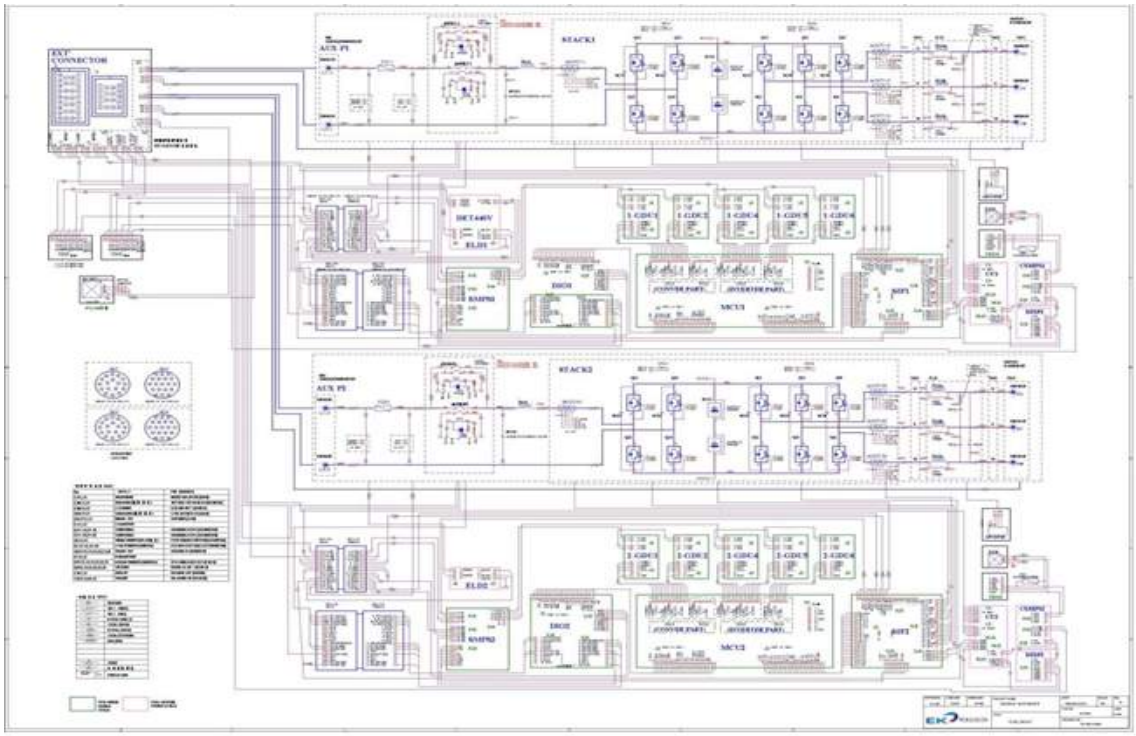


그림 57. 보조전원장치 주회로도

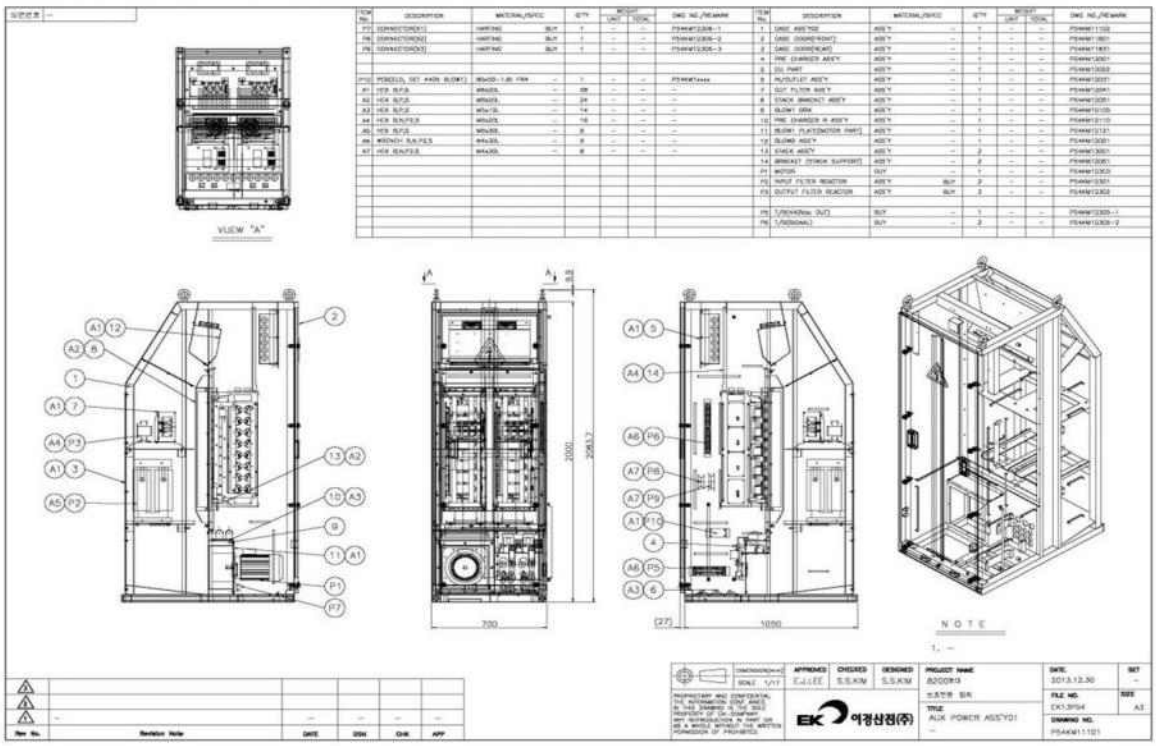


그림 58. 보조전원장치 제작도면(대표도)

5. 보조전원장치 시험용 가변부하장치 설계 및 제작

가. 가변부하장치 설계 및 검증

(1) 전력회로 구조 및 기능

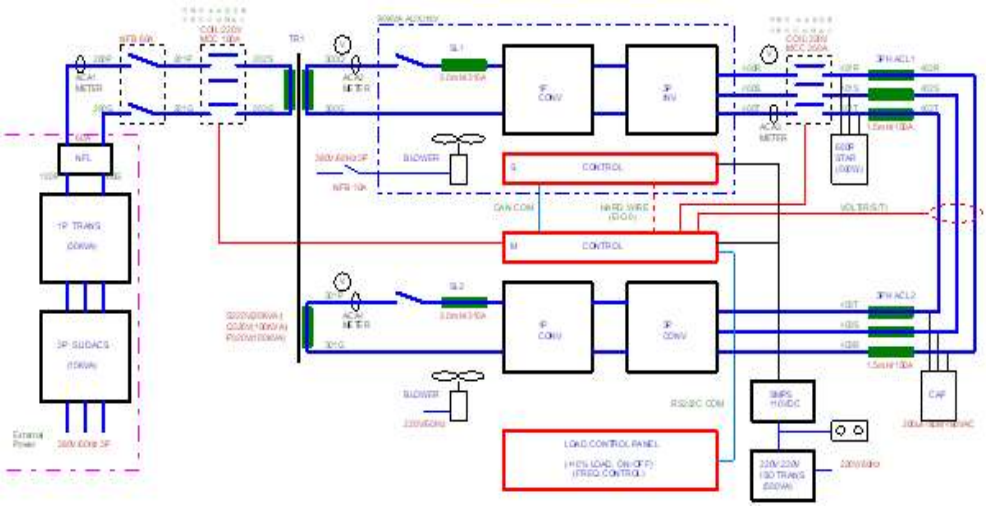


그림 59. 피시험체를 포함한 백투백 가변부하시험장치 구성도

(가) 3상 교류입력 동기화 및 역률 제어기능

보조전원장치의 출력전압에 동기화되어 회생전류와 주파수가 제어되어야 한다. 시험이 진행되는 동안 역률의 제어가 가능해야 하며 보조전원장치의 동작조건에 따라 PF가 1~0.8(지상)까지 운전이 가능하도록 해야 한다. 부하의 가변조정 기능이 있어서 0~100%까지 필요한 만큼의 부하가 연속적으로 공급될 수 있어야 한다.

(나) 내부 DC 링크 레귤레이션 기능

부하시험장치 내부의 DC Link 캐패시터에 과전압이 발생되지 않도록 일정전압으로 유지되는 기능이 반드시 필요하다.

(다) 단상 교류출력 동기화 제어기능

부하시험장치의 출력은 보조전원장치의 입력 및 지상의 Grid 전원과 연결되어 있다. 따라서 출력전압은 Grid 전원과의 동기화가 이루어져야 하며 고성능의 전력제어에 의하여 Grid가 아닌 보조전원장치의 입력으로만 전류가 흐르도록 해야 한다.

(라) 보조전원장치에 대한 통신제어기능

CCU의 통신 기능을 모의하여 보조전원장치에 적절한 제어 명령을 전달하는 기능도 포함되어야 한다.

(마) 각종 전기적 보호기능

시험기간 중 전기적인 에러가 발생하면 피시험체인 보조전원장치 및 부하시험장치 본체의 보호를 위하여 빠른 보호동작이 필수로 요구된다.

(바) 동작표시 기능

사용자의 편의성을 제공하기 위하여 PC를 연결하여 장치의 동작을 살펴볼 수 있으며 이와는 별개로 각종 표시기와 미터장치에 의하여 장치의 동작상태를 직관적으로 알 수 있도록 설계된다.

(2) 시뮬레이션을 통한 설계 검증

부하시험장치의 적절한 동작을 위한 제어방법의 검증을 위하여 아래의 회로와 같이 시뮬레이션 회로를 구성하여 입출력 동작을 확인하였다. 시뮬레이션 회로의 구성은 상단의 부하시험장치와 하단의 보조전원장치로 구성된다. 시뮬레이션 결과로 정격 90kVA 부하에 대하여 각각 PF=0.8 및 PF=1.0으로 제어시의 입출력 전압/전류 파형을 표시하였다.

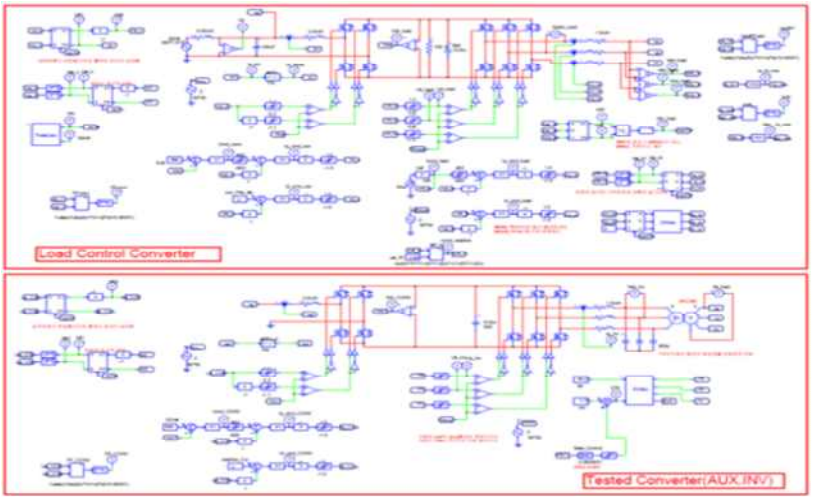
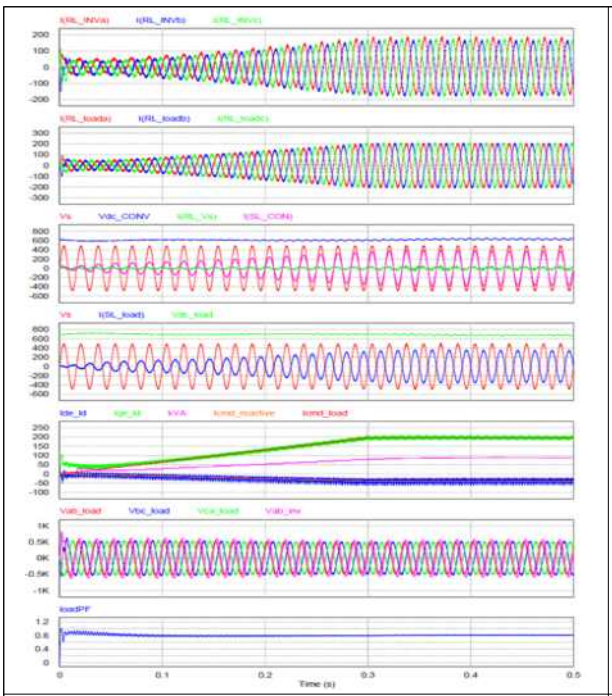
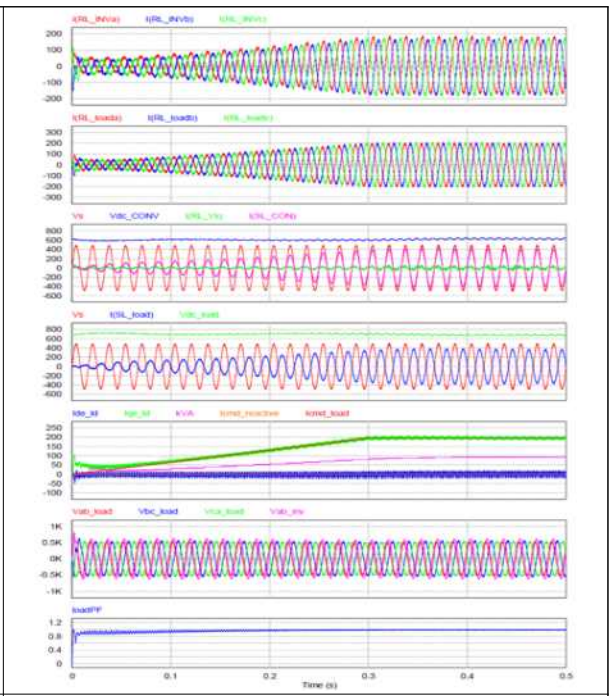


그림 60. 백투백 가변부하장치 시뮬레이션회로

표 35. 가변부하장치 시뮬레이션 결과파형

	
부하역률 PF=0.8 제어 시뮬레이션 파형	부하역률 PF=1.0 제어 시뮬레이션 파형

나. 가변부하장치 제작

전기기관차 보조전원장치를 시험하기 위한 가변부하장치는 입력전원부 및 제어전원부, 전력제어, 출력부, 표시 및 조작부 등으로 구성되어 있으며, 보조전원장치의 입출력사양에 맞도록 백투백 방식의 컨버터가 내장된다. 가변부하장치의 모든 부품을 취부하는 외함은 추후에 변형이 발생하지 않도록 적절한 보강재를 사용하여 제작되었다.

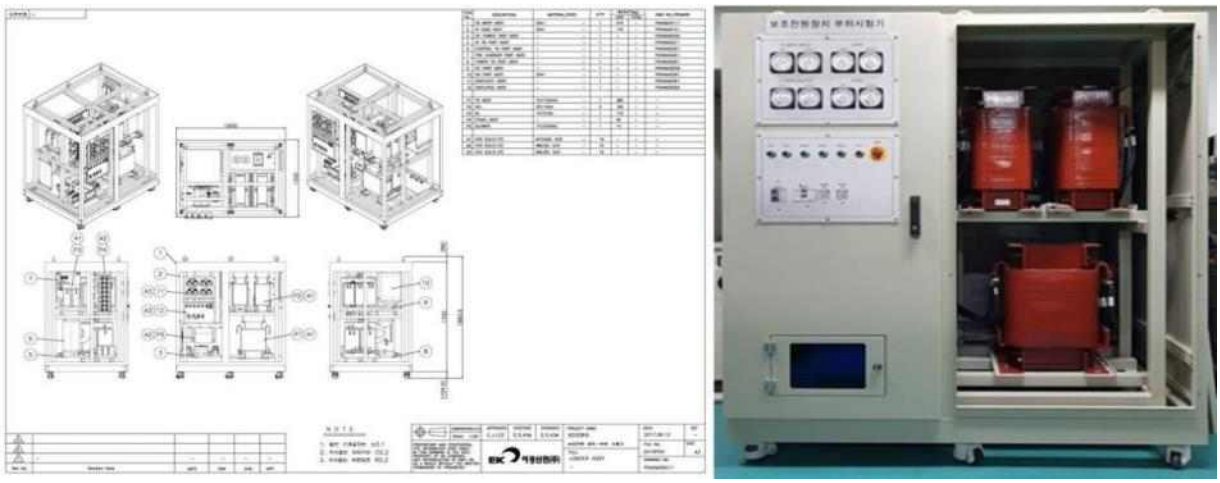


그림 61. 보조전원장치 시험용 가변부하장치 제작도면 및 시제품

표 36. 시험용 가변부하장치 구성 및 기능

구성 장치	사 양	기능 및 특징
입력전원부	1. 15KVA 380Vac / 3상 Slidacs 2. 15KVA 3p/1p Transformer 3. Noise Filter 4. 480V/60A NFB 5. 480V/100A MC(Magnetic Contactor)	부하 및 피시험 장치의 전원을 공급하기 위한 설비
제어전원부	1. 220Vac to 100Vdc SMPS	부하 및 피시험 장치의 제어전원을 공급하기 위한 설비
전력제어부	1. 3상 Converter 2. 단상 Converter 3. DSP 제어장치 4. 부하제어 판넬	피시험 장치의 출력전력의 양을 제어하고 이를 다시 입력으로 되돌리는 장치
출력전원부	1. 480V/300A MC 2. 500W 3상(star) 저항기 3. 3상 스므딩 인덕터 4. 필터캐패시터 5. 델타/스타 3상 트랜스포머 6. 3상 부스트 인덕터	피시험 장치의 출력전원을 부하시험장치에 매칭하기 위한 장치
기타	1. 220V/250W Blower 2. 외함	부하장치 냉각핀 강제냉각용

6. 이중계 보조전원장치의 시험 및 평가

개발된 시제품의 현차시험을 위한 기능 및 성능 검증을 위해 공장시험설비를 구축하고 철도차량기술기준에 의거한 공장시험절차서에 따라 공장시험을 실시하여 연구개발품을 평가하고자 한다.

가. 시험개요

(1) 시험대상품 : 8200호대 전기기관차용 보조전원장치 개발품 1SET

(2) 시험절차 : 보조전원장치 공장시험절차서(R&D8200-X-05(AUX)-204)

(3) 시험 입회(의뢰)기관

(가) 3자 입회시험 : 한국철도차량엔지니어링

(나) 공인기관인증시험 : 한국화학융합시험연구원(KOLAS 인증기관)

(4) 시험기간

(가) 3자 입회시험 : 2017년 09월 06일 ~ 09월 08일(3일간)

(나) 공인기관인증시험 : 2017년 08월 21일 ~ 08월 30일(9일간)

나. 시험항목

표 37. 보조전원장치 공장시험 항목

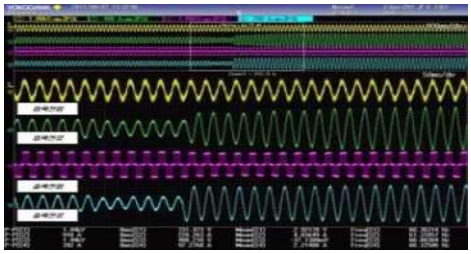
순번	시험항목	형식시험	전수시험	비 고
1	육안검사	◎	◎	3자입회시험
2	치수 및 허용오차 확인	◎		3자입회시험
3	중량 측정	◎		3자입회시험
4	표시검사	◎	◎	3자입회시험
5	내압 시험	◎	◎	3자입회시험
6	절연저항 시험	◎	◎	3자입회시험
7	기동 및 재기동 시험	◎	◎	3자입회시험
8	상 회전 시험	◎	◎	3자입회시험
9	냉각시스템 동작 시험	◎	◎	3자입회시험
10	전기적 보호 및 측정시험	◎	◎	3자입회시험
11	전압 및 주파수 범위 검증 시험	◎	◎	3자입회시험
12	경부하 시험	◎	◎	3자입회시험
13	부하 차단 시험	◎	◎	3자입회시험
14	출력특성 시험	◎	◎	3자입회시험
15	온도상승 및 과부하 능력 시험	◎		3자입회시험
16	안전 요구사항 시험	◎		3자입회시험
17	환경 시험	◎		공인기관인증시험
18	진동 시험	◎		공인기관인증시험
19	전자기 호환성 시험	◎		공인기관인증시험

다. 시험결과

(1) 3자입회시험 결과

공장시험 중 3자입회시험은 육안검사 및 부하시험 등이 포함된 16항목에 대하여 철도전문 시험기관인 한국철도차량엔지니어링(로테코)의 입회하에 시험하였다. 각 항목에 대하여 기존 장치 대비 동등이상의 성능을 확인하였으며, 기존장치에는 없는 전력스택의 캐패시터 방전표시램프를 통한 정상방전여부를 확인하는 안전 요구사항 시험을 진행하여 개발장치의 안전성을 검증하였다.

표 38. 보조전원장치 3자 입회시험 주요결과물

보조전원장치 3자 입회시험 결과(01)	보조전원장치 3자 입회시험 결과(02)
	
보조전원장치 출력파형(기동)	보조전원장치 3자 입회시험 관련사진

(2) 공인기관 의뢰시험 결과

공장시험 항목 중 환경시험 및 진동시험은 KOLAS 인증기관인 한국화학융합시험연구원에 의뢰하여 시험하였다. 환경시험은 KS C IEC 60068 기준에 의거하여 내한성, 내열성, 온도변화, 내습 사이클 시험을 하였으며, 진동시험은 KS C IEC 61373 기준에 의거하여 모의장기수명시험, 충격시험, 기능랜덤시험을 하여 성능을 검증하였다.

표 39. 보조전원장치 공인기관 의뢰시험 결과

(3) 보조전원장치 전체에 대한 전자파 영향은 개발품 사양 고려, 현차 시험을 통해 그 성능을 검증하였으며, 향후 기술 사업화 단계 등에서 해당 부하 용량의 시험기관을 확인하여 규격에 반영하고 시험을 추진할 예정이다.

제4절 보조전원장치용 통신제어기(SIBCOS) 실용화 기술개발

1. 보조전원장치 통신제어기 분석

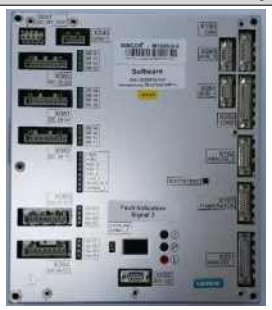
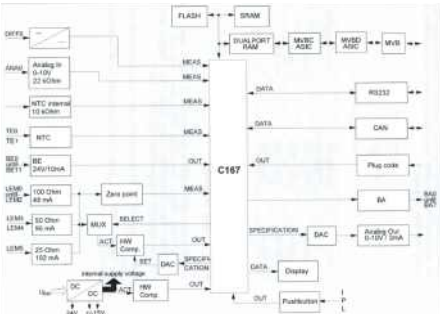
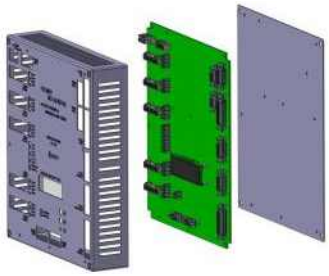
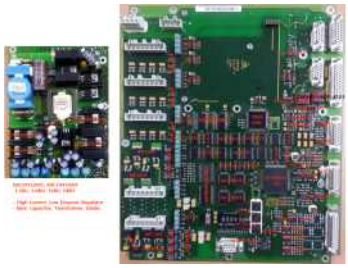
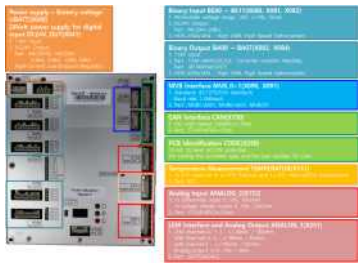
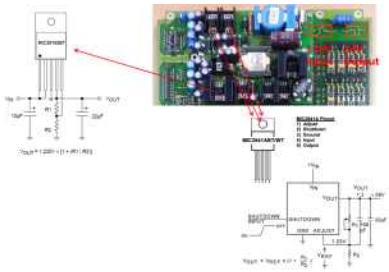
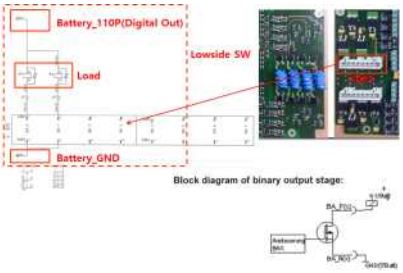
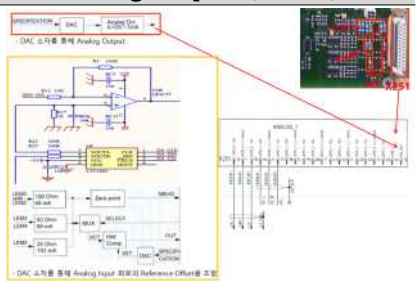
가. 장치개요

보조전원장치의 통신제어장치(이하, SIBCOS-M1300)은 SBICOS-M Series의 제어모듈이며, 여기서 SBICS-M Series는 지멘스(SIEMENS)의 컴팩트 온보드 제어장치를 의미한다. 장치의 주요기능은 각기 다른 레벨의 시스템 간 제어 및 통신을 담당하는 장치이다. 장치특징은 12개의 Binary Input과 8개의 Output, Analog In/Output, Temperature 측정을 위한 포트를 제공하는 것이 특징인 장치이다. 본 과제에서는 SIBCOS-M1300의 고유기능과 적용된 프로토콜을 분석하여 개발품 보조전원장치의 호환성 확보된 SIBCOS-M1300을 개발하고 이를 검증하는 것이 실용화의 최종목표이다.

