철도차량 견인전동기의 상태진단 및 상시감시 기술

Condition Diagnosis & On-line Monitoring Technology on the Traction Motor for Railway Rolling Stock

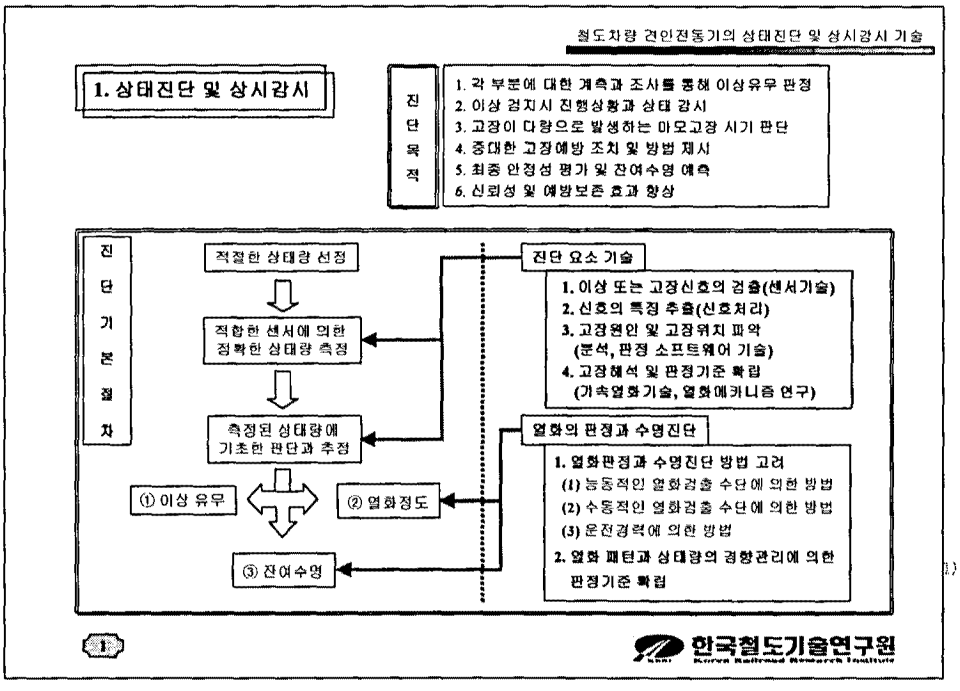
왕종배*, 변윤섭**, 백종현**

(Jong-Bae Wang*, Yeun-Sub Byun**, Jong-Hyun Baek**)

Abstract

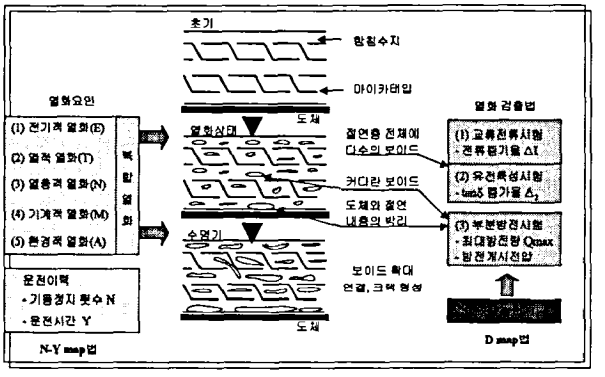
This paper presents the technology of condition diagnosis & life estimation on insulation system of the traction motor. In the non-destructive methods for diagnosis of coil insulation state, residual dielectric strength is estimated by the D-map which consist of the partial discharge quantity Q and average degradation degree Δ. In the operating history of machine, the N-Y life estimation method is based on the stop-starting numbers and operating times with considering each degradation factor by the thermal, electrical and heat-cycle stress. With the on-line conditioning monitoring on the currents of traction motors, detecting the abnormal operating state due to bearing faults, stator or armature faults, eccentricity related faults and broken rotor bars can be performed.

