154kV 전력계통 가스차단기(GCB) 소손원인 조사분석

이은춘*, 신강욱, 홍성택
한국수자원공사

Damage Cause Analysis for GCB of 154kV Power Plant

Lee, Eun-Chun, Shin, Gang-Wook, Hong, Sung-Taek
Korea Water Resources Corporation

Abstract - The purpose of this study is to find the cause of the damage to the GCB(Gas Circuit Breaker), since the GCB of the 154kV power plant at the Hap-Cheon Dam has already been damaged twice.

We researched the characteristics of this class of circuit breaker and the possible causes for this type of damage to the GCB using the FTA(Fault Tree Analysis) Method.

We studied the optimal maintenance method of the GCB, the stability analysis and power serge protection of Hap-Cheon Dam, and the power serge and fault list of the power transmission line to help prevent a reoccurrence of the problem.

1. 서 론

본 연구에서는 한국수자원공사의 합천댐 관리단 수력발전소 154kV 전력계통에 설치 운영중인 가스차단기(GCB : Gas Circuit Braker)의 소손원인에 대하여 분석하고, 이에 대한 문제점 도출 및 해결방안을 제시코자 한다.

소손원인 분석은 F·T·A(Fault Tree Analysis)에 의한 항목별 원인분석 방법을 이용하였고, 계통의 고장해석은 EMTP(Electromagnetic Program) 프로그램을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 이와 같은 절차를 통하여 문제점을 도출하고 GCB 및 주변기기의 사고방지 대책을 현장여건에 알맞도록 제시하였다.

2. 본 론

2.1 가스차단기 사고현황

한국수자원공사 합천댐 제1수력 154kV옥외 변전소에 설치된 GCB는 탱크형 단일압력식 Puffer Cylinder Type이며, 제1발전소의 옥외변전소에 Unit System구조로 4대의 차단기가 설치되어 있다. T/L측 2회선에 각각 1대와 주변압기 고압측에 각각 1대씩 설치되어 있고, 그 세부규격은 표 1과 같다.

표 1 가스차단기 세부규격

구 분	정 격	구 분	정 격
형 식	170NPL31.5	정격재기전압	2.0 kV/μs
정격전압	170 kV	상용주파내전압	325 kV, rms
정격주파수	60 Hz	충격파내전압	750 kV, Peak
정격차단전류	2000 A	표준동작책무	O-0.3S-CO-3분-CO
차단용량	10 GVA	정격투입조작전원	DC 110 V
정격투입전류	80 kA, Peak	정격트립조작전원	DC 110 V
정격단시간전류	31.5 kA, 1Sec	조작방법(투입)	압축스프링
정격차단시간	3 Cycle	조작방법(트립)	압축공기
정격개극시간	30 ms	정격조작공기압	15 kgf/㎠.G
무부하투입시간	150 ms	정격가스압력	6 kgf/㎠.G, At 20℃

2.2 사고 내용

합천 제1수력 옥외변전소에 설치된 GCB가 '97년, '98년 2회에 걸쳐 소손되어 발전이 중단되는 사고가 발생하였고, GCB 내부에서 절연파괴로 도체부와 대지사이에 접지되면서 보호계전기 동작으로 사고 회로를 분리하였다.

합천 제1수력 옥외변전소에서 2회에 걸쳐 발생한 사고내용을 비교하면 표 2와 같다.

표 2 사고내용 비교

구 분	제1차 사고('97)	제2차 사고('98)
사고일시	1997. 5. 4. 18:50경	1998. 4. 17. 10:32경
기상현황	천둥, 번개가 심한 흐린 날씨	천둥, 번개를 동반한 비가 내림
사고호기	제2호 발전기용GCB(152T-2)	제1호 발전기용GCB(152T-1)
운전현황	발전기 가동을 위해 GCB투입중 사고발생	발전기 운전중 사고발생
동 작 계전기	87T(비율차동), 44(거리계전기)	86(폐쇄계전기), 87T(비율차동), 44(거리계전기)
사고기기	GCB(152T-2)의 가동접촉자용 절연조작봉 S, T상	GCB(152T-1)의 가동접촉자용 절연조작봉 R, S, T상
복구방법	제작업체 반출 수리(30일소요)	제2호 발전기용 GCB로 교체후 제작업체 반출수리(33일 소요)

2.2.1 제1차 사고('97년)

옥외변전소의 각 구간별 절연저항값을 1,000V용 Megger를 사용하여 측정한 결과, GCB 2차측 측정값은 대지와 완전 접촉된 지락상태로 판명되었고, GCB 3상중 R상은 양호하게 나타났지만, S상, T상은 아주 불량하게 나타났다.

