

3상 170 kV 가스절연개폐장치(GIS)의 사고 원인 분석 및 예방 대책

최 충 석

전주대학교 소방안전공학과
(2011. 5. 7. 접수 / 2011. 7. 21. 채택)

Analysis of the Causes of Accidents Related to 3 Phase 170 kV Gas Insulated Switchgears(GIS) and Preventive Measures

Chung-Seog Choi

Department of Fire Safety Engineering, Jeonju University
(Received May 7, 2011 / Accepted July 21, 2011)

Abstract : The purpose of this paper is to analyze the causes of accidents related to the 3 phase 170 kV gas insulated switchgear of a power system collected from accident sites to secure data for the prevention of similar accidents and provide important points of view regarding diagnosis for the prevention of accidents involving gas insulated switchgears. The analysis results of the causes of accidents involving gas insulated switchgears showed deformation of the manipulation lever installed at the S-phase, disconnection of the insulation rod connection, melting of the upper conductor, a damaged tulip, damage to the lower spacer and the spacer at the breaker, etc. It is believed from this result that the potential for accidents has expanded due to accumulated energy as a result of repeated deterioration. The carbonization depth of a GIS was formed near the screw (T2, T3) used to secure the lower pole of the S-phase tulip. It is not known what has caused the screws to be extruded and melted. However, it is thought that an unbalanced electromagnetic force, micro-discharge, surface discharge, etc., have occurred at that point. In addition, even though 16 years have passed since its installation, there was no installation defect, act of arson, accidental fire, etc. General periodical inspection and diagnosis failed to find the factors causing the accidents. As a system contained in a closed metal container, it has a high risk factor. Therefore, it is necessary to design, install and operate a GIS in accordance with the standard operational procedure (SOP). In addition, it is necessary to apply conversion technology for periodical SF₆ gas analysis and precision safety diagnosis. It is expected that tracking and managing these changes in characteristics by recording the results on the history card will provide a significant accident prevention effect.

Key Words : GIS, preventive measures, lower spacer, deterioration, carbonization depth, SF₆ gas

1. 서론

전기설비의 효율적인 전원의 공급, 차단, 운용 및 관리 등을 위한 기기가 차단기(switchgears)이다. 전기설비에 적용하는 차단기는 성능 및 보수가 우수하고 화재의 위험성이 없으며, 설비의 소형화 추세에 따라 유입차단기(OCB; Oil Circuit Breaker), 자기차단기(MBB; Magnetic Blast Circuit Breaker), 진공차단기(VCB; Vacuum Circuit Breaker), 공기차단기(ABB; Air Blast Breaker), 가스차단기(GCB; Gas Circuit Breaker) 등이 적용되고 있다. 차단기는 전선로에서 사고가 발생했을 때 고장 전류를 개방하는 것으로 회로를 선택 개폐하므로 동작횟수 등

이 한정된다. 즉, 차단기는 보통의 부하전류를 개폐함과 동시에 이상상태가 발생했을 때 신속하게 회로를 차단하고, 회로에 접속된 전기기기 및 전선 등을 보호하고 안전하게 유지하는 것이다^{1,2)}. 최근 산업 설비의 대형화, 산업설비의 고밀도화, 대도시 집중 현상 및 위험 시설의 설치가 어렵다는 현실을 반영하여 설치공간이 적고 안전성(신뢰성)이 높은 가스절연개폐장치(GIS; Gas Insulated Switchgears) 전력시스템의 적용이 증가하고 있다. GIS는 차단기, 단로기, 변성기, 피뢰기, 주회로 모선 등을 금속제 탱크 내에 일괄 수납하여 충전부를 고체 절연물(spacer)로 지지하며, 절연성능과 소호능력이 뛰어난 6불화황(SF₆) 가스를 충전하여 밀봉한 개폐설비 시스템이다. GIS 시스템은 시스템 운용에 대한

신뢰성은 높은 반면 사고 인자를 조기에 검출하고 조치하기 어렵다는 한계점이 있다. 또한 GIS의 사고가 발생하면 수리 및 보수가 현실적으로 불가능하므로 교체하는 시간과 비용이 많이 필요하다. GIS가 설치된 전기설비는 다른 어떤 시스템보다 에너지 밀도가 높고 인접설비와 연동되어 있으므로 위험 요소 제어를 적절하게 못하면 단락, 과부하, 접촉(속) 불량, 누전, 트래킹 현상 등에 의한 중대사고가 발생할 수 있다³⁻⁸⁾.

