

# 직류 전철 계통의 정류기용 몰드변압기 안전성에 관한 연구

## The safety Properties of Rectifier Mold Transformer for DC Railway System

주현정\*  
Joo, Hyun-Jung

박현준\*\*  
Park, Hyun-June

김경화\*\*\*  
Kim, Kyeong-Hwa

---

### ABSTRACT

Electric railroad transformer of a supply of Operation power of DC electric cars is intense Fluctuation of load and flows the only big short-circuit current as a accident of the power system. it is a peculiarity more severe than general power transformer.

Consequently, researches the properties about the rectifier mold transformer of DC substation and applies with data of safety of the electric railroad transformer.

This paper analyzed a failure mode, the accident occurrence scenario and the be latent dangerous unit against the rectifier mold transformer of DC railway system.

---

### 1. 서론

1974년 8월 15일 서울지하철 1호선이 개통된 이래 지하철은 타 교통수단과 비교하여 환경 친화성, 에너지이용의 효율성, 속도의 향상, 수송능력의 증강 등으로 타 교통수단과의 경쟁력을 확보할 수 있어 대중교통수단으로서 도시교통난과 공해문제 해결에 결정적 역할을 하고 있다. 그러나 고장 또는 장애 발생 시 해당선로 구간 전체가 운행이 불가능 하게되어 이용고객에게 큰 불편을 주게되며 특히 R-H 시간대에 사고가 발생하게 될 경우 인접한 타 교통수단까지 마비시키는 교통대란이 발생하게 되어 사회적으로 큰 혼란을 야기 시키게 된다.

지하철안전운행에 있어 중요한 전기설비의 경우 정지(靜止)기기인 변압기는 본래 사고율이 낮고 취급이 용이한 기기이지만, 전원의 주간 기기이므로 변압기의 중대 사고는 장시간의 정전에 직접 연결된다. 전철용변압기는 전기차의 운전용 전력을 공급하기 위한 것으로서 부하의 변동이 극심하며 급전회로의 사고시 대단히 큰 단락전류가 흐르는 등 일반 전력용변압기에 비하여 가혹한 사용을 하게되는 특이성이 있다.

따라서, 직류급전계통에서의 정류기용 몰드변압기에 대한 열화특성을 연구함으로써 전철용변압기의 안전성에 대한 자료로 활용하고자 한다.

이 논문은 직류전철계통의 정류기용 몰드변압기에 대한 잠재적인 위험원, 고장형태, 사고발생시 나리오 등을 분석하였다.

---

\* 서울산업대학교, 철도전문대학원 철도전기신호공학과 석사과정, 학생회원

\*\* 한국철도기술연구원 전기신호연구본부장, 정회원

\*\*\* 서울산업대학교, 전기공학과, 교수, 정회원

## 2. 본론

### 2.1 직류 전철 계통 시스템

직류변전소는 일반적으로 3상교류의 특별고압 22.9[kV] 수전하여 수전용 개폐 장치를 통하여 수전 모선이 가압되면 수전 모선에 설치되어 있는 차단기에 의하여 정류기용 변압기와 고배율 변압기의 1차측에 수전 전압이 가해진다. 그러면 정류기용 변압기 2차측은 약 1,200[V]의 전압으로 변환되어 정류기의 1차측을 가압하고 정류기의 2차측에는 1,500[V]의 직류 전압이 발생된다.

그림 1은 표준적인 예시로서 직류변전소의 구성을 나타내며, 직류변전소의 주요설비는 교류전력 계통에서 전력을 수전하기 위한 수전설비, 교류전력을 직류로 변환하기 위한 주변성설비, 직류전력을 전차선로에 공급하기 위한 급전설비 등으로 구성되어 있다.