사고 GCB를 분해 점검한 결과, GCB 내부의 주요 부속품의 상태는 비교적 양호하였으나, GCB 내부에 절연작용 목적으로 충진된 SF_6가스의 오염정도는 Gas Checker(GASTEC IM04GV100SJI)를 이용하여 측정한 결과, 기준치인 5ppm을 훨씬 넘어 가스측정기의 Scale Over하는 정도를 나타났다. 그리고 절연저항 측정시 S상, T상의 절연이 불량하였던 것과 마찬가지로 그 두 상의 가동접촉자용 절연조작봉이 심하게 그을렸으며, 사고 파급으로 절연 지지물까지 흑화현상이 나타났다. 소손된 절연조작봉의 도면 및 사진은 그림 1 및 2와 같다. 또한, GCB 내부의 절연재로 사용된 SF_6가스의 순간적인 화학변화로 인하여 붓싱 내부가 심하게 그을려 재사용이 불가능한 상태였다. 사고기 붓싱의 그을림 정도와 신품 애자의 내부상태는 그림 3 및 4와 같고, 사고기의 접점부 상태는 그림 5와 같다.

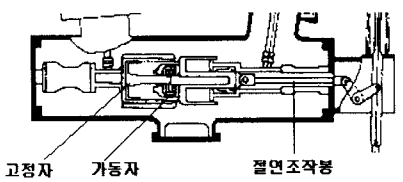

그림 1 절연조작봉 구조 및 설치위치

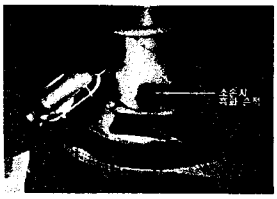

그림 2 절연물 흑화현상

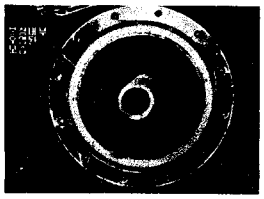

그림 3 부싱내부 오염된 모습

그림 4 신품의 붓싱내부 깨끗한 모습

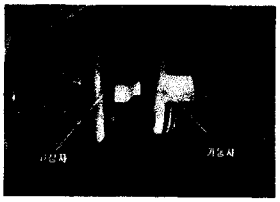

그림 5 GCB탱크 내부 접촉자 모습

2.2.2 제2차 사고('98년)

변압기 붓싱을 단자에서 분리하고 변압기를 포함한 변전소 전체설비를 대상으로 절연저항값을 측정, 분석한 결과 주변압기의 절연상태는 양호한 것으로 분석되었으며, GCB의 절연상태가 극히 불량하여 GCB의 절연상태를 알아보기 위해 탱크 내부의 SF_6가스 오염정도를 측정한 결과 오염도의 최대치인 5ppm이하 보다 많은 10ppm을 훨씬 상회하고 있었다.

사고 GCB를 분해 점검한 결과, GCB 탱크 내부의 주요 부속품의 상태는 비교적 양호하였으나, 절연작용 목적으로 사용된 SF_6 가스가 순간 절연내력을 상실하면서 심하게 오염되어 탱크내부 및 내부 부속품이 그을러 있었고, 절연저항 측정시 R, S T상의 절연이 불량하였던 것과 마찬가지로, 3상의 가동접촉자용 절연조작봉이 심하게 그을렸으며, 사고 파급으로 절연 지지물까지 흑화현상이 나타났다. 또한 탱크내부에서 절연파괴시 열압력이 심하게 가해진 붓싱 내부에도 흑화정도가 심하여 재사용 할 수 없을 정도였다.

