

한국형 고속열차 추진시스템의 신뢰성 평가

Reliability Assessment of Traction System of Korean High Speed Train

서승일* · 박춘수* · 한영재* · 이태영* · 김기환*

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, an electric traction system is selected and reliability analysis is carried out. The electric traction system is classified into subsystems and functional block diagrams and reliability block diagrams are drawn. Expressions for evaluating the reliability are derived and Mean Kilometer Between Service Failure is calculated using the trial track test results. The calculation results show reliability growth of the proposed system.

Keywords : Functional block diagram(기능블록선도), Korea High Speed Train(한국형고속열차), Mean Kilometer Between Service Failure(운행고장간평균주행거리), Reliability(신뢰도), Traction system(추진시스템)

1. 서론

한국형 고속열차 시제차는 지난 8년간의 개발 기간을 거쳐 완성되어 지난 2004년 12월 16일 최초로 350km/h의 속도에 도달하였고, 현재 안정화를 위한 신뢰성 평가 시험이 진행되고 있다. 한국형 고속전철의 차량 시스템은 기존 경부고속전철의 아날로그 기술에서 벗어나서 과감히 디지털 신기술을 적용하였으므로 차세대 고속전철 시스템이라고 할 수 있는데[1], 신기술 적용에 따른 신뢰성 향상이라는 새로운 연구 분야의 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 한국형 고속전철의 안정화 및 신뢰성 향상을 위해 차량의 주요 시스템인 추진시스템을 대상으로 신뢰성 평가 기술을 개발하고 신뢰성 평가 시험을 통해 얻어진 결과를 토대로 신뢰성 향상 추이를 고찰하였다.

2. 한국형 고속열차의 신뢰성 평가 과정

한국형 고속열차는 그림 1과 같이 7량 1편성(동력차+동력객차+객차3량+중간동력객차+동력차)으로 구성되어 있다.

편성 차량의 시스템은 주시스템과 하부시스템 (Sub-system) 및 교체 가능 부품(LRU, Line Replaceable Unit)으로 계층적 분류가 가능하다. 차량 시스템은 기능상 주행 (Movement) 시스템, 추진(Electric Traction) 시스템, 기계 제동(Mechanical Braking) 시스템, 공압(Compressed Air, Treatment and Storage) 시스템, 보조 전원(Production of Electric Power and Distribution) 시스템, 편의 시설(Comfort Function Utility) 시스템, 운전(Driving) 시스템, 제어 및 통신(Train Control & Data Transmission) 시스템 등으로 나누어 볼 수 있다.

본 연구에서는 한국형 고속열차 차량시스템 중에서 핵심 시스템이라고 할 수 있는 추진시스템에 대해 신뢰성 평가를 수행하고자 한다. 추진시스템은 Table 1과 같이 서브시스템과 LRU로 분류할 수 있다.

한국형 고속열차 시스템 기본사양서[1]에 따르면 모든 시스템 및 보조시스템의 신뢰성은 MTBF(Mean Time Between Failure) 기준에 따라 시험되고 평가되어야 하며 전체 차량의 MKBSF(Mean Kilometer Between Service Failure)는 121,000km 이상이 되어야 하고 추진시스템에 대해서는 783,000km 이상 되어야 한다.

차량시스템은 일반적으로 그림 2와 같은 과정을 거쳐 신뢰성 평가가 진행된다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단