따라서 본 논문에서는 사고 현장에서 수거된 3상 170 kV GIS 전력시스템의 사고 원인 분석을 통하여 유사사고 예방을 위한 자료를 확보하고, GIS 사고예방을 위한 진단의 중요 관점을 제공하는데 있다.

2. 원인 분석 및 판정

본 연구에 적용된 GIS 시스템은 3상 3선식으로 170 kV, 60 Hz이며, 차단 전류 50 kA, 절연 강도 750 kV, 최고 사용 주위 온도 40°C, 최저 사용 주위 온도 -25°C, 직류(DC) 조작 전압 110 V, 교류(AC) 보조 전원 220 V 및 3상 380/220 V 설비이다. 시스템은 무인으로 작동되도록 설계되어 있고 DS(단로기), 접지개폐기, Gas to Air Bushing(부싱), PT(계기용변압기), Z.L.A(ZeO Lightning Arrester) 등이 금속 용기 내부에 일괄 수납되어 있으며 SF₆ 가스의 압력은 5.0 kg/cm².G(20°C 기준)로 설계되어 있다. 일반적으로 GIS에 사용되는 레버(lever), 절연 로드(rod), 가동 및 고정 접촉자, 가동 도체 등의 기대 수명은 20년 이상이며, 정밀 점검 주기는 6년 정도(2,000회 동작 기준)로 정하고 있다.

Fig. 1은 사고로 소손된 3상 170 kV GIS의 실제 사진을 나타낸 것으로 강력한 에너지에 의해 소손될 때 발생하는 백화 현상이 확인되며, 인접한 연동설비 또는 부속설비 역시 화염에 의해 오염된 탄화 패턴을 나타내고 있다. Fig. 2는 탄화 심도가 형성된 곳으로 일부에서 백화 현상이 확인되고, 외함(용기)의 일부에 15 mm 정도의 구멍(hole)이 형성된 것이 확인된다. 구멍의 확산 패턴은 내부에서 외부로 에너지가 전달될 때 형성되는 특성을 보이는 것으로 보아 어떤 이유인지 단언할 수 없으나 내부에 강력한 아크 화염이 형성되었음을 의미한다. Fig. 3 및 4는 GIS 외함 내부에 형성된 실제사진을 나타낸 것이며, 부분적으로 파손된 흔적이 있고, 전체적으로 심하게 탄화된 패턴이 확인된다.



Fig. 1. 3 phase 170 kV Stereo-photographic photograph of GIS accident spot.



Fig. 2. Formation of carbonization depth and stereogram of hole.



Fig. 3. Internal burnout state (1).



Fig. 4. Internal burnout state (2).



Fig. 5. Lower part of R-phase tulip.



Fig. 6. Upper part of R-phase tulip.

Fig. 5는 R-상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튨립 하부의 소손된 실제 사진을 나타낸 것으로 표면의 일부가 오염되어 있으나 오링, 에폭시 절연체, 튨립, 볼트 등은 특이 사항이 없다. Fig. 6은 R-상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튨립 상부의 소손된 실제 사진을 나타낸 것으로 표면 전체가 강력한 화염에 의해서 탄화될 때 나타나는 박리형 탄화물의 형성 및 파손이 확인된다. 절연체 파단면의 소손 패턴은 전기적인 스파크 또는 아크에 의한 것이 아니고 폭발 또는 강력한 충격파에 의해 소손될 때 형성되는 패턴으로 확인된다.

