

철도차량 견인전동기의 상태진단 및 상시감시 기술

왕종배, 홍선호, 김상암, 곽상록

한국철도기술연구원, 안전체계연구그룹

Conditioning diagnosis & on-line monitoring technology on the traction motor for railway rolling stock

Jong-Bae Wang, Seon-Ho Hong, Sang-Am Kim and Sang-Rok Kwak

Railway Safety System Research Group, Korea Railroad Research Institute

Abstract

본 논문에서는 철도차량 견인전동기에 대한 상태진단 및 상시감시 기술에 관하여 소개하였다. 권선의 절연상태 진단을 위한 비파괴 시험법에서는 부분방전량 Q에 대한 평균열화도 \angle 로 표현되는 D-Map에 의해 잔여 절연내력(residual dielectric strength)을 예측하고, 기기의 운전이력측면에서 기동-정지 횟수와 열적, 전기적 및 열싸이클 스트레스 등에 의해 각 열화 인자를 고려한 운전시간에 기반한 N-Y 수명예측을 수행한다. 그리고 견인전동기의 전류에 대한 온라인 상태감시를 통해 베어링 고장, 고정자 및 전기자 고장, 고장 또는 전동기축 손상에 기인하는 비정상 운전상태의 감지를 수행한다

Key Words : Conditioning diagnosis(상태진단), On-line monitoring(상시감시), Traction motor(견인전동기)
Dielectric strength(절연내력), Life estimation(수명예측)

1. 서론

철도차량의 유지보수 방식은 종래의 가동시간 기준의 overhaul식 시간계획 보전에서 설비진단기술을 이용하여 설비의 상태를 정량적으로 파악함으로써 최적의 보전을 실시하고자 하는 상태 감시 보전형으로 전환되는 추세로서, 철도차량 분야의 진단기술도 철도차량의 기술발전에 대응할 수 있는 예방보전형 유지보수 체계로의 전환을 이끌어감으로써 철도 운행의 안전성 확보와 차량 보전의 효율화를 이룰 수 있어야 한다.

일반적으로 철도차량의 진단기술은 차량의 운전 상태에서 감시 제어시스템을 구성하여 이상상태를 감지하는 상태감시기술, 비파괴검사나 비분해검사의 상태정보로부터 설비나 기기의 열화정도 및 잔여수명을 평가할 수 있는 정밀진단기법, 합리적인 유지보수계획을 수립하는 유지관리체계로 정리할 수 있다. 최근 분해하지 않은 상태에서의 기기나 장치의 열화 및 이상상태를 진단하는 비분해 검사

와 차량 운행중의 이상검지에 의해 돌발고장을 예방하는 상시감시 진단기술에 대한 연구가 주목받고 있다.

본고에서는 철도차량 고장진단 및 수명예측 분야의 기술기반을 축적하고 예방적 유지보수 체계로의 전환을 목적으로 하며, 자동검사 수명판정, 차량운행중의 이상검지, 효율적인 상태감시 및 이력관리에 의한 사고예방 등 철도운행의 안정성과 신뢰성 향상 및 유지보수 합리화에 기여할 수 있는 철도차량 견인전동기의 절연시스템에 대한 상태진단 및 상시감시 기술내용과 현장 적용 기법을 소개하고자 한다.

2. 절연진단기술 수명평가

2.1 상태진단 및 수명평가 기본절차

상태진단 및 수명평가의 기본절차는 센서기술에 의존하여 현재 기기나 부품의 상태를 정확히 파악

해야 하며, 진단대상에 대한 고장 및 열화 메카니즘 연구, 고장해석기술, 가속열화기술 및 수명판정 기준의 확립 등이 뒷받침되어야 한다.

표 1은 진단방법 분류로서 장치, 기기를 정지시켜 진단하는 off-line진단과 정지시키지 않고 운전 상태에서 진단하는 on-line 진단으로 나누어진다. 최근에는 상태량을 계측하는 신종 센서의 개발이 진행되면서 모니터링법에 의한 on-line 진단이 점차로 증가하는 추세이다.

표 1. 진단방법의 분류.