E-mail : siseo@krii.re.kr

TEL : (031)460-5623 FAX : (031)460-5699

* 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

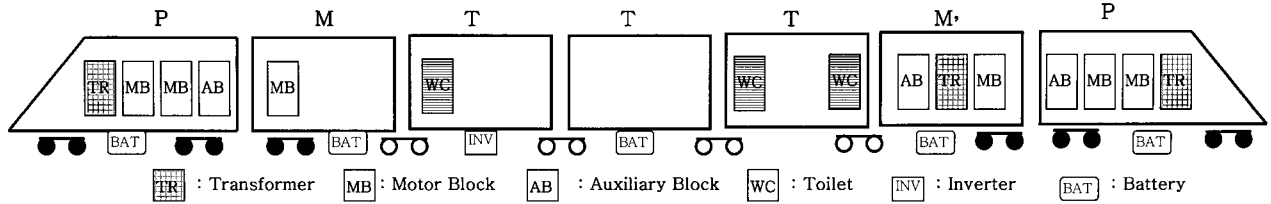


Fig. 1. Composition of prototype KHST

Table 1. System breakdown of electric traction system

SYSTEM	SUBSYSTEM	LRU
ELECTRIC BRAKING AND TRACTION	PANTOGRAPH	PANTOGRAPH
		AIR SUPPLY HOSE UNIT
	HIGH VOLTAGE SAFETY DEVICE	SENSING TRANSFORMER
		VACUUM CIRCUIT BREAKER
		CURRENT RETURN BRAID
		CURRENT MEASUREMENT TRANSFORMER
		LIGHTENING ARRESTER
		ROOF LINE
	ROOF LINE	HV ISOLATING SWITCH
		ROTARY HEAD
		MAIN TRANSFORMER
	MAIN TRANSFORMER	MAIN TANK
		COOLING UNIT
		HYDRAULIC UNIT
		OIL PUMP CONTACTORS
		COOLING FAN CONTACTORS
	MOTOR BLOCK	POWER CONVERTER STACK
		POWER INVERTER STACK
		BRAKING CHOPPER STACK
		VENTILATION FAN
		VENTILATION INVERTER
		RHEOSTAT
		ELECTRIC COMPONENTS
		CONVERTER/INVERTER CONTROL UNIT
		TRACTION CONTROL UNIT
	TRACTION MOTOR	TRACTION MOTOR
		MOTOR FAN UNIT
	EDDY CURRENT BRAKE	EDDY CURRENT BRAKE CONTROL UNIT
		FRAME ASSEMBLY
		MAGNET
		AIR CYLINDER ASSEMBLY

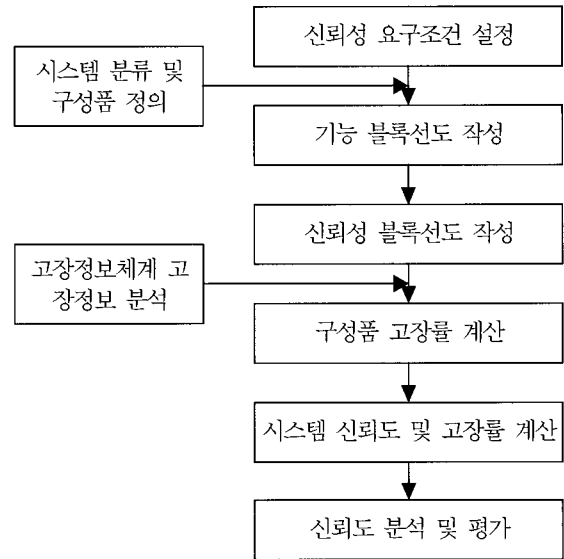


Fig. 2. Procedure for Reliability assessment

먼저, 차량시스템의 성능과 수명, 안전성, 제작 비용, 유지 보수 비용 등 시스템 설계 시의 상충 요인들을 절충(trade-off)하여 시스템의 신뢰성 요구 조건을 설정하게 되는데, 차량시스템의 경우에는 보통 주행거리를 기준으로 신뢰성 요구 조건을 설정하게 된다[2]. 다음으로 설계 결과 및 PWBS (Project Work Breakdown System)를 기초로 시스템을 기능 별로 분류하고 시스템을 구성하는 구성품의 상호 관계 및 기능을 정의하는 기능 블록선도(Functional Block Diagram)를 작성한다.