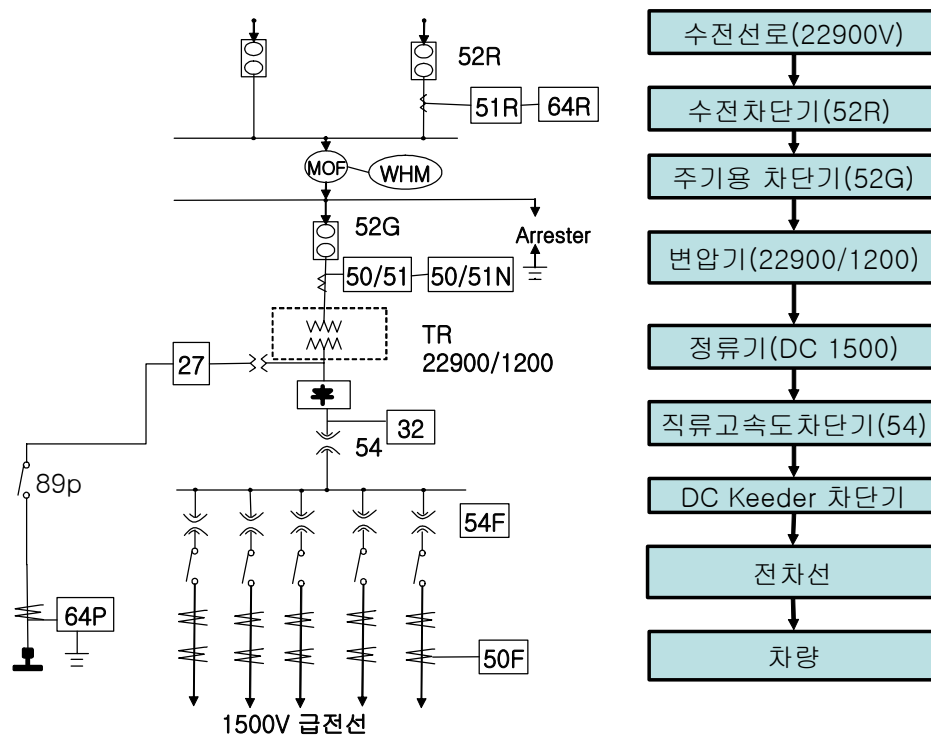


그림 1. 직류변전소의 구성

최근 건설되는 도시철도는 2뱅크의 정류기 출력을 직렬로 하여 정류기의 절연에 보다 유리한 3권선 변압기방식이 주로 채용되고 있다. 특고압인 1차권선을  $\Delta$ 결선으로 하고 선간전압과 임피던스를 갖게한  $\Delta$ 결선인 2차권선, Y결선인 3차권선을 갖추면 3차권선은 2차권선과  $30^\circ$ 의 위상차를 갖게된다. 2차권선과 3차권선의 출력을 각각 3상 전파정류하여 정류기 출력을 서로 합하면 결국 6상 전파정류의 출력파형과 같은 12pulse의 맥동을 가진 직류가 얻어진다.

정류기용 변압기와 정류기의 설치 대수는 부하의 조건에 따라 산정되어지며 정류기의 용량은 대당 보통 3,500[kW]이며, 이에 전원에 공급되는 정류기용 변압기는 대당 4,000[kVA]이다.[3]

변성 설비의 구성은 규모에 따라 약간의 차이가 있으나 정류기용 변압기, 실리콘 정류기(SR), 교류차단기(52), 직류 고속도 차단기(54), 변류기(CT), 보호 계전기 등으로 구성되어 있다.

## 2.2 사고 및 장애 사례의 조사

사고를 유발한 열화형태를 정리해서 그림 2에 나타내었다. 이 그림에서와 같이 열화의 형태로서는 흡습, 부식, 균열의 발생, 오손 등이 주된 것임을 판정할 수 있었다.

열화에 의해 발생하는 장애현상을 정리하면 그림 3과 같이 된다. 장애현상으로는 81건 중에서 27%에 해당하는 절연저하가 발생하였으며 그림 2의 열화 상태와 견주어 보면, 흡습이나 부식이 진행하여 절연저하나 과열을 일으켜서 최종적으로는 지락이나 소손등의 사고에 이르는 것을 나타내고 있다.[4]