* Control PCB SIBCOS-M1300 Technical Description, SIEMENS, 2006, pp. 6

나. 장치 하드웨어 분석

표 40. 장치 하드웨어 분석결과

장치외관		장치구성
 <전면>	<후면>	
3D Modeling 설계	주요부품 확인	기능별 성능
		
전원회로 분석	Digital Output회로 분석	Analog Output 회로 분석
		

기존제품의 외함(Case), 회로설계와 같이 하드웨어를 제작하기 위한 기본설계를 위한 기초자료로 활용하였으며, 그 방법과 내용은 아래와 같다.

(1) 분석방법

기존품 SIBCOS-M1300의 치수측정, 분해 후 주요부품 파악, 주요부품의 성능 확인 등 기술문서 검토(제조사 기술문서, 운용사 정비지침서 및 전기회로 등)

(2) 분석내용 및 결과

장치구성 확인, 3D Modeling 설계, 주요부품을 확인하여 기능별 성능 도출, 기술문서 검토를 통해 내·외부 결선 및 기능 파악, 구동전압 확인

다. 통신분석

기존품 분석을 통해 SIBCOS-M1300의 내·외부 인터페이스 종류 및 성능을 파악할 수 있었으며, 분류는 MVB, 외부 신호, MMI 고장코드 순으로 정의하여 프로토콜을 분석할 수 있는 기초분석을 실시하였다. 그에 따른 기초분석 결과는 아래와 같이 기술한다.

(1) MVB 통신분석

(가) 차량 통신 네트워크(TCN)

기관차의 전장품은 차량 버스를 통해 서로 연결되어 있다. 1999년 철도차량 인터페이스의 일원화를 통해 서로 다른 제조사의 차량 간 혼성운행이 가능하도록 하기위해, 유럽 철도관련사 주관으로 IEC 61375(TCN: Train Communication Netwrok, 이하 TCN)를 최초 제정하였으며, 개발대상이 적용되는 차량은 전기기관차(8200호대)로 2003년부터 2006년까지 총 55량, 2008년에 추가 28량이 도입 되었으며, 차량 통신 및 제어는 지멘스에서 공급하였다.

지멘스사는 TCN 규격 제정에 관여한 기업이며, 대상차량에도 TCN 기반의 제어시스템이 적용되어있음을 확인하였다.

(나) 차량 내 통신(MVB) 개요

차량 내 통신(MVB: Multifunction Vehicle Bus, 이하 MVB)은 보편적 의미그대로 차량 내 전장품 간의 통신을 위한 인터페이스로 TCN 하위규격인 IEC 61375-2-3에 의해 규격화 되어 있다. 규격상 정의된 MVB의 전송 매체에 따른 사양은 아래 표와 같으며, 개발대상은 EMD(Electrical mediun for middle distance)를 사용하고 있다.

표 41. MVB 사양

구분	내용	
Network Topology	**Bus(Twisted wire pair)**	Active star(Fiber)
Transmission Media	**Copper(Twisted wire pair)**	Optical(Fiber and active star coupler)
Transmission Interface(Distance)	**EMD(200m)**, ESD (20m)	OGF(2,000m)
Number of Connectable Media	**4,096 physical devices, 4,096 logical ports per bus**	
Code	**Manchester Code**	
Transmission Rate	**1.5Mbps (Data Polling)**	
Response time	**10 □s, 43 □s 이내**	
Frame Size	**16, 32, 64, 128, 256 bit**	
Error Detection	**CRC 8 per 64 bits, HD = 8, protected against sync slip**	

MVB 통신의 인터페이스를 위하여 통신주기, 신호레벨, 데이터의 시작과 끝 구분, Data Frame Format, 코딩방식, Error Detection 방식을 조사하였으며, 현차시험을 통해 규격과 동일하게 구현되어 있는지에 대하여 검증하였다. 이는 MVB 프로토콜을 위한 가장 기초단계의

과정이며, 1단계 진행 시 수행하였던 사항이다. 다만, 이후 기재되는 내용의 이해를 돕기 위해 요약하여 내용을 기재하도록 한다.

MVB 규격(IEC 61375-3-1, MVB)에서 정의하는 MVB 인터페이스를 위한 OSI Layer Model은 하기와 같으며, 이러한 전처리 과정을 거친 후에 실제 차량에 적용된 프로토콜 분석을 수행할 수 있으며 역으로 데이터를 송·수신할 수 있다. 다시 정리하면, 전처리과정은 모듈 또는 회로에서 데이터 수신, 변환 및 처리를 거쳐 사용자(제어유닛)에게 전송하는데 까지를 의미하며, 송·수신하는 데이터에 대한 정의(프로토콜)는 사용자가 지정하는 것으로 역할에 따라 중앙제어장치(CCU: Central Control Unit), Slave장치(IBP, SIBAS KLIP, SIBCOS 등), 분석장치, 시험장치 등으로 활용할 수 있다.

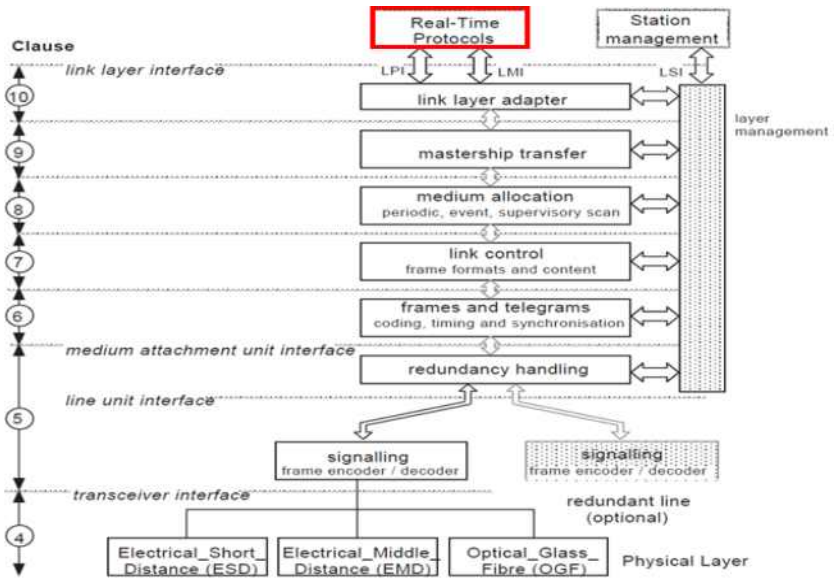
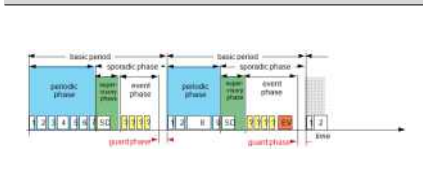
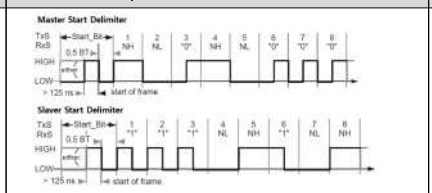
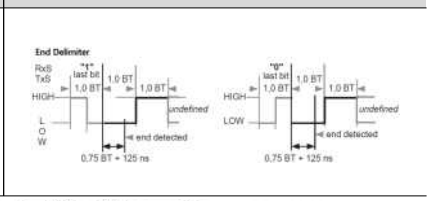
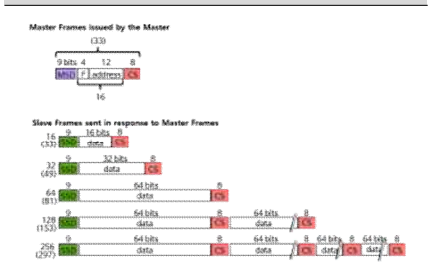
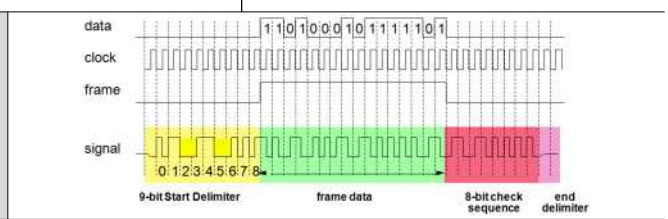
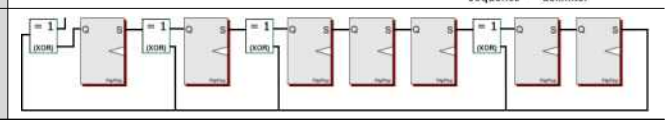


그림 62. MVB OSI Layer (IEC 61375-3-1)

MVB Data 송·수신을 위한 주기, Frame Format, 데이터의 시작과 끝 구분 방법, 송·수신 시 효율과 에러를 찾기 위한 코딩 방식을 파악하였다.

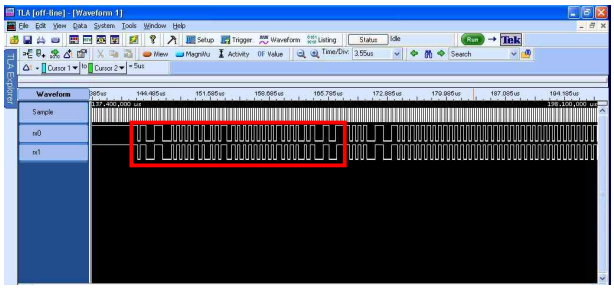
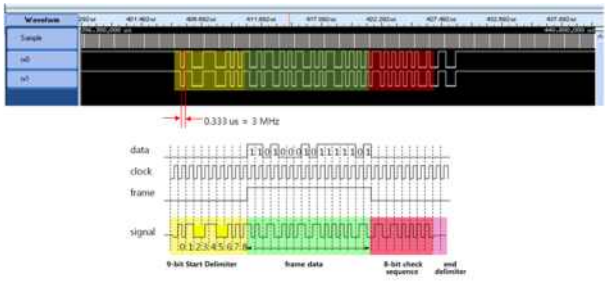
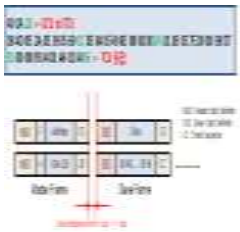
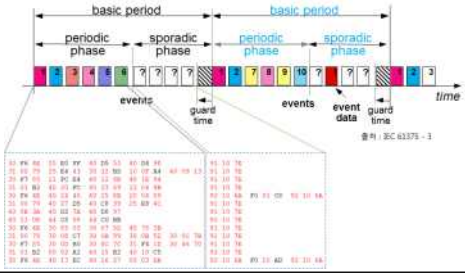
표 42. MVB Data Format

통신주기	Master, Slave Start Delimiter	End Delimiter
		

MVB Frame Format		
	Manchester Encoding	
	CRC-7 -MVB	

실제 차량에 적용된 MVB Data의 Frame을 검증하기위해 전기기관차(8200호대)의 MVB 통신 파형을 측정하여 시뮬레이션을 통하여 비교분석하였으며, 동일한 것을 확인하였다.

표 43. MVB Data Format 시뮬레이션 검증

측정된 Data Frame	Data Frame 시뮬레이션 검증(위) / 규격(아래)
	
Decoding Data 프로토콜 데이터 검증	**Master Data 주기성 검증-규격(위) / 측정값(아래)**
	

(2) 외부신호 분석

SIBCOS-M1300의 외부와 통신하는 대상과 커넥터, 커넥터의 종류와 실제 사용여부 그리고 내부에서 실제 사용하는 핀과 그 속성을 파악하고 정리하였다.

표 44. 외부 커넥터의 Plug Type 정리(예)

Connector	Name	Description	Plug type
X040	UBAUBATT (전원 입력_밧데리 입력단)	- pin1 Battery voltage negative - pins2 Battery voltage negative - pins3 Battery voltage positive - pins4 Battery voltage positive ---------- - G5X040/3 0301. 01 - G5X040/1 0302. 01	- On PCB : Wago plug connector, 4-pin, 721 series - On cable : Wago socket, 4-pin, 721 series

Signal	Connector	IN/OUT	Signal	PIN	배선	비고	사용회로
UBATT	G5 - X040	IN	100Vdc_GND	1,2	0	MAX 65W	DISC CAP, -Ue(bottom)
			100Vdc	3,4	0		DISC CAP, +Ue(bottom)

(3) MMI 고장코드 분석

기존품에서는 FND Type의 MMI가 있으며, 고장코드 및 정상동작 여부를 사용자에게 전달하기 위한 용도로 분석된 내용의 일부를 아래와 같이 정리하였다.

표 45. MMI 고장코드(일부 발췌)

* MAS = Fault monitoring by master controller		
* ESPI = Intelligent IGBT Module		
* MMI = Man Machine Interface		
Code	Description	비고
xx01	MAS:ESPi Fault	
xx02	MAS:ESPi defective	
xx05	MAS:ExtInt-fault	
xx06	MAS:Contactor fault	

(4) SIBCOS의 휴대 가능한 MVB 분석장치 개발(SIBCOS Signal Analyzer)

(가) 개발목적

앞서 분석이 요구되는 신호 및 프로토콜(MVB 프로토콜, 외부신호, MMI 고장코드)에 대하여 현장(현차)환경에서의 실측이 필요하였으며, 기존의 상용 계측장비로는 분석이 불가하여 전용 분석장치를 개발 및 제작하여 분석용도로 활용하였다. 이때, 협소한 차량 안에서 분석을 해야 하고 이동이 잦기 때문에 휴대에 용이하도록 구조적으로 컴팩트하게 제작하였다.

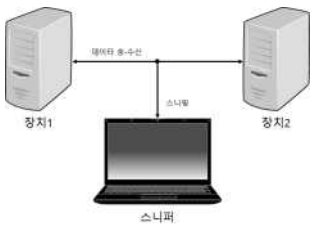
(나) 요구사항

① 분석이 요구되는 신호 및 프로토콜의 종류가 많고 전원공급이 안정적이지 않은 상황으로 상용 계측장비로는 사용이 어렵기 때문에 이들 신호를 통합하여 분석할 수 있어야함

② 장치 하드웨어에 적합한 S/W 개발 필수

③ 기존 차량 통신에 영향을 받지 않도록 스니핑 기법을 활용해야 함

표 46. SIBCOS Signal Analyzer 요구사항, 제작 및 활용

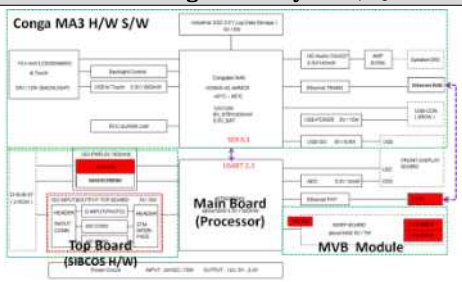
Packet Analyzer 기능	전용 Packet Analyzer S/W	스니핑 기법의 기본구성
		

SIBCOS Signal Analyzer개발	현차시험 시 SIBCOS Signal Analyzer 활용

(다) 구성 및 사양

제품은 Main, TOP, MVB Board로 구성되며, 제어 및 처리를 위해 PC 모듈(Conga MA3)을 사용하였다. PC 모듈은 Main Board에 탑재되어 신호 및 프로토콜 분석에 관련된 인터페이스 제어 및 분석프로그램을 운용하는데 사용되어진다. 인터페이스를 위해 두 개의 Board를 사용하였으며, Digital Input과 ADC를 위한 TOP Board와 MVB Data의 전처리를 위한 MVB Board가 있다. 제품의 성능은 PC 모듈의 성능을 따라가며, I/O는 분석에 요구되거나 필요에 따라 활용할 수 있는 선에서 설계에 반영하였다.

표 47. 제품 구성 및 성능

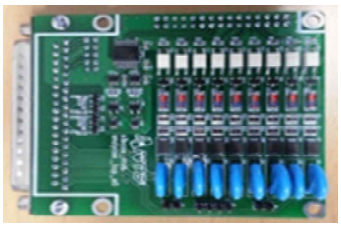
SIBCOS Signal Analyzer 구성	제품 성능
	

항목	기능	사양
PC System	Conga MA3	i-E3845"4G eMMC8 Ethernet, USB, RTC Industrial SSD 2.5"(Log Data Storage)
	Display & Touch	10.4inch LCD(800 x 600) & Touch
Micro Processor	Core	ARM® Cortex®-M4 32 bit / 168 MHz / 512KB
	RAM	192K x 8
	I/O	Digital Input : 9 Port ADC : 2 Channel CAN : 1 Port RS422 or RS485 : 1 Port Ethernet : 1 Port(UDP) USB to Serial : 1 Port MVB : 2 Port
Power	Input Power	90"260VAC or 127"370VAC

(라) 설계 및 제작

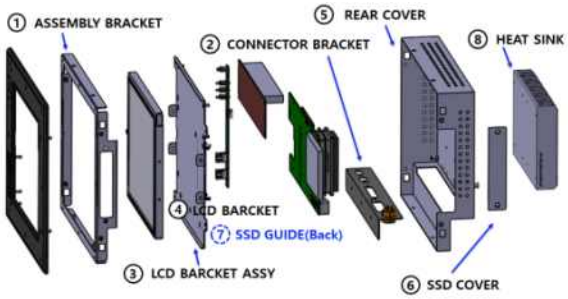
① PCB

표 48. PCB 보드 제작

Main Board	TOP Board	MVB Board
		

② 외함(Case)

표 49. 외함 3D Modeling, 구성 및 기능

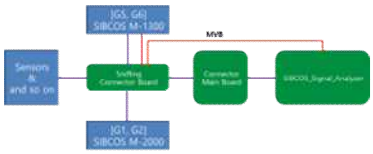
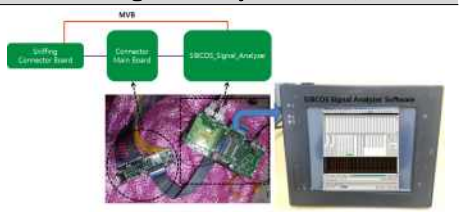
3D Modeling	구성 및 기능
	

No	품명	기능
1	ASSEMBLY BRACKET	측면 커버 고정 용도
2	CONNECTOR BRACKET	뒷면에 위치한 커넥터 고정 용도
3	LCD BRACKET ASSY	4. LCD Panel 고정기능 7. SSD GUIDE 기능(후면 위치)
5	REAL COVER	제품의 측면 커버
6	SSD COVER	SSD 덮개
8	HEAT SINK	COM의 방열기능

(마) 전용 프로그램 개발 및 분석활용

전용프로그램은 PC 모듈의 OS(Windows)에 설치되며, 자체개발 패킷분석 프로그램이다. 개발된 SIBCOS Signal Analyzer는 Sniffing 기법으로 차량 운행에 영향을 주지 않게 설치할 수 있도록 하였으며, Digital Input과 Analog Data를 수신하기위해 분석 포인트와 SIBCOS Signal Analyzer 사이에 Connector 지그를 사용하여 현차시험 시 활용하였다.

표 50. 전용 프로그램 UI 및 시험 구성

전용 프로그램	SIBCOS-M1300 Sniffing 현차시험 구성	SIBCOS Signal Analyzer 현차시험 구성
		

2. 보조전원장치 통신제어기의 제작 및 보완

가. 개발개요

(1) 개발목적

전기기관차(8200호대)의 기존의 보조전원장치에 요구되는 제어명령을 개발품 보조전원장치의 제어기에 전달하고 종합제어장치가 요구하는 응답을 하는 통신제어장치(M1300)을 신뢰성 있게 개발하는데 목적이 있음

(2) 요구사항

(가) 종합제어장치와 보조전원장치 간의 통신 인터페이스(MVB) 회로 적용

(나) 개발품 보조전원장치의 제어기와의 통신 인터페이스(RS-485) 회로 적용

(다) 통신제어장치(M1300)의 상태정보를 현시하는 MMI 적용

(라) 외부통신(보조전원장치 외부) 결선을 위한 기존제품의 커넥터 호환성 확보

나. 구성 및 사양

(1) 기존품, 시작품, 시제품의 기능에 따른 구성은 동일하며, 그 기능을 구현하는데 적용된 회로 및 소자는 보완 및 수정하여 설계되었다. 또한 제어통신 인터페이스를 기존의 CAN 방식에서 RS-485 방식으로 바뀜에 따라 추가회로를 구성하였다. 성능은 제어소자인 MCU를 최신제품을 적용함으로써 처리속도, 내부클럭 등의 성능이 전반적으로 개선되었으며, MMI Display 방식을 기존의 4 bit LED에서 20*4 Character LCD로 바꾸어 장치 상태정보전달을 효율적으로 할 수 있었다.

표 51. SIBCOS-M!300 구성의 비교

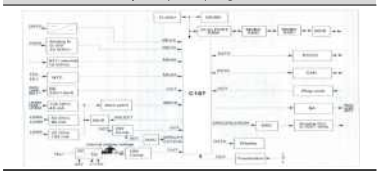
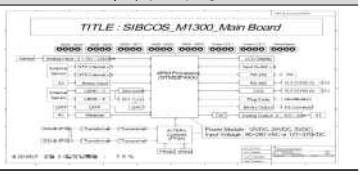
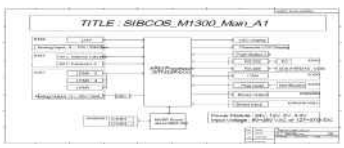
기존품 구성도		시작품 구성도		시제품 구성도
	➡		➡	

표 52. SIBCOS-M1300 사양비교

항목	단위	사양		
		기존품	시작품	시제품
MVB 통신속도	Mbps	1.5	좌동	좌동
MVB 시그널링	방식	Manchester Coding	좌동	좌동
MVB 프레임	bit	16, 32, 64, 128 or 256	좌동	좌동
MVB 전송주기	ms	1, 1024	좌동	좌동
MVB 전송매체	-	Shied Twisted Pair	좌동	좌동
MCU	-	SAF-C167/20MHz/16bit	STM32F417/25MHz/32bit	STM32F417/25MHz/32bit
Memory	MB	2MB Flash-EPROM /1MB SRAM	-	-
MMI Display	-	LED Display (Four-digit alphanumeric)	20x4 Character LCD Display	20x4 Character LCD Display
Interface	-	RS232, CAN, MVB	RS232, 485, CAN, MVB	RS232, 485, CAN, MVB

다. 설계 및 제작

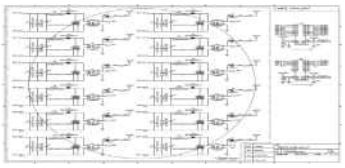
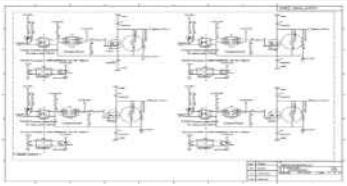
(1) 설계 및 보완

1차년도 설계 및 제작한 시작품의 기능 및 성능시험 결과와 요구사항에 따른 보완설계를 진행하였으며, 변경사항에 대한 상세내용은 아래와 같이 정리하였다.

