

도시철도 차량용 변압기 정밀진단지침 제작을 위한 기초 연구

문종필*, 김재철*, 최준호*, 추동욱**, 한성호***
 *숭실대학교 전기공학과 **경문대학 ***한국철도기술연구원

A Basic Study for the production of Precisional Diagnosis Guidelines of the Transformer used in railway vehicles.

Jong-Fil Moon*, Jae-Chul Kim*, Joon-Ho Choi*, Dong-Wook Choo** Seong-Ho Han***
 *Dept of Electrical Engineering In Soongsil University **Kyungmoon College ***KRRI

Abstract - In this paper, as a basic study for the production of precisional diagnosis guidelines of the transformer used in railway vehicles, the stress and ageing cause of the transformer is analyzed, the international standards and diagnosis items relative to it are invested and rearranged.

1. 서 론

현재의 도시철도법에 따르면 25년을 초과한 도시철도 차량은 운행 할 수가 없으나, 정밀진단을 받아 적합하다고 판정된 경우에는 5년 까지 연장할 수 있다. 현재 서울시 지하철 1~4호선에는 77년부터 도입된 차량이 현재 까지 운행되고 있는 실정으로 25년이 넘게 사용된 차량이 있으며, 그 양은 점차 급속하게 늘어날 전망이다. 그러나 현재의 도시철도 차량 정밀진단 지침은 일반적인 항목만 나열하고 있어 실제 정밀진단지침을 하기에는 현실적으로 어려운 실정이다[1].

따라서, 본 논문에서는 도시철도 차량용 변압기를 정밀진단 할 수 있는 정밀진단지침 마련을 위한 기초연구로서, 우선 도시철도차량용 변압기의 스트레스 및 열화요인을 분석하고, 그에 맞는 국내외 관련 규격 및 진단 항목 자료를 검토하여 정밀진단지침 항목을 정리하여 국내 실정에 맞도록 재설정하여 제시하였다.

2. 연구 배경

2.1 배경

현재 서울시 지하철 공사에서 발표한 통계에 따르면 1, 2, 3, 4호선에 1974년에 60대의 전기철도차량이 운행되기 시작한 이래 1999년에는 1944대의 차량이 운행되고 있다. 1974년에 도입된 철도차량은 모두 폐차가 되었으나, 77년부터 도입된 차량은 현재까지 운행되고 있는 실정으로 현재 25년이 넘게 사용된 차량이 있으며, 그 양은 점차 급속하게 늘어날 전망이다. 따라서 사용년한이 도래된 철도차량에 대하여 계속적인 사용여부를 결정하기 위한 정밀지침에 관한 연구가 절실히 필요한 실정이다[2,3].

다음 표 1은 1989년까지 전동차 보유현황을 나타낸다.

표 1. 전동차 보유현황(서울시지하철공사)

구분	반입량	1호선	2호선	3호선	4호선	합계	비고
'74	(60)	(60)				(60)	'98, '99폐차
'77	18	18				78	
'78	18	18				96	
'80	44		44			140	
'82	12		12			152	
'83	126		126			278	
'84	150		66		84	428	
'85	228			150	78	656	
'86	64		64			720	
'89	162	64	36		42	862	

2.2 현재의 정밀진단지침

현재까지 연구된 도시철도 차량용 고압전기설비 정밀진단지침안을 살펴보면 다음과 같다[1].

- 기계적 성능평가시험
 - 기계적 동작시험
 - 기계적 강도시험
 - 진동 및 충격내력시험
 - 유, 공압장치의 기밀시험
- 전기적 성능평가시험
 - 절연특성시험(절연저항, 냉전압, 유전손실 및 부분방전시험)
 - 온도상승시험
 - 보호장비와 계전기에 대한 동작 및 조정 시험

위에 설명된 바와 같이 현재의 정밀진단지침안은 일반적인 추상적인 항목 및 공통적인 항목만 나열하고 있으며 세부진단지침이 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 도시철도차량에 사용되는 변압기의 열화특성을 파악한 후 기기 특성에 맞는 진단안을 제시하였다.