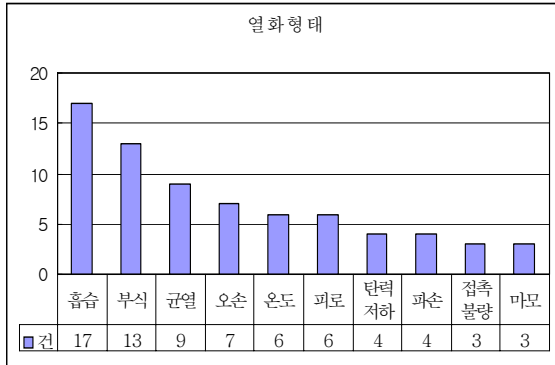


그림 2. 사고 및 장애의 주요열화형태

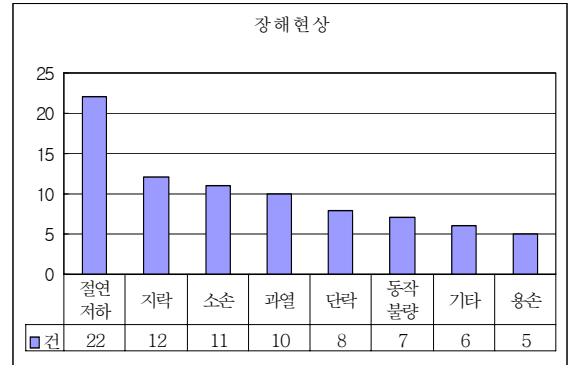


그림 3. 장애현상

## 2.3 몰드변압기의 안전성 분석

### (1) 위험원 도출

현재까지의 안전성 확보는 주로 설비의 점검에 의한 것에 의존하여 왔다. 사고가 발생하면 원인 분석을 수행하지만 안전성확보 체계에 의한 안전성검토를 수행하지 않았다. 따라서, 전기철도에 사용되는 몰드변압기에 발생될 수 있는 사고와 그 것에 대한 대책을 규명하기 위해서 안전성 체계에 따른 안전성 확보를 위해서 몰드변압기에 대한 위험원을 도출하였다. 위험원(hazard)의 도출과 분석을 하기 위해서 기존에 판명된 위험원과 아직까지 밝혀지지 않은 위험원을 도출하기 위해서 what if, FMEA 및 HAZOP 방법을 사용하였다.

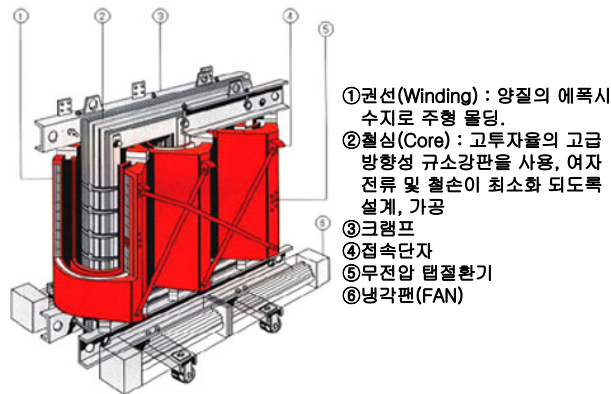


그림 4. 몰드변압기 명칭

(2) what if 방법

“what if” 방법에서는 변압기 위험원을 전문가의 인터뷰를 통하여 항목을 설정하였다.

표 1. what if

번호	항목	what if	원인	결과
1	온도	온도가 상승하면	과부하	부하의 저감, 상간균등, 설비용량의 증가
			환기 불량	급, 배기 시설 운전
			높은 주위온도	기준치 이하로 낮춘다.
2	진동	진동이 크면	설치 불안정	베이스를 안정하게 설치
			과전압	적정한 탭으로 절환
			체결부의 이완	조이기 작업
			공진	공진조건외 제거
		코로나방진	원인규명	
3	오손	오손발생하면	주변먼지흡착	건조한압축공기 (1.0kg/cm <sup>2</sup> 정도)를 내뿜거나 진공청소기로 청소한다.
4	결로	결로가 발생하면	내,외부 온도 변화	상간 및 상대지간 절연내력감소
5	수분	물이 침입하면	빗물 및 누수	방수처리, 습도의 저감
6	표면저항	표면저항이 감소하면	절연물열화	변압기 교체
7	절연내력	절연내력감소하면	절연물열화	변압기 교체
8	충격	충격에 견디지 못하면	낙뢰 및 단락	변압기 교체

(3) FMEA에 의한 방법

표 2. 변압기의 FMEA(일부)

날짜 : 시스템 전철시스템 FMEA 작성자 서브시스템 변압기 조립품 검사자											
번호	대상품목	기능	고장 모드	추정 원인	영향		고장 검지법	고장 평점		고장 등급	대책
					변압기	시스템		기능 C1	빈도 C2		
1	권선	2개이상의 회로로 교류전력을 받아 전자유도작용에 의해 전압, 전류를 변성	단선	절연파괴	소손	부하 단선	차단기 보호계 전기			A	권선 교체
2	철심	교번 자속을 발생하여 2차측 권선에 전압을 유기	이완	볼트이완	소음확대		소음 측정기			C	조임 작업
3	클램프	권선과 철심 고정	이완	볼트이완	소음확대		소음 측정기			C	조임 작업
4	접속단자	입, 출력 케이블 연결	이완	볼트이완	코로나		광 온도계			B	조임 작업
5	무접압탭 절환기	2차측 전압 조정	이완	볼트이완	코로나		광 온도계			B	조임 작업
6	냉각팬	권선 및 철심의 냉각 장치	정지	베어링	온도상승		육안			C	교체
7	에폭시	권선의 절연체	변색	노후			육안			B	

(4) HAZOP에 의한 위험원 도출

표 3. HAZOP 시트

HAZOP 시트							
항목	파트	속성	가이드워드	원인	결과/의미	표시/보호	질문(Q)/ 권고조치(R)
1	Epoxy/철심	온도	More	과부하	권선소손	위험	부하차단
2	철심	진동	More	볼트이완	소음확대	경고	조임작업
3	Epoxy	오손	Other than	주변먼지	냉각저하	경고	청소
4	시스템	결로	Other than	기온차	절연저하	경고	건조
5	시스템	빗물	Other than	누수	절연저하	경고	방수
6	Epoxy	표면저항	Less	노후	절연저하	경고	교체
7	Epoxy	절연내력	Less	열화	절연저하	경고	건조
8	Epoxy/철심	충격	More	낙뢰, 단락	절연파괴	위험	부하차단

(5) Risk 분석

위험도 분석은 IEC 규격 61508에 제시된 것에 의해 수행되었다.

