

지상변압기 안전성 향상을 위한 전기적 특성 분석

한운기 · 길형준 · 김향곤 · 최충석

한국전기안전공사 전기안전연구원

1. 서 론

대도시를 중심으로 설치되어 운용되고 있는 지중배전계통은 가공시스템에 비하여 도시미관, 공급선로 확보, 안전 및 공급신뢰도 향상 등의 장점을 가지고 있어 꾸준히 증가되고 있는 추세이다. 이와 같은 지중선로의 확대에 따라 대도시 및 신규 택지조성지역의 도로주변 등에 지상변압기 설치대수도 증가되어 2000년도 12월 기준 21,000여대에 이르고 있다. 지상변압기는 도시생활의 편리한 전기공급 및 쾌적한 도시계획 설계의 측면에서 도시미관, 공급선 확보, 설비안전 및 공급신뢰도 향상 등의 장점을 가지고 있어 장기적으로 가공배전시스템에서 지중배전시스템으로의 전환이 가속화됨에 따라 지상변압기의 사용은 급증할 것으로 전망된다.

그러나 지상변압기는 사람의 왕래가 빈번한 지역에 설치되고 있으므로 변압기의 고장발생시 절연유 분출화재 등을 수반하며 재산피해는 물론 인명피해까지 발생할 우려가 있다. 따라서 이와 같은 고장을 예방하기 위하여 변압기 제작과정에서 철저한 생산관리와 함께 적절한 현장부하관리 및 유지관리가 요구된다¹⁾.

본 논문에서는 지상변압기의 국내·외 현장실태조사를 통한 전기안전 적정성 여부와 개선사항 등을 제시하고, 현장사고사례를 중심으로 한 분석 등을 다루었다. 또한 실증 실험장에 지상변압기를 설치하여 폭우시의 위험성을 평가하기 위하여 침수수조, 실험회로와 접지시스템 등을 구성하였다. 구축된 실험장에서 침수에 의한 전기적 위험성 및 인체감전 위험성을 분석하고, 이를 제도 개선(안) 제안을 위한 자료로 활용하고자 한다.

2. 현장실태조사 및 사고원인 분석

2.1 국내·외 지상변압기 설치조건에 대한 실태조사 분석

그림 1(a)는 국내에 설치된 지상변압기이다. 지상변압기 뒤편에 충분한 설치공간이 있음에도 불구하고 도로에 인접하여 설치하였으며, 도로에 근접하여 설치함에 따른 차량 등 외부의 충격에 대한 보호장치가 마련되어 있지 않다. 그리고 보호대 및 울타리 등에 대한 실태조사 결과 대부분의 지상변압기가 보호울타리 없이 외부 충격에 노출되어 있었다. 일부 보호울타리를 설치한 경우 정면충돌에 대한 보호는 불가능한 실정이

다. 그러나 일부 지역에 설치된 철재 펜스의 “L” 형식의 보호울타리는 차량에 의한 충돌은 어느 정도 예방할 것으로 판단된다.

그림 1(b)는 미국 시카고에 시설된 지상변압기의 설치상태를 나타낸 것이다. 사진에서 알 수 있듯이 도로에서 떨어진 곳에 시설되었으며 외부의 충격에 의한 기기 손상을 방지하기 위한 보호조치로서 충격을 받을 수 있는 방향에 원기둥 형태의 보호대가 설치되어 있다. 이 형태는 아직 우리나라에는 시설되지 않은 형태이다. 또한 지상변압기 주변 바닥에 자갈을 성토하여 접촉·보폭전압에 대한 위험성을 예방하였다.



(a) 국내(광주)



(b) 국외(미국 시카고)

그림 1. 국내·외 지상변압기의 실태조사

이상과 같이 일반인에게 쉽게 접촉되는 장소에 설치된 지상변압기의 설치조건이 국내와 많은 차이점이 있음을 알 수 있었다. 국내에서는 지상변압기의 설치 운용에 대한 기준이 명확하게 정립되지 않음에 따라 지상기기를 설치하는 업체와 관계기관과의 자체규정에 따라 운용되고 있는 실정이다.

2.2. 지상변압기 구조 및 사고원인 분석

지상설치형 변압기(이하 지상변압기)의 특징은 1차측 2부싱(bushing)으로 내부에 동대로 연결된 1차측 전원 루프를 하고, 한류퓨즈(current limiting)와 이중소자퓨즈를 이용하여 2중 퓨즈보호를 한다. 이 때, 한류 퓨즈는 1차측 보호를 목적으로 하고 이중소자 퓨즈(dual element fuse, Bay-O-net fuse)는 2차측 보호를 목적으로 한다. 그림 2는 한류퓨즈와 이중소자퓨즈의 설치된 형태를 보여준다.

