

22.9kV 수변전설비의 실태 및 계기용변성기 절연커버의 출화특성에 관한 연구

최충석[†] · 김동우 · 한운기 · 이기연
전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)
(2005. 3. 2. 접수 / 2005. 6. 8. 채택)

A Study on the Fire Properties of MOF Insulation Cover and Field Condition of 22.9kV Class Power Receiving System

Chung-Seog Choi[†] · Dong-Woo Kim · Woon-Ki Han · Ki-Yeon Lee

Electrical Safety Research Institute, subsidiary of KESCO
(Received March 2, 2005 / Accepted May 8, 2005)

Abstract : We studied fire properties of MOF(Metering Out Fit) insulation cover and field condition of 22.9kV power receiving system. 49.5% of formal equipments were installed indoors, whereas 40.8% of informal equipments were installed as H-type. Insulation treatment was not done at a 22.4% ratio of main line(27.7% of transformer, 70.2% of COS, 10.4% of MOF). Fire pattern analysis showed that the fire started at the secondary part of OC wire. In the result of DTA(Differential Thermal Analysis), normal cover showed exothermic reactions at 310°C, 399°C and 510°C (endothermic reactions at 382°C). Whereas damaged cover showed exothermic reactions at 412°C(endothermic reactions at 389°C). In the result of TGA(Thermo Gravimetric Analysis), the thermal weight change of normal cover was similar compared to damaged cover. In the result of FT-IR analysis, normal cover showed absorption peaks at 3,024cm⁻¹, 2,921cm⁻¹, 1,600cm⁻¹, 1,492cm⁻¹, 1,451cm⁻¹, 1,154cm⁻¹, 1,027cm⁻¹, 906cm⁻¹. Whereas, in case of tracked cover, the absorption peaks that were shown in normal cover disappeared and different absorption peak was shown at 966cm⁻¹.

Key Words : fire properties, MOF, power receiving system, SEM, FT-IR, DTA/TGA

1. 서 론

전력설비의 증가로 전기에너지의 사용량이 매년 급증하고 있으며 앞으로도 전기사용량은 더욱 늘어날 것으로 전망된다. 이와 같이 전기에너지는 우리의 일상생활에서 없어서는 안 될 중요한 역할을 하고 있음에도 불구하고 작업자의 과실, 사용자의 부주의, 시설의 노후, 제품자체의 결함 등으로 화재나 감전사고, 설비사고를 유발하여 많은 인명피해와 재해피해를 가져오고 있다. 2003년도 우리나라 전기화재 통계에 의하면 화재는 총 32,966건으로 그중 전기화재는 11,202건으로 34.0%를 차지하였

다. 전기화재의 발생원인으로는 합선(단락), 과부하(과전류), 누전 순으로 많았다¹⁻³⁾.

22.9kV 수변전설비에 있어 노출충전부로부터 전격재해의 예방을 위하여 절연커버가 사용되고 있으며 사용 여건상 한번 설치되면 소손 또는 파괴가 일어날 때까지 사용된다. 즉, 전기설비는 다양한 조건에 설치되어 있기 때문에 염분, 분진, 산성우, 자외선 등에 의해 열화(劣化)의 속도가 상대적으로 빠르다. 이런 환경에서 설비가 안전하게 유지되기 위해서는 내아크성, 내열성, 내산성 등에 우수한 특성을 갖도록 설계되어야 한다.