표 4. Risk 분석

번호	항목	위험원	결과	빈도
1	온도	권선	절연파괴	occasional
2	진동	철심	소음확대	occasional
3	오손	권선 및 절연물	냉각 저하	occasional
4	결로	권선 및 철심	절연내력 저하	occasional
5	빗물	권선 및 철심	절연내력 저하	occasional
6	표면저항	권선	절연내력 저하	occasional
7	절연내력	권선	절연내력 저하	occasional
8	충격	권선	절연파괴	occasional

(6) 사고시나리오 설정 및 분석

표 5. 사고시나리오

번호	항목	위험원	단계1	단계2	단계3	단계4	사고결과
1	온도	권선	과부하	절연물열화	절연내력저하	기포발생	절연파괴
2	진동	철심	설치불안정	볼트이완	공진	코로나	소음확대
3	오손	권선 및 절연물	먼지누적	냉각덕트협소	-	-	온도상승, 코로나방전
4	결로	권선 및 철심	내,외부 온도차	-	-	-	코로나방전
5	빗물	권선 및 철심	누수	-	-	-	절연파괴
6	표면저항	권선	노후	절연열화	-	-	절연파괴
7	절연내력	권선	노후	절연열화	-	-	절연파괴
8	충격	권선	낙뢰	부하단락	-	-	절연파괴

(7) 위험원 저감분석

표 6. 위험원저감분석

시스템 타이틀 : 변압기										
시스템 번호		동작 기간		작성 날짜						
분석 단계	최초 :			수정 :			부가 :			
위험원 번호	위험원 내용	조치전위험도				대책		심각 도	확률	위험도크기
		위험원 대상	심각도	확률	위험도 크기	D:설계변경 E:안전대책 S:안전소자 W:경고체제 P:절차/교육				
1	온도	권선	크다	작다	크다	D				
2	진동	철심	중간	중간	작다	E				
3	오손	권선 및 절연물	작다	크다	중간	E				
4	결로	권선 및 철심	작다	작다	중간	E				
5	빗물	권선 및 철심	작다	작다	크다	E				
6	표면저항	권선	중간	중간	중간	E				
7	절연내력	권선	중간	작다	중간	E				
8	충격	권선	크다	작다	크다	D				
작성자/작성일						승인일				

3. 결론

몰드변압기 소손을 크게 보면 층간단락 및 인출부위 소손과 Crack 크게 두가지로 대별할 수 있는데 Crack은 전류의 흐름에 따른 도체의 팽창과 고체 절연체인 에폭시 수지의 열팽창 계수가 다른데서 오는 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 과부하 운전과 저부하 운전을 반복하는 경우와 전력변환장치 부하에서 발생하는 고조파등에 의해 심하며 지하철에서 특히 심하다고 볼 수 있다. 현장에서 몰드 변압기 유지보수를 위해 주로 적용하고 있는 방법은 육안점검에 의한 온도관리, 소음관리 등 극히 초보적인 수준으로 사고를 조기에 예측하기에는 한계가 있다. 따라서 측정기술, 데이터 분석기술 등의 축적된 외국의 기술등을 검토 연구하여 국내 생산된 몰드변압기 취부시험을 거쳐 각종 진동과 초음파 파라메타를 추출하여 이상여부를 검출하는 알고리즘을 개발하고 몰드변압기 내부의 과도상태(온도, 전류, 전압)에 대한 모델링 기법을 확립함으로써 사고직전에 이를 검출할 수 있는 시스템을 개발해야 한다.

참고 문헌

1. 강인권편저(2005), “전기철도시스템공학”, 성안당
2. 松井照夫 高橋 勇 공저(1998), “변압기 활용기술”, 성안당
3. 인천광역시 지하철건설본부, “정류기용 변압기 제작시방서 3φ 4000kVA 22.9kV/600V
4. 한국전기연구원, 이화전기공업(주)지원(2004), “건식몰드변압기Coil의 수명예측 기술지원”.  
산업자원부, 산업자원부에서 시행한 부품.소재 종합기술지원사업의 기술지원결과품
5. “System Safety: Hazop and Software Hazop”, John Wiley & Sons (1999)
6. 정국삼외(2002), “최신안전공학개론”, 동화기술