3. 변압기 사양 및 열화요인

3.1 변압기 사양

철도청에서 사용하고 있는 전기철도용 주변압기의 규격은 국내 차량제조업체인 한진 중공업, 현대 정공, 대우 중공업 등의 기술 제휴선 또는 수입선의 제시 규격에 의존하고 있으며 현재 한국철도산업기술연구원의 주관으로 철도차량 기자재에 대한 표준 규격 제정 작업이 진행되고 있다. 국내 철도에 사용되는 변압기의 규격은 국내 차량 제조업체의 제시규격에 의존하고 있는 실정이며, 국내 차량에 탑재되는 변압기는 전량 수입에 의존하고 있어 변압기 규격은 외국의 변압기 제조사의 규격에 100% 의존하고 있다고 볼 수 있다[4].

다음은 변압기 형식, 정격, 구조, 각 부품의 정격이다.

- 형식 : 옥외 설치형, 실리콘유 침적형, 단상외철형, 무압밀폐식, 송유 풍냉식
- 정격 : 제조 회사에 따라 차이가 있으나 대체로 다음 표 2와 같다.

표 2. 변압기 사양

	1차	2차	3차
용량[kVA]	1,360(1,430)	1,340(1,410)	20(20)
전압[V]	25,000	1,850	237
전류[A]	54.5(57.2)	724(762)	84.3(84.3)

※ ()는 동계 정격

- 정류방식 : PWM 방식
- 냉각장치 : 순환유량 0.7 m³/min, Total Heal 7m, 풍

- 량 90 m³/min
- 5) 총중량 : 3020 kg
- 6) 절연유의 종류 및 유량 : 실리콘유, 유량은 약 490 ℓ

3.2 변압기 열화현상 및 요인

변압기의 열화요인은 열적, 전기적, 기계적 요인의 세 가지를 들 수 있으나 이러한 요인들이 단독으로 발생하는 일은 드물고 여러 요인이 복합되어 진행이 된다.

변압기 본체의 경년열화는 주로 권선의 도체피복(절연지)과 코일간에서 발생하는 기계적, 전기적 열화로 결정된다. 열화의 원인으로서는 열에 의한 열화, 흡습에 의한 열화, 산소 흡수에 의한 열화, 부분 방전에 의한 열화, 기계적 응력에 의한 열화 등을 들 수 있으며 이러한 열화의 요인은 단독으로 일으키는 것보다 중첩되어 열화요인으로 작용하는 경우가 대부분이다.

이중 특히 영향을 많이 받는 것은 열에 의한 열화현상으로 흡습, 산소 흡수가 복합적으로 영향을 미치면 열화가 가속된다. 절연물의 열화가 진행됨에 따라서 외피, 내피에 의한 이상전압이 발생하거나 단락전류에 의한 전자기력으로 전기적, 기계적, 이상 스트레스가 복합되어 변압기의 수명을 단축시킨다.

4. 변압기 열화진단 시험 및 점검

변압기는 장기간에 걸쳐서 여러 운전조건에서 사용되므로 전기적, 기계적, 열적 스트레스 등 여러 가지 요인에 의하여 절연열화가 진행된다. 이러한 절연열화에 의하여 변압기의 절연내력은 점차 저하되어 운전 중에 절연파괴 되어 돌발사고를 일으키게 된다.

그러므로 절연열화의 진단상황을 미리 파악하여 사고를 사전에 방지할 수 있다. 변압기의 열화진단시험에는 전기적 특성시험과 절연유의 열화진단시험이 있다.

4.1 전기적 특성시험

4.1.1 절연저항 측정시험

변압기의 권선과 접지간, 혹은 두 권선 사이와 같은 주절연시스템의 상태를 파악하기 위하여 시험을 실시한다. 측정기기로는 Megger를 사용하며, DC 500, 1000, 2500 V 급 메거를 이용하여 절연저항을 직독한다. 절연체의 정격전압이 시험전압 이상일 때, 절연체에 두 가지 시험전압을 인가하여 측정된 결과치의 차가 25% 이상이라면 절연시스템이 흡습될 가능성이 있다. 변압기에서는 전압인가 1 분 후의 최소절연저항기준치를 다음 식 1에 의해 결정할 수 있다.

$$R = \frac{CE}{\sqrt{kVA}} \quad (1)$$

여기서 R은 절연저항, C는 계수로서 순수 유입 변압기에서 0.8이며, E는 1상 권선의 정격전압, kVA는 변압기의 용량을 나타낸다. 절연저항치가 최소절연저항 기준치보다 낮을 경우 절연파괴현상이 생긴 것으로 분석되며, 측정치가 0 이거나 매우 낮은 값을 나타낼 경우 심한 탄화 트랙킹이나 권선의 접지, 권선간의 단락 현상이 발생한 것으로 판단한다.