(가) Input & Output 회로 변경사항

기존품의 회로구조와 동일하도록 Input & Output 절연소자 변경, Output MOSFET 방식으로 변경

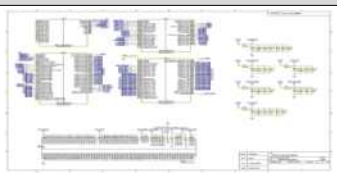
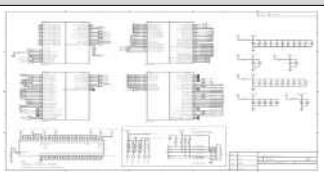
표 53. Input & Output 회로변경

변경전		변경후
	➡	

(나) MVB Control Unit(FPGA) 회로 변경사항

FPGA 소자를 기존의 Cyclone 4에서 보안에 강한 MAX 10으로 변경

표 54. MVB Control Unit 변경

변경전		변경후
	➡	

(다) Analog Input & Connector 회로 변경사항

Analog Input 회로는 Op-amp를 통해서 +/- Level 모두 읽을 수 있도록 설계하였으며, 커넥터 회로는 SIBCOS-M1300과 동일하게 변경

표 55. Analog Input 회로 변경

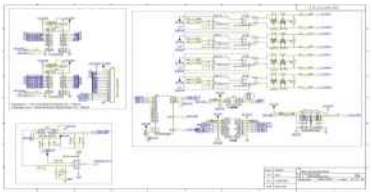
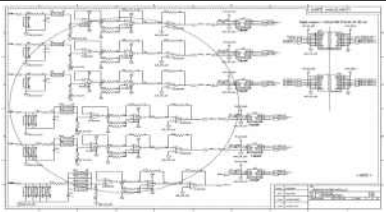
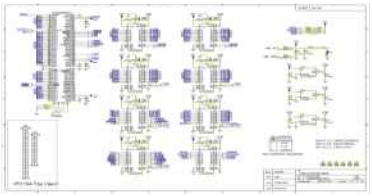
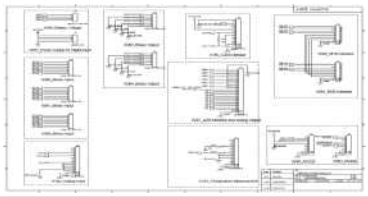
Analog Input 회로 변경전		변경후
	➡	

표 56. Connector 회로 변경

Connector 회로 변경전		변경후
	➡	

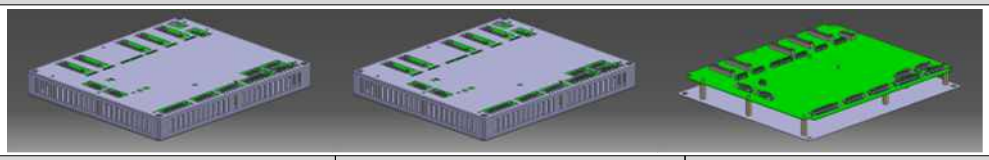
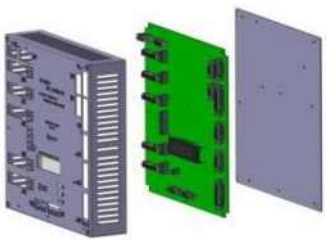
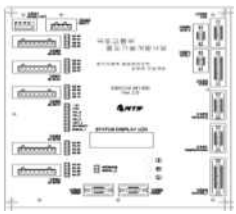
(2) PCB

표 57. PCB 보드 제작

Main Board	Power Board	MVB Board

(3) 외함(Case)

표 58. 외함 설계 및 제품 제작

3D 설계		
		
전개도	2D 설계	제품 전면
		

라. 프로토콜 분석 및 검증

(가) 프로토콜 분석 및 검증 개요

전기기관차(8200호대)의 SIBCOS-M1300에 적용된 통신프로토콜을 분석하여 개발품 보조전원장치가 기존 시스템(SIBAS32)과 연동하여 구동하는데 가장 핵심 연구 활동이라 할 수 있으며, 분석부터 검증까지의 활동을 의미한다.

(나) 분석 대상 및 절차

① 분석대상

분석대상은 MVB 통신 프로토콜이 가장 높은 우선순위에서 진행되어야하며, 내·외부 신호순으로 분석 및 정리하였다. MVB 통신 프로토콜은 1단계 분석 내용에 보조전원장치 제어시스템과 통신제어장치 내부 제어스퀀스를 포함하여 매칭하는 분석활동이 추가로 요구된다.

표 59. 분석대상 정리

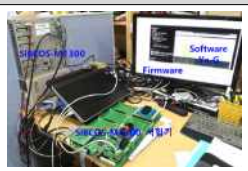
분석대상	분석내용	분석활동	구분	비고
보조전원제어장치 (SIBCOS-M1300)	MVB	기술자료 검토 파형분석 포트검색 프로토콜 분석 외부신호관계 CAN 프로토콜	1단계~계속	
	외부 신호		신규	
	내부 신호		신규	

- 내부와 외부의 범위는 보조전원장치를 기준으로 함
- 내부: SIBCOS M1300 to M2000(CAN), Temp Sensor(ADC), MMI
- 외부: MVB, Digital & Analog IO

② 분석절차

분석내용은 크게 MVB를 포함한 외부신호 분석과 내부신호 분석으로 구분되며, 각 신호별 분석방법 및 절차는 상이하다. 따라서 어떤 하나의 장치와 하나의 문서만으로 분석절차를 정의하기는 어려우나 공통되는 부분을 추려내어 아래와 같이 정리하였다.

표 60. 분석절차

기존품 분석	현차시험	운전실화면표시기 검증
	파악된 기능을 현차시험을 통해 해당기능에 대한 통신데이터의 변화 값을 취득하여 데이터가 의미하는 프로토콜 분석	시험기와 기존품을 연결하여 분석된 프로토콜을 전송하여 운전실 화면표시기(CCU MMI)의 화면변화를 통해 검증
	실험실분석	**현차시험 검증**
		
기술문서, 기존품 분석을 통해 인터페이스 사양, 기능 확인	시험기를 통해 SIBCOS-M1300에 할당된 포트에 값을 송신하여 응답하는 값을 취득 및 정리	운전실 화면표시기에서 점증이 되지 않는 신호(내부신호)에 대하여 파악된 데이터 값을 현차시험을 통해 검증

(다) 상세 분석활동

① MVB Port 분석

MVB 통신분석 시 신호의 주기, 레벨, 파형, Data Frame을 분석하여 MVB 데이터 통신을 할 수 있는 기초를 마련하였다. 실제로 전기기관차에서 MVB 통신 데이터를 취득할 수 있는 여건을 구축하면서 가장 먼저 수행한 분석활동은 MVB Port 분석이다. Port는 MVB 통신을 하는 여러장치를 구분할 수 있는 일종의 식별코드로 분석 대상을 한정시키기 위하여 현차시험 시 정상구동을 시킨 상태에서 MVB 통신 Port(MVB 커넥터)를 하나씩 탈거하여 데이터를 송·수신하지 않는 포트를 찾아 탈거한 장치의 포트임을 직관적으로 확인할 수 있도록 하였다. 아래는 그렇게 찾아낸 MVB 통신 장치별 Port 정리표이다. 정리한 포트 중 AUX1,2에 해당하는 MVB 통신 데이터를 구분하여 분석을 수행하였다.

표 61. MVB Port 구성 정리

MVB Port 구성 분석결과

Device	CCU	GW	TCU1,2	IBP1,2	ATP1,2	MMI1,2	MFA1,2	KLIP1,2,3	KMICRO	AUX1,2
Port	30	7	16	6	4	4	5	9	41	6
설명	Master 기능 Polling List	TCN Gateway	Response	Response	Response	Response	Response	Response	Response	Response

② MVB 프로토콜 분석

검색한 MVB Port에 해당하는 Data를 기록하고 화면으로 현시해주는 Portable MVB Analyzer로 현차시험을 통해 취득하였고, 취득한 데이터를 프로토콜 내용을 적용하여 Data Format의 형태로 아래와 같이 정리하여 일부만 표기하였다.

표 62. MVB 프로토콜 분석 정리(1)

Data Format

Device : AUX11 (Class 1 Device)
F_Code : F
Address : HEX = 700 DEC = 1792
Slave Frame

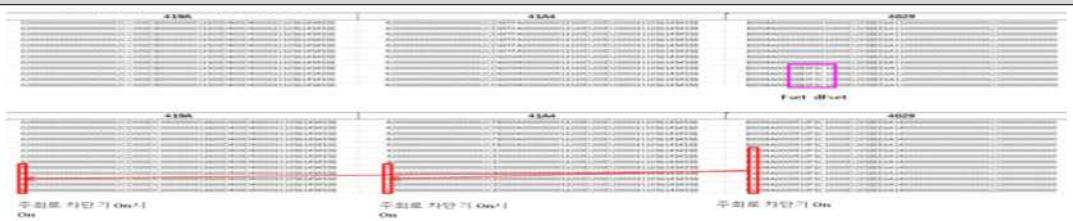
Byte	Default	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
1	00	Class 1 Device							
0	00	Line A 수신 "1"	여분 Line 교란	통신 시스템 장애 "1"	장치 장애 "1"	Reply 장애 "1"	강제 장치 "1"	장치 준비되지 않으면 "1"	예비 시스템 "1"

MVB 프로토콜 분석 결과 내용 중 AUX Power On

프로토콜				변화 내용	
F-Code	Address	Default	Byte		
4	029	4500	29-28	AUX1, PWR1 ON	
4	02A	4500	29-28	AUX2, PWR2 ON	

표 63. MVB 프로토콜 분석 정리(2)

MVB 프로토콜 분석 결과 내용 중 출력 주파수 설정 값, 변화율 Set



③ 외부 신호분석

개발품 보조전원장치의 제어기능을 하는 SIBCOS-M2000을 새로 개발하면서 M1300 to M2000 통신인 CAN에 대한 프로토콜을 분석할 필요가 없어졌으며, RS-485 통신으로 대체되었음. 또한 가선전압 값을 수신하는 Digital I/O와 장치온도 측정을 위한 TEMP Sensor에 대한 구현도 개발품 보조전원장치 내부에 기능을 탑재하면서 분석이 불필요하게 되었음

(라) MMI 고장코드 분석

① 고장코드 분석

SIBCOS-M1300의 상태정보를 Character LCD로 현시하는 기능을 하며, 분석결과는 아래와 같음

표 64. MMI 고장코드 분석결과

MMI 고장코드 분석결과 중			
* MAS = Fault monitoring by master controller			
* ESPI = Intelligent IGBT Module			
* MMI = Man Machine Interface			
Code	Description	Code	Description
xx01	MAS:ESPi Fault	xx25	MAS:Operation without MVB
xx02	MAS:ESPi defective	xx27	MAS:Service-Operation
xx05	MAS:ExtInt-fault	xx33	ESPI:Program fault
xx06	MAS:Contactor fault	xx34	ESPI:new SW
xx09	MAS:Precharging fault	xx35	ESPI:Controller Area Network-fault
xx11	MAS:Plug-coding	xx39	MMI:delete
xx15	MAS:Temp.of controller	xx40	ESPI:faulty
xx16	MAS:Temperature detection	xx41	ESPI:locked
xx17	MAS:Overload short	xx42	ESPI:PWM Faulty
xx18	MAS:Overload long	xx43	ESPI:PWM locked
xx21	MAS:Program fault	xx51	MAS:Fault main contactor
xx22	MAS:SW-Reset	xx52	MAS:Fault prechanrging contactor
xx23	MAS:new SW		
xx24	MAS:Controller Area Network-fault		

마. 소프트웨어 요구사항(SOFTWARE REQUIREMENT) 및 TRACKING 이력

Identifier	main
Function	장치의 내부 컨트롤의 초기화를 수행하고, RS485, Digital_Input, LCD Display, MVB통신를 구동한다.

Identifier	RS485
Function	열차의 중앙제어장치(CCU)로부터 수신된 MVB통신 데이터를 보조전원장치로 송신한다. 보조전원장치로부터 수신 된 보조전원장치의 상태를 MVB 통신을 위한 버퍼로 저장한다.

Identifier	Digital_Input
Function	디지털 입력 포트의 값을 읽어서 보조전원장치의 ID를 체크한다.

Identifier	US2066
Function	Character LCD Display에 화면 표시를 한다.

Identifier	TimerInterrupt
Function	타이머 인터럽트 이벤트가 발생되면 MVB id Check, 버튼 입력, LCD Display 프로세서를 동작시킨다.

Identifier	PushButton
Function	버튼 입력의 값을 읽어서 입력에 따라 기능을 수행한다.

Identifier	Pc104
Function	열차의 중앙제어장치(CCU)로부터 수신된 MVB통신 데이터를 보조전원장치로 송신하기 위해 버퍼로 저장한다. 보조전원장치로부터 수신 된 보조전원장치의 상태를 MVB 통신으로 송신한다.

Identifier	RS232
Function	펌웨어 프로그램을 업데이트한다.

소프트웨어 MATRIX

Firmware	내용	Remark
SIBCOS_M1300_a1_20180119	정적, 동적 시험 내용 반영	영업운전 버전
SIBCOS_M1300_a1_20180208	펌웨어 Read Protect 코드 추가 고장 정보 화면 표시 디버깅 MVB Watchdog 기능 추가	1차 정기점검 시 업데이트
SIBCOS_M1300_a1_20180212	MVB Watchdog 기능 삭제	1차 정기점검 후 고장 발생하여 재 업데이트

바. MVB Conformance Testing Report

MVB Conformance Testing Report는 보조전원장치의 통신제어장치(이하, SIBCOS M-1300)에 적용된 MVB EMD Type에 대하여 적용하며, 관련규격인 IEC 61375의 세부규격인 IEC 61375-3-1(Multifunction Vehicle Bus: MVB)에 대한 Conformance를 테스트하기 위한 규격인 IEC 61375-3-2(MVB conformance testing)에 의거하여 시험하였다. 전기기관차 8200호대에 적용된 MVB 네트워크에 대하여 송·수신하는 데이터 Format, 물리적 전송매체(Electrical Middle Distance) 및 신호규격에 대하여 규격(IEC 61375-3-1)을 만족하고 있음을 확인하였으며, SIBCOS-M1300의 MVB 네트워크 접속을 위하여 MVB to PC/104 변환장치를 개발하여 제품에 적용 하였다. 시험 대상은 MVB to PC/104 변환장치가 물리적 레벨에서의 규격을 만족하는지에 대하여 BOMBARDIER 사에 Conformance testing을 의뢰하여 시험을 진행하였다. 관련시험 문서는 다음과 같다.

- IEC 61375-3-2(MVB conformance testing), IEC, 2012
- 3EGM007200D3780, BOMBARDIER(Test Specification), 2014
- 3EGM007200D1408, BOMBARDIER(Specification), 2016

TCMS Level 1 MVB conformance Test Report는 아래와 같다.

Legal owner: RoQ	Responsible Unit: TTT	Document type: Test Report		BOMBARDIER
Prepared: 2017-10-11	T. Flügel	TCMS Level 1 MVB Conformance Test	Document state: APPROVED	
Checked: ---	---	ANTS Co.,Ltd EMD Ethernet/USB Controller	3EGM007200D4078	
Approved: 2017-10-11	G. Hans	File name:	Revision: ---	Language: en Page: 1 / 21

Test Object: ANTS Co.,Ltd EMD Ethernet/USB Controller
Identification No: S/N: AP-MVB-P001-A0 Rev.: A0
Test Date: 2017-08-31 and 2017-09-29

Participants

Function	Department	Name
Tester	TTT	Thorsten Flügel

Kind of Test: Interoperability test
Test Sequence: ☒ first test ☐ re-examination to:

Related Standards and Guidelines: TCN Standard IEC61375-3-1 2012-06
Test Specifications and Test Instructions: 3EGM007200D1408 rev. F, TCMS Level 1 MVB Conformance Test

Test Certificate:

☒/	Decision	Next Steps
☒	Test passed	
☐	Test passed with restrictions	see chapter 4, Overview of results
☐	Test failed	

Remarks: See chapter 4 overview of results.

Test	Result
Mechanical construction / electrical design	passed
DSW response	passed
EMD signal amplitude	passed
EMD signal pulse width distortion	passed
EMD signal slew rate	passed
EMD signal end delimiter	passed
MVBCS1 – MVBC02C interoperability test	communication possible
Powerup / Powerdown behaviour	passed
Line redundancy	passed with comments
Long term test with Bombardier test system	passed
MVB interface isolation test	passed

사. Software FMEA

소프트웨어 아키텍처 설계에 대한 안전 분석과 FMEA의 수행 절차를 관련 규격(ISO등)에 따라 기술 사업화 시 반영하여 안전도 향상이 필요할 것으로 보인다.

3. 보조전원장치 통신제어기의 시험 및 평가

가. 보조전원장치 통신제어기의 성능시험

제품의 성능은 보편적으로 환경시험 및 전자파시험으로 진행되며, 환경시험은 개발품 보조전원장치에 탑재하여 시험을 진행하였으며, 내용 및 결과는 보조전원장치의 환경시험성적서를 참조하면 된다. 전자파시험은 보조전원장치 통신제어기만 별도로 수행하였으며, 한국인정기구(KOLAS) 인증시험을 완료하였다. 시험내용 및 결과는 아래와 같이 기술하였다.

(1) 전자파 적합시험

(가) 전자파시험 일반사항

전자파시험은 항목에 따라 과전압 내성시험 EMC 시험으로 구분하였으며, 시험기간은 2017년 8월 말에 수행되었다. 시험기관은 한국인정기구인 KOLAS에서 지정한 기관에서 수행하였으며, KOLAS인증을 받았다. SIBCOS-M1300 개발품에 대한 전자파 적합시험 내용 및 결과에 대하여 기술한다.

표 65. 시험 장치 및 개요

항목		과전압 내성시험	그 외 시험	비고
시험대상 품목	기기명	SIBCOS-M1300	좌동	
	모델명	SIBCOS	좌동	
	제조번호	N/A	N/A	
시험기간		2017.08.31 ~ 2017.08.31	2017.08.28. ~ 2017.08.29	
시험기관		㈜원텍	주식회사 랩티	
공인인증		KOLAS	KOLAS	

(나) 시험적용 기준 및 규격

시험항목은 총 8개이며, 시험기준 및 절차는 항목별 해당 규격에 따라 수행하였다. 적용규격은 한국철도공사에서 주관하는 기술검토를 통해 타당한 규격 내용과 시험 등급을 정의하였으며, 시험에 관련된 내용과 적용된 등급은 시험방법 및 결과에서 기술한다.

표 66. 시험항목 및 적용규격

시험항목	적용규격
전자파 적합성시험	
1. 과전압 내성시험	IEC60571:2012
2. 전도성 방해 시험	CISPR11:2015
3. 방사성 방해 시험	CISPR11:2015
4. 정전기 방전 내성시험	IEC 61000-4-2:2008
5. 방사성 RF 전자기장 내성시험	IEC 61000-4-3:2006 +A2:2010
6. 전기적 빠른 과도현상 / 버스트 내성시험	IEC61000-4-4:2012
7. 서지 내성시험	IEC61000-4-5:2014
8. 전도성 RF 전자기장 내성시험	IEC61000-4-6:2013

(다) 결론

앞서 기술한 바와 같이 공인인증을 위해 한국인정기구(KOLAS)에서 공인한 시험기관에 시험의뢰하여 진행하였으며, 시험결과에 따른 공인시험성적서를 발행 받았다. 전자파 적합시험은 통신제어장치(M1300) 단독 진행하였으며, 목표했던 성능 대비 우수한 성능결과를 얻을 수 있었다. 따라서 제품의 전기적 특성에 대한 성능의 신뢰성을 확보했다할 수 있다.

표 67. 전자파적합시험 공인시험성적서

과전압 내성시험성적서	EMC 시험성적서

나. 보조전원장치 통신제어기의 기능시험

개발품 보조전원장치는 CCU로부터 제어를 받아 구동하는 구조로 되어있으며, 제어명령은 MVB를 통해 전달된다. 이때, 전기기관차(8200호대)에 적용된 고유의 프로토콜로 전달되며 보조전원장치 통신제어기는 이를 해석하여 프로토콜에 담긴 기능을 수행하고 응답을 하는 형태로 구성되어 있다. 개발품 보조전원장치를 검증하기위해서 CCU의 제어신호를 발신하고 보조전원장치의 응답을 수신하여 정상구동여부를 확인할 수 있는 시뮬레이터(시험기)를 개발하고 조합시험을 통해 개발품 보조전원장치의 기능을 시험 및 검증하였다.

(1) SIBCOS-M1300 시험기 개발

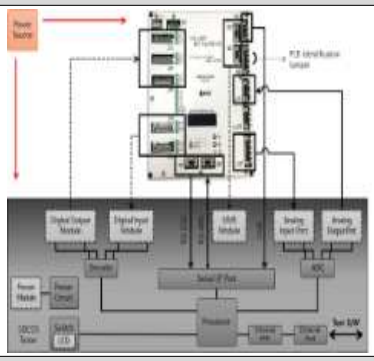
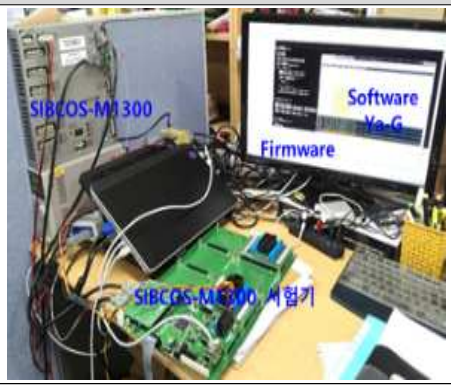
(가) 개발개요

보조전원장치 통신제어장치에 명령코드(F-Code)를 송신하고 응답(ACK)를 받을 수 있는 전용 시험장치 개발

(나) 구성 및 사양

① 제품구성은 제어유닛인 MCU와 MVB 인터페이스부, Digital IO, ADC, DAC 회로, LED&LCD, 전원부로 구성되어 있으며, 아래와 같다.

표 68. SIBCOS-M1300 시험기 설계 및 제작, 시험

SIBCOS-M1300과 시험기 결선(예)	SIBCOS-M1300 시험기 시제품
	
실험실 시험	통신조합시험
	

(다) 결과 및 결론

SIBCOS-M1300 시험기는 실험실 및 공장환경에서의 전기기관차(8200호대) 보조전원장치 개발품의 기능시험을 수행하는데 무리가 없는 성능 및 인터페이스를 보유하고 있으며, 실제 실험실환경에서 단품시험을 수행하는데 문제없이 진행하였으며, 개발품 보조전원장치와의 공장 및 조합시험에 있어서도 큰 이슈없이 수행하였다. 실험실 시험과 조합시험을 마친 개발품은 정적 및 동적시험과 본선시운전을 거쳐 영업운전 중에 있다. 개발된 SIBCOS-M1300 시험기는 추후 상용화시 제품의 출고 전 시험용도로 활용할 예정이다. 정적 및 동적시험에 대한 상세한 내용은 공장시험 및 조합시험을 통한 검증에서 다루도록 한다.

제5절 현차시험

1. 현차시험 기술검토 및 심의

국가 R&D 철도기술연구사업「전기기관차(8200호대) 보조전원장치 실용화 기술개발」연구과제 최종 성과물의 성공적 현차시험 목표 달성을 위한 개발품 시험 기준의 적성성 및 현차 시험 관리 절차를 검토하고, 차량의 운행 안전성 확보를 위한 관련 사항을 마련하고자 하였다.