Key Words : Condition diagnosis(상태진단), On-line monitoring(상시감시), Traction motor (견인전동기), Non-destructivem methods(비파괴법), Operating history(운전이력)



* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원
(Fax: 0343-461-8561, E-mail : jbwang@krri.re.kr)
** 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원

2. 전동기 열화 분석 및 운전수명 추정



2. 전동기 열화 분석 및 운전수명 추정

(1) N-Y 수명 추정

잔존파괴전압=각 열화요인의 곱(복합열화)

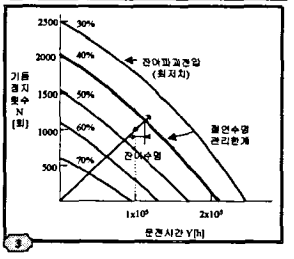
$V_R/V_0=(V_E/V_0)\times(V_N/V_0)\times(V_T/V_0)$

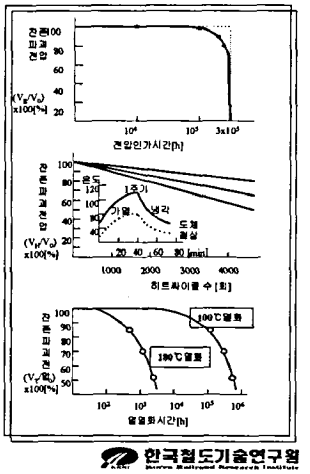
V_R: 잔존파괴전압, V_0: 초기파괴전압

V_E: 과전열화에 의한 잔존파괴전압

V_N: 열응력열화에 의한 잔존파괴전압

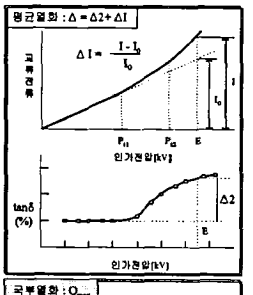
V_T: 열열화에 의한 잔존파괴전압

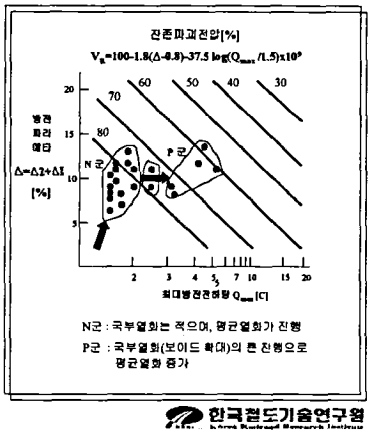




2. 전동기 열화 분석 및 운전수명 추정

(2) 비파괴 진단에 의한 수명추정(D-map법)





3. 상시감시 고장진단

상시감시 고장진단의 적용

1. 연속적 주기적으로 운전 상태 감시
2. 감시중 돌발적이거나 예상치 못한 변수의 변화
3. 상태분석 및 심각한 상태변화 지시
4. 적절한 대응조치 및 운전정지, 수리 시행 등 유지보수 계획의 기반정보 제공

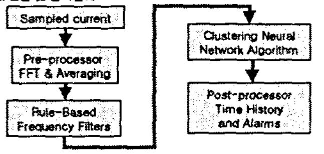
상시감시 진단방법

고장모드 및 고장원인 분석을 위한 조합방식 적용

1. 전자기적 방법 :
   - 전류감시 및 신호해석(MCSA)
   - 써지시험 권선진단(직류고전압 및 고주파 써지)
   - 부분방전감시, 누설자속(엔드권선, 축누설) 감시
   - 공극토크 전자계 감시, 전력 및 성능감시
2. 기계적 방법 :
   - 진동감시
   - 충격펄스감시
   - 음향방출감시
   - 속도요동 감시
3. 기타방법 : 온도법, 기름입자법, 가스분석법

상시감시 및 진단분석 자동화

1. 시험구성
   - 주전원- 인버터(컨버터)-전동기 연결
   - 전압, 전류, 전력, 자속 및 진동 감시 등 변환기 부착
   - 분석장비 : 범용신호분석기 및 Dynamic 신호분석기 다채널 FFT 스펙트럼/네트웍 분석기(주파수 0-100kHz)
   - 타코 발전기 및 토크메타
   - PC 자료 제어 : 고장분석, 성능분석(역율, 효율)
2. 진단 및 분석절차