Fig. 7은 S-상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튨립 하부의 실제 사진을 나타낸 것이다. 가운데 금속(구리)은 열적 스트레스를 장시간 받은 적갈색의 열흔이 확인되고, 절연체 표면은 강력한 화염에 의해 오염된 탄화 패턴을 보이고 있다. 또한 절연체 파단면의 소손 패턴은 전기적인 스파크 또는 아크에 의한 것이 아니고 폭발 또는 충격파에 의해 소손될 때 형성되는 패턴으로 확인된다. Fig. 8은 S-



Fig. 7. Lower part of S-phase tulip, Fig. 8. Upper part of S-phase tulip,

상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튜립 상부의 실제 사진을 나타낸 것이다. 그런데 표면의 소손 상태, 탄화물의 착색 및 연소의 패턴 등은 순간적인 화염 또는 대전류에 의해 소손된 패턴이 아니고 상당 시간 반복적으로 표면 누설 방전, 미소 방전 또는 연면 방전 등에 의해서 소손될 때 형성되는 얼룩 및 박리(일부) 패턴이 확인된다. 일반적으로 GIS 내부에 설치되는 스페이스 튜립의 재질은 절연성이 우수한 에폭시 계열의 수지를 압축 성형하여 제작하며, 정상 제품의 표면 계질은 균질하고 완벽한 원형 대칭을 갖도록 설계되어 있다. 만일 대칭 구조가 부적절하거나 표면 계질이 균질하지 못하면 전자기력(電磁氣力)의 불평형에 따른 절연 열화(劣化)가 급속히 진행될 수 있다.

Fig. 9는 S-상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튜립의 실제 사진을 나타낸 것이다. 스페이스의 표면은 강력한 화염에 의해 오염된 패턴을 보이고 있고, 절연체 파단면의 소손 패턴은 전기적인 스파크 또는 아크에 의한 것이 아니고 폭발 또는 충격파에 의해 소손될 때 형성되는 패턴으로 확인된다. 또한 S-상의 튜립 하부의 도전부(도체)는 장시간 열적 스트레스를 받을 때 형성되는 적갈색의 열흔이 확인된다.



Fig. 9. Tulip placed to spacer lower of S-phase,

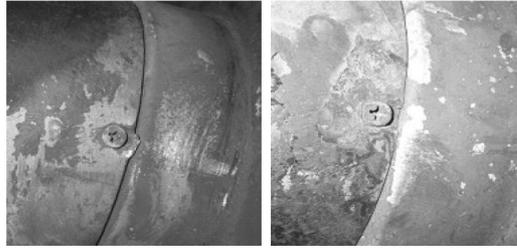


Fig. 10. Screw of S-phase (T2), Fig. 11. Screw of S-phase (T3).

Fig. 10은 S-상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튜립 하부의 전극을 고정하기 위해 체결된 나사(T2)를 나타낸 실제 사진이다. +자형 나사를 사용하여 체결되었고, 일부의 금속(구리)이 찢어져 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 S-상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튜립 하부의 전극을 고정하기 위해 체결된 나사(T3)를 나타낸 실제 사진으로 +자형 나사를 사용하여 동일한 방법으로 체결되었다. 그런데 나사 주위의 일부가 소실되었고, 주위에 장시간 스트레스를 받은 흔적이 있다. 즉, 어떤 이유로 소손이 되었는지 단언할 수 없지만 나사(T3) 주위에 전자기력(電磁氣力)의 불평형, 미소 방전 또는 연면(누설) 방전 등이 있었던 것으로 판단된다.

Fig. 12는 T-상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튜립 하부의 소손된 실제 사진으로 표면의 일부가 오염되어 있으나 오링, 볼트, 에폭시 절연체, 튜립 등은 특이 사항이 없다. Fig. 13은 T-상의 하부 스페이스에 설치되어 있는 튜립 상부의 소손된 실제 사진으로 표면 전체가 강력한 화염에 의해서 고르게 탄화물이 형성되었고, 특이 사항은 없는 것으로 보아 자체적인 결함은 없었고 외부적인 요인에 의해 오염된 것으로 판단된다.