가. 현차시험 기술검토

(1) 관련근거

- 철도차량 부품국산화업무관리 절차서 제12조(현차시험)(한국철도공사-차량 내규 제22호)
- 철도기술연구사업 참여 계획(안)(한국철도공사 기술연구처-594호, 2016.03.)
- 현차시험 기술검토 서류 제출(이경산전 EK-17MC-09-P54-005, 2017.10.19.)

(2) 주요사항

- 철도차량 현차시험 요청에 따른 기술검토 자료의 적정성 및 보완
- 부품 국산화 추진과제에 대한 현차시험 기술검토 서류의 확인 및 검토
- 현차 시험 계획 및 관리 절차, 차량의 운행 안전성 확보 및 작업자 보호를 위한 사항
- 정적 및 동적 시험 기준의 적정성
- 장치 중요성 및 계절적 영향 등을 반영한 현차시험 절차 및 방법의 적합성

그림 63. 현차시험 기술검토 시행

표 69. 철도차량 현차시험 기술검토

구분	제출목록	제출시기	구분	제출목록	제출시기
		현차시험			현차시험
1	현차시험 계획서	제출	12	부품 용량계산서	제출
2	현차시험 검토서	〃	13	주요부품 List 및 Datasheet	〃
3	검사 및 시험계획	〃	14	정비 지침서	〃
4	공장시험 절차서	〃	15	회로설계 도면	〃
5	정적시험 절차서	〃	16	기구설계 도면	〃
6	정적시험 보고서	(양식)	17	공인기관 시험성적서	〃
7	동적시험 절차서	제출		17-1 진동 및 환경 시험성적서	〃
8	동적시험 보고서	(양식)		17-2 과전압 시험성적서	〃
9	정기검사 및 기능시험	계획서		17-3 전자기호환성 시험성적서	〃
10	설계 자료	제출		17-4 3자 입회 시험성적서	〃
11	제품 기술사양서	〃	18	현차시험 측정결과	〃

나. 현차시험 심의

(1) 현차시험 심의 결과

- 대상부품: 국가R&D "전기기관차 보조전원장치 실용화 개발" 시제품
- 시험기간: 부품중요도(상), 계절적영향(4계절)
- 대상차량: 8200호대 전기기관차(1량, 차호: 8280호)
- 시험소속: 충북본부 제천차량사업소
- 시험장소: 제천차량사업소(정적/구내시운전), 운행선로(본선시운전, 영업운전)
- 시험방법: 정적시험, 동적시험(구내시운전, 본선시운전), 영업운전

그림 64 현차시험 차량(전기기관차 8280호)

표 70. 개발품 현차시험 기간(한국철도공사 차량내규 제22조)

부품 중요도 [1]			계절적 영향 [2]				현차시험기간 [3] (개월)
상	중	하	1계절	2계절	3계절	4계절	
○			○	○	○	○	-

※ 주석
1) 부품 중요도 : A - 차량성능과 안전에 직접적인 영향을 미치는 중요부품
B - 안전에 간접적 영향을 미치는 하위 조립체 부품
C - 안전에 영향을 미치지 않는 최하위 구성품
2) 계절적 영향에 대한 분류선정 예시
예) 봄-여름 : 2계절 , 여름-가을-겨울 : 3계절 , 여름-겨울 : 3계절
3) 현차시험 기간은 필요에 따라 동일계절 2회 이상으로 선정할 수 있다.

표 71. 현차시험 구분

검사/정적시험	⇒	구내시운전	본선시운전	영업운전 (4계절, 60,000Km)
'18. 1월		'18. 1월	'17. 1월	완료시까지

(2) 현차시험 방법 및 주요사항

(가) 현차시험은 아래와 같이 정적 및 동적시험과 영업운전의 현차적용시험으로 구분하며, 각 시험별 시험항목 및 기준은 정적 및 동적시험 절차서에 따른다.

표 72. 현차시험 항목

<table>
<tr><th colspan="2">구분</th><th colspan="2">시험항목</th><th>시험장소</th><th>시험기준</th></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="8">정적시험</td><td>1</td><td>외관 및 설치상태 검사</td><td rowspan="9">제천차량사업소</td><td rowspan="8">정적시험절차서
정적시험보고서</td></tr>
<tr><td>2</td><td>제어기능 시험</td></tr>
<tr><td>3</td><td>기동 및 차단시험</td></tr>
<tr><td>4</td><td>정상특성시험</td></tr>
<tr><td>5</td><td>연장급전시험</td></tr>
<tr><td>6</td><td>보호기능</td></tr>
<tr><td>7</td><td>감시 및 기록</td></tr>
<tr><td>8</td><td>안전경고 및 시험</td></tr>
<tr><td rowspan="5">동적시험</td><td rowspan="2">구내시운전</td><td>9</td><td>정상동작시험</td><td rowspan="9">동적시험절차서
동적시험보고서</td></tr>
<tr><td rowspan="4">본선시운전</td><td>10</td><td>정상동작시험</td><td rowspan="7">운행선로</td></tr>
<tr><td>11</td><td>절연구간시험</td></tr>
<tr><td>12</td><td>냉각장치 온도시험</td></tr>
<tr><td>13</td><td>고조파시험</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">현차적용시험(영업운전)</td><td>14</td><td>정상동작여부</td></tr>
<tr><td>15</td><td>주요기기 온도, 냉각성능</td></tr>
</table>

(나) 개발품의 검사 및 시험방법

보조전원장치 개발품은 현차 적용시험(영업운전) 기간동안 차량에 탑재하여 개발품의 성능 및 신뢰성을 검증하며, 철도차량 유지보수 기준에 따라 확인 및 점검을 실시하고 그 결과를 기록한다.

① 정적 및 동적시험

- 정적 및 동적시험에 대한 시험절차 및 기준은 관련 문서(기술검토 제출서류 5. 정적시험 절차서 ~ 8. 동적시험 보고서)에 따른다.
- 현차 적용시험에 대한 검사 및 시험은 관련 문서(기술검토 제출서류-09. 정기검사 및 기능검사)에 따른다.

② 정적 및 동적시험

개발품의 검사 및 시험방법은 다음과 같다.

- 기본검수(ES) : 철도공사 차량내규 8200호대 전기기관차 유지보수 기준에 따른다. (단, 개발품 해당 항목에 한함)

③ 경정비3(LI-3)

- 철도공사 차량내규 8200호대 전기기관차 유지보수 기준에 따른다. (단, 개발품 해당 항목에 한함)
- 고장기록 유무는 매 검사마다 종합제어장치 고장데이터 기록을 확인하고, 조치한다.
- 검사항목 및 결과는 다음의 표와 같이 기록・관리한다.

표 73. 개발품 점검 주기 및 항목

정비종류	약호	정비항목	점검주기		비고
기본검수	ES	보조전원장치 고장 유무 확인 및 조치	5,000Km	-	입고소속
경정비3	LI-3	송풍기 외관 및 모터 회정상태 검사	40,000Km	4개월	개발사 (철도공사 입회/확인)
		전면커버, 기기함, 공기덕트 및 함내 청소			
		함내 접지선, 배선, 절연상태 점검			
		각 연결커넥터와 전기연결부 점검			
		휴즈 및 홀더의 고정상태 점검			

(3) 현차시험 위험도 분석 및 안전관리

(가) 위험요인 도출

- 빈도와 심각도 파악(위험도 조합표)　　* 위험도(R) = 발생빈도 × 심각도

표 74. 현차시험 위험도 분석

위험요인	빈도	심각도	위험도 (R)	비고
구성품 고장으로 인한 운행장애 발생 위험	2	1	2	
작업 안전사고 발생 위험	2	2	4	
계			6	(3등급)

(나) 위험성 평가 및 개선대책

평가서 No	1	위험성평가표 (헤드라인M 22포인트)	평가자	정위섭	
소 속 명			평균위험도	현재	개선
대 상 명	전 기 기 관 차 (8200호대) 보조전원장치 현차시험			(3등급)	(1등급)
작성일시	2017.09.01				

내용	평가 구분	평가 구분위험요인	현재안전조치	현재위험도			개선대책	코드 번호	개선위험도			완료 예정일
				빈도	강도	위험도			빈도	강도	위험도	
운행	열차 운행	구성품 고장으로 인한 운행장애	매뉴얼에 따른 응급조치/보고	2	1	2	(첨승자 및 입회자) 관련 장치 응급조치 교육 (시운전 전) 구성품 정적시험/구내 시운전 (시운전) 시운전 차량 입회 및 첨승		2	1	1	
작업	산업 안전	개발품 설치/제거 시 안전사고	사전 조사 및 작업계획서 작성	2	2	4	작업 관리 및 담당업무 지정 취급절차서 작성, 안전교육 시행 정적.동적시험 절차서 작성		2	1	2	
특기 사항	없음							검토 승인	검토자		승인자	

그림 65. 현차시험 위험성 평가

표 75. 현차시험 업무 처리 절차

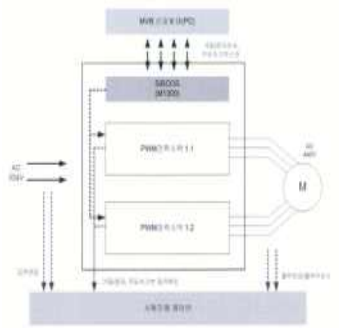
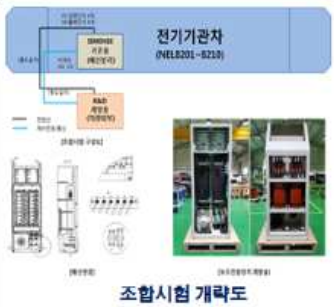
업무절차	업 무 내 용
현차 시험 요청 ↓	**1. 현차시험을 위한 보조전원장치 사전 기술검토** 1.1 개발품 기술검토 기준 및 규격 설정 1.2 현차시험 방법/절차 등 세부계획 협의 **2. 현차시험을 위한 보조전원장치 성능검증** 2.1 개발품 사양 및 성능, 등 공인시험 수행 2.2 시험 절차 및 시험기준 마련 2.3 개발품 조합시험
현차 적용시험 기술검토 ↓	**3. 보조전원장치 현차시험 기술검토** 3.1 검사/시험계획서, 시험절차서 검토 3.2 설계자료 및 제품 기술사양서 검토 3.3 공인기관 시험성적서 검토
위험도 분석 안전성 검증	**4. 위험성 분석 및 안전성 검증** 4.1 위험도 분석 및 안전관리 대책 4.2 안전성 검증
현차시험 계획(안) 마련 ↓	**5. 보조전원장치 현차 적용시험 계획 확정** 5.1 현차시험 계획 심의/확정 5.2 정적/동적시험 절차서, 취급설명서 작성 5.3 시험차량 보험가입, 비용산정 등
운전명령 요청 사전조사/작업계획서 작성 ↓	**6. 시험운전을 위한 운전명령 발행 요청** **7. 사전조사 및 작업계획서 작성** 7.1 설치소속/ 관련 장비 사전조사 및 점검 7.2 작업계획서 검토/보완, 담당자 지정
개발품 설치 정적/구내시운전 ↓	**8. 개발품 설치 및 본선 시운전 준비** 8.1 작업계획서/취급절차서에 따른 작업 수행 8.2 정적·동적시험절차서에 따른 시험
본선 시운전 (영업운전) ↓	**9. 본선 시운전(입회/첨승)** **9.1 차량진단·상태 확인, 고장 모니터링** **9.2 이례사항 발생, 조치 지원**
입고 검사 (현차시험 종료) ↓	**10. 검사 및 개발품 취거** 8.1 차량검사 및 고장기록 확인(시운전 점검표)
시험 종료 취거	**11. 시험품 취거/기존품 재설치** **12. 시험결과 분석**

2. 차량 인터페이스 및 호환성 시험(조합시험)

가. 공장시험 및 조합시험을 통한 검증

현차 탑재를 위해 동적·정적시험 전에 총 3회에 걸쳐 시험하였으며, 공장시험 1회, 조합시험(한국철도공사) 2회 실시하여 현차 탑재를 위한 사전검증을 실시하였다. 보조전원장치 통신제어장치(SIBCOS-M1300)는 보조전원장치에 탑재하여 시험을 진행하였으며, 하기내용은 통신제어장치(M1300)에 대한 시험 내용 및 결과만 별도 발췌하여 기재하였다.

표 76. 조합시험

<table>
<tr><th>구분</th><th>공장 조합시험</th><th>1차 조합시험</th><th>2차 조합시험</th></tr>
<tr><td>장소</td><td>이경산전 외주공장
(경기도 남양주시 진전읍 금곡리 2076)</td><td>한국철도공사
대전철도차량융합기술단
(전기차량정비센터)</td><td>한국철도공사 충북본부
(제천차량사업소)</td></tr>
<tr><td>일자</td><td>2017.09.07</td><td>2017.09.15.</td><td>2017.09.20. ~ 09.22.</td></tr>
<tr><td>시험방법</td><td>보조전원장치(이경) + 통신제어기(SIBCOS, 앤츠)</td><td>전기기관차 8210호 + 보조전원장치
(보조전원장치 조립체,)</td><td>전기기관차 8236호 + 보조전원장치
(보조전원장치 조립체)</td></tr>
<tr><td>시험내용</td><td>1. 기동 및 차단 시험
(MVB 통신 호환 및 성능)
2. 주파수 가변시험
(MVB 통신 호환 및 성능)
<table><tr><th>시험항목</th><th>MVB 통신</th><th>기준</th></tr><tr><td rowspan="2">기동/차단</td><td>기동 명령</td><td>정상기동</td></tr><tr><td>차단 명령</td><td>정상차단</td></tr><tr><td rowspan="2">주파수 가변</td><td>출력주파수 30Hz</td><td>30Hz±1%</td></tr><tr><td>출력주파수 60Hz</td><td>60Hz±1%</td></tr></table></td><td>1. 보조전원장치 제어 성능 시험
2. 고장검지 및 처리기준 비교
3. 고장코드별 통신프로토콜 확인
- MVB data 전송 펌웨어 수정
- 수정 펌웨어 적용 후 로깅
4. 통신 인테페이스 시험
5. 보조전원 정상특성 시험(고압)</td><td>1. 기존품 정상동작 및 특성 확인
2. 보조전원장치 조립체 현차설치
3. 설치 호환성 확인 및 보완
4. 개발품 제어 특성 비교 시험
5. 개발품 정상동작 및 특성시험
(고압 기동시험)</td></tr>
<tr><td>시험
설비</td><td><보조전원장치+SIBCOS 조합시험 >
 
* MVB 통신시험 호환성 시험</td><td><보조전원장치 조립체 조합시험>
 

* 통신 인터페이스, 정상특성시험</td><td><보조전원장치 현차 설치 시험>

* 기존품 맞교환, 개발품 성능 비교</td></tr>
<tr><td>관련사진</td><td> </td><td>
</td><td> </td></tr>
<tr><td>시험결과</td><td>MVB 통신 성능 및 호환성 검증</td><td>통신 및 제어 성능 확인
고장코드 및 통신프로토콜 확인
보조전원 정상특성 및 성능 보완</td><td>MVB 통신 성능 보완
고장코드 발생 Bit 분석완료
보조전원 기동시험 완료</td></tr>
</table>

3. 현차시험

가. 현차시험 계획

국가 R&D 철도기술연구사업「전기기관차(8200호대) 보조전원장치 실용화 기술개발」연구과제성과물의 사계절 및 60,000km 현차시험 목표 달성을 통해 연구 개발품의 실용화 기술을 검증하고자 한다.

(1) 현차시험 계획

- 일정/장소(개발품 설치) : 2018. 1. 3(수), 09:00~12:00 / 제천차량사업소
- 정적시험 : '18. 1. 3(수) ~ 1. 9(화) / 제천차량사업소
- 동적시험(시험 운전) : 2018. 1. 10(수) ~ 1. 12(금)
  - ·(시험운전 1차) '18. 1. 10(수), 제천⇔도담역 2왕복
  - ·(시험운전 2차) '18. 1. 11(목) ~ 1. 12(금), 제천→영주→동해→태백→제천

표 77. 현차시험 계획

구분	정적시험	동적시험			
		구내 시운전	본선시운전		영업운전
			1차	2차	
일자	'18.1.3 ~1.9	1.10	1.10	1.11~1.21	'18.1.22~ '18.9.28
장소 구간	제천차량사업소		제천역⇔도담역 (2회 왕복) 제천 도담	1/11 : 제천→영주→동해 1/12 : 동해→태백→제천 제천 영주 동해 제천 태백 동해	영업운전 전노선
편성	전기기관차 1량 (8280호)		기관차 단행 (8280호)	기관차 단행 (8280호)	8280호+여객열차 (무궁화열차)
주요시험항목	외관 및 설치호환성 제어성능시험 기동 및 차단시험 정상특성시험, 보호동작 기능시험 연장급전시험 감시 및 기록 중련시험		정상특성 시험 절연구간 시험 냉각장치 온도시험 고조파시험		정상특성 고장 모니터링 온도모니터링 계절적 영향 등
입회 첨승	참여연구진(6명), 차량관리원(1명), 일반차량처(1명)				* 수시

나. 정적시험

(1) 시험방법 및 절차

보조전원장치 개발품의 제어기능과 동작의 정확성 및 안전성을 확인하기 위해 다음과 같이 시험하고 그 결과를 판정한다.

(가) 설치 및 연결

보조전원장치의 설치 및 연결을 확인한다.

(나) 제어시험

보조전원장치의 제어기능을 확인한다.

(다) 기동 및 차단 시험

보조전원장치 기동 및 차단 조건에 따른 기능을 확인한다.

(라) 정상특성시험

① 차량의 정상적 기동절차에 의거하여 차량을 기동, 보조전원장치의 기동을 확인한다. 보조전원장치는 기동 된 이후에 동작하는 보조전원계통의 기기를 규정된 순서대로 동작시키며 보조전원장치의 동작을 확인하여 이상이 없어야 한다.

② 정상특성 비교시험

개발품이 정상적으로 기동 된 상태에서 출력주파수를 최대 및 최소로 가변하며 입출력 전압, 전류 및 주파수를 측정하고 기존품과 성능을 비교・검증한다.

③ 보조전원장치 출력필터(LCR필터)의 성능확인을 위해 출력전압을 측정한다.

(마) 연장급전시험

① 보조전원장치에 고장이 발생한 경우 해당 보조전원장치는 전기적으로 분리되고 정상으로 동작하는 보조전원장치로부터 연장급전이 가능하여야 한다. 보조전원장치는 연장급전이 동작한 경우에 차량 내 주요회로 및 장치에 전원을 공급할 수 있는 용량을 확보하여야 하며, 과부하를 방지하기 위하여 차량 운행에 지장이 없는 보조전원계통의 부하는 차단 또는 정해진 절차에 따라 감소되어야 한다.

② 자동연장급전 시험

보조전원장치 자체 고장이나 부하장치의 기능 고장에 의해 자동연장급전이 되어야 한다.

(바) 고장처리 및 감시, 기록

① 보조전원장치는 일시적인 현상에 의한 고장 조건이 사라지고 안전한 상태가 확인 된 경우 초기화 기능에 의하여 정상적인 동작이 회복될 수 있어야 한다. 또한 보조전원장치에 발생한 고장은 종합제어장치 등에 기록 및 표시가 되어야 한다.

② 제어장치 기능시험

제어장치(SIBCOS)는 자체 화면표시기(MMI)를 통해 주회로차단기 및 보조전원장치 상태, 결함발생 유무, 고장코드, 프로세서 데이터를 표시하고 필요시 초기화 할 수 있어야 한다.

(사) 안전 경고 및 시험

① 보조전원장치에는 위험한 전기 전압에 대한 경고, 중계회로에 대한 방전시간 및 안전한 작업을 위한 작업 전 확인 및 조치사항을 작업자가 쉽게 판별할 수 있는 위치에 표기하여야 한다. 또한 중계회로의 잔류전압은 작업자가 쉽게 확인 할 수 있도록 표시되어야 하고, 기준에 따라 안전한 상태까지의 방전되어야 한다.

② 안전표지(추가, 2017.11.22.)

내부부품(PWM 스택)의 임계방전 시간에 대한 안전경고 표시, 방전램프 확인방법을 표기하여야 한다.

표 78. 정적시험 시험 및 검사 항목

구분	검사항목	검사기준	비고
1	외함 정렬	설치레일과 외함의 위치	
2	고정 상태	스터드볼트(M20) 고정 및 조임상태	
3	공기덕트 연결	공기덕트와 하우징의 연결 및 기밀상태	
4	입력전원 연결	L1.1, L2.1, L1.2, L2.2 및 배선번호 확인	
5	출력전원 연결	1U, 1V, 1W, 2U, 2V, 2W 및 배선번호 확인	
6	커넥터 연결	커넥터, 핀번호 및 배선번호, 전기적 연결 상태	
7	제어기능 시험	통신 • 신호 처리 및 동작상태	
8	기동 시험	MCB투입 후 보조전원장치 기동	
9	차단 시험	차단 조건에 따른 보조전원 정지 및 차단	
10	정상특성시험	보조전원 상태 및 출력전압, 위상 검사	
11	연장급전시험	보조접촉기 및 연장급전 동작상태	
12	보호기능 시험 (고장검지 및 처리)	고장검지 및 알림, 재기동 및 연장급전 기능	
13	감시 및 기록	상태 표시 및 고장기록 상태	
14	안전경고 및 시험	안전작업 및 방전 표시, 방전시간 시험	

그림 66. 개발품 현차 설치 및 시험

다. 동적시험(구내/본선 시운전)

국가 R&D 연구과제 개발품의 시험운전 및 영업운전 통해 기존 장치 및 차량과의 인터페이스를 검증하고 장치의 신뢰성을 확인하고자 한다.

(1) 구내시운전

(가) 구내 시운전 개요

표 79. 구내 시운전 개요

구분	구내시운전
일시	2018. 1. 9.
차호	전기기관차 8280호
시험구간	한국철도공사 제천차량사업소 구내
차량조성	전기기관차 2량(중련시험 포함)
첨승/입회	참여연구진(6명), 차량관리원(1명), 일반차량처(1명)

(나) 시험 항목

① 차량 기지 구내를 시운전하고 보조전원장치의 동작 상태 및 이상 여부를 확인한다.

② 보조전원장치 동작 시 1차 가선의 고조파 영향을 분석한다.

(다) 시험 절차 및 방법

① 차량의 정지 상태에서 MCB를 투입하고, 보조전원장치를 기동하여 정상동작 여부를 확인한다.

② 구내시운전 구간을 운행 중 보조전원장치 출력주파수 가변상황 시 정상동작 여부를 확인한다.

③ 주변압기 1차측 고압회로에 고압 프로브 및 계측기를 설치하고 전류 파형을 측정한다.

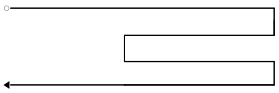
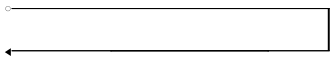
표 80. 구내 시운전 시험항목

시험구분	시험기준		판정기준
구내시운전	MCB 투입 후 보조전원장치 기동		정상 동작할 것
	보조전원접촉기 상태(화면표시기)		정상 급전할 것
	주파수 가변	출력전압	AC 0~440V
		출력주파수	2~60Hz
	출력전원의 위상검사		정상일 것
	1차 가선의 고조파 영향이 없을 것		정상일 것
	MCB 차단 시 보조전원장치 차단		차단될 것
중련제어 및 구원시험	제어 및 피 제어차량 보조전원장치 동작상태		정상 동작 할 것
	피 구원차(개발품) 고장 시 구원차량의 기관사 화면에 해당 고장 현시 여부		표시될 것

(2) 본선 시운전

(가) 본선 시운전 개요

표 81. 본선 시운전 개요

구분	본선시운전	
	1차	2차
일시	2018. 1. 10(수)	2018. 1. 11(목) ~ 2018. 1. 12(금)
차호	전기기관차 8280호	
시험구간	제천역⇔도담역(2회 왕복) 제천차 제천 도담 	제천역-영주역-강릉역-태백역-제천역 제천차 제천 영주 동해 
첨승자	참여연구진(6명), 차량관리원(1명), 일반차량처(1명)	

(나) 시험 항목

① 중련조성시 제어 및 피제어 차량의 보조전원장치 통신제어 기능에 이상이 없어야 한다.