또한 기능 블록선도를 활용하여 신뢰도의 모델링을 수행하고, 계산이 가능한 신뢰성 블록선도를 작성한다. 이후, 고장정보체계로부터 수집된 각 구성품의 고장 정보로부터 평균 고장률을 계산하고, 신뢰성 블록선도(Reliability Block Diagram)를 기초로 수학적 기법을 적용하여 시스템의 고장률 및 신뢰도를 계산하고 신뢰도 요구 조건과 비교 분석하고 신뢰성을 평가하게 된다.

3. 추진시스템 구성 및 신뢰성 해석 모델

초기 신뢰성 평가 단계에서 추진시스템의 기능 블록선도를 서브시스템 단계까지 포함하여 작성하면 Fig. 3와 같다.

정상 운전 모드에서 진행 방향 기준 후부에 있는 판토품그래프로부터 AC 25kV의 전원 공급이 이루어진다. 판토품그래프의 상승은 운전실의 명령에 따라 밧데리로부터 DC 72V의 전원을 공급받는 보조 공압 설비의 작동으로 가능하다. 판토품그래프가 상승되면, High Voltage Safety Device인 VCB의 투입으로 주변압기(main transformer)에 전력이 공급된다. VCB가 투입되면 전원은 Roof Line을 통해 반대편의 보조 변압기와 주변압기에도 전력이 공급된다. 보조 변압기는 중간 동력객차의 모터블록에만 전력을 공급한다. 정상 모드의 판토품그래프에서 고장이 발생하는 경우에는 반대편의 판토품그래프가 비상 모드로 상승하여 동일한 과정을 거쳐 각 변압기에 전력을 공급할 수 있다. 주변압기는 AC 380V의 전원을 보조 블록에 전달하고 AC 1400V의 전원을 각 모터블록에 공급한다. 모터블록은 컨버터와 인버터의 1 세트로서 운전실 Master Controller의 PWM 지령 신호에 따라 2대의 견인전동기(traction motor)를 일괄 제어한다. 제동

시에는 모터블록이 발전기와 같은 역할을 수행하여 회생 전기를 판토품그래프를 통해 가선으로 전달한다.

기능블록선도에 기초하여 신뢰도를 계산하기 위한 신뢰성 블록선도(Reliability Block Diagram)를 작성한다.

정상 운전 모드에서 진행 방향의 후방 동력차의 판토품그래프로부터 집전이 이루어지나, 후부 판토품그래프 고장 시에는 비상 모드로서 전방 동력차의 판토품그래프로부터 집전이 가능하다. 따라서 전방 판토품그래프는 대기다중화계(Stand-by-Redundancy)로서 역할을 하게 된다.

정상 상태에서 한국형 고속열차 시제차는 6개의 모터블록에서 추진에 필요한 견인력을 발생하고 있는데, 시제차의 기본 사양서에 따라 3/4 이상의 모터블록이 정상 작동하여야 출발이 가능하게 된다. 따라서 6개 중, 5개 이상의 모터블록이 정상 작동하는 경우의 신뢰도를 계산하기 위해 보조 변압기를 기준으로 다음과 같은 조합을 고려한다.

(1) 보조변압기가 정상 작동하는 경우

6개의 모터블록 중 5개의 모터블록이 정상 작동하는 경우로서 Fig. 4와 같이 신뢰성 블록선도를 나타낼 수 있다.