진단 방법	on-line 진단	비파괴 시험	열화진단 이상진단 수명진단
		파괴시험	
	off-line 진단	모니터링	
		활성진단	

3. 절연진단 수명평가

3.1 절연진단 수명평가

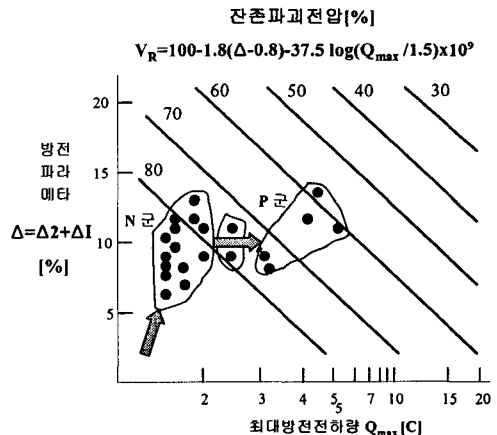
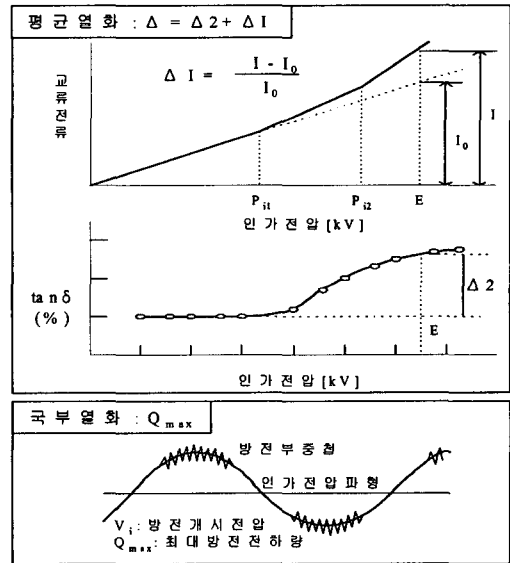
① 비파괴 절연진단에 의한 수명추정

표 2. 비파괴 절연특성치와 진단내용의 상관성

구분	일반 정의	상관성		
		흡수 변질 오손	박리 보이드	국부 이상 열화
$\tan \delta_0$	베이스(1kV) 유전손실	○		
C_0	베이스 정전용량	△	△	
R	절연저항(통상 1분치)	○	△	△
PI	성극지수	○		
$\Delta \tan \delta$	$\tan \delta_E - \tan \delta_0$		○	
$\Delta C/C_0$	용량증가($(C_E - C_0)/C_0$)		○	
Δ	전류증가율($\approx \Delta C/C_0$)		○	
Σnq	평균방전전류		○	△
γ	AIA 부분방전을		○	△
P_{11}	제 1전류 급증전압		○	△
P_{12}	제 2전류 급증전압		○	○
V_i	부분방전개시전압		○	○
q_m	최대방전전하($E/\sqrt{3}$)		○	○

표 2의 절연진단 특성치와 진단내용 사이의 상관성에 근거를 둔 평균열화와 방전열화의 정도로부터 잔존절연내력을 추정하는 그림 1과 같은

Discharge-map에 의해 고압 전동기나 발전기의 수명을 추정하고 있다.



N군 : 국부열화는 적으며, 평균열화가 진행
P군 : 국부열화(보이드 확대)의 큰 진행으로
평균열화 증가

그림 1. Discharge-map 수명추정.

② 운전이력에 근거한 N-Y 수명추정

고압발전기나 전동기의 기동, 정지 횟수와 운전 시간 등의 운전이력과 전기적, 열적 및 기계적인 요인에 의한 열화가 각기 독립적으로 작용할 때의 기준마모량을 가지고 누적효과에 의한 가산으로 전마모량을 구하여 그림 2와 같이 잔존파괴전압

V_R 을 추정하고 있다.

