

한국형 고속열차 보조전원 시스템의 신뢰성 해석

Reliability Analysis of Auxiliary Power System on Korea High Speed Train

서승일¹ · 박춘수² · 한영재² · 이태형² · 김기환²

Sung-Il Seo · Choon-Soo Park · Young-Jae Han · Tae-Hyung Lee · Ki-Hwan Kim

Abstract

In this paper, as the first step to assess and enhance the reliability of Korea High Speed Train, auxiliary power system is selected and reliability analysis is carried out. The auxiliary power system is classified into subsystems and functional analysis is conducted. Reliability block diagrams are drawn and reliability parametric analysis is performed. Analysis results show that the reliability of auxiliary power system depends on critical items. To grow the system reliability, activities should be concentrated on improvement of critical items.

Keywords : Auxiliary power system(보조전원시스템), Critical item(중요 부품), High speed train(고속열차), Reliability analysis(신뢰성 해석), Reliability block diagram(신뢰도 블록선도)

1. 서론

2004년 4월1일 역사적인 KTX(Korea Train eXpress)의 상업 운행 개시로 한국은 세계에서 5번째의 고속철도 운행 국가가 되었다. KTX가 프랑스에서 도입된 기술을 이용하여 제작된 고속열차임에 비하여 G7한국형 고속열차(Korea High Speed Train)는 국내 자체 기술로 지난 7년간의 개발 기간을 거쳐 완성되었으며, 성능시험을 거쳐 현재 300km/h의 주행속도로 신뢰성 시험을 수행하고 있다. 한국형 고속열차의 상용화를 위해서는 신뢰성 입증에 필수적이므로, 신뢰성 향상을 위한 연구 및 시험이 계속되고 있다. 본 연구에서는 한국형 고속열차의 주요 시스템인 보조전원 시스템을 대상으로 기능 분석 및 신뢰성 해석을 실시하고, 해석 결과를 기초로 하여 신뢰성 향상 방안을 모색하고, 신뢰성을 평가하고자 한다.

시설계를 진행한다. 상세설계 후 품질관리 절차에 따라 시스템을 제작하고 설치 완료한 후에는 시운전 등을 통해 신뢰성을 입증한 후에 실제 상업적으로 운용하고, 신뢰성을 모니터링하면서 유지보수 단계를 거친 후, 최종적으로 폐기된다. 한국형 고속열차는 현재 시제차량이 제작되어 시운전을 실시하면서 신뢰도를 입증하는 단계에 있다. 이 단계에서는 상업용 운영을 목표로 신뢰도의 성장이 필요하고, 신뢰도 성장을 위한 계획과 관리가 필요하다. 신뢰도 성장을 위해서는 Fig. 2와 같은 단계로 신뢰도 관리를 실행하는 것이 효과적이다. 시운전 중에 고장정보체계를 가동하면서 발생한 고장에 대해 원인을 분석하고 신뢰도를 평가한 후에 시스템 신뢰도에 미치는 영향을 분석하고 신뢰도에 치명적으로 영향을 미치는 품목을 선정한 후에 집중적으로 수정 보완하여 전체 시스템의 신뢰도를 높일 수 있도록 한다.

2. 신뢰성 성장 관리 과정

시스템의 신뢰성 라이프사이클을 요약해 보면 Fig. 1과 같다. 개념 설계의 단계부터 신뢰성요구 조건을 설정하고, 신뢰도를 배분한 후에 신뢰도를 예측하고, 평가한 후에 상