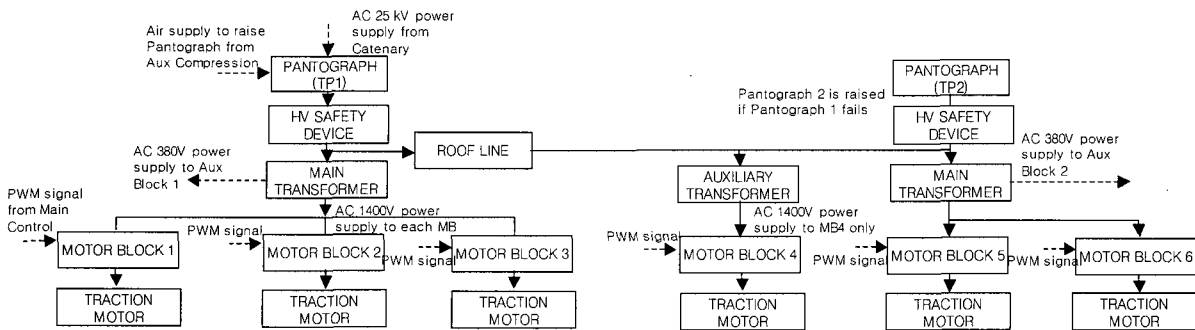


Fig. 3. Functional block diagram of electric traction system

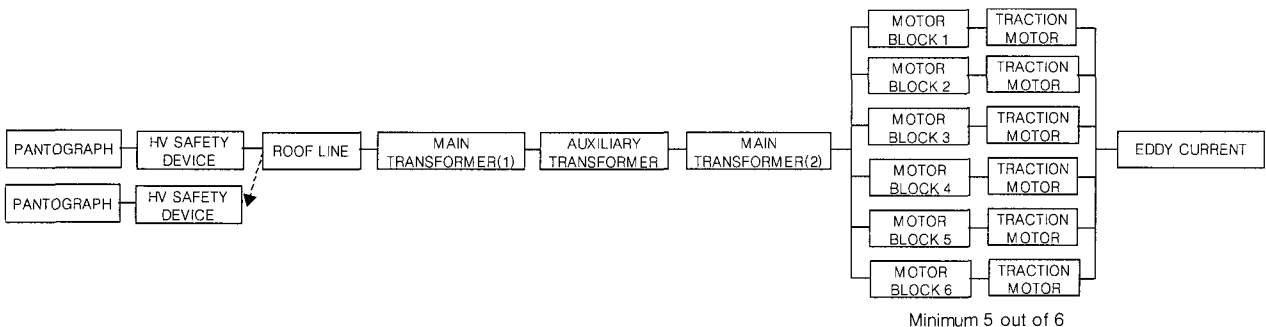


Fig. 4. Reliability block diagram of electric traction system during normal operation of auxiliary transformer

(2) 보조변압기 고장의 경우

보조변압기에 의해 직접 전원이 공급되는 4번 모터블록을 제외한 전체 모터블록이 정상 작동하는 경우로서 Fig. 5와 같이 신뢰성 블록선도를 나타낼 수 있다.

이상의 두가지 경우에 대해 Bayes의 정리[3]를 사용하여 신뢰도를 표현하면 다음과 같이 된다.

$$R_{TRAC} = R_{TRAC_{avr}} R_{aux TR} + R_{TRAC_{fa}} (1 - R_{aux TR}) \quad (1)$$

여기서, R_{TRAC} = 추진시스템의 신뢰도

$R_{TRAC_{avr}}$ = 보조변압기가 정상 작동하는 경우의 추진 시스템 신뢰도

$R_{TRAC_{fa}}$ = 보조변압기가 고장인 경우의 추진시스템 신뢰도

$R_{aux TR}$ = 보조변압기의 신뢰도

식 (1)에 따라 신뢰도를 구하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} R_{TRAC} &= R_{panto} R_{HV} R_{roof} R_{TR(1)} R_{aux TR} R_{TR(2)} [6(R_{MB} R_{TM})^5 \\ &- 5(R_{MB} R_{TM})^6] [1 + (\lambda_{pn} + \lambda_{hv})t] R_{eddy} \\ &+ R_{panto} R_{HV} R_{roof} R_{TR(1)} R_{TR(2)} (R_{MB} R_{TM})^5 \\ &\times [1 + (\lambda_{pn} + \lambda_{hv})t] (1 - R_{aux TR}) R_{eddy} \\ &= R_{panto} R_{HV} R_{roof} R_{TR(1)} R_{TR(2)} R_{eddy} (R_{MB} R_{TM})^5 \\ &\times [1 + (\lambda_{pn} + \lambda_{hv})t] (5R_{aux TR} - 5R_{aux TR} R_{MB} R_{TM} + 1) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, R_{panto} =판토타그래프의 신뢰도