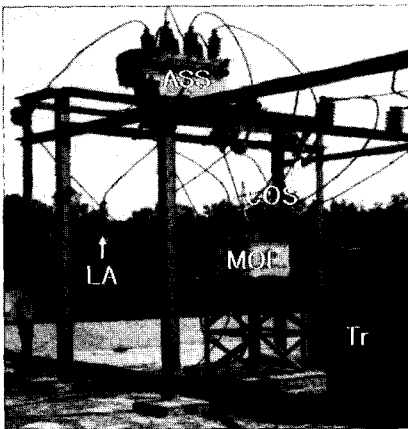
본 연구에서는 22.9kV 수변전설비의 구성 방식에 대한 현장실태와 계기용변성기 절연커버의 열화에 의한 출화특성을 객관적으로 제시하여 시스템 운용에 도움이 되고자 한다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
enetek@naver.com

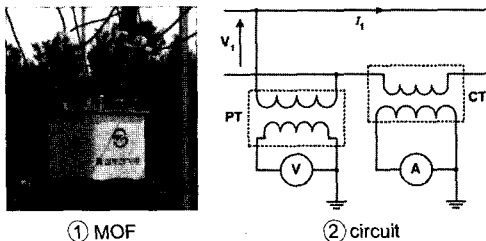
2. 현장실태 분석

2.1. 수전설비의 구성

Fig. 1은 연구 대상인 옥외용 22.9kV 수변전설비의 일부를 나타낸 실체사진이다. (a)는 현장에 설치된 수전설비의 예로서 철골을 지지대로 사용하였으며, 바닥은 콘크리트를 이용하였다. 이와 같은 수전설비는 송배전선을 통해서 공급된 전기가 고장 구간자동개폐기(ASS; Automatic Section Switch), 컷아웃스위치(COS; Cut Out Switch), 계기용변성기(MOF; Metering Out Fit or Instrument Transformer), 변압기(Tr; Transformer) 등을 경유하게 된다. (b)는 수변전설비에 설치된 MOF의 실체사진 및 회로도를 나타낸 것이다. (c)는 MOF의 절연커버를 나타낸 실체사진이며, 사람의 접촉 또는 접근이 있을 때 안전사고 예방 및 시스템 보호를 위해 설치된다.



(a) Installed state of main equipments



(b) The picture of MOF and circuit



(c) The insulation cover of MOF

Fig. 1. The pictures of 22.9kV Power Receiving System

계기용변성기는 고전압을 사용하는 설비에 큰 변압비와 변류비를 이용하여 전압과 전류를 계측하는 것으로 일반적으로 사용되는 구조는 건식(dry type), 몰드형(mold type), 유입식(oil field type) 등이 있다. 구성은 계기용변압기(PT; Potential Transformer)와 계기용변류기(CT; Current Transformer)가 조합되어 있다. PT의 1차 전압이 정격전압인 경우에 2차 전압이 110V가 되도록 설계하고, CT는 1차 측에 정격전류가 흐를 때 2차 전류는 5A이다.

2.2. 수전설비의 현장실태 분석

Table 1은 22.9kV 수변전설비의 구성방식을 조사한 것이다.

현장실태조사는 경기도와 강원지역으로 한정하였으며 총 조사수용가는 15,489호로 이중 91.6%에 해당하는 14,185호가 약식설비를 채용하고 있었다.

약식설비를 채용한 수용가 중 H변대는 5,789호(40.8%), 옥외 옥상설비는 3,423호(24.1%), 옥내 지하설비는 2,403호(16.9%)의 순으로 나타났다. 정식설비는 1,304호가 채용하고 있었으며 이중 지하와 구내를 포함한 옥내 설치는 946호(72.5%)로 나타났다. 여기서 약식설비는 78.7%가 옥외 및 H변대에 설치되어 있는 반면, 정식설비는 72.5%가 옥내에 설치되어 있음을 알 수 있었다.

Table 2는 22.9kV 수변전설비의 노출충전부 절연처리 현황을 조사한 결과이다.

