

22.9kV 수변전실에 설치된 계기용변성기(MOF)의 소손 원인 판정(上)

전기 화재의 발생 원인을 과학적으로 분석하고 향후 예방을 위한 자료로 활용하기 위해 계기용 변성기(계기용 변압변류기 ; MOF)의 소손 패턴, 실제 사진 및 금속 조직, 조성 변화, 적외선 흡광 스펙트럼 등을 과학적으로 해석하여 객관적 근거를 제시하고자 한다.

글 | 최충석 한국전기안전공사 전기안전연구원
재해예방연구그룹장, 공학박사

1. 머리말

전기는 현대 문명을 발전시키는 원동력으로서 산업 발달의 중요한 에너지 역할을 해오고 있다. 특히 최근에는 다양한 욕구 충족에 맞도록 전기 기기 및 기계 기구의 대량 생산이 가능하게 되었고 정밀화, 고도화 되어가고 있는 추세이다. 이는 향후에도 더 많은 발전이 있을 것으로 기대된다. 일상생활에 없어서 안 될 유용한 전기에너지는 인간생활에 혜택을 주는 반면, 부주의한 사용과 제작상의 결함, 설계의 문제점 등으로 전기 재해를 유발하게 된다.

전기 재해는 크게 인체에 직접적인 영향을 주는 감전 사고와 전기설비 사고에 의한 화재 등으로 구분될 수 있다. 전기화재의 출화 형태는 배선기구 및 전기기기로부터의 출화, 누전에 의한 출화, 정전기 불꽃에 의한 출화 등이 있다. 전기 화재를 구체적인 원인에 따라 분류하면 단락, 과부하, 반단선, 트래킹 및 그래파이팅 현상, 누전, 접촉 불량 및 아산화동 증식 발열 현상, 방전, 정전기 불꽃, 은 이동 등이 있다.

전기에너지를 생산하는 발전 방식은 원천 에너지에 따라 수력, 화력, 원자력 등으로 분류하고 있으나 에너지를 전달하는 방식은 유사한 패턴을 가지고 있다. 즉 발전소에서 생산된 전기는 765[kV], 345[kV] 등의 전압으로 승압(1차 변전소; Tr1)된 전기가 송전선(T/L)으로 보내지면, 2차 변전소(Tr2)에서 154[kV], 22.9[kV] 등으로 다시 강압되어 아파트, 공장, 학교, 병원 등의 수변전실로 배전한다. 수변전실에서 다시 비교적 안전한 전압인 220[V], 380[V], 440[V] 등으로 전압을 낮추어(강압) 공급하는 시스템이 구성되어 있다. 즉 이와 같이 안전을 확보하고 전기 활용의 효율성을 높이기 위해 수변전실이 필요하고 그곳에 설치된 기기 중의 하나가 계기용 변성기 또는 계기용 변압변류기(MOF)라는 것이다.

MOF는 고전압 회로의 전압, 전류 또는 저압 회로의

큰 전류를 측정하는 경우와 계전기(relay) 종류 등을 사용하는 경우에는 취급에 대한 안전을 위해 설치된다. MOF의 사고 원인이 되는 주요 열화 인자는 제작 불량에 의한 단락, 설치시 취급 불량에 따른 절연 재료의 절연 성능 저하로 인한 절연 파괴, 관리 및 회로 구성 방식의 착오로 인해 철공진, 계기용변압기 사용 중에 2차 측의 단락(open)에 의한 사고, 변류기의 경우 사용 중에 2차 측 개방에 따른 절연 파괴 등이 있다. 사고 원인 분석은 소손된 MOF의 열흔 패턴 분석, 금속 현미경을 이용하여 금속 단면을 확대하여 열원을 해석한다. 또한, 주사 전자 현미경(SEM), 에너지 분산형 분광 분석(EDX) 등을 이용하여 금속 조직의 미세 확대와 성분 분포 특성을 해석하여 사고 당시의 상태를 분석한다. 탄화된 절연 재료 표면의 화학적 변화 특성을 적외선 흡광 스펙트럼(FT-IR)을 이용하여 분석한다.