사고가 발생한 후 초기 소손 패턴 조사를 실시하여 정리한 결과는 Table 1과 같다. 3상 170 kV GIS의 R-상, S-상, T-상 중에서 소손은 S-상에서 대부분 발생하였고, 인접한 R-상, T-상 및 부속설



Fig. 12. Lower part of T-phase tulip, Fig. 13. Upper part of T-phase tulip,

Table 1. Burnout actual conditions analysis of 3 phase 170kV GIS system

순서	조사 부위	S-상	R-상	T-상
1	조작 레버	내부베어링 휨 발생	정 상	정 상
2	절연 로드	열화 및 접촉부 이탈	정 상	정 상
3	상부 도체 CB	T형 부위 용융 절단	스페이서 도체 용융	스페이서 도체 용융
4	상부 튜립	용융 절손	셸드 용융	셸드 용융
5	가 동 자	부분 용융 로드 소손	정 상	부분 용융
6	하부 튜립	용융	셸드 용융	세그먼트 부분 용융
7	하부 고정도체	부분 용융	정 상	정 상
8	하부 스페이서	파손 후 상부로 비산	정 상	부분 파손
9	CB측 스페이서	파손 후 내부로 비산	파손 후 내부로 비산	정 상
10	외 함	15 mm 구멍 발생	열적 손상	열적 손상
11	방 압 변	동 작	동 작	동 작
12	흡습제 용기	용 손	부분 용융	정 상

비 등에서 부분적인 소손이 확인되었다. 특히 분석된 S-상은 조작레버의 뒤튜립, 절연 로드²의 접촉부 이탈, 상부 도체의 용융, 튜립의 하부 및 상부 파손, 하부 스페이서 및 차단기 측 스페이서의 파손 등이 확인되었다. 즉, 동시에 시스템의 여러 곳이 파손되었다는 것은 단순한 과전류, 누전, 반단선, 접촉(속) 불량, 아산화동 증식 발열 현상, 트래킹 현상 등에 의해서 발생하기 어려운 것이며, 시스템 내부에서 장시간 열화가 진행되어 축적된 에너지에 의해 사고가 확대된 것으로 판단된다.

3. GIS의 사고 예방 대책

GIS 시스템의 열화에 의한 사고 요인은 전극 표면의 전계집중, 스페이서 내부의 구멍, 튜립(tulip)의 축 변이, 연결부의 불완전한 접속, 도전성 이물질의 유입 및 충전 가스의 분해 등이 있다. GIS는 기존 차단기(switchgears)의 단점을 보완하기 위해 개발된 설비로 설치공간이 적고 시스템의 신뢰성 및 환경 조화 등이 우수하다는 특징이 있다. GIS는 전선로의 고압 또는 특별고압 부분이 금속 용기 내부에 일괄 수납된 상태로 설치되므로 주변 환경에 대한 영향이 거의 없고 단순한 구조이므로 운용적인 측면에서 매우 매력적인 설비이다. 그러나 시스템 운용 중에 금속 용기를 적절하게 관찰하거

나 적절한 조치를 적극적으로 할 수 없어서 이물질의 유입 또는 내부 부품의 파손에 의한 절연 파괴가 발생하면 사고범위가 확대되어 시스템의 복구(복원)에 많은 시간의 소요 및 경제적인 손실이 크다는 단점이 있다. Table 2는 일반 산업 현장에서 사용되는 일반 배전반과 GIS 시스템의 특징을 비교한 것이다. 일반 배전반은 가격이 저렴하고 설비 변경 및 점검 등이 유리한 반면 GIS 시스템은 설치면적이 적고 신뢰성이 높다는 장점이 있으나 가격이 비싸며 사고발생 위험인자의 발굴이 어렵다.

3.1. 전극 표면의 전계분포 분석

GIS는 밀폐된 좁은 금속 공간에 각각의 부품을 일괄 배치함에 따라 상호간의 전자계 불평형이 발생하기 쉽다. 따라서 적절한 설계 및 구조를 갖는 제품이라도 설치하는 과정에서 수평 및 수직 방향성 등을 정밀하게 고려하지 못하면 대전력의 공급됨에 따라 전자계의 불평형에 따른 응력 집중으로 취약한 부분에서 간헐적인 미소 방전이 발생할 수 있다. 이와 같은 과정이 수개월 또는 수년 지속되면 그 범위는 더욱 확대되어 전극의 표면에서 미소방전, 연면방전 및 트래킹 현상에 의한 절연열화면적이 넓어져 결국에는 대형 사고를 유발시키게 된다. 따라서 설계 및 구조의 균형은 물론 전극의 적절한 배치로 전계 집중 현상이 없도록 하는 것이 필요하다.

