

추진장치의 고장진단과 성능특성에 관한 연구

A Study on Fault Diagnosis and Performance Evaluation of Propulsion Equipment

한영재^{1,a}
(Young-Jae Han^{1,a})

Abstract

Recently, as the feasibility study shows that trans-Korea railway and trans-continental railway are advantageous, interest in high-speed railway system is increasing. Because railway vehicle is environment-friendly and safe compared with airplane and ship, its market-sharing increases gradually. KHST(Korean High Speed Train) has been developed by KRRI (Korea Railroad Research Institute) for last 6 years to satisfy the need. An electric railway system is composed of high-tech subsystems, among which main electric equipment such as transformers and converter are critical components determining the performance of rolling stock. We developed a measurement system for on-line test and evaluation of performances of KHST. The measurement system is composed of software part and hardware part. Perfect interface between multi-users is possible. A new method to measure temperature was applied to the measurement system. By using the system, fault diagnosis and performance evaluation of electric equipment in Korean High Speed Train was conducted during test running.

Key Words : Fault diagnosis, Transformer, Converter/Inverter, Measurement system, Railway, MB

1. 서론

고속철도차량의 국내기술확보를 위해 최고운행 속도 350 km/h의 한국형 고속전철시스템을 개발하여 단품시험, 완성차시험, 공장시험 등을 통해 기본적인 성능을 확인한 후 현재는 본선시운전 시험이 진행 중이다.

차량의 고속화와 관련해서는 안정성, 신뢰성, 유지보수비 및 에너지 저감 등이 요구됨에 따라 이러한 요구조건을 충족시킬 수 있는 전장품을 개발하기 위해 선진국 업체들이 힘쓰고 있다[1-3].

프랑스, 독일, 일본 등을 비롯한 철도 선진국의 부품업체들은 여러 차종에 취부되는 전장품들을

개발하고 다년간에 걸쳐 운영해왔기 때문에 부품 설계, 제작기술이 국내보다도 높은 수준에 있다. 따라서 그들이 개발한 철도차량 전장품에 대한 성능을 파악하기 위해 우수한 성능을 가진 계측, 분석 및 평가시스템을 보유하고 있다[4-6].

그리고 계측장비들도 계측 및 분석을 통한 시험 평가와 동시에 완성차시험이나 본선시운전 시험시에 발생할 수 있는 고장원인을 찾아내고 해결하여 차량 시스템의 신뢰성, 안정성, 유지보수성을 높이고 있다[7].

본 논문에서는 계측시스템을 이용하여 추진장치를 고장진단하고 성능특성을 연구한 내용에 대해 서술하고 있다.

2. 본론

2.1 주회로시스템의 구성 및 기본사양

철도차량의 추진장치 견인 특성을 파악하기 위해서, 먼저 시스템의 일반사양과 핵심전장품인

1. 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단
(경기도 의왕시 월암동 360-1)

a. Corresponding Author : yjhan@krri.re.kr

접수일자 : 2004. 9. 24

1차 심사 : 2004. 12. 3

심사완료 : 2005. 1. 7

주전력변환장치의 기본사양에 대해 살펴볼 필요가 있다. 본선시운전을 통한 추진장치 성능도 시스템과 각 장치들의 성능에 절대적으로 의존하고 있기 때문이다. 여기서는 한국형 고속철도차량의 일반사양 및 성능과 주전력변환장치의 기본사양, 그리고 주회로시스템의 구성에 대해서만 간략하게 기술하였다[8].

가. 시제차량의 편성 및 열차 특성

- 1) 시제차량의 편성 : 2P+2M+3T
- 2) 열차 종량
 - a) 짐착중량 : 204 ton
 - b) 열차중량 : 332 ton
- 3) 열차 축수
 - a) 구동축수 : 12개
 - b) 비구동축수 : 8개
- 4) 열차 길이 : 145 m
- 5) 추진성능
 - a) 견인전동기 출력 : 1,100 kW
 - b) 기어효율 : 0.975
 - c) 총출력 : 13,200 kW
 - d) 350 km/h에서 가속여력 : 0.218 m/s