본 논고에서는 전기 화재의 발생 원인을 과학적으로 분석하고 향후 예방을 위한 자료로 활용하기 위해 계기용 변성기(계기용 변압변류기; MOF)의 소손 패턴, 실제 사진 및 금속 조직, 조성 변화, 적외선 흡광 스펙트럼 등을 과학적으로 해석하여 객관적 근거를 제시하고자 한다.

2. 화재 조사 및 분석

가. 현장 상황 조사

(1) 건물의 용도

어떤 용도로 사용되고 있는가?

(2) 발화 지점 및 발화원의 위치

사고 당시 정확한 위치는 분석되었는가?

(3) 목격자의 진술

화재 현장의 열 확산 패턴은 어떠한가?

나. 전기 설비의 화재 현장 조사

(1) 단선 결선도에 의한 결선 상태

전기가 공급되고 있는 설비의 결선 상태 해석은 이루어졌는가?

(2) 배·분전반 결선도 및 현장 상태(개폐 상태, 퓨즈, 차단 상태 등)

보호 장치의 작동 상태 및 소손 상태는 어떠한가?

(3) 열에 취약한 전기 기구의 발화 상태

열적 스트레스를 많이 받는 설비의 상태는?

다. 현장 수거물의 외형적 고찰

(1) 전기 화재 요인으로 추정되는 수거품의 화염 패턴 등

수거품뿐만 아니라 건물 벽면의 상태, 천장의 그늘음 등 거시적이고 미시적인 시각으로 중점을 허용하며 파노라마 기법으로 촬영과 분석이 이루어져야 한다.

(2) 수거품의 용융흔 상태

외부 화염인 경우 전체적인 용융흔이 나오기 쉽고 급격한 요인의 열에 의한 영향보다 장시간 지속적으로 인가된 흔적이 많이 발견된다. 이때 물질의 녹는점과 발화점 등을 숙지하여 판별하면 쉽게 접근이 가능하다.



(3) 절연 재료의 탄화 도전로에 의한 저항 감소 등

절연 재료의 목적은 전류가 흐르는 도전로(기기)로부터 생명체(사람과 가축) 및 설비를 보호하는 데 있지만 어떤 요인에 의해 열화된 경우 표면에 누설 전류가 흘러 절연이 파괴되어 화재로 이어지는 경우가 많다. 이때 대부분 절연성을 잃고 도전화되는 현상을 가지게 되는데 이런 경우를 탄화 도전로가 형성되었다고 한다. 즉 전류가 흐르면 절연 재료는 저항으로의 역할을 하게 되어 고온의 열을 발산하게 된다.

(4) 접속부에서의 아산화동 증식 등

접속부의 접촉 불량에 의한 화재는 많이 발생된다. 이때 장시간 접촉 불량에 의한 금속부의 열적 손상이 이루어지면 아산화동 증식과 같은 발열하기 쉬운 형태의 열 저항이 발생하게 된다.

(5) 스위치의 개폐와 차단기의 차단 여부 등

스위치나 차단기 등의 가장 근본적인 공통점은 기기의 2차측 전원 상태를 통제하여 전류가 흐르지 않도록 할 수 있다는 것이다. 즉 최초 현장 점검 및 조사가 있을 때 그 사항을 조사할 수 있도록 하여야 한다.

라. 금속 단면 조직 분석

(1) 실체 현미경에 의한 외형 분석

실체 현미경은 작은 실물의 형태를 확대하는 데 용이한 것으로 100배 이하의 배율을 조절하여 용융 망울이나 기타 소손 형태를 분석한다.