2.3 사고원인 분석

2.3.1 F.T.A 방법에 의한 고장분석 결과

고장요인을 세부항목별로 분류하여 고장원인 추정을 하는 F.T.A법에 의한 분석결과를 요약하면 표 3과 같다.

표 3 F.T.A 방법에 의한 고장분석 결과

항 목	분 석 결 과	가능성
절연물 자체결함	기계적, 전기적, 화학적 시험결과 절연조작봉의 성능은 양호한 편이지만 장기간 사용으로 열화에 의한 특성저하로 절연성능을 상실할 수도 있음.	△
Shield류 기밀불량	탱크내의 SF_6가스 및 배관의 Air 기밀시험결과 누기가 없었으며, 외관상 이상부분을 발견하지 못하였음.	×
도전성 이물질	차단기 단순사고 발생율중 높은 비율을 차지하지만 공장 분해점검시 이물질은 발견되지 않았음. 그러나 미세한 금속분이 절연파괴시 용융되어 소멸되었을 가능성도 있으므로 전혀 배제할 수는 없음.	○
Surge	2회의 사고발생당시 낙뢰가 빈번하였던 점과 차단기 동작이 멈춘 상태에서 소손된 것으로 보아 개폐서지(내뢰)가 아니고 외부에서 유입된 뇌과전압(외뢰)으로 판단 됨. 계전기 및 피뢰기가 동작한 것으로 보아 뇌과전압 유입으로 절연파고 사고가 발생했을 가능성이 높음.	◎
차단기 접촉상태	공장 분해점검시 접촉자와 편심을 점검한바 이상이 없었고 기계적 시험결과 양호하게 나타났음.	×
차단기 동작불량	차단기 동작이 멈춘 상태에서 사고가 발생한 점과 투입, 차단 개극 시험결과 양호하게 나타났음.	×
SF_6가스	차단 또는 Arc발생시 분해가스가 통상적으로 발생하나 그 양이 1%이하이고 급속히 안정화되기 때문에 절연유지에 문제가 없지만 수분 등의 침투로 절연성능이 급격히 저하될 우려도 있음.	△

〔가능성 정도 : ×없음, △약간, ○있음, ◎아주 높음〕

2.3.2 분석결과

2회에 걸쳐 발생된 GCB소손 사고를 항목별로 분석한 결과, 자연현상으로 발생된 낙뢰로 의하여 뇌과전압이 변전소로 침입, 절연이 비교적 약한 부분인 GCB탱크 내부에서 절연파괴를 일으킨 사고였음을 알 수 있었고, 절연파괴 부분은 가동접촉자 조작용 절연조작봉이었다.

따라서, 사고 발생당시 유입된 Surge의 크기가 규정치를 훨씬 넘는 뇌과전압이 유입되었다고 판단된다.

실제로 합천댐의 발, 변전계통에 유입되는 뇌과전압에 대한 안전도를 모의 실험한 결과 차단기가 모두 Open 되었을 경우, 침입 Surge전압이 약 2,000kV정도로 나타났으며, 이는 허용 기준치의 약 2.7배를 초과하는 것으로 분석되었다.

2.4 변전소 유입 뇌과전압 모의 해석

발·변전소 인근 철탑에 뇌격 발생시 차폐실패 혹은 역섬락에 의해 발생되는 뇌과전압은 발변전소에 침입하여 변압기, 차단기 등에 전위상승을 일으키고, 각종 기기의 절연에 커다란 위협요소로 작용하므로, 본 모의 해석은 합천댐 옥외변전소로 유입되는 뇌격 과전압의 크기를 알아보기 위하여 미국 EPRI(미국전기연구소)에서 개발한 국제적 범용 과도해석 프로그램(EMTP)을 이용하여 차단기에 발생 가능한 과전압을 계산하였다.

선로 및 발변전소에 대한 여러 가지 사고발생 상황을 모의하기 위해, 합천댐 옥외변전소내에 설치된 차단기의 조작 상황을 표 4와 같이 3단계로 접지저항이 변화되는 상황을 고려하여 Case study를 수행하였다.

여기서 검토 대상인 각 Node 전압과 Branch 명은 다음과 같다.