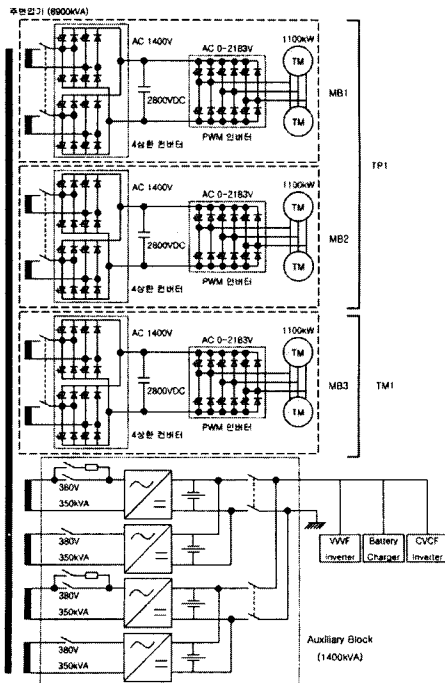


그림 1. 주회로 시스템.

Fig. 1. Main circuit system.

추진시스템은 컨버터 2대를 병렬운전하고 인버터 1대로 견인전동기 2대를 구동하는 구조를 한 MB(이하 Motor Block)이며, 동력차의 경우는 3개의 MB로 구성된다. MB는 IGCT, Diode 각 2개씩으로 구성된 브릿지 1arm을 하나의 Stack으로 조립하여 컨버터용 4개 Stack, 인버터용 3개 Stack과 별도의 Chopper Stack 1개 등으로 구성되며 직류단 콘덴서, 각부의 전압, 전류검지기 및 제어부가 포함된다.

표 1. 인버터부 주요 사양.

Table 1. Main specification of inverter.

항 목		내 용	
전 기 적 사 양	용 량	연속정격 : 2,730 kVA	
	입력측	정격전압	2,800 VDC
		정격전류	884 A
	출력측	출력전압	AC 0~2,183 V(선간전압)
		출력전류	7,474 A
		최대 주파수	143 Hz
시 스 템 구 성	구 성	1C2M	
	반도체 소자	IGCT(4,500 V/4,000 A)	
	냉각 방식	Heat Pipe식 Heat Sink	
	제어 방식	VVVF제어, 회생제어	
	스위칭 주파수	540 Hz	
	입력 필터(FC)	16,000 uF	

표 2. 컨버터부 주요 사양.

Table 2. Main specification of converter.

항 목		내 용	
전 기 적 사 양	용 량	1,300 kVA × 2	
	입력측	정격전압	1,400 VAC
		정격전류	930 A
	출력측	출력전압	2,800 VDC
		출력전류	884 A
	시 스 템 구 성	구 성	컨버터 2대 병렬운전
반도체소자		IGCT	
냉각 방식		Heat Pipe식 Heat Sink	
제어 방식		PWM(일정전압/역률제어)	
스위칭 주파수	540 Hz		

표 3. 변압기의 주요 사양.

Table 3. Main specification of main transformers.

구 분		동력차용	동력객차용
상수 및 주파수		단상 60 Hz	
용량(kVA)	일차	8,900	2,640
	건인	1,250 × 6	1,250 × 2
	보조	350 × 4	140
전압(kV)	일차	25	25
	건인	1.4 × 6	1.4 × 2
	보조	0.380 × 4	0.3

표 4. 전동기의 주요 사양.

Table 4. Main specification of motor.

사 양	형식	3상 농형 유도전동기
	총 대수	12대
	프레임구조	프레임레스
	추진장치	IGCT 제어
제 원	상수/극수	3상/4극
	출력	1,100 kW
	전압	2,183 V
	주파수	143 Hz

컨버터 시스템은 직류 링크전압을 2,800 V DC로 제어하고 컨버터 1대 용량은 약 1,238 kVA로 하며 입력단 전압은 1,400 V AC이다. 이런 형태의 컨버터를 사용함으로써 입력 역률이 1에 근접하도록 제어가 가능하고 회생제동시에 에너지를 입력측으로 환원할 수 있으며 입력전류를 정현파 형태로 할 수 있으며 병렬운전에 의해 입력측 고조파 성분을 대폭 줄일 수 있다.

한국형 고속전철에 사용되는 전력변환장치, 변압기 및 전동기의 주요제원은 표 1~표 4와 같다.