(2) 금속 현미경에 의한 금속 단면 조직의 분석

전원선의 단락이나 열에 의한 변형, 과부하에 의한 형태 등을 분석하는 데 용이하다. 구리의 경우 일반적으로 높은 고온이 발생하게 되면 기포가 형성되고 조직이 불규칙하게 변형된 단면을 볼 수 있고 단락인 경우 동선의 경계면 중심으로 용융된 부분이 주상 조직을 가지고 분포되어 있다. 주상 조직이 발생하는 원인은 구리의 특

정상 순간적으로 고온에서 저온으로 약 1,000[°C] 이상의 열 변화가 생길 때 발생하는 조직으로 단락의 경우 스파크에 의해 상당한 고열이 발생하게 되는데 이때 온도에 의해 생성된다. 또한 과부하에 의해 조직이 변형되는 것은 소혈흔 등이 나타나므로 종합적인 분석이 가능하다.

마. 주사 전자 현미경(SEM)에 의한 분석

주사 전자 현미경은 현장 수거물을 고배율로 분석할 수 있는 것으로 일반적으로 수백~수만배 이상의 배율이 가능하다. 전자총에 고압의 전계가 가해져 전자가 방출되면 시료의 표면에 부딪히고 이때 2차 전자와 반사 전자를 검출하여 영상으로 재현하는 방식으로 미세 조직의 형태를 분석하는 데 용이하다.

바. 도전 재료의 정성 및 정량 분석

(1) 열에 의한 산소의 반응 참여

전원선의 경우 열에 의해 달아오른 후 식으면서 주변의 가스와 반응하는데 이때 산화 반응에 의해 전원선 표면에 부착된 여러 가지의 성분을 분석하여 화재의 원인을 분석한다.

(2) 전선의 성분 함유율 등

절연 피복에서 발생한 가스나 주변에서 발생한 특이 가스의 분출로 전선이 오염되었을 경우 이러한 상태를 분석하여 전기 화재의 원인을 분석하는 자료로 활용할 수 있다.

사. 절연 재료의 열분석

(1) 열 열화에 따른 흡열 및 발열 반응

열적 피로가 가중된 절연 재료의 정도를 확인할 수 있는 것으로 흡열 및 발열 반응을 확인하면 화재 당시의 열적 피로 정도를 추정하는 데 유리하다.

(2) 열량 변화

시차 열량 변화에 의해 열적 피로의 정도를 분석하는데 이용된다.

(3) 열에 의한 절연 재료의 손상 정도 등

상기의 분석을 종합하여 실질적으로 화재가 발생하였을 때 발화원으로서의 역할을 한 것인지 열이 내부에서 외부로 진행된 패턴을 가지는지 등을 분석하는 데 용이하다.

아. 기타(절연 재료의 분석 등)

절연 재료의 화학적 구조 변화를 분석하거나 X-선을 이용한 투과 분석으로 기계적 피로를 분석하는 데 용이하다.

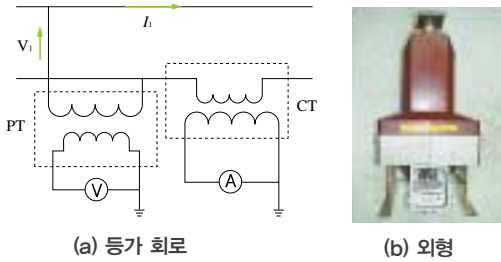
3. MOF의 구조 및 소손 원인

가. MOF의 구조

계기용변성기(MOF)는 고전압을 사용하는 설비에 큰 변압비와 변류비를 이용하여 전압과 전류를 계측하는 것으로, 일반적으로 사용되는 구조는 건식(dry type), 몰드형(mold type), 유입식(oil filled type) 등이 있다. 최근 유기질 절연 재료의 발달에 따라 몰드형이 옥내 고전압 설비에 많이 이용되는 경향이 있다. 즉, 고전압 회로의 전압, 전류 또는 저압 회로의 큰 전류를 측정하는 경우와 계전기(relay) 종류 등을 사용하는 경우에는 취급에 대한 안전을 위해 설치된다. 계기용변성기에는 계기용 변압기(Potential Transformer)와 계기용 변류기(Current Transformer ; CT)가 있으며, 2차측 부하는 계기나 계전기이고, 선로의 부하와 구별하기 위하여 이것을 부담(burden)이라고 한다.

