

철도차량용 전기추진장치의 진단시스템 연구

박헌준\*, 김길동, 변윤섭, 한영재, 장동욱  
한국철도기술연구원 차량연구본부

A Study on the Diagnosis system for the propulsion equipment in railway rolling stock

Hyun-June Park, Gil-Dong Kim, Yoon-Sub Byun, Young-Jae Han, Dong-Uk Jang  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - This paper discusses that the maintenance of the propulsion equipment in railway rolling stock. Condition monitoring of railway equipment is the need for integration of remote condition monitoring with maintenance management strategies. The paper outlines research leading to the design and development of a prototype control and monitoring system for propulsion equipment.

1. 서 론

철도차량의 고속화, 고성능화 및 maintenance free의 추구에 따라 철도차량의 경량화와 장수명화를 위한 노력이 이어지면서 인버터 구동 전기추진방식의 도입과 반도체를 활용한 기기류의 전자화·무접점화, 기초 브레이크로서 전기브레이크의 채용 등 가동마모 부분의 제거와 장치의 일체화에 의해 차량 부품의 교체시기가 길어지고 손이 거의 가지 않는 차량시스템의 개발과 도입이 더욱 가속화되고 있는 실정이다. 철도차량의 유지보수도 기술발전에 대응하여 종래의 가동시간기준의 overhaul식 시간계획 보전에서 설비진단기술을 이용하여 설비의 상태를 정량적으로 파악함으로써 최적의 보전을 실시하고자 하는 상태감시 예방보전형으로 전환되는 추세이며, 특히 분해하지 않은 상태에서 기기나 장치의 열화 및 이상상태를 진단하는 비분해 검사와 차량 운행중의 이상검지에 의해 돌발고장을 예방하는 고장감시 기술에 대한 연구가 최근에 주목받으면서 철도운행의 안전성 확보와 차량보전의 효율화를 도모하고 있다.

본 연구에서는 예방진단을 주체로 하는 유지보수체계의 도입과 차량진단분야의 시급한 기반기술 개발을 촉구하면서, 효율적인 상태감시와 이력관리를 통해 차량운행의 안정성과 신뢰성을 확보하고 유지보수 노력 절감 및 합리화를 달성하는데 필수적인 철도차량 전기장치의 고장예방 및 유지관리 자동화 시스템 구축에 필요한 연구로써 향후 철도차량 전장품에 대한 비분해 상태의 이상검지 및 고장진단 자동화를 위한 시스템을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 정기점검 유지보수 체계 검토

현재 운영처의 철도차량 전기장치의 유지보수 활동은 시간기준의 정기점검으로 장치나 부품의 수명주기를 근거로 하여 일률적인 보수, 점검을 실시하고 있어 시간경과에 따른 고장율의 급증과 수명중점에서의 과도한 유지보수 노력의 투입, 예비 부품의 과도한 확보나 적기공급 등의 애로사항이 발생하고 있다.

그리고 노후정도나 열화상태를 고려하지 않고 검사시점에서 양, 부만을 판정하는 획일적인 한계치 관리로 인해 신뢰성 및 고장을 평가하는데 어려움을 겪고 있으며, 또한 고장발생시 정확한 원인분석과 시스템적인 평가없이

단순히 고장부위만을 수리, 교체하는 상황에서 개별이력 경향관리 및 고장분석 부재로 사고재발이 우려되며 돌발고장에 대처할 수 없어 운행 안전성 확보에 어려움을 겪고 있다.

따라서 현행 시간주기 유지보수체계의 기술한계를 극복하고 운행중 돌발사고를 예방하기 위해서는 신뢰성 있는 진단기법 적용과 중요 감시대상에 대한 열화상태 및 경향 관리에 의한 수명주기 분석에 의한 예방진단 유지보수 체계로의 전환이 시급하다.

