

송전선로 유도전압으로 진공중인 170kV GIS의 절연파괴 사례분석

김진환, 서정철, 박한우
한국전력공사

Analysis of Breakdown of 170kV GIS in a vacuum due to transmission line induced voltage

Jin-hwan Kim , Jung-chul Seo, Han-Woo Park
Korea Electric Power Corporation

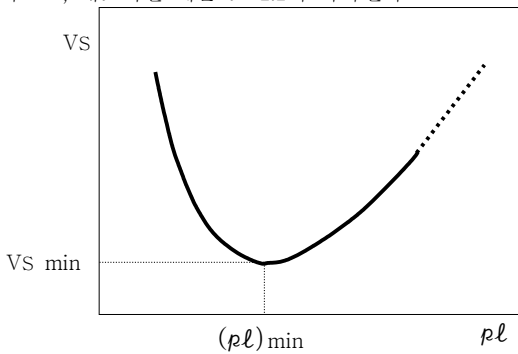
Abstract - 전력계통에서 사용하는 고전압급의 차단기의 절연은 대부분이 SF6 GAS를 사용하고 있으며 (22.9kV급에서는 진공차단기가 주종을 이룸)운전중 압력은 약 3.6-6.0kg/cm²이다. 내부점검을 위해서는 무압상태에서 Gas를 회수장치에 옮겨 보관후 작업을 수행한다. 그러나 다시 Gas를 용기(容器)내로 담아 넣기 위해서는 진공(眞空)하여야 하는 공정이 필요하며, 이 과정의 진공은 진공초기 단계정도로 절연내력을 가지는 진공상태라 할 수 없다. 진공작업과정에 발생한 고장사례를 통해 전기절연 상의 선행 조건이 어떠한지 살펴보고자 한다.

1. 서 론

평등전계(평등전계)중에서 스파크방전이 일어나는 전압Vs는 기압 P와 전극간격 l의 곱 pl의 함수로 되고,그림[1]과 같이 최소값 Vs min이 있는 것이 실험적으로 밝혀졌다.이것을 발견자의 이름을 따서 파센의 법칙이라고 한다 VS는 A1,B1을 상수로 해서,

$$VS = \frac{B1 \cdot pl}{\ln(pl) + \ln\{A1/Ln(1 + 1/\gamma)\}} \quad (식-1)$$

로 나타내진다. 최소 스파크전압 VS min은 기체의 종류에 따라 다르고, 대표적인 예를 표 1.1에 나타낸다



<그림 1.1>

<표1.1> 파센의 법칙에 있어서 최소 스파크전압VS min

단 위	He	Ne	Ar	공기	H2	N2	O2	CO2
Vs min (v)	147	168	192	220	270	250	450	420
((pl) min [Torr.mm])	35	38	12	5.67	11.5	6.7	7.0	5.0

☞ 특정 밀폐공간안에서 매질의 압력을 점차 높혀나가면 절연전압이 높아지며, 반대로 공간안에 매질이 량과 압력이 낮아지면 절연전압 또한 낮아지게 된다. "V"곡선의 최소점에서 절연계급은 대기상태보다 더 악화되고, 점차 진공도를 높혀나가 10⁻³Torr에 이르면 절연전압은 약 40kV 정도로 된다

2. 본 론

OO제 가스절연개폐장치
송전선로 유도전압에 의한 고장원인 분석 및 대책

1. 고장개요

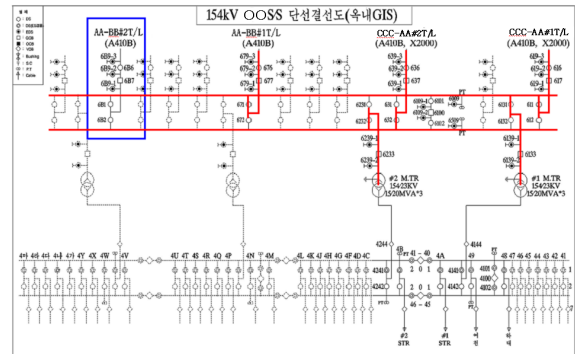
☐ 발생일시 : 20△△. ××월 ××(화) 18:00경 (비)

☐ 발생설비 : 154kV AA변전소 AA-BB#2T/L용 가스절연개폐장치

설비명	규 격	제작사 및 제작일자
AA-BB#2T/L GIS	170kV 2,000A 50kA	OO중공업, '06.01

☐ 고장내용 : GIS 상부 모선의 붓싱 인출측 내부 절연파괴
○ GIS 상부 모선측 UHF 센서 설치[협력회사(OO전기)] 및 단로기 (6B1, 6B2, 6B6) 조작함 하자교체[제작사(OO중공업)]병행작업후 계통 환원조작 기기 가압 중 내부절연 파괴 고장 고장발생