계기용변압기는 1차 전압이 정격 전압의 경우에 2차 전압이 110[V]가 되도록 설계하고, 변류기는 1차 측에 정

격 전류가 흐를 때에 2차 전류가 5[A]가 되도록 하는 것이 표준으로 되어 있다. 계기용 변성기의 일반적인 회로 구성을 보면 [그림 1]과 같이 계기용 변압기와 변류기로 구성되어 있는 것을 알 수 있다.

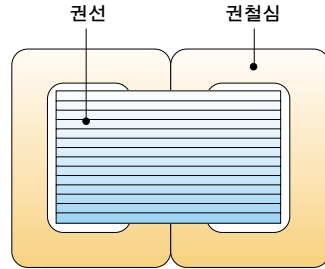


■ 그림 1. 계기용 변성기의 회로 구성 및 외형

계기용 변압기는 1차 측을 피측정 회로로 하고 2차 측을 전압계 또는 전력계의 전압 코일 등에 접속한다. 일반적인 전력용 변압기의 원리와 구조를 비교하여 큰 차이는 없으나, 변압비를 특히 정확하게 하기 위해 1차 권선과 2차 권선의 임피던스 강하를 적게 하고, 철심에 좋은 철판을 사용하여 여자 전류를 적게 하고 있다.

계기용 변압기의 변압비를 보면, $V_1=(n_2/n_1)V_2=aV_2$ 이며, 이때 a 가 변압비이다. 분석품의 경우 외형을 이루는 것은 몰드형으로 계기용 변압기는 권철심형의 외철형이다. [그림 2]는 권철심형을 간략도로 나타낸 것으로 권철심 사이에 1차 및 2차 권선이 있는 것을 알 수 있다.

사고 분석품의 경우 한국산업규격(KS C-1707) 및 JIS-1736에 해당하는 규격을 갖추어야 한다. 모델명은 YHM-20BD로서 절연 계급이 20.A호이다. 변압비는 13200/110[V]이고, 변류비는 150/5[A]로 되어 있다. 정격 부담은 25[VA]로 정격 주파수가 60[Hz]이며, 총 중량은 61.5[kg]에 이른다. 본 변성기는 접지형으로 옥내용에 이용되는 것이다.



■ 그림 2. 권철심형 변압기의 간략도

나. MOF의 소손 원인

교류 고전압이나 대전류를 측정하는 경우 계기를 직접 회로에 접속하면 위험할 뿐 아니라 적당한 계기가 얻어지지 않는 경우가 많다. 따라서 주 회로와 절연하여 전압, 전류를 계기로 측정할 수 있는 적당한 값으로 변환하여 계측이 가능하도록 구성된 계기용 변성기는 측정 보조 장치로 이용되는 것으로 원리와 구조는 일반 변압기와 같으나 변환할 때에 오차를 일으키지 않도록 하여야 한다. 이 때문에 투자율이 크고 철손이 작은 철심을 이용해서 여자 전류를 극히 작게 하고 또한 누설 자속과 권선 저항을 작게 하여 1차 및 2차 권선에 임피던스 전압 강하를 될 수 있는 한 작게 하여 변환할 때 오차를 일으키지 않도록 하여야 한다. 계기용 변압기의 경우 수천 볼트에서 수만 볼트를 강압하여 계기에 접속한다. 이러한 특성을 가진 변성기의 사고 원인은 다양하게 나타나며, 몰드형 계기용 변성기의 예를 들면 다음과 같다.