그림 3은 지상변압기의 1988년부터 1995년까지의 사고원인을 분류하여 그 점유율을 표시한 것이다. 가장 높은 점유율은 차량 충돌 등 외부적 요인에 의한 사고가 39.8%, bushing elbow의 고장이 30.1%를 점유하는 것으로 조사되었다. 외부적 요인과 엘보우의 절연파괴 등에 의한 고장이 전체의 70%를 넘고 있어 주 사고원인이 되고 있다. 이외에 변압기 내부의 누유 및 절연유의 분출, 제작 불량, 자연열화 등에 의해 사고가 발생한 것으로 나타났다. 외부요인에 의한 경우 차량충돌에 의한 사고가 가장 많았으며,

주변 공사나 낙하물에 의한 충돌 등이 주를 이루었다^{2,3)}.

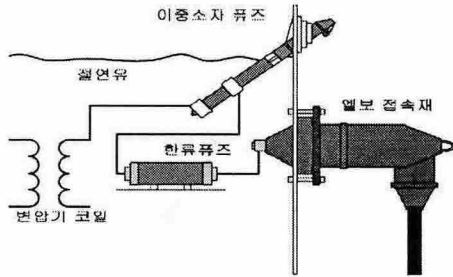


그림 2. 지상변압기 내부구조

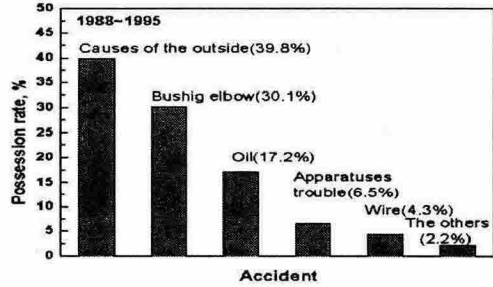


그림 3. 지상변압기 사고원인 통계

3. 옥외 실증실험 방법

지상변압기 침수에 의한 안전성을 다각적으로 분석하기 위해 실증실험장을 구축하였다. 실증실험장에서는 지상변압기가 침수할 수 있는 현장조건과 유사한 조건으로 실험할 수 있도록 모델링 하였다. 도로에 설치된 지상변압기의 위치는 전술한 바와 같이 도로의 인도, 화단, 주차장 등 여러 위치에 설치되어 있고, 지상변압기의 침수 조건 또한 다양하다. 따라서 지상변압기의 침수조건을 그림 4와 같이 지상변압기 상단까지 충분히 잠길 수 있도록 설계하였으며, 바닥면의 넓이도 지상변압기의 감전위험성(보폭, 접촉 전압 등)에 의한 위험성 실험에서 데이터 취득이 가능하도록 설계하였다. 그림 4는 지상변압기 침수용 수조이다^{4,5)}.

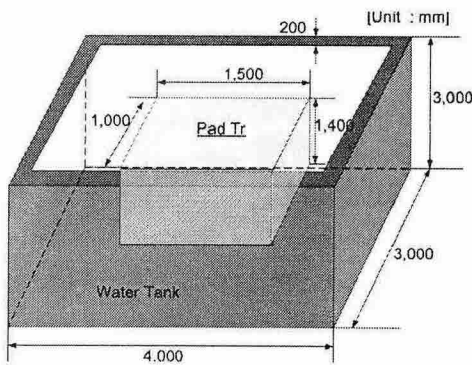


그림 4. 지상변압기 침수 수조

표 1. 지상변압기 규격

사 양	내 용	
용 량	200kVA	
전 압	1차	22.9kV
	2차	380/220V
제 조 년	1999년	
권선 결선방식	Y-Y 결선	
2차 결선방식	3상 4선식	
변압기 종류	유입 자냉식	
보호장치	Bay-O-Net fuse	

수조의 크기는 3,000×4,000×3,000mm³이고, 벽은 200mm의 두께의 콘크리트를 이용하였으며 수조 탱크 내·외부를 절연 처리하여 누설전류에 의한 절연파괴 위험과 외부 충격에 충분히 견딜 수 있도록 하였다. 실증실험에 사용된 지상변압기는 시중에 시판 사용 중인 지상변압기로 사양은 표 1과 같다. 변압기 외함(E₁) 및 중성점(E₂)의 접지저항 값은 9.8Ω과 280Ω 정도의 2가지 유형으로 설계하였다⁶⁾. 이상과 같이 실험 수조를 구축하여 지상변압기의 유전정접, 회복전압 특성 등 전기적 특성과 절연유의 화학적 구조 및 열중량 변화 등을 비교·분석 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유전정접(Tan δ) 실험

표 2는 침수전의 지상변압기의 유전정접 실험결과이다. 표에서와 같이 인가전압별 tanδ% 값은 기준치 2.0% 이하의 값에 모두 만족하여 적합한 것으로 나타나 정상적으로 운용이 가능한 변압기임을 알 수 있었다.

