

## 철도용 전기기기의 고장요인 및 절연열화 분석

### Analysis of fault cause & insulation degradation on the electrical equipments for railway

왕중배\*, 전한준, 박옥정, 온정근  
( J. B. Wang, H. J. Jeun, O. J. Park, J. G. Ohn )

#### Abstract

Electrical equipment for railway is always experiencing wear and degradation by mechanical, electrical and environmental stress in service and the fault or the accident of high voltage main circuit directly causes operation interruption. Particularly propulsion drive of high speed switching inverter takes the form of specific degradation mechanism such as fast rising transient surge, reflective overvoltage and harmonic stress, and it is known that it threatens the long life and the reliability of electrical equipment. In this paper, statistics of fault and accident on main electrical equipment for railway are presented and also insulation degradation mechanism, which governs end life of electrical device, is analyzed. Finally the method of fault response and reliability improvement on the main electrical equipments will be reviewed in order to prevent operation interruption.

**Key Words** : Fault cause analysis, Insulation degradation, Operation interruption  
Electrical Propulsion System, Reliability improving

#### 1. 서 론

현재 국내 전기철도는 안전성을 제일의 목표로 하면서 환경 친화성을 추구하는 단계적인 전철화 사업을 추진하고 있으며, 또한 최근 대전력 인버터의 성능개선과 효율적인 VVVF 운전제어 기술의 발달로 인버터-전인전동기 구성의 최신 차량시스템이 도입되어 속도제어가 용이한 고효율 운전이 가능하고, 빈번한 기동과 정지에 따른 과부하와 전원의 급변에도 잘 견딜 수 있는 전기적 특성을 구비하면서 열악한 운전환경(진동, 고온, 먼지, 철분, 기름 등)과 최소한의 정비상태에서도 20년을 상회하는 운전수명을 보장하는 운행안전성, 정시성 및 쾌적성을 확보하고 있다.

철도용 전기기기는 차량운행 중 기계적, 전기적, 환경적 스트레스에 의한 마모 및 열화를 항상 경험하고 있으며, 고전압 주회로 계통의 사고나 고장은 곧바로 열차의 운전정지를 초래하고, 계전기나 스위치류의 고장도 연계되어 있는 판토타그래프 상승, 주차단기 투입, 냉반방 제어, 운전실의 제어동작 불능 등을 초래하여 열차의 운전정지로 이어진다. 특히 고속스위칭 인버터에 의한 추진제어장치의 구동은 급준과도 썬지, 반사파 과전압 및 고조파 스트레스가 더해지는 독특한 열화메카니즘으로 차량전기장치의 장기수명과 신뢰성을 크게 위협하는 것으로 알려지고 있다.

본 논문에서는 철도 전기계통의 주요 장치 및 구성품에 대한 고장사고 요인분석과, 특히 전기기기의 최종수명을 지배하는 절연열화 요인 및 열화기구 분석을 통해 열차의 운전정지를 미연에 방지할 수 있는 철도용 주요 전기기기에 대한 고장대응 및 신뢰성 향상 방안에 대하여 소개하고자 한다.

\* 한국철도기술연구원 철도안전성능시험인증센터  
(경기도 의왕시 월암동 374-1 한국철도기술연구원  
Fax: 031-461-7651  
E-mail: jbwang@krri.re.kr)

## 2. 철도전기기관의 고장발생 현황

### 2.1 전기철도차량의 고장발생 현황

국내 전동차량 고장사례를 분석해 보면 전체 고장 요인중 전기장치가 큰 비율을 점유하고 있으며, 다음으로 제동장치와 연관된 공기계통의 고장이 다수를 차지하며, 차체부의 고장도 나타나고 있다.

우선 전동차의 원인별 고장현황은 표 1과 같으며, 고장원인으로는 우선 재질불량 및 재질노후로 인한 고장이 많이 발생하였다.

다음으로 계통별 고장발생은 전기계통 고장이 전체 고장의 절반을 차지하고 있다. 그 고장원인을 추적해보면 과열, 진동, 충격, 흡습, 마모 등 전기장치나 부품자체의 열화나 고장에 의한 것보다는 외부의 기계적, 환경적 요인에 의해 고장이 시작되어 최종적으로는 전기계통에서 발생하는 경우가 많다.

그리고 계절별 고장은 하절기에 가장 많이 발생하고 있는데 이는 외기온도상승과 냉방장치 가동에 의한 과부하 및 과열에 의한 고장, 폭우 및 우기시 습기로 인한 접지나 누수 고장이 발생하고 있다. 그리고 동절기에는 설해나 냉해로 인한 고장이나 기온급강하에 의한 공기배관이나 고무제품 문제로 인한 제동장치나 출입문 등의 고장이 발생하였으며, 또한 5월 봄철 개화기에는 꽃가루 비산으로 주변압기 냉각계통이나 주정류기의 필터폐쇄 등으로 인한 고장이 다수 발생하고 있다.