R_{HV} =고압안전장치의 신뢰도

R_{roof} =지붕배선의 신뢰도

R_{TR} =주변압기의 신뢰도

R_{MB} =모터블록의 신뢰도

R_{TM} =주전동기의 신뢰도

R_{eddy} =와전류제동장치의 신뢰도

t =가동시간

λ_{pn} =판토타그래프의 고장율

λ_{hv} =고압안전장치의 고장율

고장율 λ 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\text{Number of Failure}}{\text{Service Kilometer}} \quad (3)$$

Bayes의 정리를 사용하지 않는 경우에도 신뢰도를 계산할 수 있다. 6개의 모터블록 중에서 5개 이상 작동하여야 정상 운행이 가능하므로 6개의 모터블록이 작동하는 경우와 5개의 모터블록이 작동하는 경우에 정상 운행이 가능하다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R_{TRAC} = R_{TRAC_{6MB}} + R_{TRAC_{5MB}} \quad (4)$$

여기서, $R_{TRAC_{6MB}}$ = 6개의 모터블록이 작동하는 경우의 추진 시스템의 신뢰도

$R_{TRAC_{5MB}}$ = 5개의 모터블록이 작동하는 경우의 추진 시스템의 신뢰도

식 (4)를 기초로 추진시스템의 신뢰도를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{TRAC} &= R_{panto} R_{HV} R_{roof} R_{TR(1)} R_{TR(2)} R_{eddy} [1 + (\lambda_{pn} + \lambda_{hv})t] \\ &\times [R_{aux TR} (R_{MB} R_{TM})^6 + (1 - R_{aux TR}) (R_{MB} R_{TM})^5 \\ &+ R_{aux TR} 6 C_5^6 (R_{MB} R_{TM})^5 (1 - R_{MB} R_{TM})] \\ &= R_{panto} R_{HV} R_{roof} R_{TR(1)} R_{TR(2)} R_{eddy} (R_{MB} R_{TM})^5 \\ &\times [1 + (\lambda_{pn} + \lambda_{hv})t] (5R_{aux TR} - 5R_{aux TR} R_{MB} R_{TM} + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (2)과 식 (5)을 비교하여 보면 동일한 결과가 얻어짐을 알 수 있다.

통상의 경우와 같이 신뢰도 함수가 지수함수를 따른다고 가정하고 신뢰도를 적분하여 얻어진 MKBSF를 구하면 식 (6)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} MKBSF_{TRAC} &= \int_0^{\infty} R_{TRAC} dt \\ &= \frac{5}{\lambda_{pn} + \lambda_{hv} + \lambda_{rf} + \lambda_{tr(1)} + \lambda_{atr} + \lambda_{tr(2)} + \lambda_{ed} + 5(\lambda_{mb} + \lambda_{tm})} \\ &+ \frac{[\lambda_{pn} + \lambda_{hv} + \lambda_{rf} + \lambda_{tr(1)} + \lambda_{atr} + \lambda_{tr(2)} + \lambda_{ed} + 5(\lambda_{mb} + \lambda_{tm})]^2}{5} \\ &- \frac{\lambda_{pn} + \lambda_{hv} + \lambda_{rf} + \lambda_{tr(1)} + \lambda_{atr} + \lambda_{tr(2)} + \lambda_{ed} + 6(\lambda_{mb} + \lambda_{tm})}{5(\lambda_{mb} + \lambda_{tm})} \\ &- \frac{[\lambda_{pn} + \lambda_{hv} + \lambda_{rf} + \lambda_{tr(1)} + \lambda_{atr} + \lambda_{tr(2)} + \lambda_{ed} + 6(\lambda_{mb} + \lambda_{tm})]^2}{1} \\ &+ \frac{\lambda_{pn} + \lambda_{hv} + \lambda_{rf} + \lambda_{tr(1)} + \lambda_{tr(2)} + \lambda_{ed} + 5(\lambda_{mb} + \lambda_{tm})}{(\lambda_{mb} + \lambda_{tm})} \\ &+ \frac{\lambda_{pn} + \lambda_{hv} + \lambda_{rf} + \lambda_{tr(1)} + \lambda_{tr(2)} + \lambda_{ed} + 5(\lambda_{mb} + \lambda_{tm})^2}{1} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $MKBSF_{TRAC}$ =추진시스템의 운행고장간평균거리