② 피 구원차의 보조전원장치(개발품) 고장 발생 시 구원차량의 기관사 화면에 고장이 표시되어야 한다.

③ 본선 시운전 구간 운행 중 보조전원장치는 정상동작 하여야 한다.

④ 본선시운전 구간을 운행 중 절연구간 통과 시 보조전원장치의 정상동작 하여야 한다.

⑤ 밀폐구조인 실제차량에 보조전원장치를 탑재하고 PWM 스택의 온도(최고, 최저, 변위량)를 측정한다.

(다) 시험 절차 및 방법

① 보조전원장치 개발품 탑재(시험차량)과 기존 차량을 중련 조성하고, 제어 및 피제어차 각각에서의 보조전원장치 상태, 통신 및 제어 기능을 확인한다.

② 보조전원장치 개발품이 탑재된 피구원차에서 보조전원장치 기능이상 또는 고장(소프트웨어적인 고장 등)을 발생시키고 구원차량의 기관사 화면에 고장이 현시되는지 여부를 확인한다.

③ 본선 시운전 중 보조전원장치 출력주파수 가변상황 시 정상동작 여부를 확인한다.

④ 본선 시운전 중 절연구간 통과 시 보조전원장치의 정상동작 여부를 확인한다.

⑤ 밀폐된 상태의 보조전원장치 PWM 스택에 온도측정용 센서를 설치하고 냉각장치의 온도를 측정한다.

표 82. 본선 시운전 시험항목

시험 구분	시험기준		판정기준
본선시운전	MCB 투입 후 보조전원장치 기동		정상 동작할 것
	보조전원접촉기 상태(화면표시기)		정상 급전할 것
	주파수 가변	출력전압	AC 0~440V
		출력주파수	2~60Hz
	절연구간 통과		정상 동작할 것
	출력전원의 위상검사		정상일 것
	PWM 냉각장치 온도		정상 동작할 것
	MCB 차단 시 보조전원장치 차단		차단될 것

라. 현차시험(사계절 및 60,000km)

(가) 영업운전(사계절 및 60,000km)

표 83. 현차시험 영업운전 개요

구분	영업운전 현차시험(사계절 및 60,000km 이상)
일시	2018. 1. 22 ~2018. 9.28
차호	전기기관차 8280호
시험구간	일반철도 전노선
차량조성	전기기관차 8280호 + + 무궁화객차(※운전명령에 따름)

(나) 시험 절차 및 방법

① 보조전원장치 개발품운 영업운전 기간동안 차량에 탑재하여 개발품의 성능 및 신뢰성을 검증하며, 철도차량 유지보수 기준에 따라 확인 및 점검을 실시하고 그 결과를 기록한다.

② 보조전원장치의 점검 주기 및 검사 기준은 한국철도공사 차량 내규 8200호대 전기기관차 유지보수 기준에 따르며, 주요 기기의 상태 및 기능을 점검한다.

③ 보조전원장치의 기능은 정지된 차량을 기동하여 출력 전압, 출력주파수를 점검하고 그 결과값이 기준치 범위에 있는지 여부를 확인한다.

④ 개발품 및 차량의 고장기록은 매 정기검수 시 또는 필요 시 확인하고 조치한다.

표 84. 현차시험 시험항목 및 기준

구분	시험항목		시험기준 및 평가	비고
현차시험(영업운전)	1	정상동작여부	정상 동작할 것	
	2	주요기기 온도, 냉각성능	기존품 대비	

그림 67. 영업시운전 사진

4. 현차시험 결과

보조전원장치 시제품의 실용화 기술검증을 위해 시제품을 현차에 탑재하고 정적시험, 동적시험, 영업시운전(사계절, 60,000Km) 시험을 실시하였다.

정적시험은 기동 및 차단시험, 중련시험을 포함하여 9항목의 시험을 정적시험 절차서에 따라 시험하고 그 결과를 기존품과 비교하여 이상이 없음을 확인하였다. 동적시험은 구내시운전 및 본선시운전을 통해 절연구간 통과, 냉각장치 온도, 가선의 고조파 측정 시험을 실시하여 성능을 확인하였다. 영업시운전은 2018년 1월 22일부터 실시하였으며, 현재까지 이상 없이 운행 중에 있다. 영업시운전 정기검사 및 기능시험절차서에 따라 연구개발기간 중 3차례의 정기검사를 실시하였다. 2018.12.01.기준 연차시험 누적 주행키로는 151,560km, 운행일수 284일로 사계절 시험을 성공적으로 수행하였다.

가. 현차시험 결과

(1) 현차시험 기간 : **2018. 1. 3 ~ 2018. 12. 1 (사계절)**

(2) 현차시험 누적 주행키로 : **151,560.5km** (2018. 12. 1. 기준)

[참고] 현차시험 누적 주행키로(2018.9.28. 협약 종료일 기준): **127,578km**

(3) 영업운전 운행일수: **284일** (2018. 12. 1. 기준, 정적시험 및 정기검사 제외)

표 85. 현차시험 결과('18.12.1일 기준)

구분	정적시험	동적시험			
		구내 시운전	본선시운전		영업운전
			1차	2차	
일자	'18.1.3～1.9	1.10	1.10	1.11～1.21	'18.1.22～'18.12.1
운행일수	**3일**				**281일**
누적주행거리	**432.3km**				**151,128.2km**
운행 내역	제천차량사업소		제천역⇔도담역 (2회 왕복) 제천 도담	(1/11)제천→영주→동해 (1/12)동해→태백→제천 제천 영주 동해 제천 태백 동해	영업운전 (여객열차)
편성	전기기관차 1량 (8280호)		기관차 단행 (8280호)	기관차 단행 (8280호)	8280호 (무궁화열차)
현차 시험 항목	외관 및 설치호환성 제어성능시험 기동 및 차단시험 정상특성시험, 보호동작 기능시험 연장급전시험 감시 및 기록 중련시험		정상특성 시험 절연구간 시험 냉각장치 온도시험 고조파시험		정상특성 고장모니터링 온도모니터링 계절적 영향 등
비고					정기검수 3회

[차량]편성, 차호 기간별 주행거리

조회기간 2018.01.03~2018.01.21 (03시 ~ 익일 03시)

순번	차종	차종명	편성/차량...	총주행키로	기간주행키로	측정지점	운행일수
1	122	전기기관차	8280	1497225.3	432.3	3093677	3

그림 68. 동적시험 주행키로(한국철도공사 KOVIS포털 조회 결과)

[차량]편성, 차호 기간별 주행거리

조회기간 2018.01.03~2018.12.01 (03시 ~ 익일 03시)

순번	차종	차종명	편성/차량...	총주행키로	기간주행키로	측정지점	운행일수
1	122	전기기관차	8280	1497225.3	151560.5	3093677	284

그림 69. 영업운전 누적 주행키로(2018. 12. 1. 기준)

[차량]편성, 차호 기간별 주행거리

조회기간 2018.01.03~2018.09.28 (03시 ~ 익일 03시)

순번	차종	차종명	편성/차량...	총주행키로	기간주행키로	측정지점	운행일수
1	122	전기기관차	8280	1497225.3	127578.1	3093677	232

그림 70. 영업운전 누적 주행키로(2018. 9. 28. 기준)

시스템(Y) 도움말(H)

차량유지보수내역

갱신 유지보수작업표 오더확인자 및 계통별작업자 오더별 측정값 조회

번호	편성차량번호	검증	검증내역	입고일자	출고일자	유지보수소속내역	완성일자	통지내역	총주행키로(910)
1	8280	71	임시정비(T1)	2018.08.16	2018.08.16	수색차량사업소	2018.08.16	임시정비 통지 -1218열차(20180816운행일)	1,454,113.4
2		33	LI-03(제한정비)	2018.07.23	2018.07.23	제천차량사업소	2018.07.23	[8280]전기기관차 신형 계획 -LI-03(제한정비)	1,441,575.7
3		71	임시정비(T1)	2018.07.22	2018.07.22	제천차량사업소	2018.07.22	임시정비 통지 -1707열차(20180722운행일)	1,441,257.5
4		71	임시정비(T1)	2018.07.11	2018.07.11	제천차량사업소	2018.07.11	임시정비 통지 -1625열차(20180711운행일)	1,435,238.9
5		33	LI-03(제한정비)	2018.05.08	2018.05.08	제천차량사업소	2018.05.08	[8280]전기기관차 신형 계획 -LI-03(제한정비)	1,397,609.7
6		71	임시정비(T1)	2018.04.09		제천차량사업소		임시정비 통지 -1707열차(20180409운행일)	1,381,616.9
7		71	임시정비(T1)	2018.04.05		제천차량사업소		임시정비 통지 -1707열차(20180405운행일)	1,380,344.1
8		71	임시정비(T1)	2018.04.02		제천차량사업소		임시정비 통지 -1707열차(20180402운행일)	1,378,753.1
9		71	임시정비(T1)	2018.02.25		대전차량사업소		임시정비 통지 -1315열차(20180225운행일)	1,361,360.3
10		33	LI-03(제한정비)	2018.02.08	2018.02.08	제천차량사업소	2018.02.08	[8280]전기기관차 신형 계획 -LI-3(제한정비)	1,353,725.5
11		71	임시정비(T1)	2018.01.16		제천차량사업소	2018.01.16	임시정비 통지 -7762열차(20180116운행일)	1,344,661.3

그림 71. 정기검수 및 임시검수 내역(한국철도공사 KOVIS 조회 결과)

표 86. 현차시험 관련문서

<table>
<tr><th colspan="2">시험항목</th><th colspan="2">시험내역</th><th>시험결과 및 관련문서</th></tr>
<tr><td>1</td><td>외관 및 설치상태 검사</td><td colspan="2" rowspan="10">정적시험</td><td rowspan="10">- 정적시험보고서
- 고장코드집
- 통신사양서
- MVB 및 신호분석 보고서</td></tr>
<tr><td>2</td><td>제어기능 시험</td></tr>
<tr><td>3</td><td>기동 및 차단시험</td></tr>
<tr><td>4</td><td>정상특성시험</td></tr>
<tr><td>5</td><td>연장급전시험</td></tr>
<tr><td>6</td><td>감시 및 기록</td></tr>
<tr><td>7</td><td>구원시험(중련시험)</td></tr>
<tr><td>8</td><td>고장처리 및 보호기능</td></tr>
<tr><td>9</td><td>통신시험</td></tr>
<tr><td>10</td><td>안전시험 및 경고표지</td></tr>
<tr><td>11</td><td>정상동작시험</td><td rowspan="2">구내
시운전</td><td rowspan="6">동적시험</td><td rowspan="6">- 동적시험보고서</td></tr>
<tr><td>12</td><td>LCR 필터 성능</td></tr>
<tr><td>13</td><td>정상동작시험</td><td rowspan="4">본선
시운전</td></tr>
<tr><td>14</td><td>절연구간시험</td></tr>
<tr><td>15</td><td>냉각장치 온도시험</td></tr>
<tr><td>16</td><td>고조파시험</td></tr>
<tr><td>17</td><td>외관 및 설치 상태</td><td colspan="2" rowspan="4">현차시험
(영업운전)</td><td rowspan="4">- 정기검사 및 기능시험 보고서
- 온도모니터링 보고서</td></tr>
<tr><td>18</td><td>정상동작여부</td></tr>
<tr><td>19</td><td>주요기기 상태 및 기능</td></tr>
<tr><td>20</td><td>주요기기 온도 및 냉각 성능</td></tr>
</table>

*) 시험항목별 판정기준 : 부록 1-2-② 정적 및 동적시험 절차서 참조

개발품(EK-17001)의 시험기준은 철도차량 기술기준(KRTS-VE-PART46)의 장치별 시험기준에 따라 설계적합성 및 형식동등성을 시험하였고 그 결과는 부록 2-3-① 공장시험 성적서 2. 검사용역증명서_부품제작 검사기록서 2/4~4/4와 같다. 제어기능 등의 시험항목에 대한 판정기준은 부록 1-2-② 정적 및 동적시험 절차서에서 시험절차 및 판정기준을 제시하였다.

또한 철도차량용 전기기기 및 철도차량 탑재 전력 컨버터의 특성 등은 IEC, VDE, BN 등의 국제규격에 따라 시험항목과 방법을 규정하고 있다. 특히 IEC 61287에서는 철도차량 차상의 전력 컨버터의 사용조건, 일반적인 특성 및 시험방법들을 규정하고 있으며, 동력차의 보조회로의 전력변환장치에 적용하고 있다. 특히, IEC 61287-2을 통해 입력/출력 전압, 입력/출력 전류, 전압/전류의 주파스 스펙트럼, 전압/전류 리플 및 전압/전류의 고조파 같은 전력량을 산출할 수 있다. IEC 60571(Electronic equipment used on rail vehicle)에서는 제어, 조정, 보호, 전원 공급등을 위하여 철도차량에 설치된 모든 전자기기 및 회로에 연결된 장치의 규격을 정의하고 있다.

향후 IEC 60571, IEC 61287-1, IEC 61287-2 등의 규격을 바탕으로 철도차량용 전자기기 요구사항과 철도차량 탑재 전력 컨버트의 특성 및 시험 관련 사항 등을 규격서에 반영하고, 시험성적서를 제시하여, 판정근거나 추산 근거를 명확히 하도록 하겠다.

나. 주요 시험 결과

(1) 설치 및 취부호환성

보조전원장치의 치수와 전체 중량은 기존품(700kg)과 동일하게 설계되어 이에 따른 중량 변화에 따른 영향은 없을 것으로 판단되었으며, 개발품의 제작 공차, 설치 호환성, 전기적 연결에 대한 하드웨어 인터페이스를 확인하였다.

표 87. 개발품 설치 및 취부 호환성 시험 결과

검사항목	검사기준	검사결과
외함 정렬	설치레일과 외함의 위치	양호
고정상태	스터드볼트(M20) 고정 및 조임상태	양호
공기덕트 연결	공기덕트와 하우징의 연결 및 기밀상태	양호
입력전원 연결	L1.1, L2.1, L1.2, L2.2 및 배선번호 확인	도면과 일치, 연결 양호
출력전원 연결	1U, 1V, 1W, 2U, 2V, 2W 및 배선번호 확인	도면과 일치, 연결 양호
커넥터 연결	커넥터, 핀번호 및 배선번호 확인	도면과 일치, 연결 양호

(2) 제어성능

차량의 정상적 기동절차에 의거하여 차량을 기동, 보조전원장치의 기동을 확인한다. 보조전원장치는 기동 된 이후에 동작하는 보조전원계통의 기기를 규정된 순서대로 동작시키며 보조전원장치의 동작을 확인하여 이상이 없어야 한다.

표 88. 제어성능 시험 결과

검사항목	검사기준		검사결과
제어시험	SIBCOS1 LED 점등 및 동작 확인		양호
	SIBCOS2 LED 점등 및 동작 확인		양호
	통신포트 연결상태(MMI AUX포트 활성화)		양호
	X2 커넥터 PIN5, PIN14 측정		0 ~ 180v
기동 및 차단시험	MCB 투입 후 보조전원장치 기동		정상 기동
	보조전원장치 차단	MCB 차단	보호동작 없이 정지
		팬터그래프 하강	
		ACVN1 차단	
		ACVN2 차단	

(3) 정상 특성 및 비교 시험

개발품이 정상적으로 기동 된 상태에서 출력주파수를 최대 및 최소로 가변하며 입출력 전압, 전류 및 주파수를 측정하고 기존품과의 성능을 비교・검증의 필요가 있다. 보조전원장치 정적시험절차서 정상특성시험에서 기동 및 주파수가변 시험의 판정기준을 기존품과 동등이상으로 수정하고 기존품과의 파형비교를 통하여 성능을 검증하였다.

개발품이 정상적으로 기동 된 상태에서 출력 주파수를 최대 및 최소로 가변하며 입출력 전압, 전류 및 주파수를 측정하고 기존품과의 성능을 비교·검증하였다.

표 89. 정상특성 시험 결과

시험항목	시험기준		판정기준	시험결과
정상특성시험	MCB 투입 후 보조전원장치 기동		정상동작할 것	양호
	보조전원접촉기 상태(화면표시기)		정상급전할 것	양호
	주파수 가변	출력전압	AC 0~440V	가변됨
		출력주파수	2~60Hz	가변됨
	출력전원의 위상검사		정상일 것	양호
	LCR필터 기능에 이상이 없을 것		정상일 것	양호

(4) 연장급전 시험

보조전원장치에 고장이 발생한 경우 해당 보조전원장치는 전기적으로 분리되고 정상으로 동작하는 보조전원장치로부터 연장급전이 가능하여야 한다. 보조전원장치는 연장급전이 동작한 경우에 차량 내 주요회로 및 장치에 전원을 공급할 수 있는 용량을 확보하여야 하며, 과부하를 방지하기 위하여 차량 운행에 지장이 없는 보조전원계통의 부하는 차단 또는 정해진 절차에 따라 감소되어야 한다. 또한 보조전원장치의 기능고장(과전류, 단락 등)이 발생했을 때 자동으로 시나리오에 맞게 연장급전이 투입되는지 여부(연장급전 제어 성능)를 시험하였다.

표 90. 연장급전 제어 및 기능시험 결과

시험항목	시험기준		시험결과	
			AUX1	AUX2
연장급전시험 (AUX1 차단)	기동 및 정지			양호
	보조전원접촉기 및 연장급전 동작상태			양호
	주파수 가변	출력전압		가변됨
		출력주파수		가변됨
연장급전시험 (AUX2 차단)	기동 및 정지		양호	
	보조전원접촉기 및 연장급전 동작상태		양호	
	주파수 가변	출력전압	가변됨	
		출력주파수	가변됨	
	공기압축기 구동		양호	
연장급전시험 (HEP 차단)	기동 및 정지		양호	양호
	보조전원접촉기 및 연장급전 동작상태		양호	양호
	주파수 (AUX1)	출력전압	440V	
		출력주파수	60Hz	
	주파수 (AUX2)	출력전압		가변됨
		출력주파수		가변됨
자동연장급전	중대 고장의 처리(해당 보조전원장치 쇄정) 및 자동연장급전 제어		양호	양호

(5) 고장검지 및 처리 기능

보호회로 동작시험에 따른 보호기능을 확인하기 위하여 개발품 설계기준에 따라 보조전원장치의 고장을 분류하고, 기존품의 고장 코드와 비교 시험하였다. 개발품의 각 고장코드에 대한 설명, 검지기준, 처리 절차 및 조치방법 등을 고장코드집으로 문서화 하였다. 현차시험에서는 각 고장코드를 소프트웨어적으로 발생시키고 그에 따른 고장 검지 및 처리 기능을 확인하였다

표 91. 고장검지 및 처리 기능 시험 결과

시험항목	시험기준	판정기준	시험결과
고장검지 및 처리 기능 (보호기능)	고장 검지 및 현시(알람)	양호할 것	양호
	해당 보조전원장치 차단	양호할 것	양호
	보조전원접촉기 재배열	정상일 것	양호
	일시적 고장의 처리 및 재기동	양호할 것	양호

그림 72. 고장검지 및 처리기능 시험

(6) 감시 및 기록 성능

전기기관차(8200호대) 통신제어기(SIBCOS)는 MVB(Multi-Function Vehicle Bus) 인터페이스를 통해 중앙제어장치 CCU(Central Control Unit)와 연결되어 있다. 보조전원 통신제어기(SIBCOS)는 기존의 보조전원장치에 요구되는 제어명령을 이중계 보조전원장치의 제어기에 전달하고 종합제어장치가 요구하는 응답을 하는 통신제어기(SIBCOS)를 통해 CCU에 전달하는 기능을 한다. 현차시험을 통해 보조전원장치에 대한 상태표시와 감시 기능과 고장 기록 성능을 확인하였다. 또한 SIBCOS MMI의 주회로차단기 투입여부, 보조전원장치의 정상 투입여부, 결함발생 유무, 고장코드(또는 고장내역), 프로세서 데이터 표시 성능과 고장내역 삭제 기능 등의 신뢰성을 시험하였다.

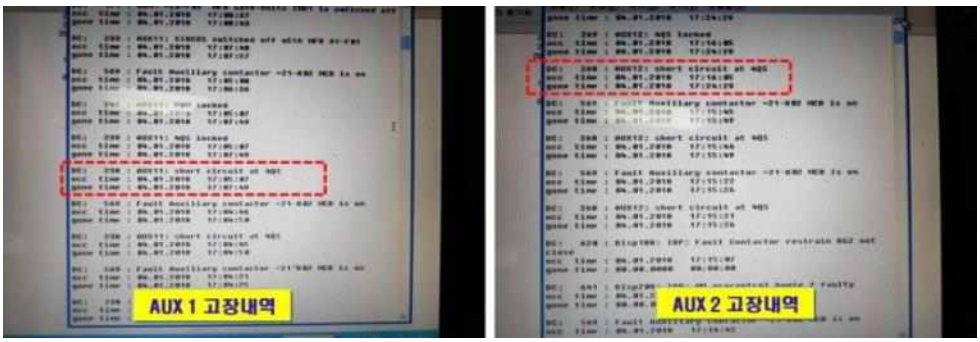


그림 73. 감시 및 기록 시험

표 92. 보조전원장치 감시 및 기록 시험 결과

시험항목	검사기준	시험결과
감시 및 기록	보조전원장치의 각 상태를 화면표시기에 표시할 것	양호
	보조전원장치에서 발생한 고장은 중앙제어장치(CCU)에서 기록할 것	양호
	발생한 고장에 대한 상세정보는 보조전원제어기에 기록할 것	양호
	제어장치(SIBCOS)에 주회로차단기 및 보조전원 상태를 표시 할것	양호
	보조전원장치 고장 시제어장치(SIBCOS)에 고장을 표시할 것	양호
	제어장치(SIBCOS) 각 버튼의 기능이 정상 동작 할 것	양호

(7) 중련제어 시험

보조전원장치 정적시험절차서에 따라 제어차량과 피 제어차량을 중련 조성하고, 제어차량에서 기동할 경우 피 제어차량에 탑재된 보조전원장치가 정상적으로 동작하는지 확인하였으며, 기존 차량과 동일하게 성능을 구현하였다.

표 93. 중련시험 결과

검사항목	시험기준	시험 결과
중련제어 및 구원시험	제어 및 피 제어차량 보조전원장치 동작상태	양호
	피 구원차(개발품) 고장 시 구원차량의 기관사 화면에 해당 고장 현시 여부	양호

(8) 고조파 시험

개발품을 차량에 탑재하여 보조전원장치 동작 시 1차 가선의 고조파 영향을 분석하고 차량 충격 여부 등 확인하기 위하여 보조전원장치로 입력되는 1차측 가선전압의 파형을 측정하였다. 측정구간은 동해에서 태백, 태백에서 제천까지 측정하였으며 측정결과 가선전압 THD(%)는 평균 2.05 ~ 1.70으로 고조파로 인한 차량충격은 없는 것으로 확인되었다.

표 94. 고조파 시험 결과

검사항목	시험기준	시험결과
고조파 시험	1차 가선의 고조파 영향이 없을 것	정상

(9) 냉각성능

전력스택의 냉각장치는 기존품과 비교하여 핀두께를 줄이고 핀의 개수를 늘려 방열 효율을 증대하였다. 방열판 형식 변경에 따른 방열 성능은 시뮬레이션 결과 기존품 대비 최고 온도와 최대온도 변위량 등 성능이 향상된 것으로 나타났으며, 실제 밀폐구조인 차량에 탑재하여 현차시험을 시행하고 온도(최고, 최저, 변위량 등)와 계절적 영향을 현차시험 하였다.