- (1) 제작 불량에 의한 사고로서는 층간 단락, 권선간 단락, 절연 불량에 의한 단락 등이 있으며, 이는 원래 목적의 설비 이용을 무시하고 사용된 경우에도 발생한다. 과도한 부담에 의해 발생하는 것으로 계측 외에 조명이나 기타 업무에 이용될 경우 사고로 이어질 수 있다.
- (2) 설치시 취급 불량에 따른 절연재료에 균열(크랙)

이 발생하여 절연 성능이 저하되면서 절연 파괴로 이어진다.

(3) 관리 및 회로 구성 방식의 착오로 인해 철공진(ferro-resonance)에 의한 사고가 발생할 수 있다. 이는 철심이 사용된 리액터와 콘덴서와의 직렬 또는 병렬 회로에 일어나는 공진으로 리액터의 비직진성에 기인하는 것으로 주파수를 바꾸지 않아도 전압을 변화시킴으로써 일어난다. 직렬 철공진에서는 전류의 도약 및 히스테리시스 등이 일어나는 경우가 있고, 병렬 철공진은 철공진 전압 안정기에 응용된다.

(4) 계기용변압기는 사용 중에 절대로 2차 측을 단락해서는 안된다. 이것은 전력용 변압기와 마찬가지로 커다란 단락 전류가 흘러서 코일을 소손하기 때문이다.

(5) 변류기의 경우 사용 중에 2차 측을 개방하면 1차 전류가 모두 여자 전류가 되어 철심의 자속밀도가 대단히 커져 철손이 증가하고 2차 측에 고전압이 유도되어 절연 파괴를 일으킬 위험이 있다. 따라서 사용 중에는 2차 회로를 개방하여 사고로 이어지는 경우가 있다.



다. 분석 방법

수거물의 분석 방법으로는 다양한 기법을 통해 과학

적인 원인 판정의 접근이 되도록 하였다. 외형 및 열흔 패턴에 의해 절연 재료의 탄화 정도를 분석하고 열 진행 방향을 추정하여 사고의 원인이 될 수 있는 시나리오를 구성한다. 이때 외형의 복원 및 탄화 진행 과정, 확대 범위 등을 과학적으로 분석하기 위한 방법으로는 다양한 사고 패턴에 대한 분석품의 변형 정도를 가지고 분석하는 기법을 이용한다.

실체 확대 및 금속 단면 조직을 확대하여 권선의 용융 흔적을 분석하고 금속 단면 조직에 나타난 형태를 분석하여 열적 소손의 정도와 단락, 과부하 여부 등을 분석할 수 있다. 이때 이용되는 장비로는 실체 현미경과 금속 현미경 등 광학 현미경(optical microscopy)을 사용한다. 미세 구조 및 성분 분포 해석에 의한 표면 분석에는 주사 전자 현미경(scanning electron microscope)과 에너지 분산형 분광 분석이 주로 이용된다.

이를 통해 1,000배까지 금속 조직을 확대할 수 있으며 탄화 및 용융시의 열적 피로에 대한 상황을 분석할 수 있다. 또한 성분 분포를 해석하여 외부 열 요인에 의한 것인지 여부를 판단하고, 얼마만큼의 시간이 소요되었는지 등을 추정한다. 정밀 분석기기인 적외선분광기(FT-IR)를 이용하여 절연 재료의 화학적 구조 변화를 분석하고 이에 따른 열화 정도를 해석한다. 이는 열적 특성을 분석하는 데 유용한 것으로 탄화되었을 때 화학적 변화 과정을 분석하는 데 이용된다.

열 분석기(TA)를 이용하여 절연 재료의 흡열 및 발열 반응의 정도를 분석하여 이때의 탄화 정도를 해석할 수 있는 시차 열 분석(DTA)을 실시하고, 열 중량 변화의 정도를 분석하여 탄화된 부분의 확대 범위 등을 판단할 수 있다. 즉 종합적 분석으로 분석 대상물의 사고 원인을 과학적으로 접근하여 객관적 자료가 되도록 판정한다. (🔴)

(다음 호에 계속)