표 1. 수도권 전동차 원인별 고장 발생 현황

구분	재질 결합	재질 노후	검수 불량	취급 불량	원인 불명	기타	계
'95년	20	15	5	6	3	13	62
'96년	16	13	7	2	6	14	58
'97년	8	7	6	1	4	20	46
'98년	4	4	3	-	-	19	30
'99년	7	-	1	1	1	8	18
계	55	39	22	10	14	74	214
%	25.7	18.2	10.3	4.7	6.5	34.6	

### 2.2 전기기관의 고장발생 및 대책

전기계통의 고장 중에서 고전압 및 주회로 계통의 사고는 곧바로 전동차의 운전정지를 초래하게 되는데, 표 3은 전기계통의 장치나 기기별 고장내용과 방지대책을 요약한 것이다. 여기서 판토타프, 피뢰기, 필터리액터, 주변환장치, 견인전동기로 구성되는 주회로 계통의 고장은 곧바로 열차의 운전정지를 초

래하는 중대 사고를 일으키며, 보조회로계통에서도 보조전원장치나 축전지 등의 고장으로 주변환장치의 정지나 고장을 유발하고 있다. 또한 계전기나 스위치류의 고장은 연계되어 있는 판토타프 상승, 주차단기 투입, 냉반방 제어, 운전실 제어 동작을 할 수 없게 되어 열차의 운전정지로 이어지고 있다.

표 3. 전동차 중요 전기장치의 고장내용 및 대책

장치명	고장내용	대책
판토타프	공기관 애자파손 수분유입, 절연과피	절연저항, 내전압시험 진단시험 도입
계기용 변압기	내부코일 단락 소손, 애자파손	절연저항, 내전압시험 온도측정, 절연유 시험 권선충간절연시험 진단시험 도입
피뢰기	절연과피	절연저항, 내전압시험 진단시험 도입
견인 전동기	전기자/계자 접지 베어링 고착/파손	절연저항, 내전압시험 진단시험 도입 베어링 점검철거
주차단 기	진공밸브 절연과피 차단불능	진공밸브 진공도 시험 절연저항 내전압시험 차단회로 성능점검
주변환 장치	스너버저항열파손 전력소자, FD단락 축전지 전압강하 오동작, 카드불량	방열대책, 과열검지 절연판부착 지락 방지 충전상태 및 전류 점검 노이즈방지 기능점검
보조 전원 장치	스너버저항 지락 전력소자 단락 축전지 전압강하 오동작, 카드불량	내부수분유입/응결방지 절연판부착 지락방지 기능점검,기동전압점검 노이즈 방지 기능점검
변압기 및 리액터 류	경년열화, 크랙발생 과대발열, 수분유입 권선접지, 소손	절연확보 중점 시험 -절연저항, 내전압시험 진단시험 도입
스위치 류	캠스위치 접촉불량 스프링파손	품질보증, 점검철거
계전기 류	접점마모,가동불량 코일단선,몰딩크랙	절연저항, 내전압시험 크랙유무, 기능점검

## 3. 주요기기의 절연열화 요인 및 고장분석

그림 1은 철도 전기기관의 절연열화 및 파괴기구를 분석한 것으로서, 절연물의 열화는 운전중에 받는 각종 스트레스에 따라 열화의 패턴이 달라지게 되며, 이에 따라 유지보수방법도 달라지게 된다.