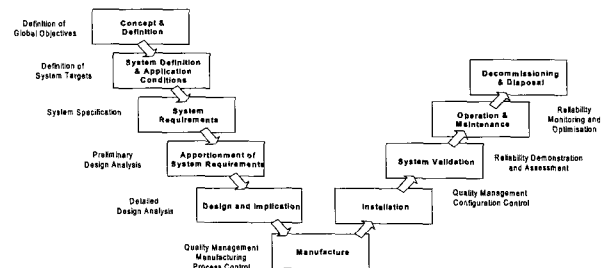


Fig. 1. Reliability life cycle of system

1 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

2 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

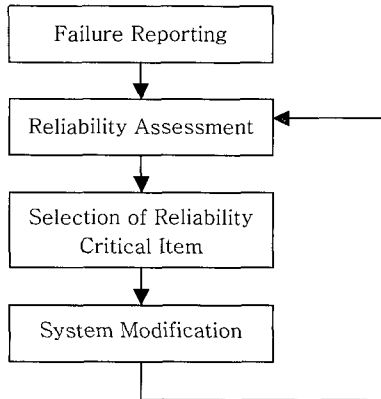


Fig. 2. Reliability growth procedure

3. 보조전원 시스템의 분류

7량1편성(동력차+동력객차+객차3량+중간동력객차+동력차)으로 구성된 한국형 고속열차의 차량시스템은 기능상, 주행 시스템, 추진(Electric Traction) 시스템, 기계 제동 시스템, 공압(Compressed Air, Treatment and Storage) 시스템, 보조 전원 시스템(Auxiliary Electric Power system), 편의 시설(Comfort Function Utility) 시스템, 운전 시스템, 제어 및 통신 시스템 등으로 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서 다루는 보조전원 시스템은 다음 Table 1과 같이 서브시스템과 교체 부품 단위(Line Replaceable Unit)로 분류할 수 있다.

한국형 고속전철 시스템 기본사양서[1]에 따르면 모든 시스템 및 보조시스템의 신뢰성은 MTBF(Mean Time Between Failure) 기준에 따라 시험되고 평가되어야 하며 전체 차량

Table 1. Breakdown of auxiliary power system

Sub system	Line Replaceable Unit
Auxiliary Block	VVVF Inverter Stack
	Converter Stack Assembly
	Auxiliary Converter Electric Components
	Cooling Fan
	Active Filter Unit
	Auxiliary Block Control Unit
Battery Set	Battery
	Battery Charger
CVCF Inverter Unit	CVCF Inverter Stack
	CVCF Inverter Control Unit
	Inverter Electric Components
Power Distribution	Terminal Board
	Transformer
	Power Extention

의 MKBSF(Mean Kilometer Between Service Failure)는 121,000km 이상이 되어야 하고 보조전원시스템에 대해서는 1,358,800km 이상 되어야 한다. MKBSF는 운행시간이 5분간 이상 지연되는 고장을 기준으로 정의된다.

4. 기능 블록선도

보조전원 시스템의 기능블록 선도는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 주변압기로부터 교류 380V의 전원을 받아서 보조블록(Aux Block)내의 컨버터에서 DC 670V의 전력으로 변환한 후에 각 충전기 세트와 객차내의 CVCF 인버터 유니트에 공급한다. 충전기 세트는 DC 72V의 전력을 충전하고 각 제어 유니트와 객실 내 조명에 전력을 공급한다. TP1 동력차 내의 보조블록이 동력차 TP1, 동력객차 TM1, TM5, 객차 TT3의 전원 및 충전기 세트에 전력을 공급하고 TP2 동력차의 보조블록은 자차 내의 전원 및 충전기 세트에만 전력을 공급하나 TP1 동력차의 보조블록 고장 시에 연장 급전을 실시한다. 보조블록 내의 4개의 VVVF 인버터는 보조블록과 견인전동기, 주변압기의 냉각용 송풍기 및 공기압축기 구동용 전동기를 제어한다. CVCF 인버터 유니트는 DC 670V 전력을 AC 440V 전력으로 변환하여 HVAC를 비롯한 객실 내 각종 시설의 전원을 제공한다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 동력차 내의 보조블록과 배터리충전기를 나타낸다.

5. 신뢰도 블록선도

보조전원 시스템의 경우 전후 동력차의 보조블록이 상호 연장 급전의 기능을 가지고 있으므로 병렬로 작동하고 있고, 동력차와 동력객차의 배터리 충전기 및 배터리가 병렬로 작동하고 있으며, 객차용 배터리 충전기와 배터리가 전부 객