잔존파괴전압=각 열화요인의 곱(복합열화)

$$V_R/V_0 = (V_E/V_0) \times (V_H/V_0) \times (V_T/V_0)$$

V_R : 잔존파괴전압, V_0 : 초기파괴전압

V_E : 파전열화에 의한 잔존파괴전압

V_H : 열충격열화에 의한 잔존파괴전압

V_T : 열열화에 의한 잔존파괴전압

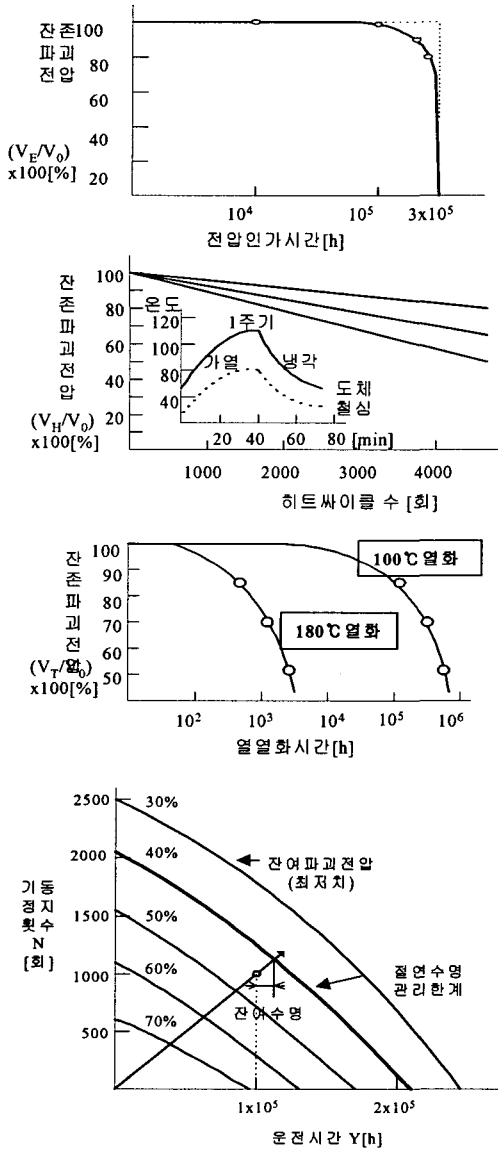
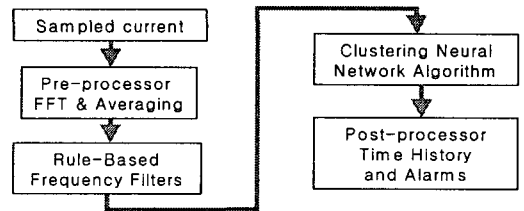


그림 2. 운전이력에 의한 N-Y 수명추정.

3. 상시감시 고장진단

3.1 전동차 추진장치의 상시감시 진단 지동화

인버터-전동기 구성의 전기추진장치에서 커다란 기동전류와 토크요동이 일어나는 운전조건은 엔드 권선, 회전자 및 베어링 고장을 초래하며, 전압 불균형 또한 주로 권선사고의 원인으로서는 비교적 적은 전압 불균형일지라도 매우 큰 전류불균형을 초래할 수 있다. 그림 4는 전기추진장치의 구동장치와 전동기사이 선전류에서 고장과 연관된 특정 고조파성분의 전류신호해석(MCSA)에 의한 고장진단과 인공지능경망(ANN), 퍼지 또는 뉴럴-퍼지시스템과 같은 인공지능기법들이 기기의 고장진단과 조건감시를 절차를 제시하고 있다.



- 1) 상태감시(전압, 전류, 전력)
- 2) Rule based frequency filter 사용, 주파수 성분 중요도 분류
- 3) 규칙에 근거하여 기기의 모든 가능한 동작조건 훈련(인공지능경망(ANN), 퍼지 또는 뉴럴-퍼지시스템 적용)
- 4) 훈련된 부류 이외의 스펙트럼 신호는 잠재적인 고장 표시
- 5) 고장신호가 지속적으로 관측될 때 경고 발령
- 6) 추진장치의 고장분석 및 성능분석(속도, 토크)

3.2 고장모드별 전류특성신호 분석

- 1) 베어링 결함의 특성주파수
 - ① Outer bearing race defect
 $f_v[Hz] = (N/2)f_r[1 - b_d \cos(\beta)/d_p]$
 - ② Inner bearing race defect
 $f_v[Hz] = (N/2)f_r[1 + b_d \cos(\beta)/d_p]$
 - ③ Ball defect
 $f_v[Hz] = d_p f_r / b_d \{1 - [b_d \cos(\beta)/d_p]^2\}$