① 역섬락 가지 전압:T00_AU와 T00_P간(철탑 상부Arm과 상도체)
② 침입 써지 : T_1_P
③ 차단기 입력단 과전압:CB_T1A → GCB는 152T-1의 철탑측
④ 차단기 입력단 과전압:CB_T2A → GCB는 152T-2의 철탑측

표 4 Case study

차단기 상태 / Case	152T-1 상태	152T-2 상태	피뢰기 동작상태
Case 1	Open	Open	동작 않음
Case 2	Close	Open	#1 피뢰기 동작
Case 3	Close	Close	#1 및 #2 피뢰기 동작

2.4.1 Case 1

두 대의 차단기의 개방된 상태에서 뇌격이 철탑에 가해지면 그림 6과 같이 침입 써지, 역섬락전압 및 차단기에 뇌과전압이 나타난다.

역섬락전압은 임계섬락전압에 상당하는 860kV 부분에서 섬락이 일어나며, 이때 발전소로 침입하는 과전압은 1,978kV가 된다. 이 과전압은 개방된 차단기의 입력단(철탑측)에서 진행파의 반사 현상이 발생하기 때문에 침입 써지의 크기보다 큰 2.311kV의 과전압이 발생한다. 이와 같은 과전압은 차단기의 BIL 750kV를 약 2.6배 초과하는 전압으로 차단기의 절연에 심각한 결과를 초래한다.

따라서, 이와 같은 개방상태에서 옥외변전소 침입 뇌과전압을 줄이기 위해서는 반드시 인입단에 피뢰기를 설치하여야 한다. 표 5는 뇌과전압 해석결과를 나타내고 있다.

표 5 각 부의 뇌과전압 크기 및 해석결과

Node	①	②	③	④	결 과
전압 (kV)	865	1,978	2,311	2,311	#1, #2 차단기 절연파괴

2.4.2 Case 2

2회선의 차단기중 한대가 투입된 상태에서는 침입 써

지는 그림 7과 같이 case1의 경우에 비해 과전압의 크기가 작으며, 투입된 차단기 쪽의 피뢰기가 동작하여 그림 8과 같이 699kV의 뇌과전압이 발생하였고, 그림 9와 같이 개방된 차단기는 1,000kV 뇌과전압이 발생하여 해당 차단기를 절연 파괴시킬 수 있다. 표 6은 뇌과전압 해석 결과를 나타내고 있다.

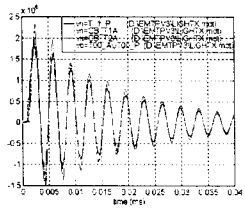

그림 6 Case 1에 대한 뇌과전압 계산 파형

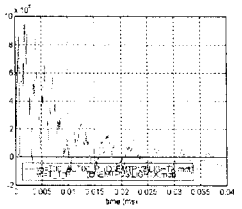

그림 7 Case 2에 대한 침입 써지 계산 파형

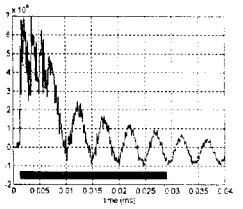

그림 8 Case 2에 대한 투입된 차단기의 뇌과전압 계산 파형

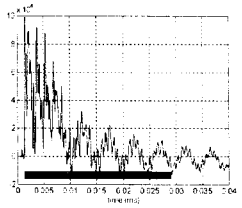

그림 9 Case 2에 대한 개방된 차단기의 뇌과전압 계산 파형

표 6 각 부의 뇌과전압 크기 및 해석결과

Node	①	②	③	④	결 과
전압 (kV)	865	954	699	992	#2 차단기 절연파괴

2.4.3 Case 3

두 차단기 투입된 상태는 해당 피뢰기가 모두 동작하기 때문에 각 부에 발생되는 뇌과전압이 작아진다. 피뢰기에 근접해 설치되어 있는 차단기는 그림 10과 같이 침입 써지보다 낮은 뇌과전압이 발생하므로, 이 경우 어떠한 차단기도 뇌과전압에 위협이 되지 않으며 그림 11과 같이 절연에 이상이 발생해서도 안 된다.

표 7은 본 Case에 대한 과전압의 크기를 나타내고 있다.