4.1.2 직류전류시험(PI시험)

직류전류 시험은 변압기 권선에 직류 고전압을 인가하여 시간경과에 따른 전류의 변화를 측정하여 PI (Polarization Index) 값으로 환산하여 전류-시간 특성에 의해 절연상태 판정을 하는 방법이다. 측정장치는 직류 고전압전원과 미소 전류계를 조합하여 사용한다. 일반적인 지표로서 성극지수(PI)를 사용하는데, PI는 1분 전류치를 10분 전류치로 나눈 값으로 절연상태가 양호한 경우 누설전류는 시간경과에 따라 점차 감소하여 일정치를

유지하나 절연물이 흡습 또는 불량한 경우 누설전류는 계속 증가하거나 높은 값을 유지한 채 감소되지 않는 현상을 보인다.

4.1.3 권선저항 측정시험

권선저항 측정은 권선의 증간단락 또는 권선이 병렬로 연결되어 있는 경우 회로의 단선, 연결점의 접촉저항을 판정하기 위한 시험으로 건전상태의 저항과 비교하여 판정한다.

권선의 저항을 측정하고 이 때의 온도를 기록한다. 저항측정은 직류를 사용하며 전압강하법, 브리지법 등을 이용한다. 변압기를 유입상태에서 여자하지 않고 3시간 이상 방치하여 측정한 온도를 권선의 온도로 하며, 철도 차량용 변압기의 경우 펌프를 운전하여 상하의 유온을 같게 할 필요가 있다.

권선재료인 동은 온도변화에 따라 저항이 변화되므로 정확한 측정을 위하여 측정결과를 기준온도(75℃)로 환산한다.

4.1.4 전압비(권선비) 측정시험

권선비 측정 목적은 기본적으로 권선에서의 턴간, 구간(Section)간의 절연상태를 진단하는 것이나, 이 시험을 통하여 내부권선의 단락발생 여부나 탭 변환기 배열에 대한 문제점을 발견할 수 있으며, 동시에 여자전류를 측정할 수 있고 도체의 불완전한 연결이나 접지로 인해 나타나는 높은 권선저항과 같은 결함들을 검출할 수 있다. 가장 보편적으로 이용되는 방법은 1전압계법으로서 한 권선에 인가한 전압과 다른 권선에 유기된 전압을 1개의 전압계를 절환하여 측정한다.

권선비 측정시 측정되는 전압비는 1차와 2차간의 권선비인 R₁/R₂로 나타낸다. 이 때 측정된 권선비는 계산치의 0.5% 이내의 범위에 있어야 하며, 권선 턴간에 단락이 있을 경우 이는 권선비 측정결과에 영향을 미친다. 즉 측정된 권선비가 허용범위에서 벗어날 경우 특히 높은 여자전류가 흐른다면 턴간 단락을 의심해볼 필요가 있다.

4.1.5 여자전류 측정시험

이 시험은 특히 권선내의 국부적인 파괴현상이나 자기 회로가 존재할 경우 변압기의 상태를 평가하는데 매우 유용한 방법이다. 변압기를 운전하기 위한 확인시험으로 이용되며, 나중의 변압기 분석을 위하여 이 시험에 사용된 장치, 연결방법, 온도 및 시험 전압 등을 기록하여 유지한다.

시험전압은 정격전압의 10% 이상이어서는 안되며 시험조건에 영향을 미칠 수 있는 정도의 유도전압발생을 방지하기 위하여 일반적으로 고압권선에 저압을 인가하는 것이 바람직하다. 변압기 2차측에 전압을 인가하여 정격전압까지 상승시키면서 V-I 특성을 측정하여 턴간의 단락을 측정한다. 전원설비가 없는 경우 정격전압의 1/3 ~ 1/10 정도를 인가하여 시험결과를 V-I 특성과 비교한다. 시험 결과와 비슷한 기기와 비교할 때 10% 이상 차이가 나서는 안되며 또한 이전에 분석한 결과와 5[%] 이상 차이가 생겨도 안된다.