또한 진단자료의 축적, 운행이력 관리 및 체계적인 고장분석에 의한 손상정도의 파악과 열화판정 기준 확립을 통해 조기에 고장을 검지하고, 고장정보의 상호연계에 의한 단계적 고장대응 체계를 구축하여 사고재발 방지와 차량운행의 안전성을 확보하여야 한다.

그리고 정비절차, 고장판단 및 조치내용 등의 정보화 연계에 의한 자동진단시스템을 구축하여 운전중 사고 가능성을 최소화하기에 충분한 조건의 정비 보증과 유지보수의 필요성과 적절한 투입시기 판단뿐 아니라 운행중단시의 손실 및 보전비용 등의 경제성을 평가할 수 있는 종합적인 유지보수 계획을 시급히 수립하여야 한다.

2.2 전동차 유지보수 현황

현행 전동차 유지보수는 주행거리나 경과년수에 의해 부분적 또는 전반적인 검사·정비를 법으로 규정하여 시간기준에 의해 정기적으로 실시하는 예방보전의 개념을 기반으로 하고 있다. 즉 정기점검을 통해 사용중의 기기를 검사, 수리, 조정 등을 실시하여 기능을 회복하고, 고장 징후를 사전에 파악하여 고장 예방을 도모하고 있다.

표 1. 국내 노선별 전동차 검수규정 비교

		일상검수		월상검수						중간검수			전반검수		
		2일	3일	1개월	2개월	3개월	6개월	18개월	2년	3년	3년	4년	6년		
KNR 서행 제어 차량	적용여부	●		●		●	●	●					●		
	표준사업 키로(km)	500		1만 5천		4만 5천	9만	27만					54만		
KNR 인버터 제어 차량	적용여부	●		●		●			●				●		
	표준사업 키로(km)	1,000				3만		9만					36만	72만	
서울시 지하철 공사	적용여부		●			●				●				●	
	표준사업 키로(km)					3만				30만				60만	
서울시 도시철도 공사	적용여부		●			●					●			●	
	표준사업 키로(km)							4만					40만	80만	
부산 지하철 공사	적용여부	●				●								●	
	표준사업 키로(km)	1,000				3만				30만				60만	
일본	적용여부		●			●							●	●	
	표준사업 키로(km)		2,000			3만							40만	80만	

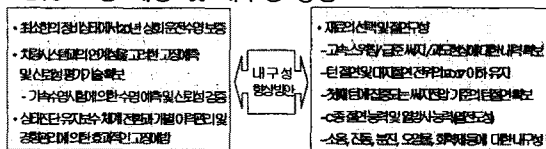
■ 유지보수의 기본 원칙은 다음과 같다.

- ① 규칙적인 정비검사와 시험 프로그램 구축
  - 운전중 사고 가능성을 최소화
  - 충분한 조건의 정비 및 신뢰성 보증
  - 얻어진 경험과 자료는 장치의 현재 상태 평가
  - 장기간의 경향이나 향후 수리 및 교체 필요성 제공
- ② 유지보수시의 시험 구분
  - 현존하는 취약점 또는 사고를 분별하기 위한 시험
  - 예상되는 운전 신뢰성을 지시해 주는 시험
- ③ 시험의 선택
  - 사용자의 철학, 성능기록, 생산성, 경제성 고려
  - 우선, 주의 깊은 육안검사를 통해 상태 확인(속련자에 의한 육안 징후 파악)
  - 다음은 상태 결정에 도움을 주는 가장 적절하고 비용-효과적인 진단 시험법 적용
  - 자동진단장비 및 컴퓨터 프로그램을 이용한 경향파악, 결과분석을 위한 전문가 검토

