154kV 전력계통 가스차단기 고장 분석

김영규 · 고영환 · 정이식 · 이상일
한국수자원공사

Fault Analysis of a Gas Circuit Breaker in the 154kV Power Line

Kim, Young Kyu · Ko, Young Hoan · Jung, Lee Sig · Lee, Sang Il
Korea Water Resources Corporation

Abstract - This paper describes fault analysis of a SF_6 gas circuit breaker of a transformer in a hydro power plant which is connected to the 154kV line. The fault is a single-line-to-ground fault, so that it gives power generation halt and economical loss. The analysis has been done in aspects of the status of the breaker, insulation degradation, surge invasion and earthing resistance of the switchyard.

1. 서 론

발전전압이 15kV급이며 이를 154kV 송전계통에 연결하여 운영 중인 A 발전소에서 사용되는 차단기는 차단 성능이 우수한 가스차단기(GCB)이다. 그러나 차단기가 기중에 노출되어 있어 운영관리는 용이하나 절연 문제 등 기술적 문제가 수반된다.

실제 A 발전소 옥외변전소에서 제2호 변압기용 가스차단기 소손사고가 2008년 7월에 발생하여 발전 사업에 지장을 초래함은 물론 경제적 손실까지 가져왔다. 이에 154kV 전력계통에 설치 운영 중인 가스차단기의 소손 원인에 대하여 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 설비 현황

A 발전소는 발전기 2대가 설치되어 운영 중이며 13.2kV의 발전 전압을 154kV로 승압하여 전력계통으로 송전하고 있다. 발전소의 단선결선도는 그림 1과 같다.

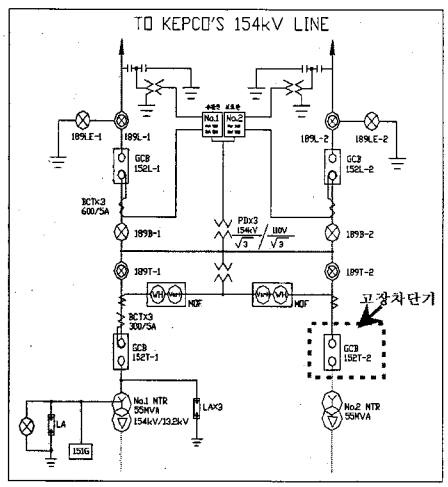

그림 1 A 발전소 단선결선도

2.2 사고 조사

2.2.1 사고 개요

발전기 정지 및 154kV 차단기(152T-1, 152T-2) 개방 상태에서 변압기 보호용 비율차동계전기(87T)가 동작하였고 옥외변전소 점검 결과 제2호 변압기용 차단기(152T-2) R상 소손이 확인되었다. 연결 전력계통의 B 변전소에서는 거리계전기 Zone 2(A 옥외변전소) R상 지락 동작하였다. 당시 기상은 낙뢰를 동반한 비가 내리는 상황이었다.

사고 차단기는 탱크형 단일압력식 Puffer Cylinder 형식이며 사양은 표 1과 같다.

구 분	사 양
제조년월	1988. 12.
정격전압	170 kV
기준충격절연강도	750 kV
정격전류	2000 A
정격단시간전류	31.5 kA
가스압력(SF6)	5 kg/㎠
동작횟수	8083

표 1 차단기 사양

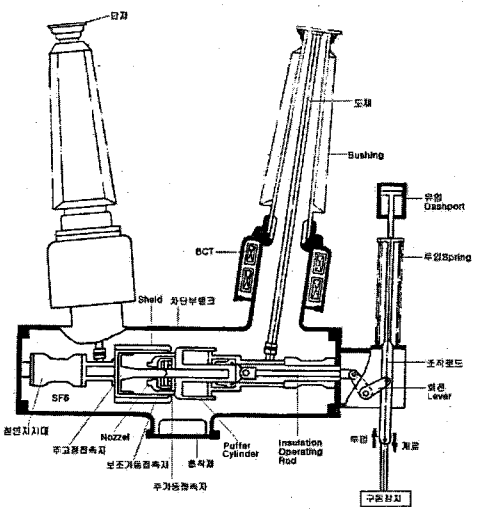

그림 2 SF6 가스차단기 구조

2.2.2 사고 조사

보호시스템 동작

보호계전기 등의 보호시스템의 동작사항은 다음과 같다.