4.1.6 임피던스전압 측정시험

변압기 권선에 단락전류가 흐르면 단락전류에 의한 전자기력의 영향으로 권선이 변형되어 임피던스 전압이 변화한다. 임피던스 전압측정 시험은 이러한 권선의 변형유무를 판정하기 위한 시험으로, 일반적으로 변압기 2차측을 단락시키고 고압측에 저전압을 인가하여 임피던스 전압을 측정한다. 판정은 제작사의 특성과 비교 판정하며, 일반적으로 2% 이내의 편차는 무시한다.

4.1.7 유전점점 측정시험

유전체에 교류전계를 가할 때 일반적으로 에너지 손실

을 일으키며 이것을 유전손(dielectric loss)이라 한다. ϵ^* 되는 복소 유전율을 가진 유전체에 발생하는 유전손을 유도해 보면 다음의 그림에 나타난 것처럼 복소유전율이 ϵ^* 인 유전체를 가득 채운 평행판 커패시터에 각 주파수 ω 인 정현파 교류전압 V 를 인가한다. 유전체내의 전계를 E , 전속밀도를 D 라 하면 전극에 흘러 들어가는 전류 I 는 다음 식과 같다.

$$I = \frac{dD}{dt} = j\omega D = j\omega\epsilon^* E = j\omega\epsilon' E + \omega\epsilon'' E \quad (2)$$

즉 그림 1에서 나타난 바와 같이 전류는 전계 E 보다 90° 앞선 성분 $j\omega\epsilon' E$ 와 동위상 성분 $\omega\epsilon'' E$ 로 된다. 따라서 유전체의 단위체적당 소비되는 에너지는 다음과 같이 된다.

$$W = E \times \omega\epsilon'' E = \omega E^2 \epsilon'' \tan\delta \quad (3)$$

$\tan\delta$ 는 유전손을 나타내는 척도가 되며 이것을 유전 정접 또는 유전체 역률이라 부른다.

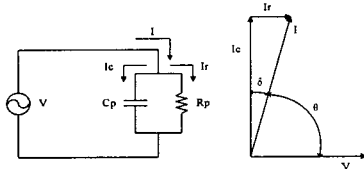


그림 1. 유전체 손실

$\tan\delta$ 의 시험결과로 절연물의 건조, 습윤상태, 공극의 유무, 열화상태 등을 판정하는 데는 L.W. Gross 식 판정 기준이 이용된다.

4.1.8 저전압 임펄스 시험

단락전류의 유입 또는 운반시의 기계적 충격 등으로 인하여 변압기 권선에 기계적인 변형이 발생하였을 경우 그 변형을 찾아내기 위하여 저전압 임펄스 시험을 시행한다. 이 시험은 휴대용 임펄스 발생장치 및 오실로스코프를 이용하여 저전압 임펄스를 변압기 권선에 인가하고 그 결과로 얻어진 전압파형을 기록 및 분석하며, 주로 변압기 운반이나 운전 전후의 측정결과를 비교함으로써 변압기의 기계적인 변형상태를 해석한다.

기본적으로 동일한 시험대상 변압기에 대해 이전에 측정된 결과와 시험대상기간 이후에 얻어진 시험결과 파형을 비교분석한다. 측정결과 위상의 변동은 축방향 이동에 관련되고, 크기의 변화는 권선의 반경방향 이동에 관련된다.

4.2 절연유의 열화진단시험

4.2.1 산화도(전산가) 측정시험

절연유는 온도, 산소, 동축매, 광 등에 의해 산화 열화되어 산성물질을 생성하며 산의 증가는 절연유 중에 Colloid 성분을 증가시켜 유중의 수분, 미세입자 등을 떠오르게 하여 권선을 단락시키거나 절연을 저하시키는 위험을 초래한다. 더욱 산화하면 슬러지를 생성하여 권선의 열전달을 방해하므로 변압기 온도 상승의 원인이 된다.