Table 2. Comparison a distributing board with a GIS system

분류	일반 배전반	GIS 시스템
형 식	폐쇄금속배전반	밀폐형 금속용기
절 연	공기	SF ₆ 가스
접속처리	많음	적음
시공방법	보통	전문성이 요구됨
신뢰성	보통	높음
안전성	보통	높음
초기투자	적음	많음
설치면적	넓음	좁음(약 1/4)
소 음	보통	저소음
전문성	보통	매우 높음
유지관리	불편함	간단함
보수점검	간편함	복잡함
사고범위	제한적인	넓음
사용년수	약 20년	약 30년
적용기준	KEMC 2101-609 KEMC 2108-163 IEC 298, JEM 1425	IEC 60694, IEC 6227-100, IEC 60265-1

3.2. 절연체 내부의 구멍 제거

밀폐된 좁은 금속 용기 내부에 에너지 밀도가 높은 시스템이 설치됨에 따라 금속 용기와 내부 전극을 지지하는 절연체(스페이서)의 절연 확보는 안전성 유지와 밀접한 관계를 갖고 있다. 스페이서는 일반적으로 고분자 화합물을 이용하여 성형 가공하는데 성형과정 중에 구멍이 내부 또는 표면에 형성되면 그 곳에 전자계 집중이 형성되어 절연 성능 저하에 따른 절연파괴로 중대 재해를 유발시킬 수 있다. 따라서 성형과정에 이물질의 유입 및 구멍의 생성 유무를 비파괴검사 및 육안검사 등을 입체적으로 실시하여 위험 요소를 제거하는 것이 필요하다. 또한 표면의 곡률반경을 전자계의 흐름과 일치하도록 설계, 제작 및 시공할 때 열화의 요인을 최소화 할 수 있다.

3.3. 연결부의 완벽한 접속(촉)

GIS 시스템과 같은 대전력 전선로를 적절하게 분리하고 체결하기 위해서는 고정축(tulip)과 가동축(rod)의 구조 및 체결형태가 시스템의 안정성 확보에 중요한 요소이다. 튜립은 고정되어 있는 상태이지만 각각의 날개가 균일한 간극으로 배치되어 있어야 하며 곡률반경도 전자계의 흐름과 일치해야 한다. 그리고 가동축인 고정축과 완벽하게 일치선으로 배치되어야 회로의 투입 및 분리를 할 때 발생하는 아크(arc)를 적절하게 소호할 수 있다. 또한 고정축과 가동축을 고정하기 위해 사용되는 볼트(나사) 또는 너트 등은 돌출 부위가 없도록 하는 것은 물론 동등한 도전성을 유지할 때 전자계 불평형에 의한 열화를 최소화 할 수 있다. 즉, 충분한 전기적인 성능 확보가 필요하며, 기계적인 안정감이 있도록 설계 및 시공할 것이 요구된다.

3.4. 이물질의 유입 방지 및 제거

GIS는 밀폐된 공간에 절연성능이 우수한 SF₆ 가스를 충전하고 부품을 조밀하게 배치한 시스템으로 전선로 상호간의 간격이 기존 설비에 비해 상대적으로 가깝다. GIS는 부품이 크고 무겁기 때문에 공장에서 단위 부품별로 생산하여 시공하고자 하는 현장에서 조립을 실시하는 경우가 대부분이다. 작업 현장은 다양한 변수가 상존하고 있으므로 표준 조작 절차(SOP; Standard Operational Procedures)에 의해 시공하는 것이 요구된다. 즉, 소량의 이물질(물, 습기, 먼지, 금속 조각 등)의 유입으로

도 전자계 불평형에 따른 간헐적인 미소방전에 의해 열화가 가속되어 결국에는 절연파괴에 따른 중대 사고를 유발 시킬 수 있다.