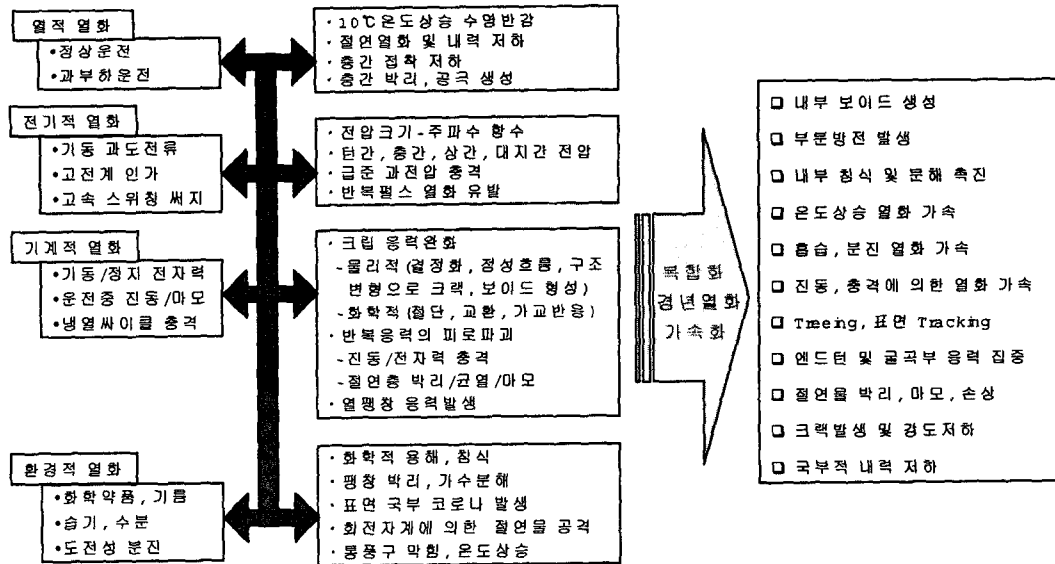


그림 1. 철도용 전기기기의 절연열화 요인 및 파괴기구 분석

### 3.1 직류전동기의 열화요인 및 고장분석

(1) 전기기관차용 직류전동기의 고장원인 분석  
 표 4는 전기기관차용 직류기기의 고장발생을 분석한 것으로서, 높은 맥류율 및 스위칭 써지전압 과다에 의한 계자 불량과 정류자 편심, 정류불량, 공전발생 등에 의한 전기자 불량으로 크게 나눌 수 있다. 특히 계자부분의 소손 원인으로서는 과도부하 운전, 맥류에 의한 정류악화 및 스위칭 과도써지가 문제로 분석되고 있다.

표 4. 전기기관차용 직류전동기 고장발생 원인분석

고장발생	고장원인	고장분석
계자소손	<ul style="list-style-type: none"> <li>과도부하(전인량과다)</li> <li>높은 맥류율(정류악화)</li> <li>과도 써지(Thyristor 스위칭)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>운전특성분석: 빈번한 기동/정지, 구배운전 및 급격한 부하변동 등 과부하 운전지속</li> <li>정류회로 특성해석: 맥류 및 고조파 전류성분 과다, 온도상승 원인</li> <li>구동회로 및 전동기 입력 분석: 전자점동시 점동각 차이발생, 스위칭 과도써지 전압 발생</li> </ul>
전기자 불량	<ul style="list-style-type: none"> <li>점지고장(빔, 분진)</li> <li>정류자 편심(Flashover)</li> <li>정류불량(절연파괴)</li> <li>출발공전발생(구배기동)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>맥류유입, 정류불량, 편심진행 및 아크발생</li> <li>구배기동: 대전류 발생 및 전류급변 이상 진동 유발, 정류악화</li> <li>공전 약계지시: 정류불량 및 불꽃과다 브러쉬 부근 열악 발생</li> </ul>

#### (2) 내구성 향상방안

전기기관차용 견인전동기의 열화특성 분석, 운전 특성분석, 검수방법 및 유지보수상의 문제점 분석을 통해 다음과 같은 내구성 향상 방안이 필요하다.

- 가혹 운행조건(급구배, 기동정지 빈번, 출발공전, 전인량과다)을 고려한 전인정수 및 내구수명의 재산정과 단시간 시험정격 적용
- 정류특성 향상에 의한 맥류율 저감
- 온도상승 및 과전압 열화에 대응 코일절연 보강
- 공전방지 운전제어 및 외부 이물질 유입 방지

### 3.2 유도전동기 열화요인 및 고장분석

(1) 전동차용 유도전동기의 고장원인 분석  
 견인전동기 사고 중 절연파괴가 많은 비율을 점유하고 있는데 이는 부분방전을 포함한 절연열화와 관련된 사고발생기구가 지배적이다.

표 5. 전동차용 견인유도전동기 고장발생 원인분석

고장발생	고장원인	고장분석
고정자 권선	<ul style="list-style-type: none"> <li>단자 과전압</li> <li>높은 dv/dt</li> <li>빠른 상승시간</li> <li>반사파 공진</li> <li>고조파 유입</li> <li>온도상승</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>전동기 단자의 과전압 분석</li> <li>고속 스위칭의 큰 dv/dt, 빠른 상승시간</li> <li>권선 초입부 전압 집중, 부분방전 유발</li> <li>인버터-전동기 케이블 공진에 의한 반사파 과전압 추가</li> <li>인버터 구동 운전특성 분석</li> <li>고속 one pulse운전: 저차 고조파, 동손증가</li> <li>지속 PWM 운전: 고차고조파 deep bar effect</li> <li>고조파 토오크 발생, 진동 유발</li> </ul>
베어링	<ul style="list-style-type: none"> <li>속전압 유입</li> <li>부분방전 &amp; 절연파괴</li> <li>점지 전류 회귀</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>높은 dv/dt로 권동기 축전압 상승</li> <li>과전류 유입으로 베어링 절연 파괴</li> <li>절연피막 절연파괴, 베어링 손상</li> <li>점지 전류</li> <li>높은 dv/dt로 점지 도체부 회귀전류 발생</li> </ul>