2.2 계측시스템 신호 입력

한국형 고속전철은 7량 1편성이며, 6개의 MB에 의해 12대의 건인전동기가 구동되고 있다. MB 1,2,3호기는 H사에서, 4,5,6호기는 R사에서 제작하였다. 제작된 MB에 대한 성능을 확인하기 위해 제어기를 설치하였으며, 보다 정확한 계측을 위해 MB 4호기에 CT와 PT를 추가로 설치하여 데이터를 취득하였다[9-11].

그림 2와 그림 3은 H사에서 제작된 MB 제어기에 각종 데이터를 얻기 위한 커넥터를 연결하고 전압을 DC 15 V에서 DC 5 V로 변환시켜 주기위한 신호변환기의 외형을 보여준다. 한 대의 MB에

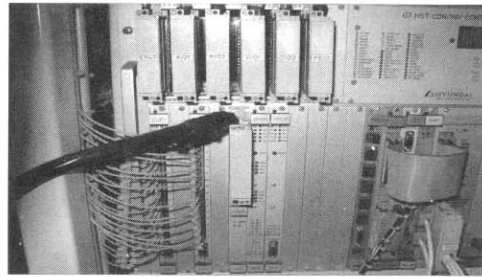


그림 2. MB1 제어기 커넥터 연결.

Fig. 2. Controller connector connection for MB1.

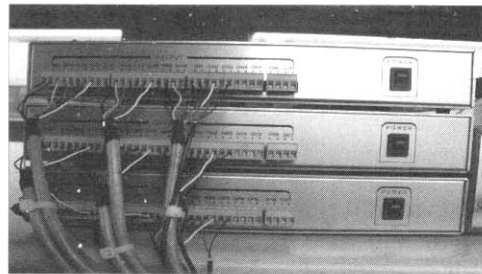


그림 3. 전압 레벨 변환기.

Fig. 3. Voltage level converter.

설치된 커넥터는 가선전압, 토크지령치, 토크실측치 등을 포함한 13개의 추진장치와 관련된 신호들을 계측시스템에 제공한다.

또한 한 대의 전압 레벨 변환기는 17개의 신호를 동시에 입력받아 처리할 수 있도록 제작되었다. 따라서 MB 1, 2, 3호기의 성능 확인을 위해 총 39개의 신호를 계측시스템에서 입력받는다.

그림 4는 R사에서 제작한 MB의 성능을 확인하기 위해 설치한 커넥터를 보여준다. 각 MB으로부터 차속속도, 가선전압, 인버터 출력전류, 토크지령치, 토크실측치 등과 같은 15개의 신호를 입력받는다. 따라서 3대의 MB로부터 총 45개의 제어신호를 계측시스템에 보내준다.

주변압기와 전동기 온도 측정을 위해 계측시스템에 신호를 입력받기 위한 방법은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째는, 측정위치로부터 직접 계측장비에 온도값이 입력되도록 한 경우이다. 이 때는 노이즈 방지를 위해 접촉부위에 운모를 사용하였다. 두 번째는 건인전동기 온도를 입력받을 때처럼, 제작시에 미리 심어둔 온도센서로부터 온도를 입력받아 컨디셔너를 거친 후에 계측장비로 입력되는 경우이다[12-14].

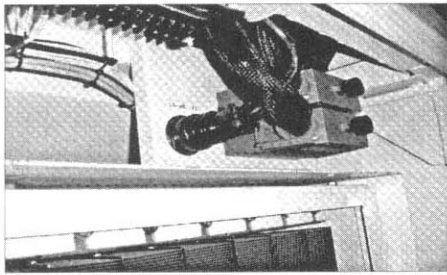


그림 4. MB4 제어기 커넥터 연결.

Fig. 4. Controller connector connection for MB4.

2.3 시험결과

한국형 고속전철은 세계에서는 네 번째로, 국내에서는 최초로 개발된 고속철도차량이며, 신뢰성 및 안전성 확보를 위해 차량 내에 상시계측시스템을 설치하여 시운전시험시 차량의 상태를 실시간으로 감시하고 있다. 이에 본 논문에서는 계측시스템을 통해 실시간으로 획득된 시험데이터를 통해 한국형 고속전철에 대한 고장진단을 수행하여 발생하는 문제점을 파악하였으며, 그 대응책을 모색하여 차량고장의 문제점들을 수정, 보완하였다.

