지상변압기 중성선 접지 탈락에 의한 화재위험성 고찰

A Study of Fire Risk Caused by the Disconnection of the Neutral Ground in the PAD-Mounted Transformer

유재익* · 정재희**

Yoo, Jae-Ick* and Joung, Jae-Hee**

Abstract

Some of the PAD-mounted transformers managed by KEPCO share the common neutral ground for both low and high voltages. When the common neutral ground of PAD-mounted transformer is disconnected, high voltage current is supplied to the low voltage circuits due to the current imbalance in the transformers, exposing the residential areas to unexpected high voltage currents supply. As a result, there is increased risk of fire due to damages in low voltage distribution boards and electrical equipments. This work presents recommendations in the design and the maintenance of the PAD-mounted transformers and additional safety measures for low voltage parts to mitigate the risks of fire.

Key words : PAD-Mounted transformer, Neutral point ground, Electricity fire, Distributor

요 지

한국전력공사 지상변압기 중 일부 제조사의 변압기는 고압측 중성점 접지와 저압측 중성점 접지가 공통으로 구성되어 있다. 이러한 변압기로부터 저압수전을 받고 있는 밀집된 주택 및 소형상가는 지상변압기의 중성점 접지가 탈락 시 변압기의 전류불평형률에 따라 저압측에 수천V까지 유입될 수 있다. 따라서 저압수용가의 분전반 및 전기사용 설비 등이 절연파괴로 소손되면서 화재로 이어질 수 있어 화재예방을 위한 지상변압기의 설계 및 관리적 대책과 저압측 수용가의 안전대책을 제시하였다.

핵심용어 : 지상변압기, 중성점 접지, 전기화재, 분전반

1. 서 론

대부분 저압으로 수전을 받는 경우 전주에 설치되어 있는 주상변압기로부터 전력을 공급 받았으나 현재는 대도시의 도심지는 미관상 전주를 철거하고 지상변압기를 인도에 설치하여 저압 수용가에 전력을 공급하고 있다. 이러한 지상변압기는 수용가에 3상 전력을 75 kVA에서 500 kVA까지 공급하고 있고 전력사용량 증가 추세에 따라 계약전력 500 kW 미만까지 확대되고 있어 향후 배전선로에 설치되는 지상변압기 용량은 지속적으로 증대될 전망이다(Kim *et al.*, 2013). 지상변압기는 현재 전국에 약 37,000 개소가 설치되어 있으며(Kim 2013), 지중저압선로의 누전실태를 파악하기 위해 약 5,000여 개의 지상변압기 저압측 중성점 접지에서 누설전류를 측정하

는 과정 중 약 10%의 변압기가 고압측 중성점과 저압측 중성점이 공통으로 연결되어 있는 것이 확인되었다. 이러한 지상변압기는 저압측의 중성점 접지가 탈락 될 경우 저압측의 부하 불평형에 의해 고압측 중성점 전압이 상승하여 저압측에 고전압이 유입될 수 있다. 따라서 3상 4선식 저압으로 수전을 받고 있는 밀집된 상가지역 및 단독주택과 같은 수용가는 차단기 및 부하설비가 고전압에 노출되어 화재로 이어질 수 있다. 저압 수용가의 3상 4선식 전력공급 회로에서 “중성선 단선”에 의한 저압측의 각종 부하설비의 소손 및 화재위험에 대한 선행 연구가 진행되어 각종 대책을 제시한 바가 있다(Kim 등 2011). 그러나 지상변압기 내부의 설비적 결함에 의한 “중성점 접지”가 탈락 시 발생할 수 있는 문제점에 대한 연구는 진행되지 않았다. 본 논문에서는 지상변압기 10개소에 대해

*정회원. 서울과학기술대학교 안전공학과 박사과정(E-mail: yjidream@naver.com)

Member. Ph.D Candidate, Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science&Technology

**교신저자. 정회원. 서울과학기술대학교 안전공학과 교수(Tel: +82-2-970-6376, Fax: +82-2-976-7479, E-mail: joung@snu.ac.kr)

Corresponding Author: Member. Professor, Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Science&Technology

각 상별 부하전류 측정하여 고전압이 부하측으로 전이될 수 있는 위험성을 시뮬레이션 하고 저압 수용가에 설치된 누전 차단기에 이상전압을 투입하고, 누전차단기가 설치되어 있는 분전반 재질별 화재 테스트를 통해 화재 위험성을 고찰하였다.