λ_{rf} =지붕배선의 고장율

λ_{tr} =주변압기의 고장율

λ_{atr} =보조변압기의 고장율

λ_{mb} =모터블록의 고장율

λ_{tm} =주전동기의 고장율

λ_{ed} =와전류제동장치의 고장율

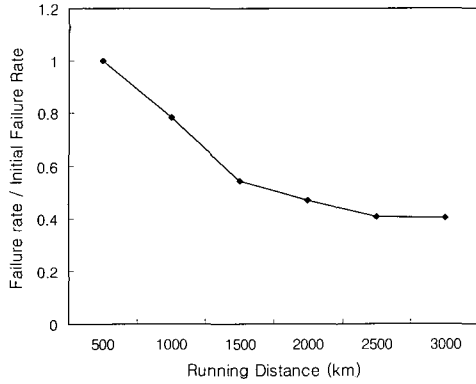


Fig. 6. Variation of instantaneous failure rate of Motor Block

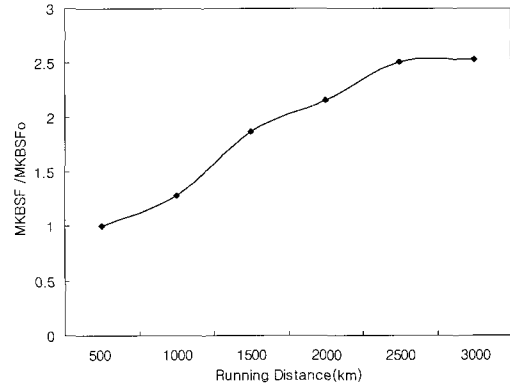


Fig. 7. Variation of MKBSF of Electric Traction System

4. 신뢰도 계산

경부고속철도 시운전 구간에서 한국형 고속열차 시제차의 분선시운전 시험을 통해 수집된 고장 정보를 기초로 하여 추진시스템을 구성하는 모터블록의 고장률 변화를 살펴보면 Fig. 6와 같다. 현재 고장의 디버깅 단계이므로 초기 고장률을 기초로 상대적인 비교만 나타내었다.

시운전 시험을 통해 얻어진 고장을 자료를 기초로 하여 식 (6)을 이용하여 추진시스템의 신뢰도 MKBSF를 계산하였다. Fig. 7은 식 (6)에 의해 계산된 추진시스템 전체의 MKBSF를 초기 MKBSF를 기초로 하여 상대적인 비교를 나타낸 것이다. Fig. 6, 7을 통해 한국형 고속열차 시제차의 신뢰도 향상을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 한국형 고속열차 추진시스템에 대한 기능 분석과 신뢰성 블록선도를 작성하였고 신뢰도 계산식을 도출하였다. 추진시스템의 기능 분석 및 신뢰성 블록선도는 초기 단계로서 서브어셈블리 수준에서 작성되었으며, 시제차의 시운전 시험 결과를 적용하여 신뢰도 계산을 수행하였다. 신뢰계산 결과를 통해 한국형 고속열차 시제차의 신뢰도 성장 현황을 가시적으로 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 김기환 외 (2002), "G7 고속전철 기술개발 사양서", 한국철도기술연구원, pp.1-30.
2. Korea TGV Consortium (1998), "Reliability and Maintainability Demonstration Test Plan - Rolling Stock", K611-1-E3200-RL +T-036, pp.5-33.
3. 김원경 (2001), "시스템 신뢰도 공학", 교우사, pp.165-196.