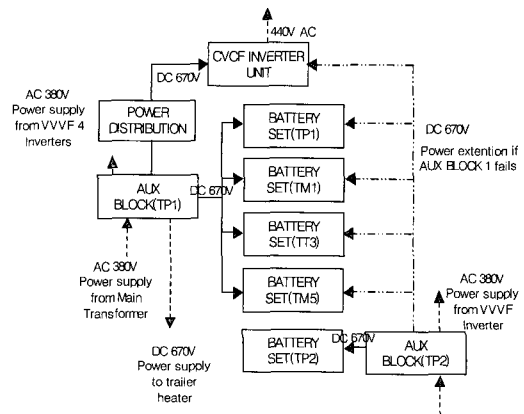


Fig. 3. Functional block diagram of auxiliary power system

차(TT3)에서 병렬로 연결되어 각 제어 Unit 및 조명 장치에 전원을 공급하고 있다. 병렬로 연결된 동력차와 동력객차의 배터리충전기는 3대중에 2대가 정상적으로 작동하여야 정상 운행이 가능하며, 객차의 배터리충전기는 5대중 3대가 정상적으로 작동하여야 정상 운행이 가능하다. 이와 같은 시스템 기능을 신뢰도 블록선도로 표시해 보면 Fig. 6와 같다.

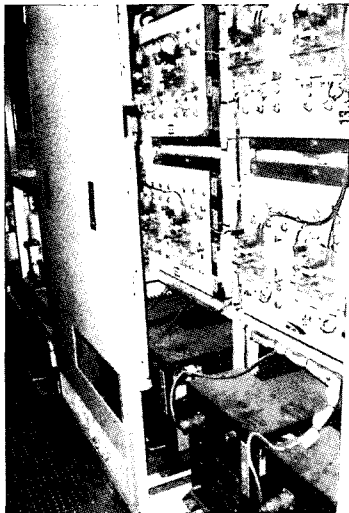


Fig. 4. Aux Block

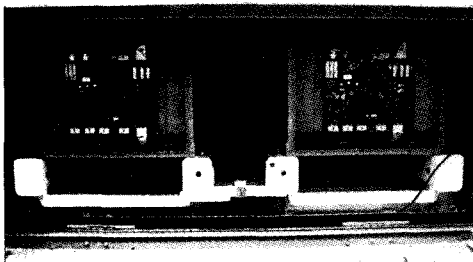


Fig. 5. Battery Charger

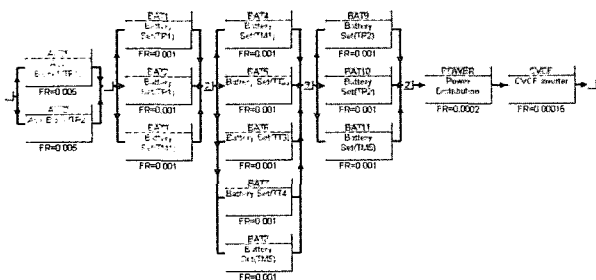


Fig. 6. Reliability block diagram of auxiliary power system

서브시스템의 신뢰도가 고장율(failure rate)이 일정하다는 가정의 지수분포를 따른다고 하면 신뢰도를 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$R_A = e^{-\lambda_A t} \quad (1)$$

$$R_B = e^{-\lambda_B t} \quad (2)$$

$$R_P = e^{-\lambda_P t} \quad (3)$$

$$R_C = e^{-\lambda_C t} \quad (4)$$

여기서, R_A = 보조블록의 신뢰도

R_B = 배터리충전기의 신뢰도

R_P = Power Distribution의 신뢰도

R_C = CVCF인버터의 신뢰도

λ_A = 보조블록의 고장율(회/km)

λ_B = 배터리충전기의 고장율

λ_P = Power Distribution의 고장율

λ_C = CVCF 인버터의 고장율

t = 주행거리(km)

Fig. 6은 병렬시스템과 m-out-of-n시스템[3]이 직렬로 연결된 시스템으로서, 확률 이론을 적용하여 신뢰도를 다음식과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{system} = (2R_A - R_A^2)(3R_B^2 - 2R_B^3)^2 \times (10R_B^3 - 5R_B^4 - 4R_B^5)R_P R_C \quad (5)$$

여기서, R_{system} = 보조전원시스템의 신뢰도

각 서브시스템의 신뢰도 분포를 나타내는 식 (1)~(4)을 식 (5)에 대입하면 MKBSF를 다음식과 같이 계산할 수 있다.

$$MKBSF = \int_0^{\infty} R_{system} dt \quad (6)$$

식 (6)의 계산은 신뢰성 해석 전용 S/W[4]를 이용하여 수행하였다. Fig. 7는 초기의 고장율을 기초로 하여 각 서브시스템의 고장율이 1/2로 감소하였을 경우 전체 MTBF에 미치는 영향을 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 7를 보면 고장율이 감소될 경우 시스템 전체의 신뢰도 향상에 가장 큰 영향을 미치는 서브시스템은 보조블록이라고 할 수 있으며 보조블록을 중요 신뢰도 부품(reliability critical item)으로 간주하고 집중적인 신뢰도 성장 관리 방안을 모색하여야 한다.