전기제해 통계에 의하면 감전사고는 주로 모선과 변압기에서 발생하는 것으로 나타났으며, 실태조사 결과에서도 모선의 경우 전체 절연처리는 51.3%,

Table 1. The configuration methods of 22.9kV Power Receiving System

구성방식		호 수	점유율(%)	
약식	옥내	지하	2,403	16.9
	구내	622	4.4	
	옥외	지상	1,948	13.8
	옥상	3,423	24.1	
	기타	H변대	5,789	40.8
소 계		14,185	100	
정식	옥내	지하	645	49.5
	구내	301	23.1	
	옥외	지상	292	22.4
	옥상	66	5.0	
	소 계		1,304	100
총 계		15,489	100	

Table 2. Insulation treatment of 22.9kV Power Receiving System according to equipments

절연 처리	모선			변압기		COS	
	전체	일부	무	유	무	유	무
수용가 (호수)	7,950	4,077	3,462	11,199	4,290	4,614	10,875
점유율 (%)	51.3	26.3	22.4	72.3	27.7	29.8	70.2
조사대상 수용가 수 : 15,489호				LA		MOF	
				유	무	유	무
				4,389	11,100	13,876	1,613
				28.3%	71.7%	89.6%	10.4%

일부절연처리는 26.3%로 나타났다. 변압기의 경우 72.3%가 절연처리를 하였으며 MOF의 경우 89.6%가 절연처리를 한 것으로 집계되었다. 반면, 컷아웃 스위치(COS)와 피뢰기(LA)는 각각 29.8%와 28.3%만이 절연처리를 한 것으로 나타났다. 즉 전기설비 사고 예방의 대표적인 방법 중의 하나가 충전거리의 확보 및 적절한 절연성능의 부여인데 이것이 부족하다는 것은 상시 사고가 잠재하고 있음을 의미한다. 따라서 작업자 또는 관리자에 대한 주기적인 교육은 물론 설비의 보완이 요구된다 하겠다.

3. 실험방법

Fig. 2는 MOF 절연커버의 절연열화에 의한 출파 패턴 및 전기적 특성변화 해석을 위해 구성된 회로의 개략도를 나타낸 것으로 공사현장과 유사한 조건에서 절연불량이 발생할 수 있도록 하였다. 또한, 실험 진행 중에 발생할 수 있는 안전사고를 방지할 수 있는 보호회로를 전단에 구성하였다. 여기서 S; 전원공급스위치(Power supply switch), VT; 전압조정기(Variable ratio transformer), T; 절연변압기(Insulating transformer), R; 직렬저항(Series resistor), V; 전압계(Voltmeter), F; 과전류 보호기기(Over current device, fuse or relay) 등이다.

실험에 적용된 MOF 절연커버의 재질은 아크릴이며 부싱(bushing) 위에 설치한 후 절연내력시험기(DEC-P100K, Dawha Eng., Korea)를 이용하여, 현장설비의 조건과 동일한 13.2kV를 옥외용가교폴리에틸렌절연전선(OC) 상단 동선과 부싱의 접지(grounding)단자 사이에 인가하였다. 가속 열화를 일정하게 시키기 위해 3% 농도의 NaCl 수용액을 절연커버와 부싱에 고르게 분사하였다. 이때 시간의 경과에 따른 절연과괴 진행과정을 관측하여 화염의 확

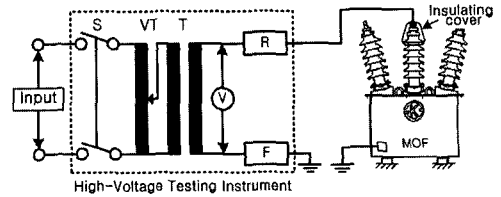


Fig. 2. Schematic of the MOF cover deterioration experiment

산패턴을 분석하였다. 그리고 TA(SDT-2960, TA Ins. USA), SEM(JSM-6400, JEOL, JAPAN), FT-IR (Spectrum GX, Perkin-Elmer, USA), 등을 이용하여 소손된 MOF 커버의 열특성, 표면이미지, 분광특성 등을 분석하였다^{4,5)}.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 아크릴 재질의 MOF 절연커버의 화재발생 과정을 순차적으로 나타낸 것이다. 일반적으로 MOF는 실외에 설치되므로 오염된 절연커버의 표면을 통해서 누설전류(leakage current)가 흐르게 되면 줄열에 의해 미소발광방전(scintillation)이 수반되어 열화(劣化)는 점점 가속된다. 이러한 과정이 반복되면서 표면에 흔적(track)이 생기고 도전성 물