전산가는 절연유 1[g] 속에 포함되어 있는 산성물질을 중화하는데 필요한 KOH의 [mg]수를 말한다.

4.2.2 고유저항 측정시험

절연유의 고유저항율은 변압기 절연에 직접적 영향을 주며 산가와 큰 상관관계를 갖고 있으므로 진단에 유용

하게 사용할 수 있다. 고유저항율의 인자로는 수분, 유기산, 전해질, 용해 가스 및 절연유 자체의 이온화 등을 들 수 있다.

고유저항율은 절연유에 가해지는 직류전계[V/m]와 그때 유중에 흐르는 단위면적당 전류[A/cm²]와의 비로써 규정된 전극용기에 시료를 넣고 Teraohm Meter로 직류 250[V](전극간 전압)를 인가하여, 1분 후의 전류 값으로부터 고유저항율을 구한다. 이때 시험온도는 80 ± 1 [°C]로 한다.

4.2.3 절연파괴전압 측정시험

절연파괴 전압은 절연유가 어떤 전계하에서 사용 가능한 한가의 여부를 판정하는 기준으로 유중의 수분, 침유질 또는 도전성 입자에 의해 파괴전압이 저하하므로 유중 불순물의 유무를 판정하는 하나의 척도라고 할 수 있다.

실험방법은 직경 12.5[mm] 구형전극을 사용, 전극간 간극을 2.5[mm]로 하여 시료를 넣고 3분간 방치 후 유중의 거품을 가라앉게 한 다음 초당 300[V]의 속도로 전압을 상승시켜 파괴전압을 측정한다. 시험은 동일시료로 5회 시험하고 시료를 교체하며, 시험 후 1분간 안정시키고 시료는 2회 교체하고 총 10회의 시험을 하며, 각각 처음의 값은 제외한 8개의 측정치를 평균한다.

4.2.4 유증가스분석 시험

변압기 내부에서 이상, 즉 부분방전이나 코로나, 혹은 국부과열 등의 현상이 발생하게 되면, 이로 인한 열 발생이 수반되어 이 열원에 접촉된 절연재료, 즉 절연유, 절연지, 프레스 보드 등은 열 분해되어 H₂(수소), CH₄(메탄), C₂H₆(에탄), C₂H₄(에틸렌), C₂H₂(아세틸렌), CO(일산화탄소), CO₂(이산화탄소) 등의 가스를 발생하게 되며, 각 발생 가스의 대부분은 절연유에 용해된다.

따라서 유입변압기에서 절연유를 채취하여 유증가스를 분석하게 되면, 발생가스 및 가스 발생량의 조성에 따라 내부 이상 유무 및 그 정도를 추정할 수 있다.

5. 결 론

현재 지하철 공사 등에서 제시하고 있는 통계에 따르면 초기에 도입한 철도차량이 사용년수가 25년이 넘고 있고, 앞으로 사용년수가 도래될 차량의 수는 점차 증가하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 이들 차량에 대한 정밀진단지침이 미비하여 현재 계속적인 사용여부를 결정하기 어려운 실정이다. 따라서 사용년한이 도래된 전기철도차량에 대하여 계속적으로 사용할 것인지 혹은 폐기할 것인지를 판단하기 위한 정밀진단 기법이 절실히 필요한 실정이다.

이에 본 논문에서는 도시철도 차량용 변압기의 정밀진단지침을 만들기 위해, 도시철도차량에 사용되는 변압기를 검토한 결과, 전력계통에 사용되는 변압기와 별반 차이가 없었으며, 따라서 전력계통에서 사용되는 기기들에 대한 진단기법을 조사, 검토 및 분석하여 철도차량용 변압기에 적용하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김재철 외, 도시철도차량 전기설비 정밀진단(절연열화), 세부기법 연구, 숭실대학교, 2001년.
- [2] Wayne J. Chatterton, "An Update on Silicone Transformer Fluid: Manufacturing, Maintenance and End of Life Options", Conference record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, April 2000.
- [3] Toskey G. A, "Manufacturing Considerations for Silicone Fluid Filled Transformer", Conference on Electrical Electronics Insulation, 1995.
- [4] 황성중 외, 전철용 변압기 기술개발에 관한 연구(최종보고서), 전력연구원, 1998년 2월.