1) 상태감시(전압, 전류, 전력)
2) Rule based frequency filter 사용, 주파수 성분 중요도 분류
3) 규칙에 근거하여 기기의 모든 가능한 동작조건 훈련 (인공신경망(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) 활용

3.1 고장모드별 신호분석

A. Bearing faults

■ 정상 내부 동작 stress
진동, 고유 편심률, 베어링 전류 등

■ 외부적 요인에 의한 베어링 손상
a) 오염과 부식
b) 부적절한 윤활
c) 베어링의 부적절한 설치

■ 전류 스펙트럼 분석(MCSA)

1) Outer bearing race defect

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

2) Inner bearing race defect

$$f_i[Hz] = (N/2)f_r[1 + b_d\cos(\beta)/d_p]$$

3) Ball defect

$$f_b[Hz] = d_p f_r / b_d\{1 - [b_d\cos(\beta)/d_p]^2\}$$

4) Train defect

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

여기서, fr : rotational frequency, N: 볼의 수, bd: 볼의 직경
dp : ball pitch diameter, β : 볼 접촉각
fv : 특성 진동주파수

B. Stator or armature faults

■ 주요 고장요인
a) 상접지, 턴간단락
b) 상전압 불균형

■ 감시방법
a) 축자속 성분의 주파수 성분분석
b) 전류스펙트럼 분석에 의한 결함 고유주파수 탐지

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

D. Eccentricity related faults

■ 주요고장 모드
a) 정적 공극 편심 : 고정자 철심의 난형성(ovality)과 고정자와 회전자의 부적절한 위치에 의해서 발생
b) 동적 공극 편심 : 휘어진 회전자축, 베어링손상 부적절한 배치, 특정속도에서 기계적인 공명에서 발생

■ 정적, 동적 편심률의 전류스펙트럼분석(MCSA) 검출

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

3상, 60도 상 벨트에서

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

$$m \pm q = 0, 1, 2, 3 \ldots, \quad r = 0 \quad k = 1$$

C. Broken rotor bar and end-ring faults

■ 주요 고장원인
a) 열적 스트레스 : 과부하, hot spot, sparking
b) 전자기 스트레스 : 전자기력 불균형, magnetic pull
c) Residual stress(제작상 결함)
d) 기계적 스트레스 : 적층판 늘어짐, 피로, 베어링결함

■ 전류 스펙트럼 분석(MCSA)
a) 기본파 주변의 측파대(sideband)성분 조사

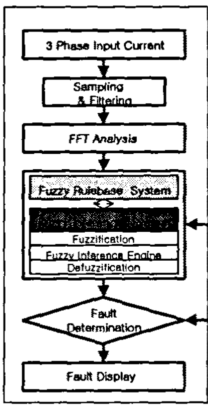
$$f_b = (1 \pm 2s)f$$

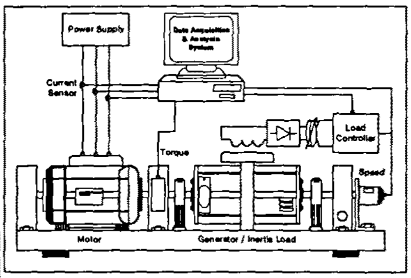
- Lower sideband는 결전에 기인
- Upper sideband는 연속적인 속도진동에 기인

b) 부하관성의 영향을 고려한 선전류 스펙트럼 분석

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

3.2 상시감시 시스템 구성

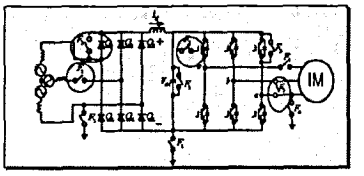


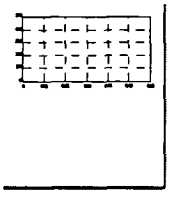


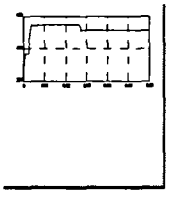
Data Base			
고장모드	고장기준	고장분석	상태관리
시뮬레이션 분석결과	-가속열화 -진단내력	-고장부위 -고장률 -운전이력	-결과자료 -경향관리 -수명예측