2. 지상변압기의 결선 방식 및 문제점

일반적으로 특별고압을 수전 받는 수용가용 변압기는 대부분 Δ -Y 결선방식을 사용하고 있어 부하측으로 부터 발생하는 영상분 고조파 등이 고압배전선로에 전이되지 않는 구조를 가지고 있어 전원품질 면에서도 유리한 결선방식일 뿐만 아니라, 부하 불평형이 발생하여도 고압측의 전위가 저압선로에 영향을 미치지 않아 안정성을 유지 하고 있다.

그러나 변압기 1차(Prim: 상전압 13.2 kV)와 2차(Sec: 상전압 230V)간의 약 57배에 해당 하는 전압비와 1/57배의 전류비로 구성된 Yn-Yn 결선방식으로 구성된 Fig. 1의 한국전력 공사 지상변압기는 결선의 특성상 영상 고조파가 고압배전선로에 전이될 수 있는 단점이 있으며, 지상에 노출 되어 있어 외물에 의한 충돌 또는 침수 등에 의한 각종 사고 위험이 상존하고 있다. 이러한 지상변압기의 가장 큰 문제점은 고압측에는 과전류 및 단락전류로 부터 변압기를 보호하는 차단기 역할을 하는 파워퓨즈 등 안전시설이 있으나 저압배전선로에는 별도의 보호설비가 없다. 즉, 대부분의 저압배전선로에는 지상변압기 내부의 중성선 접지가 탈락될 경우 중성점 전위를 유지할 수 있는 중성선 다중접지 및 차단설비가 구성되지 않았다는 점이다. 따라서 높은 부하 불평형률이 발생하는 지상변압기 저압측(Sec) 중성점 접지가 개방시 저압수용가 부하설비 까지 전원이 차단되지 않고 고전압이 지속적으로 전력이 공급되는 문제점을 가지고 있다. 여기서 1차측(Prim) Y결선 중성점 접지의 역할은 불평형 부하에 따른 중성점 전위 이동을 방지하는 것이며, 2차측(Sec) Y결선 중성점 접지의 역할은 고압측과 저압측이 혼촉 될 경우 저압측 전위상승을 억제하는 것이 목적이다.

Fig. 1. The external structure of PAD-Transformers.

2.1 고 · 저압 중성점이 분리된 결선방식

Fig. 2에서 지상변압기 1차측(Prim) 중성점은 변압기 제작 과정에서 내부적으로 변압기 외함에 연결되어 있고 외함은 CNCV(XLPE Insulated Concentric Neutral Conductor With Water Blocking Tapes And PVC Sheathed Power Cable) 실드(N상)를 외부에서 연결시키는 구조이며 2차측(Sec)의 중성점은 외부에서 접지하도록 N상 부싱으로 제작되어 있다. 즉, Fig. 2처럼 1차측 Y결선 중성점(HV-N)은 변압기 내부의 22.9 kV 배전계통 CNCV 실드에 연결되고 2차측 Y결선 중성점(LV-N)은 외부 N상 부싱단자에서 접지시키는 구조이다.

즉, 고압측과 저압측의 중성점 접지회로가 이분화 되어 있는 구조로 2개의 접지 중 1개소 탈락이 발생하여도 저압측 전원공급에는 심각한 문제를 일으키지는 않는다.

2.2 고 · 저압 중성점이 연결된 결선방식

전체 지상변압기의 약 10% 가량은 Fig. 3과 같이 변압기 내부에서 1차측(Prim) 중성점(HV-N)과 2차측(Sec) 중성점(LV-N)이 서로 연결되어 있으며 저압측 외부 N상 부싱단자를 접지 시키면 1차와 2차의 중성점이 동시에 접지가 이루어지

Fig. 2. The Separation between high-voltage and low-voltage in neutral point grounding.

Fig. 3. The common ground connection between high-voltage and low-voltage.

Fig. 4. Connection between the neutral bushing on low-voltage and grounding.

는 구조를 취하고 있다. 따라서 지상변압기 고압측(Prim) 중성점은 Fig. 2와 같이 변압기 외함에 연결되어 있지 않고 내부적으로 저압측(Sec) 중성점에 연결되어 있다.

이러한 구조는 Fig. 4와 같이 외부에 노출된 접지선 E2 (ground)가 습기로 인한 접지선의 부식, 시공불량 또는 점검자의 실수에 의해 탈락이 발생될 경우고압측(Prim) 중성점 접지도 개방된다. 즉, Y 결선에서 중성점이 개방될 때 저압측 (Sec) 부하 불평형에 의해 고압측 중성점 전위가 수천 V 이상 상승될 수 있으며, 이러한 현상이 저압측 수용가에 화재 및 전자기기 등에 소손을 주게 되는 것이다.