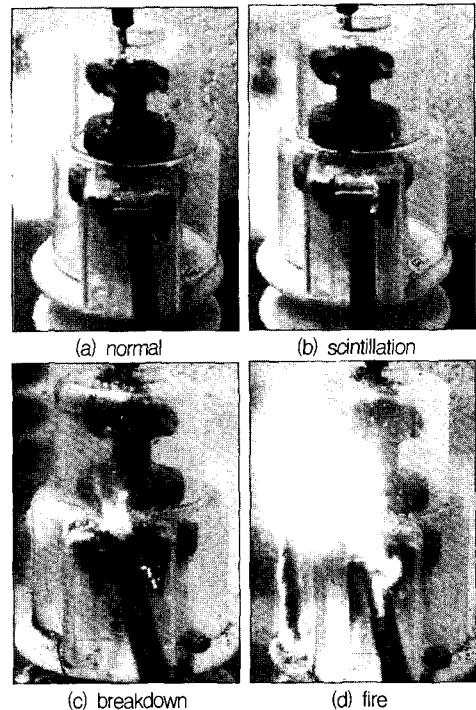


Fig. 3. Ignition pattern of MOF cover

질로 변화하는데 이것을 트래킹현상(tracking phenomenon)이라 말한다. 트래킹 과정 중에 왜 절연재료가 도전성을 갖는지에 대해서는 아직까지 명확하게 규명되지 않은 상태이다^{6,9)}. (a)는 투명한 재질의 절연커버(정상상태)로 내부의 부상이 선명하게 확인된다. (b)는 미소발광방전이 발생하기 시작하는 실제사진으로 OC전선 1차 측의 인입 부분, 2차 측의 인출 부분, 절연커버 하단 부분 등에서 불꽃이 형성되어, (c) 및 (d)와 같은 출화 패턴을 보여주고 있다. 가장 먼저 착화된 부분은 OC전선 2차 측의 인출 부분으로 나타났다. 이는 볼트 단자대와 절연커버 사이의 이격거리가 다른 부분에 비해 짧을 뿐만 아니라 볼트 단자대 위에 절연커버가 항시 접촉되어 있어 구조적 결함인 것으로 나타났다. 즉 감전보호와 화재예방 측면에서 단자의 길이를 적절하게 조정하고 MOF 절연커버의 절곡부를 더욱 완만하도록 설계해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 MOF 절연커버의 실제사진을 나타낸 것이다. (a)는 정상상태의 실제사진으로 표면이 고르고 투명한 광택을 갖고 있다. (b)는 트래킹에 의해 소손된 것으로 불규칙적인 절연과피의 패턴경로를 형성하며 탄화가 진행되었음을 알 수 있다. 이와 같은 패턴은 비정질체에서 나타나는 특징으로 쇄교(cross-link)되어 있던 고분자가 미소에너지에 의해 탄화될 때 나타나는 현상중의 하나이다.

Fig. 5는 Fig. 4의 표면의 미세변화를 알아보기 위해 나타난 주사전자현미경(SEM) 사진이다. 사진에 나타난 바와 같이 (a)의 정상품의 경우 균일한 입계를 보이는 반면, 트래킹에 의해 소손된 물품인 (b)의