표 2. 유전정접 실험결과

구 분	인가전압 [kV]	진단결과				판정	
		누설전류[mA]	손실[W]	정전용량[pF]	tanδ[%]		
200 [kVA]	1ST ~ 2ST	1	2.727	0.033	723.5	0.12	적합
		2	2.728	0.034	723.5	0.12	
		5	2.727	0.037	723.5	0.14	
		10	2.727	0.038	723.4	0.14	

※적용기준은 제작사에서(DOUBLE.COM) 제시

4.2 회복전압 및 절연유 내전압 실험

그림 5는 지상변압기 침수전의 절연지내 수분 함유량에 대한 회복전압 실측 결과이다. 측정에 관련된 조건들은 프로그램을 이용하여 자동입력 되도록 하였다. 이때 주변 온도는 15℃였다. 실험결과, 회복전압은 296V이고, 검출시간은 38.9sec, 수분함유량은 2.617%로 나타나 변압기 내부의 절연지 특성은 정상임을 알 수 있었다.

그림 6은 침수전의 내전압 실험결과이다. 각 시료의 실험차수의 첫 번째 결과값은 버린 각 2회 이상의 실험결과이다. 실험결과, 평균 26.9kV의 값이 나와 정상적인 것으로 판정되었다.

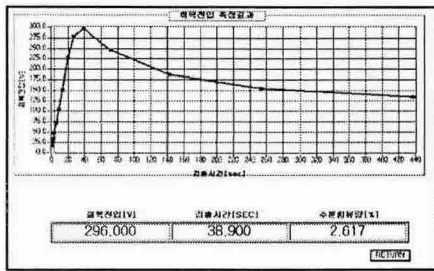


그림 5. 회복실험 결과

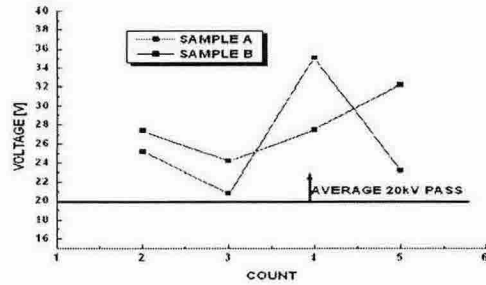


그림 6. 절연유 내압실험 결과

4.3 절연유의 화학적 구조변화 및 열중량 분석

그림 7은 적외선분광분석기(FT-IR, Spectrum-GX, Perkin-Elmer, USA)를 이용하여 변압기 절연유의 화학적 구조를 분석한 것이다. 정상 상태(normal)의 시료는 설치전의 지상변압기 절연유이고, 오염된 절연유(contaminated oil)는 물(10%), 기름(90%)의 비율로 교반시킨 것이다. 그리고 In Site Oil은 현장에 설치되어 사용되고 있는 절연유이다. 그림 7의 a와 b 대역의 오염된 절연유는 약 3283 cm^{-1} 에서 산소(oxygen)와 수소(hydrogen)의 단일결합 구조로 보이는 흡광피크가 나타는 것을 확인할 수 있었다. 또한 약 $1,635\text{ cm}^{-1}$ 에서 탄소(carbon)와 탄소(carbon)의 이중결합구조로 보이는 흡광피크가 검출되었다. 이는 절연유 내부의 탄소 구조가 물분자와 공기 중의 여러 물질과 교반되면서 화학적 결합이 이루어진 것으로 보인다. 현장에서 채취한 절연유에서도 약 1606 cm^{-1} 에서 탄소와 탄소의 이중결합구조를 가진 흡광피크가 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 절연유는 공기 중의 수분과 쉽게 반응을 일으킬 수 있음을 알 수 있었다.