특히 고속 스위칭에 의한 과도전압과 빠른 상승시간을 가진 반복적인 썬지 과전압은 인버터와 전동기를 연결하는 케이블 공진현상에 의해 배가되어 정현파 구동시에 예상할 수 없었던 매우 커다란 스트레스를 절연시스템에 인가하게 되어 견인전동기의 성능특성과 예상수명에 심각한 영향을 미치고 있다.

② 누설전류측정 : 피뢰기의 상시전류는 대부분 용량성이며 저항분 전류는 일반적으로 수  $\mu$ A~수십  $\mu$ A의 오더이기 때문에 발열은 거의 없고 긴 수명이 기대된다. 그러나 소자 및 지지절연물 등의 열화, 흡습의 경향을 보기 위하여 누설전류를 측정하는 것이 바람직하다.

(2) Surge 전압 대책

발생	Surge 대책		구체적인 대책	
	최대치	급준도 (dV/dt)	최대치	급준도 (dV/dt)
인버터측	억 제	억 제	Surge-absorber (콘덴서) 과전압Clipper	Snapper
전동기측	내전압 상승	내준도 상승	상간절연강화 대지간절연강화	코일간절연강화 코일간전압분담 평간화
			기설전동기의 인버터 구동화 절연강화(사용 10년 이상) 코일교체(사용 20년 이상)	
기타	상승시 키지 않음	억 제	직렬리액터 승압변압기설치 Damping 회로 케이블 길이	Filter

3.3 피뢰기의 열화요인 및 고장분석

(1) 피뢰기의 열화현상

교·직류 구간을 운행하는 전동차에서 직류구간의 회로상태로 교류구간에 진입시 피뢰기가 방전하여 (-)측에 설치되어 있는 교류 모진보호계전기(ArrOCR)를 동작시켜 주차단기를 차단하여 기기를 보호하는 역할을 수행한다. 전동차용 직류 피뢰기의 열화진전과 사고패턴을 그림 2에 나타낸다.

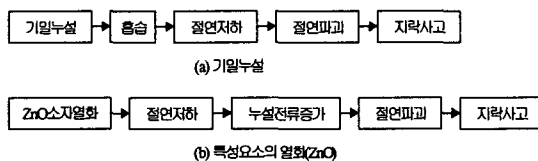


그림 2. 피뢰기의 열화진전 기구

(2) 피뢰기의 열화진단

점검은 절연저항, 누설전류 등의 측정시험이 주체가 되며, 정밀점검은 이상이 발견된 경우에 필요에 따라 방전개시전압이나 동작개시전압을 측정한다.

① 절연저항측정: 피뢰기의 현장시험으로서 1,00MV를 사용하여 ZnO 소자 및 지지절연물 등 특성요소의 저항치를 측정한다.

4. 결 론

현행 시간주기 유지보수체계의 기술한계를 극복하고 운행중 돌발사고를 예방하기 위해서는 철도용 전기기에 대한 신뢰성 있는 진단기법 적용과 중요 감시대상에 대한 열화경향 관리에 의한 예방진단 유지보수 체계로의 전환이 시급하다. 그리고 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 개량보전을 통해 차량운행의 안전성과 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다.

참고 문헌

[1] 한국철도기술연구원, "추진제어장치연구개발(전동차 AC견인전동기 표준설계)", '99 건설교통부 도시철도 차량 표준화,국산화 연구보고서, pp.78-180, 1999. 12.  
 [2] 한국철도기술연구원, "전기기관차 운용에 관한 최적화 방안 연구(견인전동기 운용의 효율화 방안)", '97 철도청 연구보고서, pp.104-124, 1997. 11.  
 [3] 이준웅외 5인, "복합열화에 의한 형권 고정자 권선의 절연신뢰성에 관한 연구" 한국전기전자재료학회 2000년 하계학술대회 논문집-유기절연재료, pp. 152-155, 2000. 7.  
 [4] 왕중배외 2인, "인버터 구동 유도전동기의 절연 열화특성검토", 한국철도기술 '98. 17호, 1998.  
 [5] 인버터썬지 절연조사전문위원회, "인버터 썬지의 절연 시스템에 미치는 영향", 日本電氣學會技術報告, 第 739 号, 1998. 8.