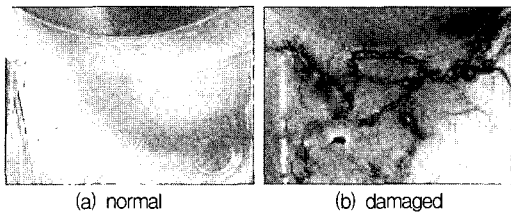


Fig. 4. Pictures of MOF cover

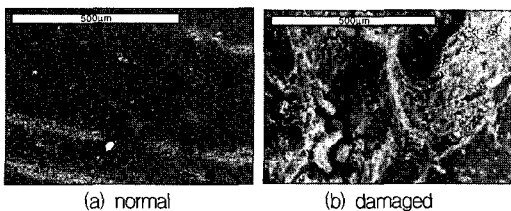


Fig. 5. SEM images of MOF cover

경우 표면이 심하게 변형되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 6는 절연커버를 시차열분석(DTA, Differential Thermal Analysis)한 곡선이다. A는 정상품의 곡선으로 310℃, 399℃, 510℃에서 발열반응이 있고, 382℃에서 흡열반응이 있는 것으로 나타났다. B는 트래킹에 의해 소손된 곡선으로 412℃에서 발열반응이 있고 389℃에서 흡열반응이 있었다. 이와 같은 차이가 발생하는 이유는 순간고열에 의해 탄화 및 재결합이 이루어지기 때문으로 판단되며 다른 고분자 재료에서 나타나는 성상과 유사했다^{10,11)}.

Fig. 7은 절연커버를 열중량분석(TGA, Thermo Gravimetric Analysis)한 곡선이다. 정상품과 트래킹에 의해 소손된 물품은 유사한 경향을 보였다. 단, 트래킹된 절연커버의 경우 1차 전기적인 스트레스를 받았기 때문에 온도에 따라 중량이 약간 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 절연커버의 적외선 분광특성(FT-IR)을 나타낸 것이다. 정상품(normal)의 경우 3,024cm⁻¹, 2,921cm⁻¹, 2,850cm⁻¹, 1,743cm⁻¹, 1,600cm⁻¹, 1,492cm⁻¹, 1,451cm⁻¹, 1,154cm⁻¹, 1,027cm⁻¹, 906cm⁻¹ 등에서 고분자물질을 대표하는 피크를 관측할 수 있었다. 그러나 트래킹된 물품(tracking)의 경우 일반적인 피크는 없어지고 새로운 966cm⁻¹가 관측되었는데 이것은 순간고열로 결합이 파괴되고 탄화되었기 때문으로 생각되며 유사한 물질에서도 이런 특징이 발견되었다^{10,11)}.

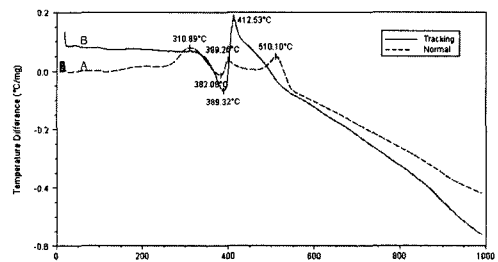


Fig. 6. DTA curves of MOF cover

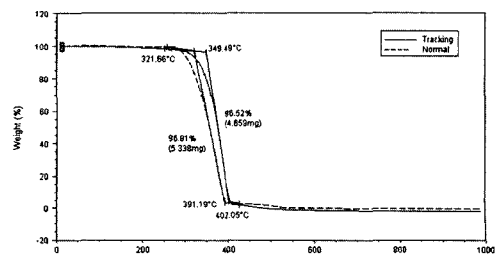


Fig. 7. TGA curves of MOF cover

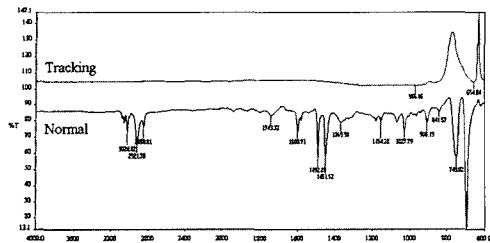


Fig. 8. FT-IR curves of MOF cover

5. 결론

22.9kV 수변전설비의 현장사용 실태 및 계기용 변성기의 출화특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 22.9kV 수변전설비의 구성방식을 조사한 결과, 조사대상의 대부분이 약식설비(91.6%)를 사용하고 있었으며 약식설비 중 옥외 및 H변대를 사용한 방식이 전체의 78.7%를 차지하였다. 반면에 정식설비의 경우 옥내의 지하 및 구내에 설치한 경우가 72.5%를 차지하였으며 설치환경 및 조건에 따라 설비의 영향은 많은 차이가 있을 것으로 판단된다.