그러나 외국에서는 고속철도차량의 고장과 관련된 자료유출을 꺼리기 때문에, 외국의 고속철도차량에 대한 고장진단의 사례를 찾는 데 어려움이 있었다.

철도차량에서 발생하는 슬립과 슬라이드는 차량의 안전과 직결되는 요소이기 때문에, 이를 방지해 주기 위해 많은 연구가 수행되어왔다. 그러나 각 차축에 대한 속도시험을 개별적으로 시험해 왔기 때문에, 전체 차량에서 동일한 차축속도를 받고 있는지를 확인하는데 어려움이 많았다.

위와 같은 단점을 보완하기 위해 한국형 고속전철 상시계측시스템에서 전체 차축속도를 동시에 측정하였다. 그림 5는 시운전 초기에 발생한 슬립과 슬라이드 현상을 보여주고 있다. 그림 5(a)에서는 기준속도와 동력차축속도를 비교한 것으로, 슬립이 발생하는 현상을 계측시스템을 통해 감지하였다. 역행중일 때, 기준속도에 비해 동력 차축속도가 급격하게 상승했다가 다시 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 그림 5(b)에서는 제동시 슬라이드 제어가 정확하게 이루어지지 않아서 기준속도와 차륜이 발생한 차축의 속도가 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

그림 6(a)와 (b)는 TCU 프로그램을 수정하고

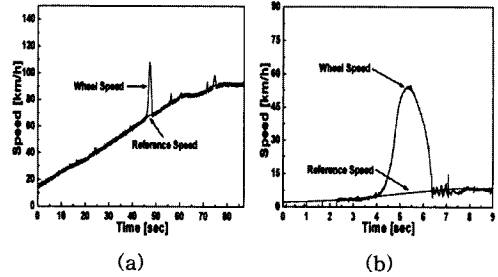


그림 5. 슬립과 슬라이드 발생.

Fig. 5. Slip and slide occurrence.

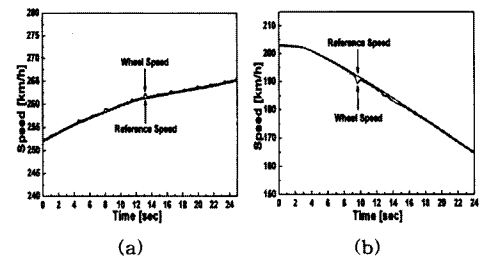


그림 6. 프로그램 수정후의 슬립과 슬라이드.

Fig. 6. Slip and slide after program adjustment.

제어신호선에 대한 노이즈 방지 등을 실시한 후에 슬립과 슬라이드 시험한 결과이다. 여기서 나타난 결과를 보면, 슬립과 슬라이드를 방지하기 위한 제어가 잘 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

추진장치 제어기로부터 나오는 컨버터 1군 전류, 컨버터 2군 전류, 속도, 토크지령치 및 토크실측치 신호 등을 각 MB으로부터 계측시스템으로 입력받고 있다. 이 중에서 토크지령치와 토크실측치를 비교하여 MB의 고장을 진단한 결과를 알 수 있다.

그림 7은 시운전 초기에 발생한 고장을 진단한 것으로, 고장발생원인을 찾아낸 후 정상적으로 제어가 될 수 있도록 프로그램을 수정 보완하였다. 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 토크지령치가 토크실측치보다도 더 앞서가고, 토크실측치는 추종하지 못해 MB이 차단되는 현상을 볼 수 있다.

그림 7(b)는 토크지령치와 토크실측치의 파형을 확대한 것으로, 토크지령치가 토크실측치를 따라가지 못하는 현상을 정확하게 볼 수 있다.