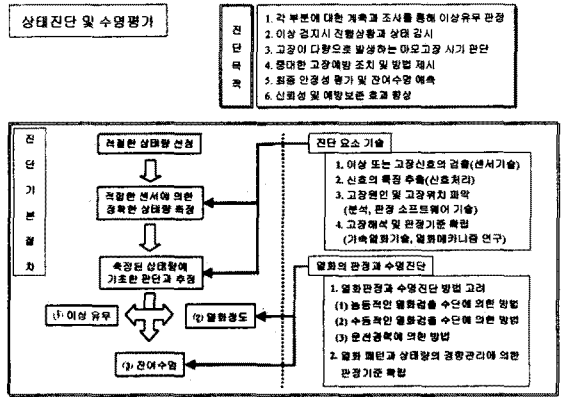
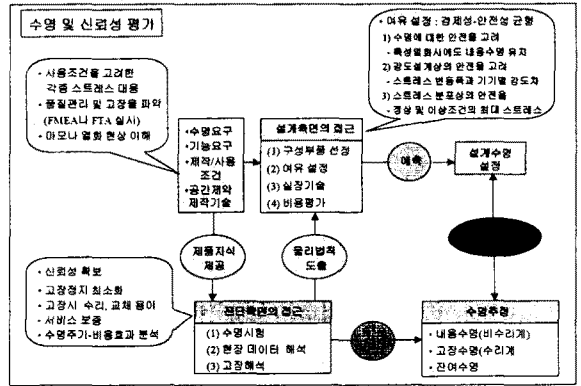
표 2. 주요 전장품의 정기검사 점검항목 및 방법

장치 (종명)	점검항목	방법	비고
파괴기	외관검사	외관검사 손상, 유무 확인	외관검사 (3일)
	절연검사	절연검사(절연저항, 내전압시험)	절연검사 (3년)
고속차단기	외관검사	분해, 마모부품 교환, 접점마모측정	매년검사
건인전동기	외관검사	부품의 풀림상태, 케이블마모, 기름유출 등 외부검사	1개월-1년단위
	분해검사	차량에서 취거후 고정자 재제작업 및 회전자축의 교체 등	400,000k (3년)
	표준 분해검사	기기 외부세척, 분해부품세척 손상/마모상태 확인 베어링검사(절연저항측정) 프레임 및 고정자 건조후 권선절연저항측정 및 내전압 시험	
공기제동장치	보수/분해	각 취부밸브, 코크, 필터를 벨브파이프 브라켓에서 떼고 청소, 검사, 급유	3년
	검사	가스켓변형 및 손상교체	3년, 6년
		가스켓 교체	6년
		전기배선에 단선 및 피복손상	3개월, 3년, 6년
전열 작동불량	3개월, 3년, 6년		
라인필터 인덕터	검사	전기연결장치, 코일, 전선, 인덕터의 손상 및 과열상태	
	수리	보호용그물망, 코일 및 단자 결합체주위의 불필요한 잔여물제거	

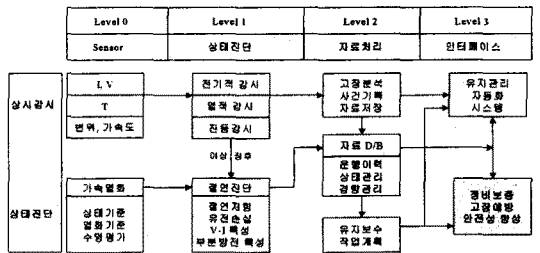
### 2.3 고장 대응 및 내구성 향상



### 2.4 상태진단 및 수명평가



### 2.5 진단시스템 구성



### 2.6 전기추진제어장치에 대한 고장감시제어시스템 구성

- 전동차 중요전기장치에 대해 고장감시 시스템을 구축하여 적용하게 되면
- 1) 연속적 주기적으로 운전 상태를 감시할 수 있고
  - 2) 감시중 돌발적이거나 예상치 못한 변수의 변화를 알 수 있으며
  - 3) 상태분석 및 심각한 상태변화를 지시해 주고
  - 4) 적절한 대응조치 및 운전정지, 수리 시행 등 유지보수 계획의 기반정보를 제공한다.