2) 노출 충전부의 절연처리 실태를 조사한 결과, 모선의 경우 전체절연은 51.3%로 나타났으며, 변압기와 MOF의 경우 각각 72.3%, 89.6%가 절연처리한 것으로 집계되었다. 그러나 COS와 LA는 각각 29.8%, 28.3%만이 절연처리를 한 것으로 나타나 감전 및 화재 등 전기재해 예방을 위한 설비의 절연보완이 요구된다.

3) MOF용 절연커버의 절연열화에 의한 화재위험성을 실험한 결과, OC전선 1차측, 2차측 인입부분 및 절연커버 하단부에서 미소발광방전이 발생하였으며 가장 먼저 착화된 부분은 절연커버의 2차측 인출부분으로 나타났다.

4) 시차열분석(DTA)에서 정상품은 310℃, 399℃, 510℃에서 발열반응이 있었고, 382℃에서 흡열반응이 있는 것으로 나타났다. 소손품은 412℃에서 발열반응이 있고 389℃에서 흡열반응이 있었다.

5) 열중량(TGA) 분석에서 정상품과 소손품은 유사한 경향을 보였다. 또한, 적외선분광특성(FT-IR)에서 정상품의 경우 3,024cm⁻¹, 2,921cm⁻¹, 2,850cm⁻¹, 1,743cm⁻¹, 1,600cm⁻¹, 1,492cm⁻¹, 1,451cm⁻¹, 1,154cm⁻¹, 1,027cm⁻¹, 906cm⁻¹ 등에서 고분자물질을 대표하는 피크를 관측할 수 있었다. 그러나 트래킹된 물품의 경우 일반적인 피크는 없어지고 새로운 966cm⁻¹가

관측되었다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 한국전기안전공사, “전기재해 통계분석”, pp. 7~84, 2003.
- 2) 최충석 외 5, “전기화재공학”, 동화기술, pp. 189~198, 2004.
- 3) Andrews, J. J., Marshall, J. A., “A detailed investigation of an electrical shock and burn injury”, IEEE., Industrial and commercial power systems Technical Conference, pp. 143~154, 1998.
- 4) IEC Pub 1. 112, “Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid materials under moist conditions”, 3rd edition, 1979.
- 5) ASTM D 2303-90, Standard Test Method for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials, ASTM.
- 6) Nahman, J. M., “Assessment of the risk of fatal electrical shocks inside a substation and in nearby exposed areas”, IEEE Trans., Industry Applications, pp. 911~922, 1998.
- 7) Wang Ruzhang, Huang Weishu, Yin Goxiang, “A testing research on composite air clearance for live line working on 500kV DC transmission lines”, ESOM, pp. 183~189, 1995.
- 8) Chung-Seog Choi, et al, “A study on the characteristics of tracking deterioration between electrodes on phenolic resin used for low voltage”, KIEE, The international Conference on Electrical Engineering Proc., pp. 1135~1138, 2002.
- 9) A. M. G. Minto, “Some aspects of precautions against electric shock and earth faults in electrical installations”, Third International Conference on IEMSS, pp. 36~41, 1988.
- 10) 송길목 외 3, “트래킹에 의해 열화된 페놀수지의 탄화 특성”, 대한전기학회, Vol. 53C, No. 1, pp. 1~7, 2003.
- 11) 최충석 외 2, “저압설비에 사용되는 누전차단기의 트래킹 특성에 관한 연구”, 한국산업안전학회지, pp. 74~79, 2001.