그림 8은 변압기 절연유를 열분석기(SDT-2960, TA.Ins., USA)를 이용하여 상온에서 600°C 까지 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 온도를 상승시키면서 온도에 따른 절연유의 열중량 변화를 분석한 것이다. 순수물(pure water)의 경우 정제되지 않은 상태의 불순물을 이용하였고, 정상절연유(Tr Oil Nor)는 지상변압기의 절연유이다. 그리고 열화된(Troilw2contani) 절연유는 물 10%, 기름 90%의 비율로 교반시킨 것을 이용하였다. 순수물은 70.16°C 부터 95.29°C 에서 100% 열중량 감소가 나타났다. 정상상태(Tr oil Nor) 절연유는 198.16°C 부터 279.63°C 사이에서 대부분의 절연유로 보이는 99.4%의 열중량 감소가 나타났다. 오염된(Troilw2contani) 절연유의 경우에는 49.28°C 부터 62.28°C 까지 1.8%의 열중량이 소량 감소하였고, 이후 175.44°C 까지 98.15%의 급격한 열중량 감소가 나타났다. 이는 절연유 내부에 수분이 침투하여 화학적 결합을 한 상태에서 정상 절연유와는 다른 형태의 절연유로서 200°C 미만에서 강한 발열피크를 확인할 수 있었다. 따라서 절연유가 수분에 노출되면 상당 부분 저하되는 것으로 확인되었다.

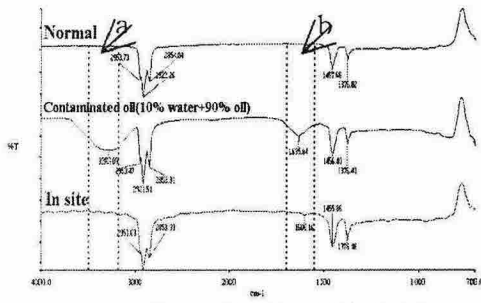


그림 7. 절연유 화학적 구조

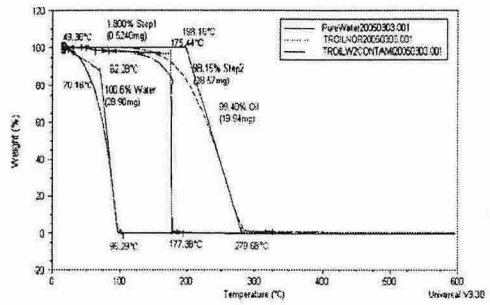


그림 8. 절연유의 열중량 분석

5. 결론

이상과 같이 현장실태조사와 사고원인분석, 실증실험을 통한 전기적, 화학적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현장 실태조사 결과, 지상변압기는 대부분 도로와 인접하여 시설되어 있었으며 차량 충돌을 방지하기 위한 보호대를 설치한 경우도 있었으나 설치하지 않은 경우도 많았으며 뚜렷한 설치기준이 없는 것으로 나타났다. 또한, 도로와 멀리 떨어진 보(인)도 측에 충분한 여유 공간이 있음에도 불구하고 도로에 접근하여 시설하여 전력기기의 안전과 보행자의 불편을 초래하고 있었다.
- 2) 사고사례 분석결과, 외부적 요인에 의한 사고가 39.8%, bushing elbow의 고장이 30.1%를 점유하는 것으로 조사되었다. 외부적 요인과 엘보우의 절연파괴 등에 의한 고장이 전체의 70%를 넘고 있어 주 사고원인이 되고 있었다.
- 3) 침수전 실제 지상변압기의 유전정점, 회복전압, 절연유 내전압 및 절연저항은 모두 판정기준에 근거하여 양호한 것으로 분석되었다.
- 4) 정상상태, 오염상태(물 10%, 기름 90%), 현장사용상태의 3가지 종류의 절연유에 대해 적외선 분광기 및 열중량에 대한 화학적 구조변화를 분석한 결과, 적외선분광분석에서는 오염상태의 절연유의 경우 피크의 변화가 뚜렷하게 나타나 공기 중의 수분과 쉽게 반응을 일으킬 수 있음을 알 수 있었고, 온도에 따른 열중량 변화를 분석한 결과, 열화 절연유에서 급격한 열중량 감소가 나타났으며 이를 통해 절연유가 수분에 노출될 경우 그 기능이 저하되어 전기재해가 발생할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 최충석 외 5, “전기화재공학”, 동화기술, pp94~115, 2004.
- 2) 한기봉 외 2, “22.9kV에서의 감전위험성 연구”, 한국전기안전공사, pp.11~33, 2002.
- 3) 한국전기안전공사, “전기재해 통계분석”, 1997~2001.
- 4) J. M. Nahman, “Assessment of the risk of fatal electric shocks inside a substation and in nearby exposed areas”, IEEE Trans. Power Delivery Vol. 5, pp.1794~1801, 1999.
- 5) G. Parise,, “A summary of the IEC protection against electric shock”, IEEE Trans. Industry Applications, pp.911~922, 1998.
- 6) NFPA/NEC, “Nationla Electrical Code”, 2002.