구 분	동작 사항	비 고
변압기 보호용 비율차동 계전기 (87T)	동작	변압기 양단에 전류 불평형이 발생되어 편차전류에 의한 87T가 동작한 것이므로 발전기 정지, 변압기 무압 및 차단기(152T-2) 개방 상태에서 87T의 동작은 외부로부터 고장전류의 유입에 의한 것으로 해석
송전선 보호계전기	부동작	동작범위 밖의 고장사고
피뢰기	부동작	카운터 변화 없음
거리계전기 (B변전소)	동작	Zone 2(A 발전소 옥외변전소) R상 지락 동작

표 2 보호시스템 동작사항

차단기 열화상 점검

각 상의 부싱 및 접촉자부 열화상 점검 결과 R상 접촉자부가 S, T상에 비해 25℃ 이상 높게 나타났다. 3상 비교법으로 동일조건의 다른 부위와 비교하면 온도차가 25℃ 이상 나타나므로 R상 접촉자부에 이상이 발생한 것으로 보인다.

절연저항 측정

차단기를 모선에서 분리하여 주회로 및 BCT 절연저항을 측정한 결과는 다음의 표와 같다.

구분	주회로	BCT
R상	0.01 MΩ (이상)	양호
S상	1340 MΩ (양호)	
T상	700 MΩ (양호)	

표 3 차단기 절연저항

SF6 오염도 측정

절연작용 목적으로 사용되는 SF6 가스가 심하게 오염되었고 측정결과 기준치를 훨씬 넘어 가스측정기의 스케일을 초과하였다. SF6 가스의 상태를 점검한 결과는 다음과 같다.

구분	측정값	비고
SF_6 압력	5.3 kg/㎠	정상
오염도 (SO_2 농도)	5 ppm 이상	-SO_2는 SF_6의 분해생성물로 절연성능에 가장 큰 영향을 미침 -시험관(5 ppm) 스케일 초과

표 4 SF6 오염도 측정

차단기 분해점검

사고 차단기를 분해하여 고장 부위를 조사한 결과 절연파괴 현상을 확인하였고 서지 유입에 따른 절연 파괴로 추정된다.

절연저항 측정 시 R상의 절연이 불량한 것은 가동접촉자용 절연조작봉이 심하게 그을려있고 사고 파급으로 인해 절연지지물이 흑화한 현상으로 나타났다. 다음은 소손된 절연조작봉 등의 사진이다.

그림 3 챔버 내부 흑화현상

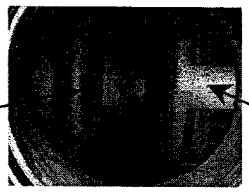

그림 4 차단기 접촉부 분진

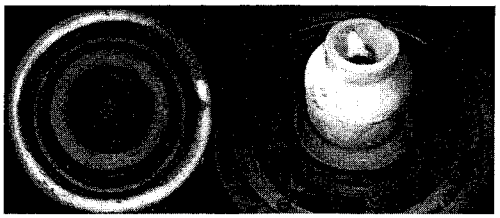

그림 5 고정접촉자(좌) 및 가동접촉자(우)

그림 6 절연조작봉 : 절연체 탄흔(우)

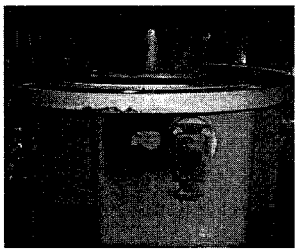

그림 7 절연조작봉 외부 탄흔

2.3 사고원인 분석

설비 신뢰성 및 안전성 관련 사고분석에 많이 이용되는 FTA(Fault Tree Analysis)로 원인을 분석한다. 세부 분석과정은 생략한다.

2.3.1 절연물 불량

운영 중인 차단기는 지속적으로 다양한 스트레스를 받게 된다. 차단기의 스트레스는 일반적인 동작에 따른 기계적인 스트레스, 정상상태 계통조건, 개폐 동작 및 고장 조건에 따른 전기적인 스트레스가 있다. 또한 절연열화(insulation degradation)를 일으킬 수 있는 동작 지속시간은 차단기 스트레스의 중요인자이다.

따라서 차단기는 동작횟수, 아크접촉부 마모, 동작 지속시간 등에 따라 분해점검을 결정하기도 한다.

사고 차단기는 과다한 동작(8,083회) 및 장기간의 경년변화(약 20년)에 따라 절연물을 포함한 내부의 기계적 구조물에 지속적이고 다양한 스트레스가 누적된 상태이다.

차단기 탱크 내부의 절연조작봉 등의 절연물이 스트레스 누적 상태에서 절연기능을 상실하면서 발생한 아크현상(arcing)이 SF6 가스의 화학변화를 일으켜 내부가 오염된 것으로 추정된다.

2.3.2 서지(Surge)

서지(surge)는 크게 외부에서 유입되는 뇌 서지(lightning surge)와 내부에서 발생하는 개폐 서지(switching surge)로 볼 수 있다. 발전기는 정지 중이고 차단기는 개방 상태에서 발생한 사고이며 사고 당시의 기상상황은 낙뢰를 동반한 우천 상태이었던 점은 외부에서 뇌 과전압이 침입한 것으로 추정된다.