그림 8은 고장에 의한 영향을 보완한 이후의 토크지령치와 토크실측치를 비교한 것으로 토크지령치와 토크실측치가 거의 동일한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

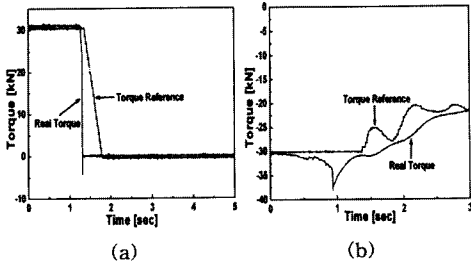


그림 7. 고장시의 토크지령치와 토크실측치.
Fig. 7. Real torque and torque reference in case of fault.

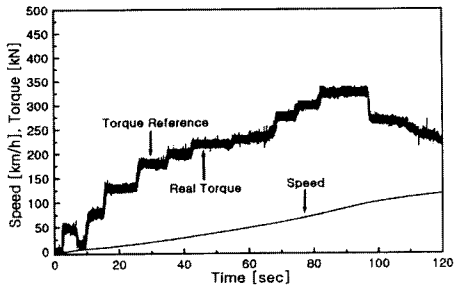


그림 8. 정상시의 토크지령치와 토크실측치.
Fig. 8. Real torque and torque reference in case of ordinary condition.

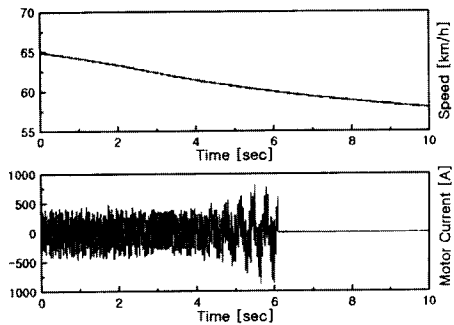


그림 9. 전동기 전류에 의한 고장진단.
Fig. 9. Fault diagnosis using motor current.

그림 9와 그림 10은 MB으로부터 받은 신호 중에서 전동기 전류를 이용하여 MB에 대한 고장진단을 실시한 것을 보여준다. 본선시운전 초기에, 그림 9에서 보는 것처럼 제동모드에서 속도가 줄어들 때, 인버터에 의한 제어가 제대로 이루어지지 않아 MB이 차단되는 현상이 종종 발생하였다.

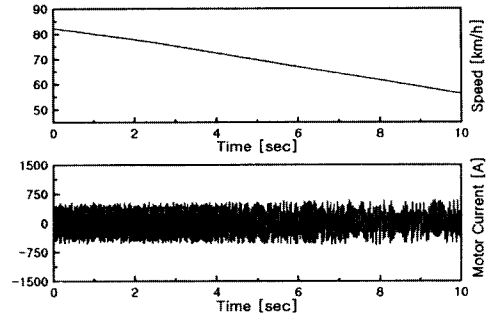


그림 10. 정상시의 전동기 전류.
Fig. 10. Motor Current in case of ordinary condition.

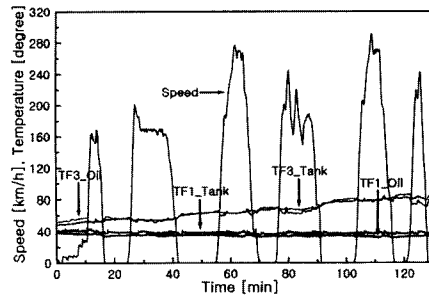


그림 11. 주변압기 과온 검지.
Fig. 11. Over-temperature detection of main transformer.

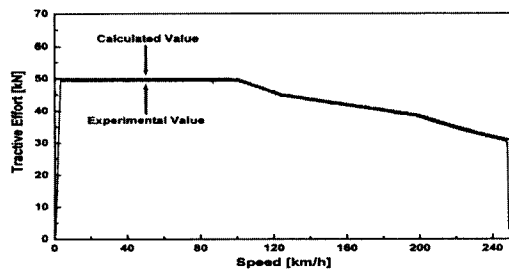


그림 12. 견인력에 대한 계산값과 실제값.
Fig. 12. Calculated and experimental value for tractive effort.

그림 10은 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터 프로그램을 수정한 후에 전동기 전류 파형을 측정 한 결과이다. 인버터에 의한 전동기제어가 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

변압기의 내구성 수명에 큰 영향을 주는 온도특성을 파악하기 위해 변압기 오일과 외함에 온도센서를 붙이고 커넥터를 거쳐 직접 계측장비로 신호를 입력받고 있다.