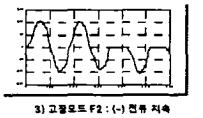
3.3 고장 분석 시뮬레이션

고장모드	
F1	1) 정류 다이오드 단락 2) 교류입력단 개방
F2	3) IGBT 구동부 단락
F5	4) 전동기 입력단 선간 단락

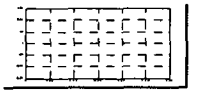






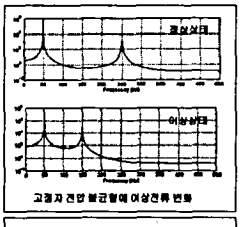


3) 고장모드 F2 : (-) 전류 저속

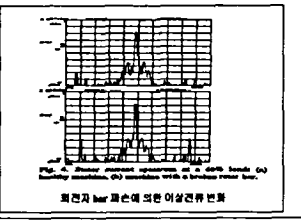


1) 고장모드 F1 : 0 전압 발생　　2) 고장모드 F1 : 부족전압 발생　　4) 고장모드 F5 : 1상 정상, 2상 동상 크기 저하

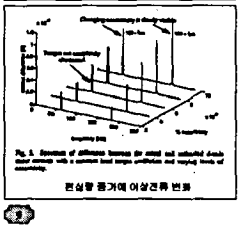
3.4 전동기 전류신호 고장분석 사례



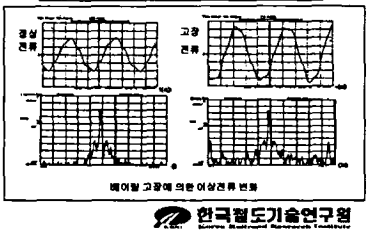
고정자 권선 불균형에 이상전류 변동



회전자 bar 파손에 의한 이상전류변동



편심량 증가에 이상전류 변동



베어링 고장에 의한 이상전류 변동

4. 결 론

□ 전동차 추진제어시스템(인버터-견인전동기)의 새로운 운전제어기술 및 스트레스 파악 미비
1) 인버터-견인전동기 구성의 추진제어장치 표준화 추세
2) 차량운행중 경험하는 열화요인 및 스트레스분석 미비
3) 고속스위칭 전력반도체의 적용에 따른 문제점 노출
- 급격한 고속 스위칭 과도현상
- 고조파에 의한 온도상승과 장해
- 전도성과 방사성의 전자방해(EMI)
- 전동기 권선절연의 복합열화 스트레스 증가
- 전동기 축전압과 베어링 전류 등의 장해 초래
4) 운전중 돌발고장과 수명단축의 위험성 상각

□ 정기점검 유지보수 체계의 한계 노출
1) 시간기준의 장치나 부품단위 정기점검과 보수
- 이상유무만을 판정하는 한계치 관리
- 고장발생시 시스템적인 명가없는 수리, 교체
- 개별이력 경향관리 및 고장분석 부재, 사고재발 우려
2) 수명주기 도래시 고장율의 급증으로 과다한 유지보수 노력의 투여와 적기 부품공급의 차질
3) 돌발고장에 대처 능력 결여와 운행 안전성 저해 우려

□ 상태진단에 의한 고장분석 시스템 도입
1) 상태진단 예방보전체계 구축에 의한 열화경향 관리
- 신뢰성 있는 상태진단기법 적용
- 중요 감시대상에 대한 상태관리
2) 체계적인 고장분석에 의한 수명예측
- 진단자료의 축적 및 운영이력 관리
- 손상 정도 및 열화판정 기준 확립
3) 중요장치 상시감시시스템 구성에 의한 사전 고장검지
4) 고장정보의 상호연계에 의한 단계적 고장대응 체계 구축

□ 유지보수 정보화 관리체계에 의한 고장감소 대책 수립
1) 진단 자동화 설비 도입
2) 체계적인 이력관리, 시험관리 및 분석 자료의 D/B 구축
3) 유지관리 자동화, 정보화 시스템 구축
- 차량 표준부품의 계층구조 정보화 관리
(수급관리, 재고관리 및 기술정보 제공)
- 고장진단 자동화 시스템 구축에 의한 정비보증
4) 취약점 도출과 품질개선에 의한 고장율 저감