현차시험을 동절기에 진행하여 추가로 하절기에 기존장치와 비교하여 냉각성능을 확인하였으며 기존장치와 비교하여 최대 15℃~ 8℃정도 개발장치의 냉각장치의 온도가 낮은 것으로 측정되었다. 따라서 개발장치의 냉각성능이 기존장치 대비 동등이상으로 확인되었다.

(10) LCR 필터 성능

LCR필터는 PWM전력스택을 통해 발생하는 출력전압의 급격한 dv/dt를 제한함으로써 인접기기에 대한 고조파 간섭을 회피할 수 있는 장치로 개발품의 출력전압의 고조파를 억제하고 정현파에 가까운 출력전압을 생성하기 위한 LCR 필터의 성능을 확인하였다. 전력스택의 출력과 LCR필터 출력단을 비교 측정한 결과 파형의 왜곡 현상없이 출력됨을 확인하였다.

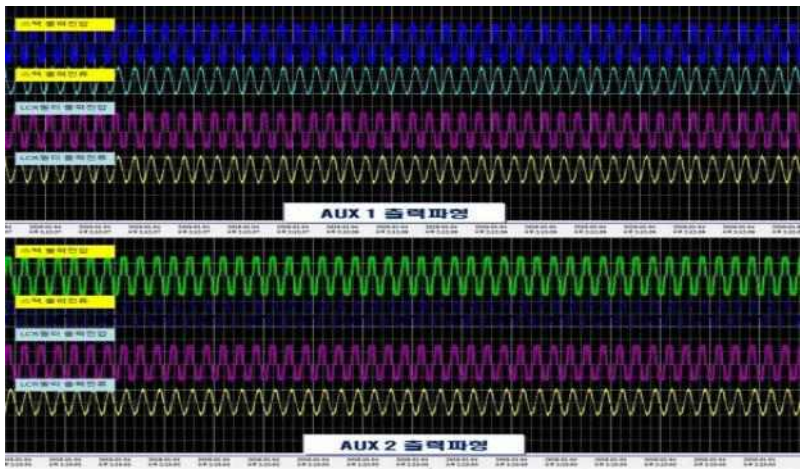


그림 74. LCR출력필터 기능확인을 위한 출력파형 비교

(11) 절연구간 통과 시험

보조전원장치 동적시험 절차서에 따라 절연구간 통과 시험을 통해 절연구간 제어 성능을 확인하기 위하여 보조전원장치 입출력 전압 및 전류를 측정한 결과 절연구간 통과 전 정상차단이 되고, 절연구간 통과 후 입력전압 투입 및 정상 출력되는 것을 확인하였다.

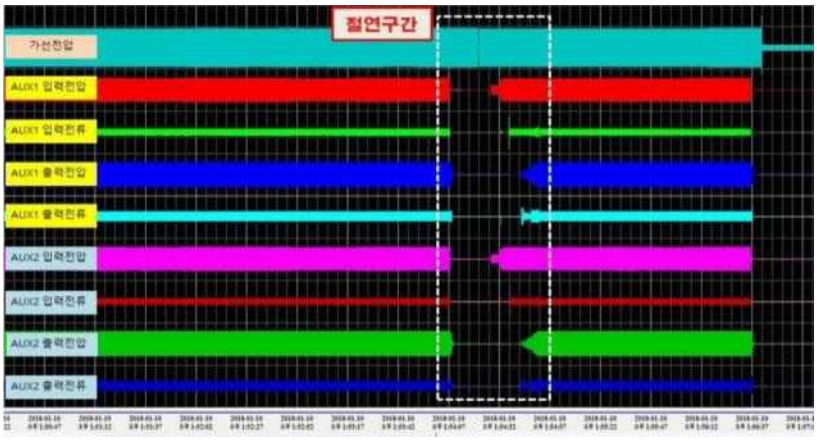


그림 75. 절연구간 통과시험(계측 결과 등)

(12) 차량의 운행 안전성 확보 및 작업자 보호를 위한 사항

보조전원장치 개발품은 장치의 유지보수 시 전력스택의 동작상태 및 캐패시터 방전여부 확인용 LED를 탑재하여 안전사고에 대비하고 있다. 개발품 외함 및 내부부품(PWM 스택 등)의 임계 방전시간에 대한 안전경고 표시 추가하여 인체에 대한 감전 위험 및 작업자 보호하였으며, PWM전력스택의 방전여부 확인 LED가 탑재되어 고압회로의 방전, 잔류전압 여부를 확인할 수 있도록 하였다.

그림 76. 방전램프 설치 및 작업 안전표지 부착

(13) 보조전원장치 하절기 온도 모니터링 결과

보조전원장치의 계절적 영향조사 및 분석을 위하여 현차에 탑재된 개발품의 하절기 온도모니터링을 실시하였다. 측정은 정적상태 및 동적상태(제천-영주)에서 기존품과의 비교측정으로 진행하였으며 결과는 아래의 표와 같다.

표 95. 정적상태 온도모니터링 결과비교

구분	AUX1.1		AUX1.2	
	최대값(℃)	최소값(℃)	최대값(℃)	최소값(℃)
기존장치	56.7	33.0	53.4	34.1
개발장치	42.5	27.0	39.4	25.5
비교값(기존-개발)	**14.2**	**6.0**	**14.0**	**8.6**

표 96. 동적상태 온도모니터링 결과비교

구분	AUX1.1		AUX1.2	
	최대값(℃)	최소값(℃)	최대값(℃)	최소값(℃)
기존장치	55.6	37.6	51.4	36.9
개발장치	38.7	28.6	36.3	28.6
비교값(기존-개발)	**16.9**	**9.0**	**15.1**	**8.3**

비교결과 정적상태에서는 기존품 대비 최대 14.2℃에서 최소 6.0℃ 낮았으며, 동적상태에서는 기존품 대비 최대 16.9℃에서 최소 8.3℃ 낮았다. 따라서 보조전원장치 개발품의 냉각성능이 기존품과 비교하여 동등성능이상으로 확인되었다.

(14) 시제품 보완사항 조치내역

(가) 접지선 칼라 및 함내 기밀 보강

보조전원장치 시제품의 접지선 칼라는 기존 흑색에서 녹색으로 교체 및 입출력 배선 인입구에 기밀 보강작업 완료하였습니다.

표 97. 접지선 칼라 및 배선인입구 기밀 보강 조치결과

항목	조치 전	조치 후
접지선 칼라		
기밀보강		

(나) 부하시험기 접지선 설치

보조전원장치 시험용 가변부하장치의 누락된 접지선 추가작업 완료하였습니다.

표 98. 부하시험기 접지선 설치 조치결과

항목	조치 전	조치 후
접지선 추가		

(15) 보조전원 AUX11,12 통신고장

(가) 고장내역

① 고장발생 시기 및 이력

보조전원장치 통신고장 관련 고장기록을 차상컴퓨터 데이터 및 열차운행정보전송장치 고장기록을 통해 확인하였다.

-(차상컴퓨터) 2018-04-11 10:34:20초경 보조전원1.2 통신고장

-(RTD) 2018-04-11 10:34:22초~10:36:47경 보조변환기 1.2 기능이상과 함께 총 43개의 고장코드가 동시에 발생 기록

표 99. 차상컴퓨터 고장기록

날짜	시간	코드	내용	비고
2018.04.11.	10:34:20~11:11:17	20	Communication Fault AUX12:STS(Port 420)	
2018.04.11.	20:47:31~21:26:09	20	Communication Fault AUX12:STS(Port 420)	
2018.04.20.	15:10:05~16:18:42	19	Communication Fault AUX11:STS(Port 410)	
2018.04.20.	16:18:44~17:20:47	19	Communication Fault AUX11:STS(Port 410)	

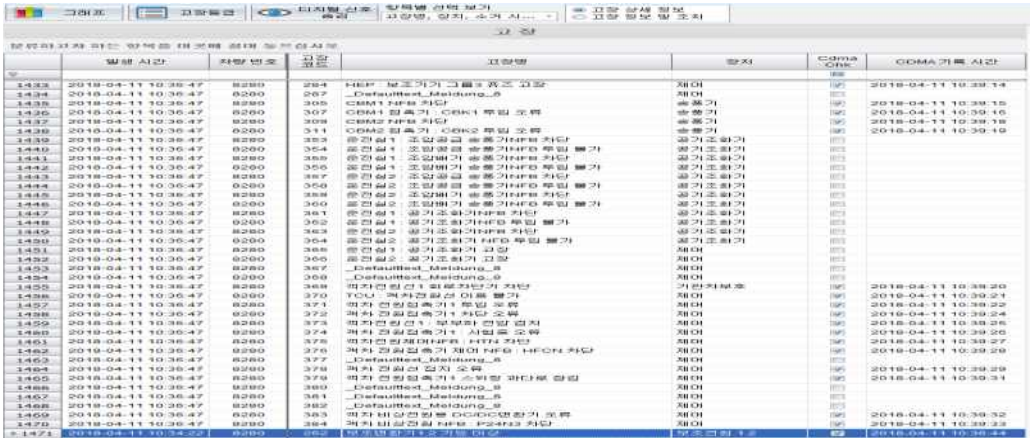


그림 77. 열차운행정보전송장치(RTD) 고장기록(8280호, 2018.4.11.)

② 차상컴퓨터 고장기록(CCU DATA)

2018. 4. 11 ~ 2018. 4. 20까지 보조전원 AUX11/12 Communication Fault AUX11/12: STS(고장코드 19/20) 4회 발생 후 소거되었으며, 그로 인해 AUX11/12: no availability after switch-on(고장코드 234/264) 순간 발생 후 소거됨을 확인하였다.

English

Rec.No	CarNo	CodeID	CodeID	DateTimeOccUTC	DateTimeGoneUTC
1199137	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	11/04/2018 10:34:20	11/04/2018 11:11:17
1199143	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	11/04/2018 20:47:31	11/04/2018 21:26:09
1199148	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	20/04/2018 15:10:05	20/04/2018 16:18:42
1199149	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	20/04/2018 16:18:44	20/04/2018 17:20:47

그림 78. 차상컴퓨터 고장기록

③ 보조전원장치 PWM 제어기 고장기록

보조전원장치 PWM 제어기의 고장기록은 아래 표와 같으며, 2018. 4. 20. 17:21:40 통신고장 (2018.04.20. 17:21:40 COM_FL) 기록을 확인하였다.

* 보조전원PWM제어기와 SIBCOS의 기록 시간 차이 1:16초(※SIBCOS통신고장 소거시점과 동일)

```
[00] 2018-04-20 17:21:40 SYS_0001 SEQ_0000 FL1_0400 FL2_0000 DIO_1100 PTR=0382 COM_FL
[01] 2018-04-11 11:38:19 SYS_8001 SEQ_7570 FL1_0000 FL2_0004 DIO_150A PTR=0194 ACV_LO
[02] 2018-03-31 14:40:51 SYS_8021 SEQ_7700 FL1_0000 FL2_0004 DIO_150A PTR=0054 ACV_LO
[03] 2018-03-29 05:10:00 SYS_8021 SEQ_7570 FL1_0000 FL2_0004 DIO_140A PTR=0393 ACV_LO
[04] 2018-03-13 15:24:39 SYS_8021 SEQ_7500 FL1_0000 FL2_0004 DIO_150A PTR=0425 ACV_LO
[05] 2018-03-08 11:12:01 SYS_8021 SEQ_7770 FL1_0000 FL2_0004 DIO_150A PTR=0294 ACV_LO
```

그림 79. 보조전원장치 전력스택 고장기록

(나) 보조전원장치 통신고장 원인 조사

① 고장코드 발생 원인 규명을 위한 현차 시험

임의의 상황에서 동일 증상을 재현하고 차량의 반응 및 고장기록을 확인하였다. 현차시험 결과 SIBCOS 입력 전원 커넥터 분리 후 삽입 시 SIBCOS의 전원이 Off/On 되면서 동일한 통신고장 고장코드 19 및 20가 기록됨을 확인하였다. 또한 MVB 통신의 F-code 및 Port Data 미전송, MCU 리셋의 방법으로 통신 기능 및 소프트웨어 오류 등으로 인한 고장 발생을 시험한 결과 동일 고장은 발생하지 않았다.

표 100. 통신고장 시험방법 및 결과

구분	Test 방법	시험결과
통신 기능	펌웨어를 수정하여 MVB 통신 Fcode를 전송하지 않음	반응 없음
	펌웨어를 수정하여 MVB 통신 Port419A/41A4(Aux11/12의 address)에 data 전송하지 않음	고장 234/264 발생
	SIBCOS-M1300의 MCU reset 시	동일 현상 발생하지 않음
제어 전원	SIBCOS-M1300의 전원 컨넥트 제거 시	고장코드 19/20 발생
	제거되어 있는 SIBCOS-M1300의 전원 컨넥트 삽입 시	고장코드 19/20 소거되면서 고장코드 234/264 발생/소거 (* 동일 현상)

② 고장원인 규명을 위한 차량전원(배터리) 방전시험

차량(전기기관차 8280호)의 축전지 전원을 자연 방전시켜 제어전압 변동에 따른 차량의 반응과 SIBCOS 전원이상으로 인한 통신고장 기록 여부를 확인하였다.

표 101. 차량전원 방전시험

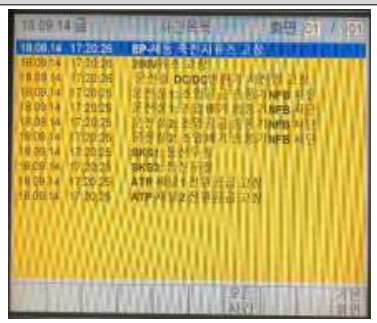
구분	조치내용	시험 및 계측장비
전압 계측	통신제어기(SIBCOS) 입출력전압 계측을 위한 전압계측기 설치 시험 간 상시모니터링을 통해 전압변동 및 동종고장 발생여부 확인	- SIBCOS 통신Analyzer - 통신기록계 - 전압계측기
방전 시험	① 차량의 배터리 임의 전압까지 방전시키고 통신고장 발생 유무를 감시 ② 차량이 충분히 방전된 전압범위에서, 차량의 제어전원(배터리) 투입 ③ MVB 데이터 및 전압데이터 확인	

그림 80. 차량전원 방전시험을 위한 계측장비

③ 시험결과

차량의 제어전원을 최초 94V에서 충분히 낮은 전압까지 임의 방전한 결과, 제어전원 53V에서 보조전원이 차단되고, 37V에서 SIBCOS 전원 이상이 발생, 보조전원 AUX1/2 통신고장(고장코드 19, 20)이 기록됨을 확인하였다.

표 102. 화면표시기 고장 기록

화면표시기 사건목록(1차 시험)	화면표시기 사건목록(2차 시험)	화면표시기 사건목록(3차 시험)
		

④ 차상컴퓨터 고장기록(CCU DATA) 비교 분석

보조전원 AUX1/2 통신고장 관련 차상컴퓨터(CCU) 고장기록은 아래 그림과 같으며, 2018. 4. 11 ~ 2018. 4. 20까지 보조전원 AUX11/12 Communication Fault AUX11/12: STS (고장코드 19/20)와 동일하게 기록되었다.

Rec.No	CarNo	CodeID	CodeID	DateTimeOccUTC	DateTimeGoneUTC
1200309	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	14/09/2018 17:24:40	14/09/2018 17:28:57
1200310	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	14/09/2018 17:24:40	14/09/2018 17:28:57
1200311	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	14/09/2018 17:28:59	14/09/2018 17:43:14
1200312	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	14/09/2018 17:28:59	14/09/2018 17:43:14
1200313	82080	23	Communication fault SKS1: STS (Ports 5)	14/09/2018 17:28:59	14/09/2018 17:43:14
1200314	82080	25	Communication fault SKS2: STS (Ports 7)	14/09/2018 17:28:59	14/09/2018 17:43:14
1200315	82080	27	Communication fault SKS3: STS (Ports 9)	14/09/2018 17:28:59	14/09/2018 17:43:14
1200316	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	14/09/2018 17:43:14	14/09/2018 17:55:42
1200317	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	14/09/2018 17:43:14	14/09/2018 17:55:42
1200318	82080	234	AUX11: no availability after switch-on	14/09/2018 17:55:42	14/09/2018 17:55:44
1200319	82080	264	AUX12: no availability after switch-on	14/09/2018 17:55:42	14/09/2018 17:55:44

그림 81. 차상컴퓨터 고장기록(8280호, 2018.9.14.)

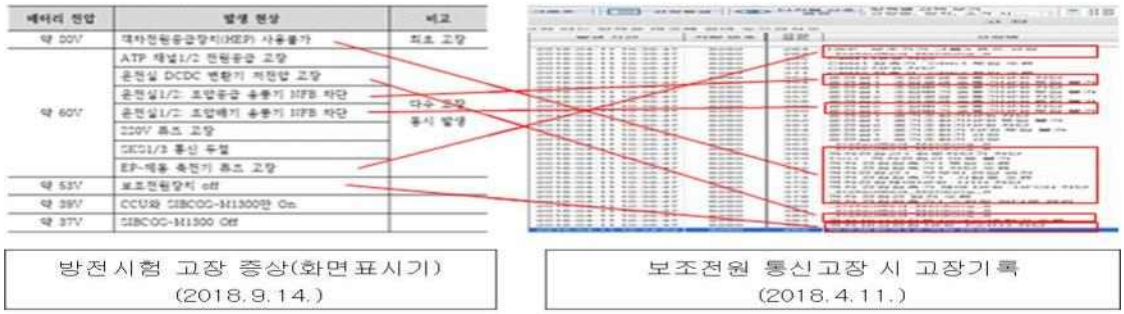


그림 82. 방전시험 고장기록 비교 분석

(다) 보조전원 AUX11/12 통신고장 조사 결과

보조전원 AUX11/12 통신고장은 4.11일 및 4.20일 최초 발생하였고, 고장원인 규명을 위해 차량의 제어전원(밧데리)을 충분히 낮은 전압까지 강하하여 시험(9.14일)하고 차량의 반응과 차상컴퓨터 고장기록을 최초 고장과 비교하였다.

방전시험 결과, 차량의 제어전원(밧데리)이 53V로 강하 시 보조전원장치가 차단되고, 37V에서 SIBCOS 전원 이상이 발생하였으며, 보조전원 AUX1/2 통신고장(고장코드 19, 20)이 차상컴퓨터에 기록되었다. 이와 함께 최초 고장 당시의 열차운행정보 기록을 방전시험 당시와 비교하여 차량 반응의 유사성을 확인하였다.

또한, 차상컴퓨터 고장기록을 확인한 결과, 보조전원 AUX11/12 통신고장은 최초 4.11 및 4.20 각 2회 발생되었으며, 9.14 방전시험 중 6회 발생으로, 차량의 고장기록 또한 최초 고장과 동일함을 확인하였다.

따라서, 보조전원 AUX11/12 통신고장 발생원인은 차량 제어전원(밧데리) 전압의 비정상적 강하에 따른 것으로 보이며, 이는 개발품의 이상에 의한 것이 아닌 것으로 판단된다.

Rec.No	CarNo	CodeID	CodeID	DateTimeOccLoc	DateTimeGoneUTC
1248727	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	2018-10-17 ?? 6:54:00	2018-10-17 ?? 6:58:28
1200316	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	2018-09-14 ?? 5:43:14	2018-09-14 ?? 5:55:42
1200317	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	2018-09-14 ?? 5:43:14	2018-09-14 ?? 5:55:42
1200311	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	2018-09-14 ?? 5:28:59	2018-09-14 ?? 5:43:14
1200312	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	2018-09-14 ?? 5:28:59	2018-09-14 ?? 5:43:14
1200309	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	2018-09-14 ?? 5:24:40	2018-09-14 ?? 5:28:57
1200310	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	2018-09-14 ?? 5:24:40	2018-09-14 ?? 5:28:57
1199149	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	2018-04-20 ?? 4:18:44	2018-04-20 ?? 5:20:47
1199148	82080	19	Communication fault AUX11: STS (Port 410)	2018-04-20 ?? 3:10:05	2018-04-20 ?? 4:18:42
1199143	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	2018-04-11 ?? 8:47:31	2018-04-11 ?? 9:26:09
1199137	82080	20	Communication fault AUX12: STS (Port 420)	2018-04-11 ?? 10:34:20	2018-04-11 ?? 11:11:17

그림 83. 차상컴퓨터 고장기록(보조전원 통신고장, 2018.4.11.~2018.12.01.)

제6절 보조전원장치 LCC분석 및 하드웨어 신뢰도 예측

수명주기비용의 분석은 철도운영기관 뿐만 아니라 제조업체에서 철도 시스템의 전체 수명주기 동안에 수명주기비용의 예측이 필수적으로 요구되고 있다. 이를 위해 신뢰성(Reliability), 가용성(Availability), 유지보수성(Maintainability) 및 안전성(Safety)을 기반으로 한 철도시스템의 최적화는 운영기관뿐만 아니라 관련 제조업체가 서로 협력하여야만 이룰 수 있다.

이를 위해 유럽에서는 IEC 60300-3-3 규격을 제정하고 있으며, 유럽철도산업연합(UNIFE) 은 철도산업의 협력을 위해 유럽의 철도산업 관련기관 및 기업을 중심으로 UNIFE-LCC 워킹 그룹을 결성하여 LCC 관련 연구 활동을 수행하고 있다. 미국에서는 SAE ARP 4293, 4294 규격과 NASA 규격 등을 제정하여 제품 개발 초기부터 LCC 분석을 요구하고 있다.