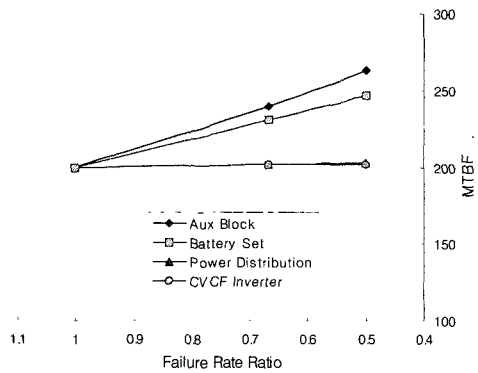


Fig. 7. Variation of MTBF according to failure rate ratio of each subsystem

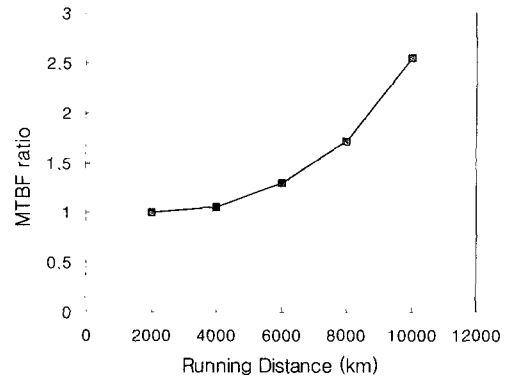


Fig. 8. Reliability growth of auxiliary power system

6. 신뢰도 해석 결과 및 신뢰성 성장

보조블록의 안정화 및 신뢰도 향상이 시스템의 신뢰도 향상에 결정적인 기여를 한다는 판단하에 보조블록의 신뢰도 향상을 위해 연구진들이 많은 노력을 하였다. 차상 고조파와 기타 전원 노이즈의 영향으로 보조블록 제어 소프트웨어의 정상적인 신호 인식이 불가능한 경우가 많이 발생하여 케이블의 노이즈 차단에 주력하였고, 제어 소프트웨어의 오류를 지속적으로 보완하였다. 또한 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 소자를 교체하여 신뢰도를 향상시켰다. 2002년 8월29일 한국형 고속열차가 시운전을 시작한 이후 보조전원 시스템의 고장기록을 바탕으로 MTBF의 변화 추이를 보면 Fig. 8와 같다. 초기의 고장율에 의한 MKBSF를 기준으로 주행 거리가 증가해 감에 따라 MKBSF의 증가를 상대적인 비로 나타낸 것이다. 보조블록의 고장 관리를 집중적으로 실행함으로써 가시적인 신뢰도 성장을 눈으로 확인할 수 있다.

7. 결론

한국형 고속열차 시제차가 개발되어 성능시험을 종료하였고, 신뢰성 시험이 진행되고 있다. 본 연구에서는 한국형 고속열차 보조전원시스템을 대상으로 신뢰성 해석을 실시하

고 신뢰성 성장 관리 방안을 모색하였다. 신뢰성 해석을 위해 보조전원 시스템의 기능 분석과 신뢰도 블록선도를 작성하였고 신뢰도 계산을 수행하였으며, 계산 결과에 기초하여 중요 신뢰도 부품을 찾을 수 있었다. 현재의 한국형 고속열차 보조전원 시스템의 중요 신뢰도 부품은 보조블록임을 발견하였고, 신뢰도 향상 방안을 모색하여 지속적인 관리를 실시한 결과, 시운전을 시행함에 따라 보조블록의 고장율이 지속적으로 감소하였고, 보조전원 시스템 전체의 신뢰성 성장을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 건교부 지원 “고속철도기술개발 사업”의 부분임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, “고속전철 시스템 기본사양서”, G7 고속전철 기술개발 사양서, 2002, pp.5-7.
2. 한국철도기술연구원, “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술 개발”, 고속철도기술개발사업 1차년도보고서, 2003, pp.10-50.
3. 김원경, “시스템 신뢰도공학”, 교우사, 2002, pp.165-196.
4. Isograph, “Reliability Workbench for Windows”, 2002.