2.3 지상변압기의 불평형 전류현황

Table 1은 10대의 한국전력공사의 지상변압기에서 3상4선식 회로에서 각 상별로 부하전류를 측정한 결과로 변압기별 전류 불평형률이 23~279%까지 발생되고 있다. 이러한 현상은 저압수전을 받는 주택 및 밀집상가 등이 단상부하 사용에

Table 1. Current unbalance of Low-voltage

Item	A-Phase (A)	B-Phase (A)	C-Phase (A)	N-Phase (A)	Unbalanced ratio
Trans #1	156	6	66	137	197%
Trans #2	509	284	269	173	68%
Trans #3	21	42	42	29	60%
Trans #4	120	171	220	81	59%
Trans #5	138	175	164	88	23%
Trans #6	125	93	120	68	28%
Trans #7	127	89	82	69	45%
Trans #8	0.5	62	15	53	238%
Trans #9	156	222	468	292	111%
Trans #10	3	150	5	141	279%

따른 결과로 매순간 변화가 심하게 발생된다. 전기설비기술기준 및 내선규정 115-1절에서는 단상 3선식은 부하 불평형률을 40% 이하, 3상3선식과 3상4선식은 30% 이하로 부하평형을 유지하도록 권고하고 있으나 현실적 수용가별로 전력사용 특성이 다르기 때문에 지켜지기 어려운 상황이다.

2.4 고압측 중성점 전위 상승 시뮬레이션

중성점 접지탈락에 의한 전위상승 현상을 시뮬레이션 하기 위하여 Table 1과 같이 저압측에서 실측각 상별 불평형 전류를 권수비(1/57배)에 의해 고압전류로 환산하고, 식 (A)를 이용한 시뮬레이션 프로그램으로 지상역률 95%를 적용한 고압측 중성점 전위상승 값을 Table 2에 나타내었다.

$$V_n = \frac{(V_a \angle 0^\circ) Z_b Z_c + (V_b \angle 120^\circ) Z_c Z_a + (V_c \angle 240^\circ) Z_a Z_b}{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a} \quad (A)$$

V_n = 중성점 접지 탈락시 중성점 전위

V_a, V_b, V_c = 각 상의 정상전압

Z_a, Z_b, Z_c = 역률에 의한 각 상의 부하 임피던스

시뮬레이션 결과 고압측 중성점 전위가 최소 0.91 kV에서 최대 12.2 kV까지 상승됨을 알 수 있으며, 중성점 전위상승에 대한 벡터도를 도식화 하기위해 10개의 변압기중 불평형률이

Fig. 5. The Simulation of neutral point transfer phenomenon.

Table 2. Neutral point potential of the high-voltage neutral grounding Left out

Item	A-Phase (A)	B-Phase (A)	C-Phase (A)	Neutral point potential
Trans #1	2.74	0.11	1.16	7.55 kV
Trans #2	8.93	4.98	4.72	2.9 kV
Trans #3	0.37	0.74	0.74	2.64 kV
Trans #4	2.11	3.00	3.86	2.23 kV
Trans #5	2.42	3.07	2.88	0.91 kV
Trans #6	2.19	1.63	2.11	1.17 kV
Trans #7	2.23	1.56	1.44	1.86 kV
Trans #8	0.01	1.09	0.26	9.5 kV
Trans #9	2.74	3.89	8.21	4.44 kV
Trans #10	0.05	2.63	0.09	12.2 kV

순위가 중간값을 가지는 Trans #9에 대해 시뮬레이션한 결과 고압측 상전압이 13.2 kV가 유지되지 않고 A상 = 16.48 kV, B상 = 15.21 kV, C상 = 8.89 kV으로 변함에 따라 중성점 전위(V_n)가 4.44 kV까지 상승하는 것을 Fig. 5의 벡터도에서 볼 수 있다. 이러한 전압이 저압측으로 전이되면 저압 전기사용 기구는 소손 및 화재로 나타날 수 있는 것이다.

2.5 누전차단기 이상전압 투입 테스트

고·저압이 중성점 접지를 공유한 지상변압기에서 중성점 접지가 탈락 시 고전압이 저압측에 전이된다는 사실을 바탕으로 저압용 누전차단기에 이상전압을 투입하여 과전압에 대한 내구성을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 다만 시뮬레이션 결과에 의한 전압은 매우 높기 때문에 실험의 안전성을 위하여 일반적으로 중성선 탈락에 의해 투입될 수 있는 과전압(380V)을 투입하여 전자회로의 소손 및 아크 발생여부를 테스트해 보았다(Lee 2003).