1. 기존품 LCC 분석

가. 보조전원장치 PBS 분석 및 비용평가모델 개발

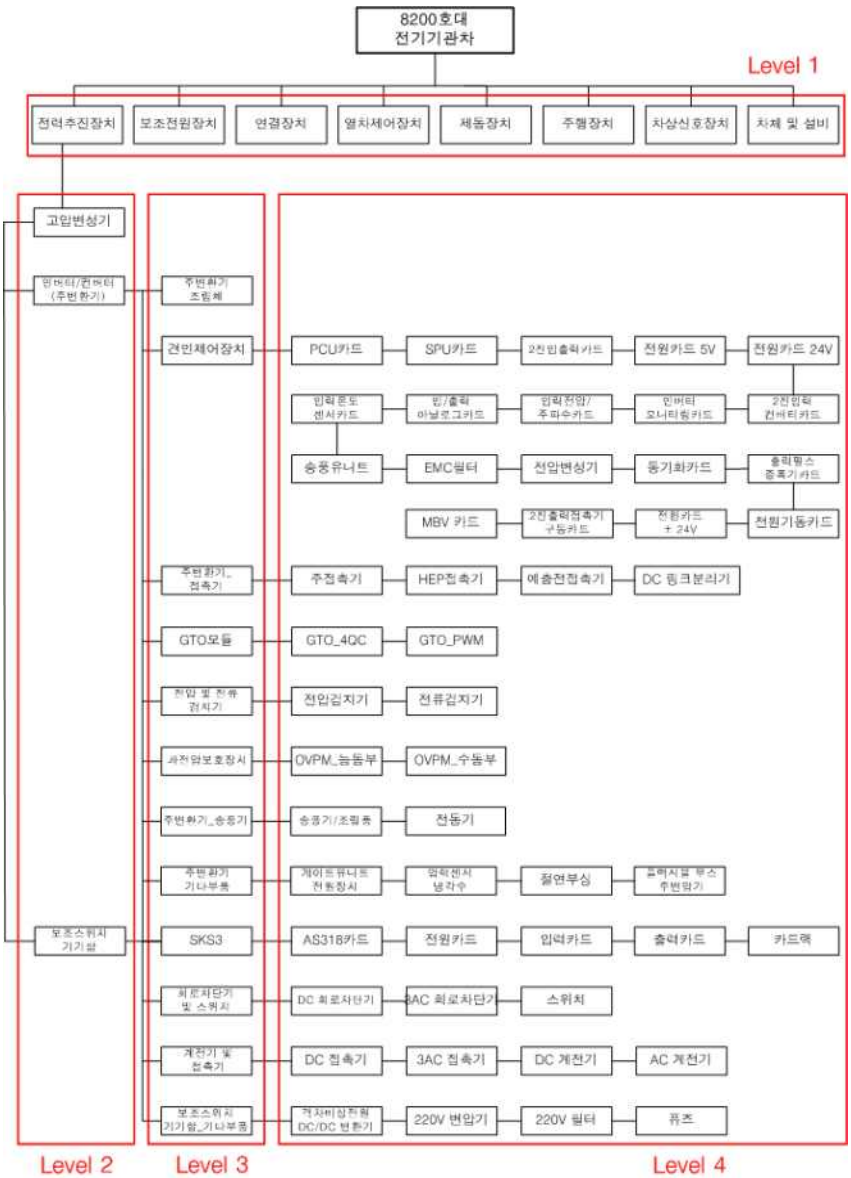


그림 84. 전기기관차 PBS

전기기관차의 CBS는 일반적인 비용평가모델로 제시되어 있지만, 비용평가에 따른 많은 양의 데이터가 요구된다. 따라서 현재 운행되고 있는 전기기관차의 경우 운영측면에서 데이터 관리가 정립되어 있지 않다가 최근에 운행이력에 대한 데이터 등을 관리하는 시스템이 도입되어 데이터 신뢰도가 낮은 편이다. 특히 고장이력은 고장에 대한 해석이 불분명하여 이와 관련된 데이터 역시 정립화가 제대로 이루어지지 않고 있다. 또한 전기기관차 도입 시에 일괄 도입형태로 이루어져 보조전원장치에 대한 취득가격이 불분명한 상태이다. 이와 같이 LCC 평가를 위한 데이터가 불분명하여 일반적인 비용평가모델을 적용하되 전기기관차의 보조전원장치에 대한 각종 자료를 활용하여 수명주기 비용을 분석에 따른 비용평가모델을 제시하였다. 이에 따라 보조전원장치의 CBS (Cost Breakdown Structure)기준을 설정하여 검토한 결과 IEC 60300-3-3의 평가모델을 적용하였다.

$$LCC = Cost_{acquisition} + Cost_{ownership} + Cost_{disposal}$$

여기서, $Cost_{acquisition}$: 취득비용, $Cost_{ownership}$: 소유비용, $Cost_{disposal}$: 폐기비용

나. 보조전원장치 주요부품 고장이력 분석

(1) 최근 5년간 고장현황 및 분석

표 103. 전기기관차 고장현황

구 분	고장현황(최근 5년간)						
	‘11년	‘12년	‘13년	‘14년	‘15년	계	평균
고장건수[건]	27	24	26	27	18	122	24
주행거리[백만km]	22.05	22.02	23.45	23.76	24.19	-	23.09
고 장 률	1.225	1.090	1.109	1.136	0.744	-	1.061

(2) 개통별 고장현황 및 분석

· 전기계통 39.3%, 전력변환 19.7%, 공기제동계통 9.0%, 기타 6.6% 순으로 발생
· 부품별로는 회로차단기, 감지기 및 카드류, 계전기류, 공기계통 동결에 의한 고장 발생
· 최근 계전기, 접촉기, 견인전동기, 제작사 작업불량 등에 의한 고장이 증가 추세

표 104. 전기기관차 개통별 고장현황

구 분	계	전력변환	전기계통	공기제동	차체주행	기타
‘11년	27	5	8	5	8	1
‘12년	24	2	9	2	11	-
‘13년	26	5	12	2	3	4
‘14년	27	9	9	1	5	3
‘15년	18	3	10	1	4	-
소계	122	24	48	11	31	8
년 평균	24.1	4.8	9.6	2.2	6.2	1.6

다. 기존품 LCC 분석 모델 및 결과

LCC 분석 모델은 전기기관차 1편성당의 보조전원장치의 부품을 3-Level 수준으로 분류하여 각각 부품별로 LCC를 비교할 수 있는 모델을 제시하였다. 예방정비비를 분석하면 점검종별, 비용평가모델 개발점검종목, 점검일수의 곱에 따라 부품별 예방정비비 및 운영비를 산출할 수 있다. 그림 6-2는 년도별 전기기관차 보조전원장치의 LCC 결과로 부품들이 내용연수(10년, 12년, 20년, 24년, 30년)에 따라 유지보수비가 크게 변한다. 특히 PWM 모듈의 내용연수가 10년 주기이고 송풍장치 , 기타장치의 교체가 동일 시점으로 내용연수 주기로 유지관리비가 크게 변화된다. 또한, 유지관리비는 보조전원장치 사용년수에 따라 증가 추이를 보이고 있는데 이는 보조전원장치의 부품비 물가상승률 및 인건비 상승에 따른 것이다.

표 105. 보조전원장치의 예방정비비 분석모델

점검 종별	점검 항목	점검 일수	예 방 정 비 비													
			횟수	비율	횟수	비율	횟수	비율	횟수	비율	횟수	비율	횟수	비율	횟수	비율
LI-3	5	5	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	3.00	0.0164
LI-8	9	5	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	3.00	0.0164
GI-3	9	5	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	3.00	0.0164
GI-6	12	5	1.50	0.0063	0.00	0.0000	1.50	0.0063	0.00	0.0000	1.50	0.0063	1.50	0.0063	1.50	0.0063
GI-9	13	5	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026
GI-10	14	5	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026	0.75	0.0026
교체주기(년)			12.00		10.00		12.00		10.00		6.00		12.00		5.00	
항 목			정비비	운영비	정비비	운영비	정비비	운영비	정비비	운영비	정비비	운영비	정비비	운영비	정비비	운영비

· 연간 예방정비비 = 임율 × 점검종별 분석 × 점검항목 비율 × 점검횟수 + 교체비용

· 내용연수에 따른 교체비용 = 각 부품단가 × $1.01^{(\text{내용연수}-1)}$

· 고장정비비 = (도입 이후 부품당 교체 수 / 총 편성 / 사용년도) × 부품단가

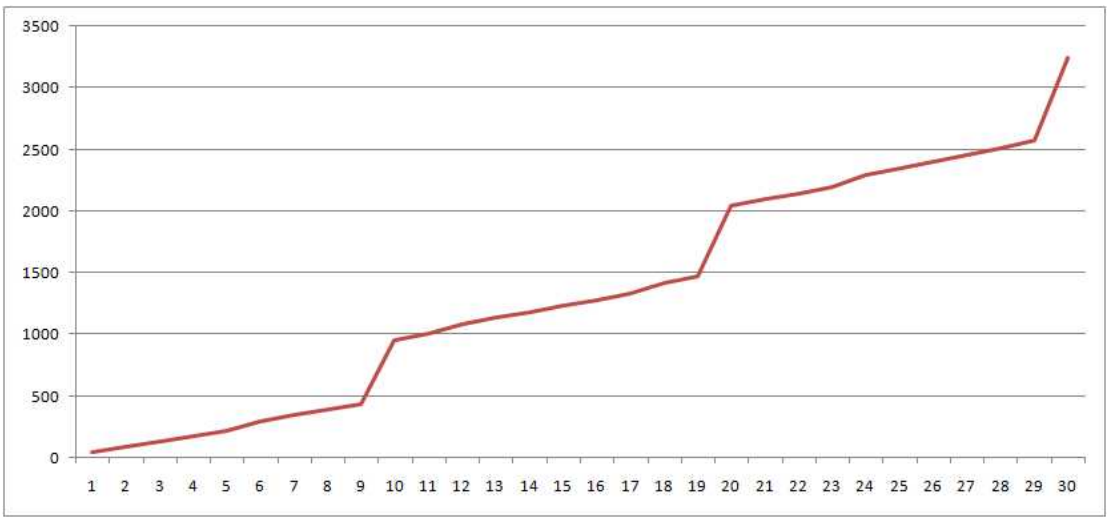


그림 85. 년도별 보조전원장치 LCC분석

2. 개발품 LCC 분석

가. 보조전원장치 PBS 분석

보조전원장치의 고장 또는 이상 징후가 발생했을 때 현장에서 새로운 예비품으로 교체가 가능한 구성품으로 개발품 PBS는 다음과 같이 분류하였다.

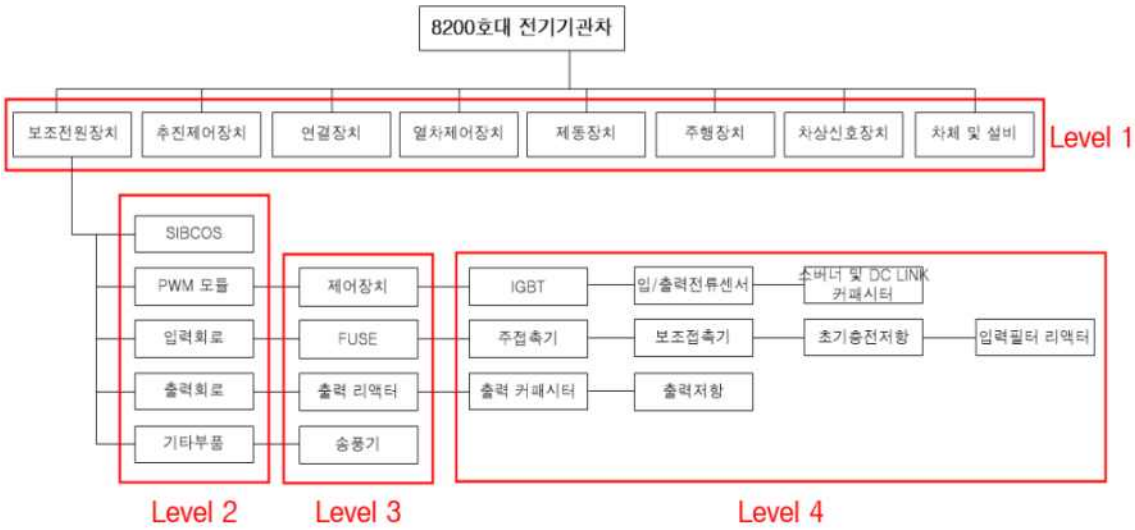


그림 86. 전기기관차 PBS

나. 신뢰성 블록도 및 고장수목분석에 따른 고장률과 평균수명

PWM 전력모듈은 전력변환장치로 제어장치, 전력소자(IGBT), 입력전류센서, 출력전류센서, 스너버 커패시터, DC LINK 커패시터로 이루어져 있으며, 각 구성품 중 하나 이상 고장이 발생하게 된다면 4상한 초퍼의 과온으로 인한 전력모듈 동작 정지 또는 불능 상태를 초래하여 전체 시스템 고장을 유발할 수 있기 때문에 직렬 구조의 RBD와 FT를 구성하였다.

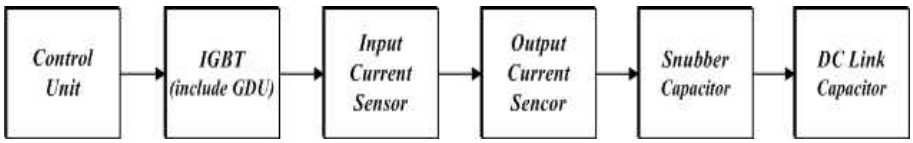


그림 87. PWM module에 대한 RBD

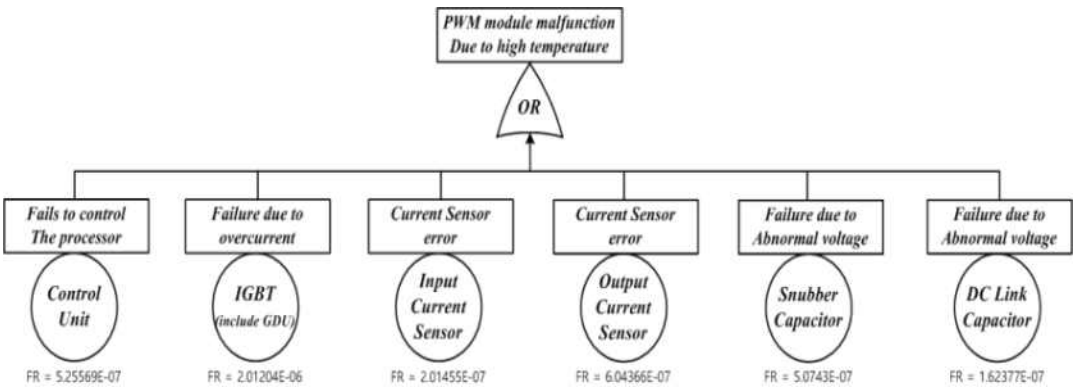


그림 88. PWM 전력모듈에 대한 FT

표 106. 보조전원장치 고장률 예측 결과

장치명 Item Description	수량 Q'ty	고장률 (Failure/hour)	평균수명 MTBF (hours)
보조전원장치			
SIBCOS (통신제어장치)	2	1.08573E-05	92,104
PWM 전력모듈			
제어장치	2	5.25569E-07	1,902,698
전력소자 (IGBT)	10	2.01204E-07	4,970,090
입력전류센서	2	2.01455E-07	4,963,881
출력전류센서	6	6.04366E-07	1,654,627
스너버 커패시터	10	5.0743E-07	1,970,717
DC LINK 커패시터	32	1.62377E-07	6,158,489
입력회로			
FUSE	2	6.34515E-07	1,576,009
주접촉기	2	5.41758E-07	1,845,843
보조접촉기	2	5.41758E-07	1,845,843
초기충전저항	2	2.00952E-08	49,763,066
입력필터 리액터	2	3.81237E-08	26,230,402
출력회로			
출력필터 리액터	2	3.81237E-08	26,230,402
출력필터저항	6	6.02857E-08	16,587,688
출력필터 커패시터	6	3.04458E-08	32,845,276
송풍기	1	1.50626E-06	663,894

다. 개발품 LCC 분석 결과

수명주기비용 예측을 위해 기본적으로 유지보수와 운영에 초점을 맞추어 분석하였으며, 분석 방법은 현재가치법을 적용하였다. 이 때 철도가 공공재의 특성을 가짐에 따라 사회적 할인율을 적용하였으며, 기획재정부에서 지정한 사회적 할인율인 4.5%를 반영하였다. 기관차 평균 내구연한을 고려하여 30년으로 설정하고 코레일 직원평균보수 및 유지보수 매뉴얼을 참조하여 분석하였다.

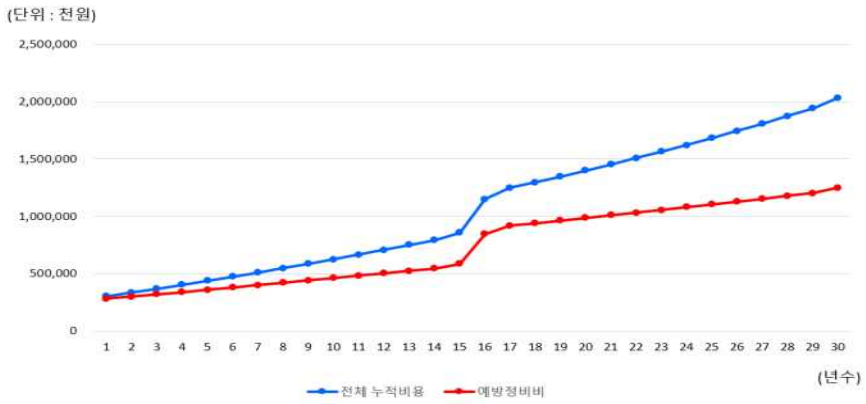


그림 89. 연도에 따른 LCC 및 예방정비비 누적비용

위 그림은 연도에 따른 LCC 및 예방정비비 누적비용을 나타낸다. 15년차부터 18년차에서 수명주기비용이 증가는 각 구성품의 내용연수에 따른 교체로 예방정비 비용에 기인한다. 이 외에도 인건비와 고장정비비 증가로 비용은 꾸준히 증가하고 있다.

3. 민감도 분석 및 LCC 절감방안

가. 기존품 및 개발품 LCC 비교분석

아래의 그림은 8200호대 전기기관차에 적용되는 보조전원장치의 기존품과 개발품의 LCC 결과값을 보여준다. 기존품의 경우 전기기관차 도입시 패키지 형태로 시스템 전체가 도입되었고 운영 중인 상태를 고려하여 초기도입비용이 고려되지 않았다. 반면 개발품의 경우 국산화 개발에 따른 초기 도입비용을 산정하였으므로 운영비용 측면에서 1차년부터 9년까지의 수명주기비용은 기존품에 비해 상대적으로 개발품이 높다. 한편 기존품의 수명주기비용 증액 요인인 부품의 교체에 따른 재료비를 절감하기 위하여 개발품의 경우에는 호환이 가능한 모듈을 통일화 하였으며 성능을 향상시켜 부품의 내구연한을 15년의 주기의 수준으로 개발하였다. 따라서 기존품의 교체시기인 10년과 20년은 개발품 수명주기비용 대비 31%와 29% 정도 증가되는 현상을 보였으며, 재료비 절감을 통하여 수명주기비용이 절감되었다.

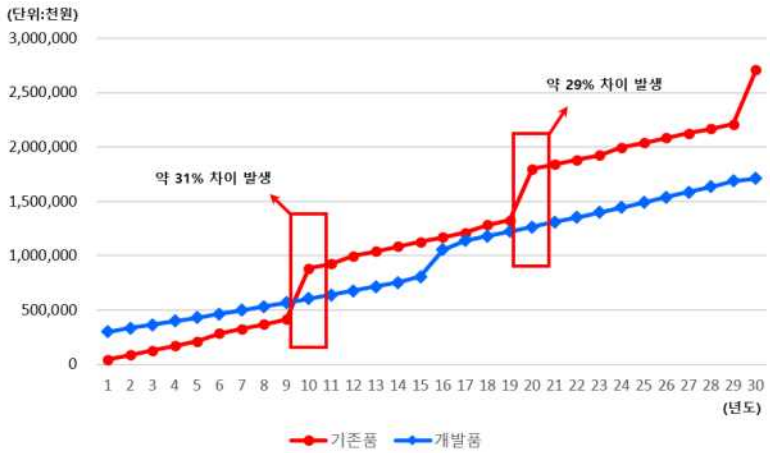


그림 90. 기존품 및 개발품 LCC 분석

나. 유지관리비 및 MTBF 민감도 분석

(1) 유지관리비 분석

아래의 그림은 기존품의 LCC 항목 중 비중을 크게 차지하는 운영비, 고장정비비, 예방정비비에 대하여 분석하였다. 유지관리비 중에 예방정비비가 63.1%로 가장 높은 비중을 차지하였으며 고장정비비 33.9% 운영비 3%의 비중을 차지하였다. 따라서 전체 수명주기비용 절감을 위해서는 절대적으로 예방정비비가 핵심이며 비용 절감을 위해서는 부품의 스트레스와 노후화를 고려한 매뉴얼 및 정비 체계가 필요하다.

각 부품별 유지관리비를 세부적으로 분석한 결과, 예방정비비는 SIBCOS 34.9%, PWM 모듈 26.8%, 송풍장치 15.7%, 기타 22.6%의 비중을 차지하였으며 고장정비비는 PWM 모듈 89.7%, SIBCOS 8.5%, 송풍장치 0.4%, 기타 1.3%를 차지하였다. 예방정비비와 고장정비비, 운영비를 포함하는 유지관리비 측면에서 부품별 비중을 살펴보면, PWM 모듈이 49%로 가장 높은 비중을 차지하였으며 SIBCOS 26%, 기타 15%, 송풍장치 10% 순의 비중을 확인하였다. 따라서 전체적인 수명주기비용을 절감하기 위해서는 PWM모듈과 SIBCOS에 대한 비용절감이 선행적으로 이루어질 필요가 있다.

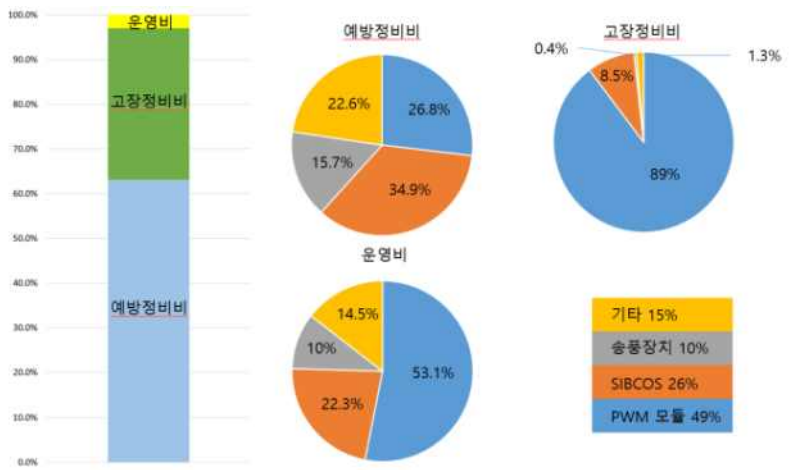


그림 91. 기존품에 대한 유지관리비 분석

(2) MTBF 민감도 분석

MTBF 변화에 따른 LCC 분석을 위해 각 구성품의 MTBF를 -50%에서 +50%까지 5% 단위별로 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 특정한 투입 요소가 변동할 때 그 안의 순현재가치가 어느 정도 변동하는지를 분석하는 방법이다. 분석 결과 MTBF가 증가함에 따라 어느 시점까지는 전체적인 수명주기비용이 감소하다가 처음 기준값의 10~15%를 지나는 시점에서는 증가폭이 급격히 감소한다. 이는 MTBF가 10~15% 가량 증가하는 것은 전체적인 비용 절감 효과를 볼 수 있으나, 그 이상의 증가는 높은 품질로 인하여 신뢰성은 증가하겠지만 비용 대비 효율이 매우 낮다는 것을 보여준다. 민감도 분석 결과를 바탕으로 추후 비용절감을 위한 부품 품질 개선 시 일정 수준에서의 품질관리가 필요하다.

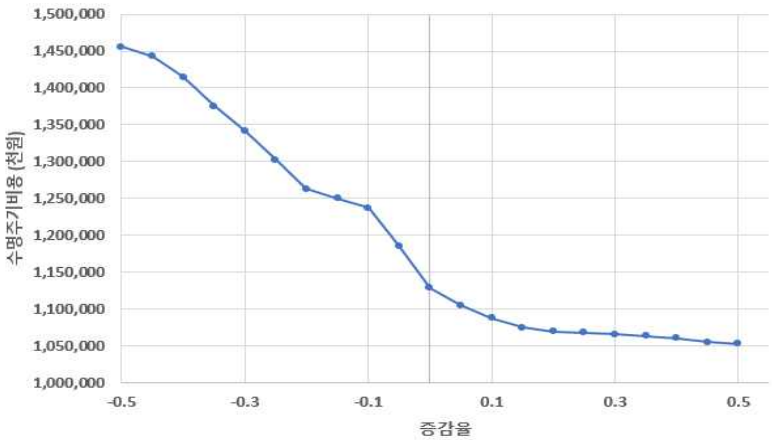


그림 92. MTBF 증감에 따른 수명주기비용

다. 효율적인 유지관리를 통한 비용절감

(1) RFID 시스템 구축을 통한 제고 관리

LCC 분석 결과를 살펴보면 교체 부품 구매에 따른 재료비에 소요되는 비용이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 부품의 고장에 따라 교체가 이루어질 수도 있으나, 예방정비 비용인 부품의 평균수명(내구연한) 도래에 따른 교체 역시 발생할 수 있다. 따라서 보수품 구매에 따라 고정적인 지출이 발생할 수밖에 없는 구조를 가지게 된다. 이러한 비용지출을 절감하기 위해서 RFID 기반의 부품 추적관리가 이루어지게 된다면 효율적인 재고관리가 가능해져 비용 절감에

도움이 된다. RFID는 제품을 한 개씩 근접 스캐닝해야 하는 바코드 시스템과 달리 여러 개의 제품을 동시에 자동으로 인식할 수 있어 실시간으로 제품의 재고 및 출고기록 등을 확인할 수 있다. 때문에 교체 부품 사용이력에 대한 기록을 바탕으로 실시간 부품 재고관리가 가능해져 불필요한 부품 구매를 방지할 수 있고 이는 운영비용 절감으로 연결된다.