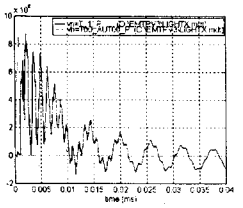

그림 10 Case 3에 대한 침입 써지 계산 파형

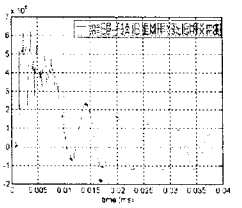

그림 11 Case 3에 대한 투입된 두 차단기의 뇌과전압 계산 파형

표 7 각 부의 뇌과전압 크기 및 해석결과

Node	①	②	③	④	결 과
전압 (kV)	865	871	631	631	두 피뢰기 동작으로 차단기 의 절연확보

이상과 같이 합천수력 송전선에 100kA의 뇌격이 가해졌을 경우, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 안전도를 검증해 본 결과 변압기 2차측(송전측)은 뇌과전압으로부터 완전 무방비 상태임이 입증되었고, 발전기 2대를 동시에 가동할 경우는 변압기 2차측에 설치된 피뢰기의 동작으로 뇌 임펄스 전압이 약 631kV로 되어 기준절연강도인 750kV 이하에서 유지되고 있다.

그러나 발전기 1대 가동 또는 2대 모두 운휴중일 경우에 뇌격이 내습하면 옥외변전소에 유입되는 뇌과전압이 992~2,311kV 정도이므로, 차단기 기준절연강도를 훨씬 상회하여 설치 기기의 절연을 파괴할 위험이 있다.

그리고 두 대의 차단기가 모두 Close되었을 경우, 옥외변전소의 접지저항 변화를 예상하여 시뮬레이션 해본 결과, 접지저항 1Ω과 10Ω은 10배의 차이를 갖고 있지만 뇌과전압의 증가폭은 631kV에서 667kV로 약 36kV로서 그 변화 폭이 적었다.

3. 결 론

154kV 전력계통에서 사용중인 가스차단기 소손원인 분석대상을 합천수력 제1발전소 가스차단기(152T-1, 152T-2)로 선정하였으며, 본 차단기는 '97년, '98년 2회에 거쳐 소손사고를 일으켰다.

F·T·A 방법을 이용하여 소손원인을 분석한 결과 2회의 사고원인이 송전선에서 유입된 낙뢰로 밝혀졌다. 2회 사고 모두 GCB탱크 내부의 가동접촉자용 절연조작봉이 절연파괴 되었고, 탱크 내부가 심하게 그을려 있었다.

또한 송전선에서 유입되는 뇌과전압을 컴퓨터 시뮬레이션 해본 결과 변전 기기의 BIL 750kV를 훨씬 초과하는 2,311kV까지 상승되는 것으로 나타났다. 이와 같이 높은 뇌과전압은 GCB뿐만 아니라 변전시스템을 구축하고 있는 모든 기기의 절연에 치명적인 손상을 일으킬 수 있는 전압이다.

[참 고 문 헌]

[1] 일본전기학회, "전력용차단기", 삼미인쇄주식회사, 1982
[2] C.H Flurscheim, "Power Circuit Breaker Theory And Design", 1982
[3] 사단법인 대한전기학회, "전기설비기술기준", 1997
[4] 일본전기학회, "전기설비의 진단기술", 1994
[5] 한국전력공사 기술연구원, "뇌격전류 파라메타 측정을 위한 조사연구", 1990
[6] 한국전기연구소, "765kV급 GIS용 차단부 설계 및 제조기술 개발", 1996
[7] 송영길, "송배전공학", 동일출판사, 1989
[8] 이봉희, "전력용 차단기의 원리 및 종류", 한국전기공사협회지, 1996. 5
[9] 박호석외, "피뢰보호방식과 보호공간의 평가", 대한전기기사협회지, 1995. 5
[10] 이근철, "안전공학과 기술개발(뇌해대책 중심)", 한국전기공사협회지, 1997. 11
[11] 김경호, "송전선의 뇌해대책 현상과 전망", 한전 중앙교육원, 1999.
[12] "산업안전공학 개론", 한진출판사, 1989