Fig. 6은 국내에서 유통되는 정격전압 220 V, 단상2선식 누전차단기에 380 V를 인가하여 누전차단기 내부의 전자회로가 소손되어 아크가 외부로 출화되는 현상이며, 각 메이커 별로 9개의 누전차단기를 개별로 시험한 결과 모든 차단기에서

Fig. 6. The ELB test by inputting over-voltage.

Fig. 7. The test of fire Flammable ABS distributor.

Fig. 8. The test of fire retardant PC distributor.

동일한 결과를 보였다.

2.6 저압용 분전반 재질에 따른 화재확산 테스트

전국 재래시장 분전반 외함 재질을 조사한 결과 합성수지 등 플라스틱을 사용하는 곳이 49%, 금속을 사용하는 곳이 44%, 기타 재질을 사용하는 곳이 7%로 나타나 합성수지와 금속을 주요 외함 재질로 사용하는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 20120; Lee *et al.*, 2008). 이러한 조사배경을 바탕으로 분전반의 구성 재질별 화재 특성을 파악하기 위해 가연성 분전반 및 난연성 분전반 내부에 차단기를 설치하였으며 분전반 내부에 가연물에 의한 연소현상을 연출하기 위해 화재실험에서 표준발화 액체로 사용되는 헵탄(C7H16)을 차단기에 도포하고 이상전압을 투입하여 테스트를 진행하였다.

Test 결과 차단기가 소손되면서 외부로 출화되는 아크로 헵탄(C7H16)에 착화되었다. 가연성 ABS 수지로 구성된 분전반 형상은 Fig. 7과 같이 지속되는 연소진행 및 확산에 의하여 화원이 인가된 부분의 상부가 심하게 소손 되었으며, PC (폴리카보네이트)의 경우 초기 화원이 인가된 부분만 변형 현상이 나타날 뿐 화원이 제거된 즉시 소화되어 Fig 8와 같이 외부 출화가 발생되지 않았다.

3. 결 론

본 연구에 의한 결과 고압측 중성점과 저압측 중성점이 연결된 변압기는 중성점 접지 탈락에 의해 저압 수용가의 화재 및 설비 피해가 발생될 수 있다는 것이 증명되었으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 지상변압기 결선방식을 Δ -Y로 변경하면 중성점 접지 탈락에 의한 고압측 중성점 전위 상승 위험성을 제거할 수 있으나 배전계통의 표준화 때문에 적용하기 어려운 방식이다. 따라서 향후 지상변압기는 제작시 고·저압 중성점 접지를 분리하도록 표준화하여 신설 또는 기설 변압기 교체 시 적용할 수 있도록 제도적 개선이 필요하다.
- 2) 지상변압기 저압측에는 중성점 전위 상승에 따른 고전압 유입시 전원공급이 차단되거나 부하설비를 보호할 수 있는 시스템에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 3) 저압배전 선로는 중성선 다중접지 시공을 표준화 하여 접지탈락에 의한 고전압 유입을 제한 할 수 있도록 해야 한다.
- 4) 저압수용가는 고전압 유입에 따른 차단설비의 화재 발생 시 화재확산 방지를 위해 계량기 함 또는 분전반은 불연 및 난연재질의 사용이 제도화 되어야 한다.

References

Kim, K.H., Choi, J.K., Lee, J.H., and Choi, S.K. (2013) The Study of the Improving Grounding Method for 22.9kV multi-

grounded Pad Mounted Transformers, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 395-396.

Kim, M.Y. (2013) *Electricity Almanac*, Korea electric association.

Kim, H.W. and Baek, D.H. (2011) A study on the neutral line compensator for prevention of rising at load voltage instantly when disconnect the neutral line in 3phase 4 line system, *Proceedings of 2011 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering*, pp. 522-525.

Lee, M.H. (2003) A study on the safety with material and from for safety cover of low voltage Distribution, *Masters Dissertation, Seoul National University of Technology*.

Kim, G.H., Lee, S.I., Shin, S.S., and Bae, S.M. (2010) Development of Electric Safety Monitoring System and Cabinet Panel for Traditional Markets, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 123-128.

Lee, S.I., Kim, G.H., Jeon, H.J., and Bae, S.M. (2008) Survey of Panelboard for Weakness Place of Electrical Disaster, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, pp. 125-127.

Received ■ September 16, 2014

Revised ■ September 17, 2014

Accepted ■ September 25, 2014