실제 본선시운전 도중에 그림 11에서 볼 수 있는 것처럼, 동력객차(TM5)에 취부된 변압기(TF3)의 온도가 다른 변압기에 비해 급격하게 상승하였고, 확인해 본 결과 냉각팬이 돌지 않는 것을 확인하였다.

그림 12는 한국형 고속철도를 진건인으로 운행하면서 얻은 시험값을 시뮬레이션한 계산값과 비교해 본 것이다. 진 속도영역에 걸쳐 계산값과 실측값이 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 또한 정토크영역에서 정출력영역으로 바뀌는 속도는 100 km/h 부근으로 나타났다.

3. 결 론

고속전철에 설치되는 추진장치는 차량의 성능에 큰 영향을 주는 장치로, 시운전을 실시하는 도중에 고장이 발생하였을 경우, 고장원인을 정확하게 빠른 시간 내에 진단할 수 있는 것과 성능을 정확히 평가하는 것은 차량의 신뢰성과 안정성 확보를 위해 매우 중요한 일이다.

본 연구에서는 한국형 고속철도 추진장치에 대한 성능평가와 고장진단을 실시하기 위해 개발된 상시계측시스템을 이용하여 추진장치에 대한 고장진단과 성능평가를 실시한 연구결과를 보여준다.

시험결과에서 볼 수 있는 것처럼, 시운전시에 발생 가능한 여러 고장에 대해 본선시운전 운행시, 또는 운행 후의 계측 분석을 통해 고장진단을 정확하게 실시하여 전장품의 안정화에 많은 도움을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 내용은 건설교통부에서 시행한 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고 문헌

[1] R. Marquardt, "High power converter for the new german high speed train ICE", EPE'89, p. 583, 1989.

[2] T. Miyashita, H. Yamaguchi, and N.

Okamoto, "High Power Inverter Locomotives", The Japan Society of Mechanical Engineers, p. 238, 1993.

[3] Wolfgang Runge et. al., "Some aspects of the circuit design of high-power GTO converters", EPE'89, p. 1555, 1989.

[4] J. Ito, Y. Hagiwara, N. Yoshie, "Development of the IGBT applied traction traction system for the series 700 shinkansen high-speed train", International Conference on Developments in Mass Transit System, Conference Publication, IEE, No. 543, p. 25, 1998.

[5] Bin Wu et al., "PWM-CSI inverter for induction motor drives", IEEE Trans on IAS, Vol. 28, No. 1, p. 64, 1992.

[6] Takashi Tsuboi, and Kiyoshi Nakamura, "Control system for traction drives", Hitachi Review, Vol. 35, No. 6, p. 311, 1986.

[7] Paolo Masini and Giovanni Puliatti, "Virtual Acquisition Systems for Global Analysis (VASGA) in Experimentation", WCRR, p. 279, 1997.

[8] 전력변환장치 개발, 고속전철기술개발사업연차보고서, 1999.

[9] 한영재, 김기환, 박춘수, 김 현, 민평오, "고속철도 전기장치의 특성에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, p. 435, 2003.

[10] 김석원, 김영국, 한영재, 박찬경, 김진환, 백광선, "고속철도 시운전시험 계측시스템 개발에 관한 연구", 한국철도학회지, 5권, 3호, p. 158, 2002.

[11] 한영재, 김기환, 박춘수, 최종선, 김정수, "센서를 이용한 전기장치 측정에 관한 연구", 한국센서학회지, 12권, 4호, p. 164, 2003.

[12] 한영재, 김석원, 김영국, 박찬경, 최종선, 김정수, "추진장치 성능측정 시스템에 관한 연구", 한국센서학회지, 12권, 4호, p. 170, 2003.

[13] Y. J. Han, S. I. Seo, K. H. Kim, C. S. Park, T. H. Lee, S. H. Han, and J. Y. Kim, "A study on traction system characteristics of high speed train", ICCAS, p. 1720, 2003.

[14] Y. J. Han, K. H. Kim, S. I. Seo, C. K. Park, S. H. Han, J. Y. Kim, and A. S. Kno, "A study on measurement system for motor block of railway vehicle", p. 1724, ICCAS 2003.