④ Train defect

$$f_v[Hz] = (f_r/2)f_r[1 - b_d \cos(\beta)/d_p]$$

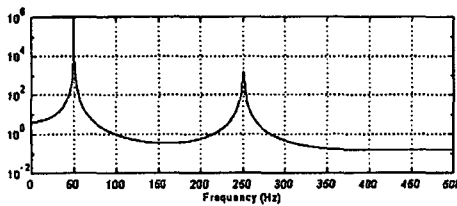
여기서, f_r : rotational frequency, N : 불의 수,
 b_d : 불 직경, d_p : 불피치 직경, β : 불 접촉각

2) 고정자 및 회전자 결합의 특성주파수

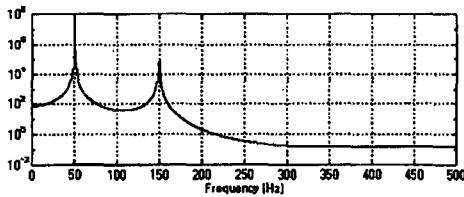
전동기의 사분면에 대칭으로 4개의 코일을 설치하여 축자속 성분 검출에 의한 고장 주파수성분은

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

여기서 p : 쌍극수, f : 주 주파수, $k=1,3, \dots$,
 $n=1,2,3, \dots(2p-1)$



(a) 정상상태



(b) 이상상태

그림 3. 고정자 전압불균형에 의한 이상전류 변화.

3) 회전자바와 end-ring 파손의 특성주파수

깨진바(bar) 고장을 검출을 위한 기본파 주변의 측파대(sideband)성분은

$$f_b = (1 \pm 2s)f$$

고정자 선전류에서 관측되는 스펙트럼 성분

$$f_b = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right] f$$

여기서 f_b : 검출 가능한 깨진바(bar) 주파수,
 $k/p=1,3,5, \dots$

4) 편심 관련 특성 주파수

정적 및 동적 편심 존재시 주파수 성분

$$f_e = f \left[(kR \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm v \right]$$

여기서, 정적 편심률에서 $n_d=0$, 동적 편심률에서 $n_d=1,2,3, \dots$, n_d : 편심률 차수, f : 기본 공급 주파수, R : 회전자 슬롯의 수, s : slip, p : pole pair의 수, k : 정수, v : 공급전력의 시간고조파의 차수 ($v=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$)

예를 들면 3ph, 조합 슬롯, 60도 상 벨트 기기에 대한 관계는 다음으로 주어진다.

$$R = 2p[3(m \pm q) \pm r] \pm k$$

여기서 $m \pm q=0,1,2,3, \dots$, $r=0$ 또는 1, $k=1$

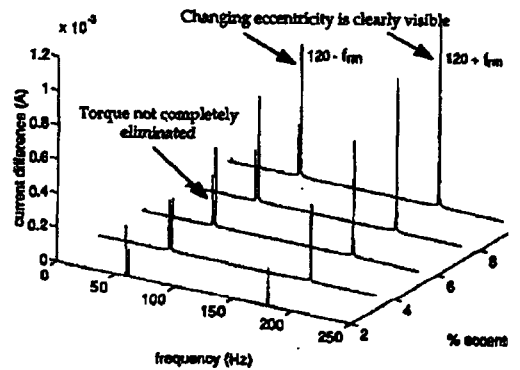


그림 4. 편심량 증가에 따른 이상전류 변화.

4. 결론

본 논문에서 검토된 철도차량 중요 전기장치에 대한 절연시스템의 상태진단과 체계적인 운전이력 관리에 의해 수명예측을 통한 예방보전 체계로의 전환을 기대하고, 또한 중요장치에 대한 상시감시 시스템을 구성하여 사전 고장검지 및 고장정보의 상호연계에 의한 단계적 대응을 효율적으로 수행할 수 있는 운전상태에서의 온라인 고장진단 기법의 철도분야 도입 가능성을 검토하였다.

참고 문헌

[1] 왕종배, “철도차량 진단기술 동향”, 한국철도기술 25호, 20001.
 [2] 왕종배 외, “전동차 전기추진장치의 고장예방 및 유지관리자동화시스템 기술개발”, 한국철도기술연구원 기술보고서, 2001.