#### 2.6.1 고장모드별 신호특성

**A. Bearing fault**

■ 정상 내부 동작 stress  
진동, 고유 공진률, 베어링 손실 등

■ 외부적 요인에 의한 베어링 손상

- 오일과 부식
- 부하불균형
- 베어링의 부적절한 설치

■ 진동 스펙트럼 분석(FFT)

- Overbearing race defect  

$$f(Hz) = (N/2) f_r [1 - b_r \cos(\beta) d_r]$$
- Innerbearing race defect  

$$f(Hz) = (N/2) f_r [1 + b_r \cos(\beta) d_r]$$
- Skid defect  

$$f(Hz) = d_r f_r [b_r (1 - b_r \cos(\beta) d_r)^2]$$
- Tran defect  

$$f(Hz) = (f_r/2) [1 - b_r \cos(\beta) d_r]$$

여기서,  $f_r$ : rotational frequency,  $N$ : 볼의 수,  $bd$ : 볼의 직경  
 $d_r$ : ball pitch diameter,  $b_r$ : 볼 접촉각  
 $\beta$ : 축상 진동주파수

■ 3rd Harmonic fault

■ 주요 고장원인

- 오일결핍, 오일단락
- 상전압 불균형
- 감시방법

- 축하중 상분의 주파수 성분분석
- 진동스펙트럼 분석에 의한 고장 고유주파수 찾기  

$$(kn \pm n(1-s)/p) f$$

**D. Eccentricity related fault**

■ 주요 고장 모드

- 정적 공극 편심: 고정자 돌출의 난형성 (ovality)과 고정자와 회전자의 부적절한 위치에 의해서 발생
- 동적 공극 편심: 회전된 회전자 축, 베어링 손상, 부적절한 배치, 특정속도에서 기계적인 공명에서 발생

■ 공극, 동적 편심률의 진동스펙트럼분석(FFT) 결과

$$f = \left[ \frac{1}{2} (k+1) + \frac{1}{2} (k-1) \right] f_r$$

$$R = 2 \left[ \frac{1}{2} (k+1) + \frac{1}{2} (k-1) \right] f_r$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad p = 0, \quad k = 1$$

**C. Broken rotor bar and end-ring fault**

■ 주요 고장원인

- 열적 스트레스: 과부하, hot spot, sparking
- 전자기 스트레스: 전자기력 불균형, magnet pull
- Restult stress (메카닉 응력)
- 기계적 스트레스: 불균형, 불어질, 피로, 베어링결함

■ 진동 스펙트럼 분석(FFT)

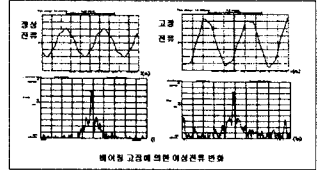
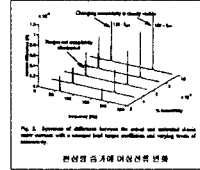
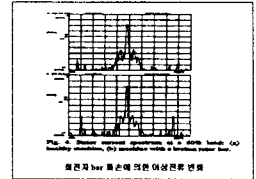
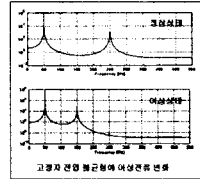
■ 기전력 주파수의 속피대 (sideband) 성분 조사  

$$f_s = (1 \pm 2s) f_r$$

- Lower sideband는 계전하에 기인
- Upper sideband는 연속적인 속도진동에 기인

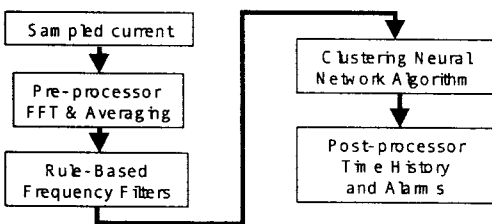
b) 부하중의 영향을 고려한 선형 진동 스펙트럼 분석  

$$f = [k \pm n(1-s)/p] f_r$$



### 3. 결 론

- 2.6.2 진단 및 분석절차
- ① 상태감시(전압, 전류, 전력)
  - ② Rule based frequency filter 사용주파수성분 중요도 분류
  - ③ 규칙에 근거한 모든 가능한 동작조건 훈련
  - ④ 훈련된 부류 이외의 신호는 잠재적 고장
  - ⑤ 고장신호가 지속적으로 관측될 때 경고 발령
  - ⑥ 추진장치의 고장분석 및 성능분석(속도, 토크) 활용