3.5. 분해가스의 정밀 추적관리

GIS에 충전하는 SF₆ 가스는 전기적 특성이 우수한 가스이지만 용기 내부에 이물질이 있거나 전원의 투입과 차단을 반복할 때 발생하는 아크(arc)에 의해 열화가 진행된다. 충전된 SF₆ 가스와 절연물의 탄화에 따른 열화 과정에 생성되는 부산물은 SOF₄, SOF₂, SO₂F₂, SO₂, CO₂, CO, CF₄ 등이 있다. 이와 같은 가스의 생성은 절연성능의 저하는 물론 내부 온도의 상승의 주된 요인으로 작용하여 열화의 속도는 가속된다. 따라서 각각의 설비에 대한 이력카드를 작성하여 주요 지표의 변화를 추적관리하고 분석할 수 있는 시스템의 도입이 필요하다. 현재 시판되고 운용되고 있는 GIS 진단시스템은 전자파 검출, 접지선 전류법, 절연 스페이서의 전압검출, 외피 전극의 전류 검출, 가속도 센서, 초음파 센서, 열화상 진단, 부분방전 진단, Ultra TEV 등이 적용되고 있다. 그러나 이들의 진단법은 각각의 장·단점이 있으므로 시스템의 특성을 고려한 융합적인 진단 및 관리가 요구된다.

4. 결론

사고 현장에서 수거된 3상 170 kV GIS 전력시스템의 분석 결과 및 사고예방을 위한 진단의 확인 사항을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 사고원인 분석에서 S-상에 설치된 조작레버의 뒤틀림, 절연 로드와 접촉부 이탈, 상부 도체의 용융, 튜립의 하부 및 상부 파손, 하부 스페이서 및 차단기 측 스페이서의 파손 등이 확인된 것으로 보아 전진적인 열화에 의해 장시간 열화가 진행되다가 축적된 에너지에 의해 사고가 확대된 것으로 판단된다.
- 2) GIS 시스템의 사고는 S-상의 하부 스페이서에 설치되어 있는 튜립 하부의 전극을 고정하기 위해 체결된 나사(T2, T3)의 일부가 소실되고 변형되었던 것으로 보아 어떤 이유로 소손이 되었는지 단언할 수 없지만 나사(T2, T3) 주위에 전자기력(電磁氣力)의 불평형, 미소 방전 또는 연면(누설) 방전 등이 있었던 것으로 판단된다.
- 3) 시공되어 약 16년이 경과된 설비이지만 공사

불량 및 시스템 운용 과정에 발생될 수 있는 방화 또는 실화 등은 없었던 것으로 판단되나 정기적인 일반 점검(열화상 진단 육안 관측)에서는 사고 유발 인자를 발굴하지 못했다.

4) GIS는 다양한 변수가 상존하고 있으므로 표준 조작 절차(SOP; Standard Operational Procedures)에 의해 설계, 시공 및 운용이 필요하다. 또한 정기적인 SF₆ 가스 분석 및 시스템 진단에 융합기술을 적용한 진단 결과를 이력카드로 작성하여 지표 변화를 추적 관리할 때 사고발생을 줄일 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 지철근, 정용기, “최신전기설비”, 문운당, pp. 128~131, 2007.
- 2) 김영문 외 5, “건축전기설비”, 문운당, pp. 336~346, 2009.
- 3) 최충석 외 5, “전기화재공학”, 도서출판 동화기술, pp. 189~198, 202, 2004.
- 4) 최충석 외 2, “과전류에 의해 용단된 소선의 특성 해석에 관한 연구”, 한국산업안전학회 논문지, 제19권, 제1호, pp. 60~65, 2004.
- 5) 최충석 외 3, “직렬아크에 따른 도체의 산화물 증식 및 전압 파형 분석”, KIEE 논문지, 제55P권, 제3호, pp. 146~152, 2006.
- 6) 주홍진 외 5, “가스절연 개폐장치의 고체 스페이서에 대한 유전율 경사기능성 재료의 영향”, KIEE 하계학술대회, pp. 1364~1365, 2008.
- 7) 주홍진, 고광철, “절연성능 향상을 위한 가스절연 개폐장치에서의 경사 기능성 재료 스페이서 및 전극 형상 연구”, KIEE 하계학술대회, pp. 1358~1359, 2009.
- 8) 도영희 외 3, “가스절연개폐장치 예방진단시 외부 노이즈 영향과 차폐에 관한 연구”, KIEE 하계학술대회, pp. 314~314, 2009.