그림 93. RFID 적용한 의약품 관리운영 프로세스 일례

실제 국내 제약사 중에서는 재고량 확인을 위해 기존에는 개개의 제품 체크를 실시하여 오랜 시간이 소요되었으나, 생산 및 물류 프로세스에 RFID를 도입하여 적정 재고관리를 통해 매출 대비 2% 수준인 106억 원의 비용절감 및 업무효율 향상의 효과를 보았다.

(2) CBM(Condition based Maintenance) 기반 유지보수 정비

분석 결과 부품에 대한 평균수명은 기존품 대비 개발품이 향상된 것을 확인할 수 있다. 이는 부품의 성능 향상으로 인한 신뢰성 지표(신뢰도) 증가가 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 유지보수 비용을 절감하기 위해 기존품을 기준으로 산정된 정비주기를 신뢰도가 향상된 개발품에 맞춰 재산정할 필요가 있다. 타 산업분야에서는 정비주기 매뉴얼을 탈피하여 지속적인 제품 상태 진단을 통해 그 결과를 근거로 신뢰성을 판단하여 정비주기를 함으로써 LCC 비용 절감을 꾀하고 있다. 아래 그림은 철도분야에 적용 중인 일본 사례를 보여준다.

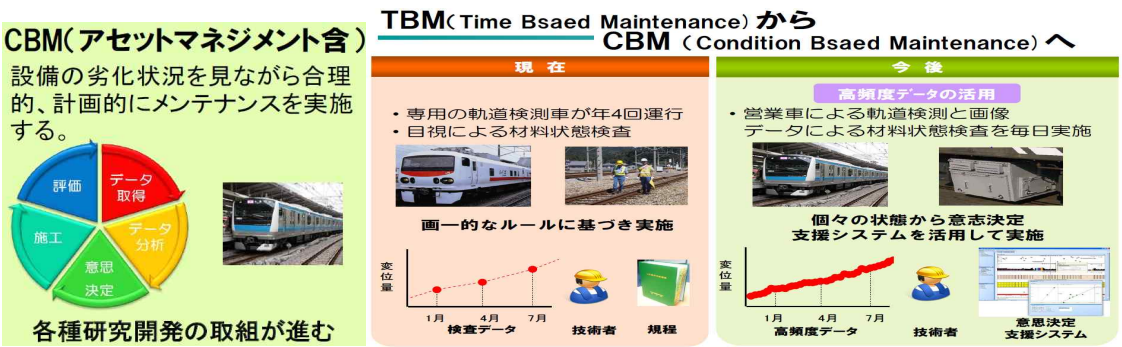


그림 94. 철도분야 사례(일본)

제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제1절 목표 달성도

구분 (연도)	세부 과제명	성과목표	최종성능목표	성과 지표	목표치	달성치	달성도
1차 연도 (2016)	보조전원장치 인터페이스 검증	실용화 기술개발을 위한 기술검토	공정회의 및 기술검토 회의	보고서	5	5	100
			성과물 및 기술자료 검토	보고서	1	1	100
			고장분석	분석서	1	1	100
		인터페이스 검증	검사·시험항목 선정	검토서	1	1	100
			구성품 기능 시험	성적서	2	2	100
	2중계 보조전원장치 실용화 기술개발	전력스택 개발	전력스택 회로 설계	설계서	1	1	100
			기능 및 보호동작 시험	성적서	1	1	100
		냉각장치 기술개발	냉각장치 설계	설계서	1	1	100
			냉각장치 제작	시제품	1	1	100
		GDU 기술개발	IGBT 일체형 GDU 회로 설계	설계서	1	1	100
			IGBT 일체형 GDU 제작	시제품	1	1	100
		제어유닛 기술개발	제어 PCB 설계 및 제작	시제품	1	1	100
		보조전원장치 설계	외함설계	설계서	1	1	100
			입출력 필터회로 설계	설계서	1	1	100
		가변부하장치 설계	가변부하장치 설계	설계서	1	1	100
	통신제어부 (SIBCOS) 기술개발	MVB 통신분석장치 개발	Portable MVB 분석장치 개발	시제품	1	1	100
		회로도 및 신호분석	입출력 신호 및 MMI Signal 분석	보고서	1	1	100
		SIBCOS 회로도 및 기구설계	SIBCOS 설계	보고서	1	1	100
		SIBCOS 시제품 제작	SIBCOS 시제품 제작 검토	보고서	1	1	100
		SIBCOS 검증용 시험기 제작	검증용 시험기 설계	보고서	1	1	100
	LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측	기존 보조전원장치 LCC 분석	주요부품 고장이력 분석	보고서	1	1	100
			비용분류구조(CBS)분석	보고서	1	1	100
2차 년도 (2018)	보조전원장치 인터페이스 검증	실용화 기술개발을 위한 기술검토	공정회의 및 기술검토 회의	보고서	7	12	100
		인터페이스 검증	보조전원장치와 SIBCOS간 조합시험	보고서	1	1	100
			정적/동적 시험	성적서	1	1	100
		실용하 기술 검증	현차시험 (사계절, 60,000km)	결과 보고서	1	1	100
	2중계 보조전원장치 실용화 기술개발	보조전원장치 시제품 제작	90KVA×2급 보조전원장치 시제품 제작	시제품	1	1	100
		가변부하장치 제작	동작특성을 반영한 가변부하장치 제작	시제품	1	1	100
		보조전원장치 공장시험	성능 사양 검증	성적서	1	1	100
	통신제어부 (SIBCOS) 기술개발	통신프로토콜 분석	프로토콜 분석 및 시뮬레이션 검증	보고서	1	1	100
		SIBCOS 시제품 제작	통신제어기(SIBCOS) 시제품 제작	시제품	1	1	100
		SIBCOS 공장시험	성능사양 검증	성적서	1	1	100
		SIBCOS 검증용 시험기 제작	검증용 시험기 제작	시제품	1	1	100
	LCC 분석 및 하드웨어 신뢰도 예측	보조전원장치 개발품의 하드웨어 신뢰도 및 수명주기비용 예측	보조전원장치 개발품 하드웨어 신뢰도 및 수명주기 비용 예측	보고서	1	1	100

제2절 관련 분야 기여도

1. 기존 기술과의 차별성

○ 철도차량의 전력변환기 기술개발과제는 고속철도 및 전동차량 위주의 추진제어시스템 기술개발이 다수 진행되었으나 보조전원장치 기술개발과 관련된 내용은 거의 없다. 일반적으로 고속철도차량이나 전동차량에 적용되는 보조전원장치의 경우 승객편의시설에 대한 전력공급이 주요 목적이지만 전기기관차에 적용되는 보조전원장치는 기계실 장치에 대한 전력공급이 주목적이어서 변환장치의 구조가 다르다. 전기기관차용 보조전원장치는 입출력의 구성방식이 C/I(Converter/Inverter)형태로 되어 있고 전동기 제어에 더 적합하도록 구성되어야 하는 점에서 전동차량의 정지형 인버터(Static Inverter)와는 확연히 구별되는 기술의 적용이 필요하다.

표 107. 보조전원장치의 형식비교

비교항목	일반철도용 APU	전기기관차용 APU
H/W 구성	Converter + Inverter(Static)	Converter + Inverter(VVVF)
출력전압	3상 380V(440V)/60Hz 고정	3상 전압가변/주파수가변
부하장치	컴프레서, 냉난방기, 승객편의 장치	주로 기계실 내의 전동기류
적용 예	전동차(EMU), 트램, KTX 고속철도차량 등	8200호대, 8500호대 전기기관차량

○ 전기기관차 보조전원장치의 통신제어장치인 SIBCOS와 통신 프로토콜 분석에 대한 기술개발은 국내에서는 취약한 편이다. MVB 통신에 대한 연구개발은 1단계 사업에서 ㈜앤츠에 의하여 진행되었으나, SIBCOS의 외부 신호에 대한 분석을 통해 CCU, TCU와 연계된 SIBCOS 전체 기능을 연구한 것은 아니었다. 외부 신호를 취득하여 외부신호의 특성을 참조하여, MVB 통신을 통해 상위 제어기로부터 전달되는 명령을 수행하고, 보조전원장치 현재의 Condition을 상위제어기에 MVB 통신을 통해서 전달하는 SIBCOS 기능은 MVB 통신 카드에만 국한된 기술과는 차별화되는 기술이다.

○ 원제작사에서 공개하지 않는 통신알고리즘 등은 기존 자료의 분석과 현차시험을 통해 직접 수집해 나갈 계획이다. 특히 본 과제에서 출원할 예정인 '휴대용 MVB 실시간 데이터 취득 및 분석장치'를 통하여 차내 통신제어의 정밀도를 높이는 차별화 전략을 구사해 나갈 것이다.

- (보조전원장치 설계 및 제작 기술 확보) 보조전원장치 전력스택의 고장은 장치의 구조적인 취약성과 용량의 한계에서 오는 문제점으로 장치가 성공적으로 개발 완료되면 현재 발생되는 문제를 해결할 수 있으며, 원천제작사의 기술종속에 대응하고, 현재의 유지보수 체계를 합리적으로 개선할 수 있다.
- (관련 기술의 확대 재생산) 연구결과를 바탕으로 교류구간에 적용되는 전동차(통근형, 간선형)의 객실전원용 보조전원장치에도 적용이 가능하며 기존 철도차량 개량이나 신조차량 도입에 활용될 수 있다. 또한 신재생 에너지 분야의 풍력발전, 가정용 에너지저장장치 등에 소요되는 전력변환장치에도 활용이 가능하다. 전기기관차용 보조전원장치의 기술개발은 파워 일렉트로닉스 및 마이크로 일렉트로닉스 활용기술 능력을 배양하고, 자체 설계기술 및 제작기술을 보유하게 됨으로서 일반 전자산업 및 방위산업 등에 응용할 수 있다.

2. 기존 기술 대비 혁신성

○ 정격용량의 증대 및 유지보수성 향상

Siemens가 선행하여 개발한 8200호대 전기기관차용 보조전원장치의 경우 장치의 소형화 및 모듈화에만 집중하여 유지보수 관점에서의 접근이 매우 열악하다. 특히 전력스택의 경우 모든 전력소자, 캐패시터, 버스바, 센서 및 제어장치가 하나의 스택으로 조립되어 있어서 작은 고장의 경우에도 스택 전체를 교환해야 하는 등 합리성이 결여되어 있다. 본 기술개발의 경우 장치의 크기 및 부피는 100% 동일하게 유지하면서 유지보수성을 향상시키기 위하여 전력스택에 대한 차량 내 조립 및 해체가 쉽게되는 혁신적인 구조를 채택하고 단위부피당 전력용량도 10%이상 향상(80KVA*2 → 90KVA*2)시킬 수 있도록 기술개발을 수행할 계획이다.

○ 전력품질 향상

기존 전력변환기의 저주파수 PWM 스위칭 한계로 인한 입출력 전력의 저품질 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로, 기존 장치에서는 입력 역률이 0.95가 최고였으나 개발품의 경우 0.97 이상으로 향상시켜 전력품질을 향상시키고 출력 전원의 품질도 기존 대비 2배의 PWM 주파수를 사용하여 출력에 포함되는 고조파전류의 함유율을 100% 이상 향상하는 혁신적인 기술을 적용할 계획이다.

○ GDU 장치의 유지보수성 개선

기존 GDU 장치에서는 모든 IGBT의 제어를 단일 PCB에서 수행하여 고장발생시 수선이 어렵고 조립 및 시험이 매우 어려운 구조였으나 국산화 개발품의 경우 IGBT 일체형으로 고장난 부품만 쉽게 수리가 가능토록 유지보수성을 개선할 것이다.

표 108. 기존장치 대비 개발품의 개선

구분		기존	개선	비고
전력스택	정격용량	80kVA x 2	90kVA x 2	용량 증대
	입력역률	0.95	0.97	한정된 L값으로 제한적
	효율	90%	92%이상	
	출력주파수범위	2-60Hz	0.1-100Hz	주파수범위 및 분해능 향상
	제어 CPU	22bit MCU	32bit DSP	계산성능 향상

○ 제작사인 지멘스사에서 통신 프로토콜을 제공하지 않는 상태에서 중앙제어장치 및 견인제어장치의 MVB 통신 프로토콜을 분석하여 보조전원장치를 제어하는 프로토콜을 직접 제공하는 통신제어장치(SIBCOS)를 제작하는 기술은 매우 어려운 기술이다. 뿐만 아니라, 외부신호를 바탕으로 보조전원장치의 상태를 파악하여 상위 제어기 및 하위 보조전원장치에 명령을 전달하는 기술은 매우 혁신적인 것으로써 통신분석에 대한 노하우의 축적은 다른 차종 및 타 산업 분야에도 적용될 수 있을 것이다.

○ 유지보수나 교체 주기를 분석하여 최적의 유지보수 전략을 수립할 수 있는 기초 정보 제공

○ 수명주기비용에 대한 고려없이 유지보수를 시행할 경우 장치의 수명주기가 단축되거나 필요이상의 조기 교체로 인한 가용능력이 저하되어 전반적인 유지보수 비용을 상승 시킬 수 있다. 따라서 수명주기 비용과 하드웨어에 대한 신뢰도를 정확하게 분석한다면 전반적인 수명주기 비용의 절감, 장비/설비/Utility 성능의 향상, 인명피해 방지, 원활한 정비지원 및 의사결정을 위한 계량적 근거를 제시할 수 있다.

제5장 연구개발성과의 활용 계획

제1절 사업화 계획

○ 실용화 기술개발이 완료되면 8200호대 전기기관차 보조전원장치의 국산품 대체 및 유사제품에 대한 국산화 기술력 확보를 통해 한국형 전기기관차 보조전원장치 및 객실전원장치로 확장이 가능하며, 국내 및 국제시장에 유통되고 있는 외국산 장치들과 경쟁이 가능할 것으로 예상된다. 8200호대 주요 전장품에 대한 기술확보로 해외 진출 시 동일기종의 차량에 대한 부품 및 장치의 수출 시도가 가능할 것으로 판단된다.

표 109. 지멘스 전기기관차 차종별 생산년도 및 대수

차 종	생산대수	생산년도
EuroSprinter 64F(8200호대)	170	1996 ~ 2001
EuroSprinter 64F4	100	2003 ~
EuroSprinter 64U	360	2000 ~

☞ 출처: http://en.wikipedia.org/wiki/Eurosprinter

○ MVB 통신기술을 바탕으로 김포경전철 MVB 통신보드 개발 및 공급을 진행하고 있으며, 8200호대 전기기관차 기술노하우를 통하여 철도공사에서 의뢰한 봄바르디어 ATP MMI, Touch Panel LCD, LCD Inverter A/S를 진행중에 있다. 이는 MVB 통신 기술이 없으면 개발하지 못하는 장치로 과제를 추진한 성과로 볼 수 있다. 이번 실용화 기술개발 사업을 통하여 얻은 기술을 바탕으로 국내외 신조 철도 차량의 주요장치 제작에 참여가 가능할 것으로 판단되어 진다.

○ MVB 통신 프로토콜 생성기 개발을 통한 사업화 계획 현재 MVB통신의 원제작사(지멘스)에서 통신프로토콜 및 기술을 오픈하지 않아 CCU와 MVB 통신으로 연결되는 차량내 모든 주요 장치들의 국산화 개발 및 국내 제작업체들의 성능 향상을 위한 개발이 많은 어려움에 놓여 있다. 국내 철도 차량 부품 제작업체 및 철도차량 운영업체에 MVB 통신 프로토콜 생성기를 공급함으로써 부품 제작업체의 개발이 수월히 이루어질 수 있으며 철도차량 운영업체에서는 고장 진단 및 고장 수리가 용이할 수 있다. 제품 개발 이후 CCU와 연결되는 MMI, SIV, MFA, TCU, IBP, K-MICRO, ATP 등의 국내 제작 업체 및 철도공사 및 각 지하철 공사에 공급할 예정이다.

○ 8200호대 전기기관차는 2003년 초기 도입분 10량을 시작으로 2004년 18량, 2005년 7량, 2006년 20량, 2008년 28량이 도입되어 총 83량이 운용되고 있다. '16.3월을 기준으로 할 때 초기 도입분 10량은 사용년수가 13년에 도달하였고 2020년이 되면 17년에 달하게 되어 있다. 따라서 사용연수 15년을 기준으로 한 시점에서 주요 부품의 대수선이 시행될 것으로 예상되어지므로 개발품의 사업화는 밝은편이다. 국산화 개발품으로 대체한다면 수입대체 효과 등으로 발생하는 직접적인 경제적 효과 외에도 취거한 부품을 순환보수품으로 활용할 수 있어 운용사의 유지보수 효율성을 높이는 간접적인 효과도 기대할 수 있다.

○ 전기기관차(8200호대) 보조전원장치 기존품의 사용 실적과 단기 구매계획(2019년~2020년)은 아래의 표와 같다. 전기기관차 보조전원장치 기존품의 내구연한 및 관련 부품의 수명, 장기적 차량 운용 등을 전반적으로 고려하면, 초기도입차량을 시작으로 전체 차량에 대한 대수선 또는 순차적 교체가 예상된다.

구분	2014	2015	2016~2018	2019	2020	비고
전기기관차(8200호대) 보조전원장치 구매실적(예정)	1	1	0	1(예정)	1(예정)	총 83개

제2절 사업화의 기대효과

○ 부품 수입대체에 따른 원가절감 및 국제수지 개선
- 8200호대 보조전원장치는 약 373억원의 국비유출 방지효과가 있음
(450백만원×1대×83량 = 37,350백만원, '15년 외자조달 금액 기준)

○ 국내 중소기업 제작사의 매출 증대 및 국내시장 활성화
- 8200호대 보조전원장치는 약 261억원의 매출이 발생
(450백만원×70%×1대×83량 = 26,145백만원, 국산화시 수입가격의 약 70%적용)

제6장 연구개발과제의 대표적 연구실적

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	MVB 통신 데이터 분석장치	㈜앤츠, 철도공사		대한민국		2018.8.31		
2	논문	8200호대 전기기관차 보조전원장치 개발품의 신뢰도 기반 수명주기비용 분석	한국교통대학교		전기학회 논문지		2018.11		
3	논문	8200호대 전기기관차용 기존품 보조전원장치의 수명주기비용 평가에 관한 연구	한국교통대학교		전기학회 논문지		2018.2		
4	논문	전기기관차(8200호대) 신규 보조전원장치 적용 시 MVB 통신프로토콜 중 고장코드에 관한 연구	㈜앤츠		한국전자통신학회 논문지		2018.4		
5	소프트웨어	전기기관차 보조전원장치 통신제어장치(SIBCOS-M1300) 펌웨어 프로그램	앤츠㈜		한국저작권위원회		2017.11.14		

제7장 참고 문헌

(1) 철도안전법 (일부개정 2009.4.1, 법률 제9610호)
(2) 철도차량 안전기준에 관한규칙 (일부개정, 2008.7.10, 국토해양부령 제35호)
(3) 철도차량안전기준에관한 지침 (일부개정 2008.4.16, 국토해양부고시 제2008- 47호)
(4) 지멘스 홈페이지 (http://www.siemens.com)
(5) B. K. Bose, 1986, “POWER ELECTRONICS AND DRIVES“
(6) 설승기, “전기기기제어론”, BRAIN KOREA, 2002. pp. 299-352
(7) 건설교통부, 철도기술연구개발사업 추진제어장치 실용기술개발 I, 2007.
(8) 한국철도기술연구원, 추진제어시스템 기술동향
(9) Kiyoshi Ohishi, Ken Nakano, Ichiro Miyashita, Shinobu Yasukawa, "Anti-Slip Control of Electric Motor Coach Using Adhesion Force Coefficient Estimator Based on Distrubance Observer", JIASC 98, Vol. 1, pp.229-234, 1998.
(10) 김상훈, 배본호, 설승기(1999), “벡터제어를 적용한 전동차 구동 시스템 개발”, 전력전자학회 논문지 제6권 제1호, pp48-51
(11) Nakamura (2009) High Voltage IGBT Module Application Manual, Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd. Japan 319-1221, pp. 18-19.
(12) Hitachi IGBT Module Appliction Manual, Hitachi Ltd. Power & Industrial Systems, pp. 33-35.
(13) 한국건설교통기술평가원, 철도 주요시스템 및 부품 국산화 기술개발 기획보고서, 2013
(14) 한국건설교통기술평가원, 경부고속열처(KTX) 차량컴퓨터제어장치(OBCS) 개발보고서, 2013
(15) 최영준, 서민호, 박재현, 철도 제어통신 네트워크 프로토콜에서 마스터권한 전달 기법, 한국철도학회 논문집, pp.88-95, 2007
(16) 김훈, 홍구선, 한정수 외, TCN(IEC 61375-1)을 이용한 열차진단제어장치의 실증시험 연구한국철도학회 학술발표대회논문집, pp.1407-1421, 2007
(17) 전성준, 백진성, 손강호, TCN(Train Communication Network) 통신 시험용 WTB(Wire Train Bus) Analyzer 개발, 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.1919-1928, 2008
(18) 설재윤, 이상화, 박재현, 철도차량을 위한 MVB 기반의 슬레이브 컨트롤러 구현, 한국통신학회 종합 학술 발표회 논문집(동계), pp.102-103, 2010
(19) S.G, Shon, S.M. Yang, Real-time Error Measurement system for MVB Protocol, IJCSI, International Jurnal of Computer Science Issues, pp.38-44, 2010
(20) 박민호, 유도기기 “유도전동기의 기본회로”, “유도전동기의 제어”
(21) 이승원,이윤종, 전기기기 “전기자 권선과 유기기전력”, “자기회로”
(22) 竹內壽太郎,嘰部直吉, 전기기기설계 “유도전동기의 설계”
(23) 박현준, “전기철도차량용 견인전동기 고정자 권선의 절연열화 및 고장진단”홍익대학교 박사학위 논문
(24) ASTM(미국재료시험학회)
(25) IEC 60349-2
(26) Paul W. Franklin, "ADVANCED THEORY AND DESIGN OF ROTATING ELECTRICAL MACHINERY“

(27) 철도인재개발원, 전기기관차의 구조 및 기능, 삼성종합인쇄, 2006.
(28) 한국철도공사, "최신반도체소자를 이용한 고속철도 차량용 추진제어 기술개발", 미래철도 기술개발사업 기획연구 최종보고서, 국토부/건설교통기술평가원, 2008.11.
(29) 이을재, “신형 전기기관차 HEP장치 인버터 출력전원 개선방안 검토”, 코레일 자문보고서, 2009.
(30) 이을재 외, “유지보수성을 고려한 8200호대 전기기관차 보조전원장치의 전력회로 설계”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2014.07.
(31) 한국철도공사, “전기기관차(8200호대)추진시스템 성능향상 기술개발”, 철도기술연구사업 최종보고서, 국토교통부/국토교통과학기술진흥원, 2015.01.
(32) M. H . RASHID, Power Electronic Circuits, Devices, and Applications (3rd Edition), Prentice Hall, 2004.
(33) S. R. Bowes and P. R. Clark, "Simple Microprocessor Implementation of New Regular-Sampled Harmonic Elimination PWM Techniques", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 28, No.1, pp. 89-95, Feb. 1992.
(34) A. Zuckerberger and A. Alexandrovitz, "Determination of Commutation Sequence with a View to Eliminating Harmonics in Microprocessor-Controlled PWM Voltage Inverter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-33, No.3, pp. 262-270, Aug. 1986.
(35) B. K . Bose, Modern Power Electronics and AC Drives, Prectice Hall PTR, USA, 2002.
(36) N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics, Jonh Wiley, New York, 1995
(37) H. Stemmler, "High-power industrial drives", Proceedings of the IEEE, vol.82, pp. 1266-1286, August 1994.
(38) D. Finney, The Power Thyristor and its Applications, McGRAW-HILL, UK, 1980.
(39) W. Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer, Germany, 1996.
(40) P. Vas, Vector Control of AC Machines, CLARENDON PRESS · Oxford, UK, 1990.