철도차량의 유지보수는 안전한 철도운행을 위한 기본 요소로서 자유도가 적은 선로를 이동하는 철도를 안전함 부터 고효율로 운영하기 위해서는 언제나 이상이 발생하지 않도록 예방적으로 대응해야 하며, 만일 이상이 발생하는 경우에도 신속한 응급대처법의 설정이 기본적인 것이다. 그래서 차량방식, 기구, 사용방식 등에 대응하여 유지보수를 어떻게 합리적으로 적절히 실시하고 안전성, 신뢰성을 확보하고 고장성을 유지하면서 더욱 경제성을 높일 수 있는가에 대해 중요성이 두어지고 있다. 또한 유지보수 작업이 미치는 부정적인 측면, 즉 가동을 저하와 함께 해체·조립이나 시험에 의한 스트레스, 초기상태의 불안정성, 인위적 실수 등을 최소한으로 가져가는 것도 중요한 과제이다.

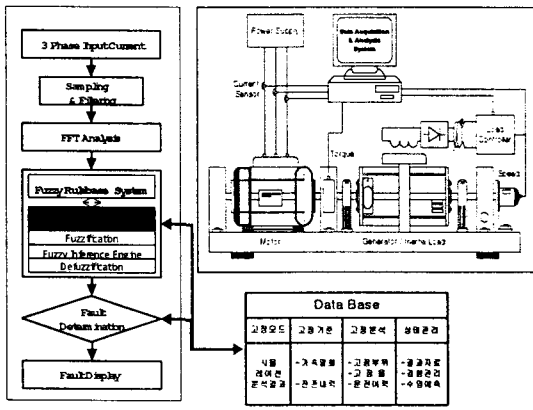
최근 전동차는 power electronics를 적용한 인버터 구동과 각종 장치나 기기의 micro electronics화에 따른 신기술을 채용한 차량 도입에 의해 문제해사를 주제로 하는 정기적인 유지보수는 대폭 경감되었으며, 신뢰성, 내구성이 향상되어 고장빈도가 감소하고 있다. 그러나 고장내용에서는 전자기기 등에서 지금까지 경험하지 못한 새로운 스트레스와 열화형식에 의한 우발고장이 자주 발생하여 정기적인 예방보전 방식으로서의 고장의 예지가 곤란한 상황이며, 이에 대응한 관련기술의 부족으로 고장시 신속한 복구 처리에도 문제점을 드러내고 있다.

따라서 새로운 기술적인 접근방법이 큰 문제로 부각된다. 즉 유지보수 과정에서 신기술 채용에 따른 고장모드 분석, 신뢰성확보 및 시험법 등에 관한 사항에 중점을 둔 연구와 새로운 유지보수 접근방법의 개발이 필요하다.

#### (참 고 문 헌)

- (1) IEEE Std. 432-1992, "Guide for insulation maintenance for rotating electric machinery".
- (2) Austine H. Bonnett, "Analysis of the Impact of PWM Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors", IEEE Trans., on Ind. Appl., Vol.32, No.2
- (3) Hiroshi HATA, Takashi MAEDA & Naoto TAGAWA, "Improvement of insulation test for traction motors", QR of RTRI, Vol.38, No.1, pp.31-35, Mar. 1997
- (4) Austien H. Bonnett, "Available Insulation Systems for PWM Inverter-Fed Motors", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1998.
- (5) A. Jouanne, etc, "Filtering Techniques to Minimize the Effect of long Motors Leads in PWM Inverter-Fed AC Motor Drive System", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.32, No.4, pp.919-925, 1996

### 2.6.3 전기추진제어장치에 대한 고장감시 시스템 구성



### 2.6.4 전동기 고장모드별 전류신호 분석