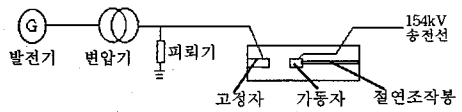

그림 8 발·변전소 회로 개략도(차단기 개방)

전력계통 송전선으로부터 뇌 과전압이 개방된 차단기로 유입되어 방전경로가 차단된 상태에서 절연열화가 진행된 취약한 부분으로 방전된 것이다.(그림 3~7. 절연파괴) 차단기가 도통 상태에서는 변압기를 고정자를 통하여 변압기 전단의 피뢰기로 방전하여 서지 카운터가 동작하여야 한다.(표 2. 피뢰기 부동작)

외부에서 유입된 뇌 서지는 차단기의 가동접촉자 및 절연조작봉을 따라 대지와 접지된 챔버 외벽을 통하여 방전된 것이다.(표 2. 거리계전기 : R상 지락)

2.3.3 접지저항

외부 유입 뇌 서지에 의해 전력계통에서 절연 레벨이 낮은 가스차단기의 챔버 내에서 절연파괴가 이루어진 것으로 볼 때 옥외변전소의 접지저항 설계에 대한 고찰이 필요하다. 지락사고 또는 서지 유입 시 대지전위 상승으로 인해 설비 소손을 일으킬 수 있기 때문이다.

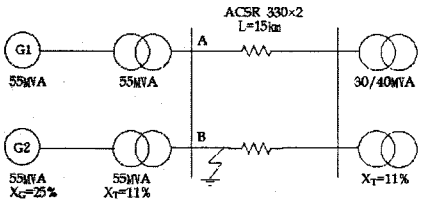

그림 9 A 발전소 전력계통도

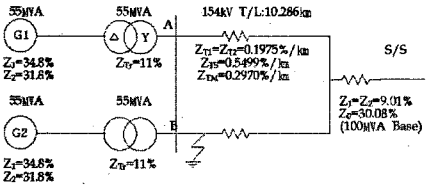

그림 10 선로정수

그림 9, 10과 같은 조건에서 계산한 1선 지락전류 I_g는 I_g = 4,707 [A]이며, 분류계수 0.6을 고려한 1선 지락전류 I_g'는 2,824[A]이다. 또한 접촉전압 및 보폭전압 등을 고려한 목표 접지저항값은 R ≦ 0.71Ω이다.

A 발전소의 옥외변전소의 접지저항은 계절 등의 환경적 요인에 따라 다를 수 있으나 측정시기를 고려하더라도 측정값은 높게 나타났다.

목표 접지저항	측정값(2005.12)	측정값(2008.7)
0.71 Ω	2.4 Ω	5.5 Ω

표 5 접지저항

이러한 접지저항 측정 결과는 상기 차단기 소손사고에 대한 충분한 원인으로 볼 수 있을 것이다.

기밀 불량, 도전성 이물질, SF6 가스 이상 등의 다른 결함수(Fault Tree) 가지는 당해 사고의 원인을 분석하기에 어려운 부분이며 직접적인 원인이라기보다는 2차적으로 소손을 가중시키는 것이기도 하다. 이들에 대해서는 보다 세밀한 분석(further study)이 필요한 부분이다.

3. 결 론

이상에서 살펴본 것을 종합하면 (1) 당해 차단기 고장의 원인은 장기간의 경년변화, 과다한 동작 등의 스트레스가 누적되어 절연열화가 진행된 취약부분에 외부로부터 서지가 유입된 것이며, (2) 옥외변전소의 높은 접지저항은 차단기의 절연파괴를 가중시키는 원인이 된 것으로 분석된다.

따라서 차단기에 가해지는 기계적, 전기적, 열적 스트레스에 따른 절연열화에 대한 충분한 모니터링이 필요하며, 옥외변전소의 높은 접지저항을 보완할 수 있는 설비 보강이 필요하다 하겠다.

[참 고 문 헌]

[1] S. Stojkovic, Fault Recorder Application in Calculating of I^2t Distribution Circuit Breakers Maintenance Criterion, Elektroprivreda, V.2006 no.4, pp.74-80, 2006

[2] 한국수자원공사, "154kV 전력계통 가스단차기(GCB) 소손원인 분석 및 사고재발 방지에 관한 연구", pp.44-75, 1999

[3] 한국수자원공사, "피뢰 및 접지설비 안전성 평가를 통한 표준화 방안 연구(1차년도), pp.74-80, 2005

[4] (주)의제전기설비연구원, 新전기설비기술계산핸드북, 제4판, 2005

[5] 김상남 외, 송배전공학, 북스힐, 2004