<표 1> 단선결선도



2. 고장발생 경위

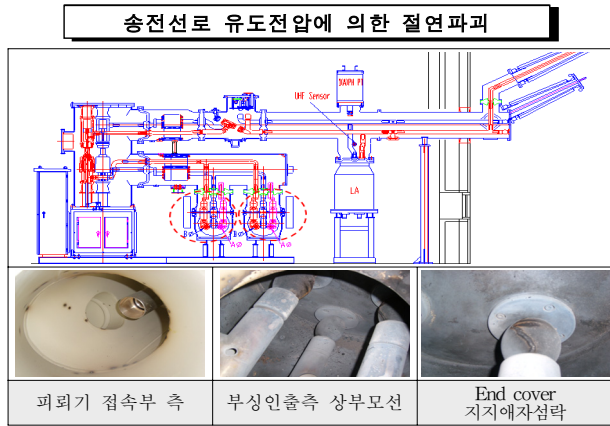
☐ '08.'××.××일(월) #1모선 및 AA-BB#2T/L 휴전작업

- 10:30 인출 상부모선 UHF 센서 취부완료 (상부모선 진공시작)
- 13:30 #1모선측 단로기(6B1) 조작함 교체
- 16:15 인터록시험시 조작불량으로 조작함 재교체
- 17:09 인터록 시험을 위하여 접지단로기(6B9-3) 개방 [0.5Torr 1분18초]
- 18:35 #1모선 환원조작 (AA-BB#2T/L 연속휴전중)

☐ '08.'××.××일(화) :#2모선 및 AA-BB#2T/L휴전작업

- 09:40 인출 상부모선 진공도 확인 (0.12Torr)
- 10:10 단로기(6B2, 6B6) 조작함 교체중 접지단로기 (6B9-3) 개방
☞ 0.12Torr 15분간 (가스주입시 까지)
- 11:30 인출 상부모선 SF6가스 주입완료 (수분측정 : 43ppm)
- 14:46 조작 및 인터록 시험 (양호)
- 18:35 AA-BB #2T/L 작업완료후 차단기 투입조작과 동시 절연파괴 고장

추정 고장원인

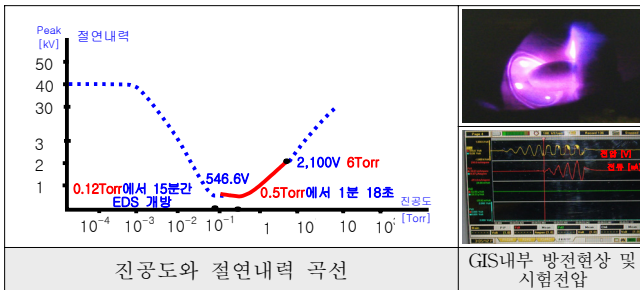


3. 현상과악

- 고장 발생부위 (GIS 단면도)
 - 상부모션과 Wall bushing 연결부위 진한 회색의 탄화가루 부착
 - 최초 고장유발지점 이외의 여러 개소에서 방전흔적(갈색점) 발견
- 진공 및 가스주입 작업관련 항목별 측정값
 - 진공도 측정 결과값 : 양호 (0.12Torr)
 - SF6 가스 순도측정 결과 : 양호 (제조사 시행)
 - SF6 가스 수분측정 결과 : 양호 (43ppm)
- 탄화가루 성분측정 결과 : SF6 가스성분 포함 (제조사 시행)

4. 고장 원인분석

- 유도전압 계산 및 분석 (전력연구원 시행)
 - 검토방법 : 전자기 과도현상 해석 프로그램(EMTP) 이용
 - 검토조건 : 송전선로 4회선 및 2회선 병행 선로 20.97 km
 - 부하조건 : AA~BB#1T/L 196MW, AA~BB#2T/L은 휴전중
 - 검토 결과 (정전 유도전압)
 - 선로 양단 접지단로기 투입상태 : 30 ~ 40 Arms
 - 편단접지 개방시 : 400 ~ 550 Vrms (600 ~ 800 Vpeak)
 - 편단접지 개방 동작시 과도전압 : 약 1,500 Vpeak
 - AA변전소측 접지단로기 개방후, BB변전소측 접지단로기 개방시 ⇒ 13,000 Vpeak(9.0 kVrms)
- 진공중 절연강도 시험
 - 시험방법 : 154kV GIS 모션을 활용한 실 절연파괴 시험
 - 시험일자 : '08.'xx.xx일~xx일 (OO중공업에서 모의장치로 통해 공동시험)
 - 시험결과
 - 대기압에서 5,000[V] 인가시 : 절연상태 양호
 - 0.1~0.5Torr 진공상태시 : 진공도와 무관하게 절연파괴전압이 거의 동일하게 발생 ⇒ 546.6 [V, Peak]



- ㉠ 진공 작업중 편단접지 개방으로 선로 정전유도전압(600~800 Vpeak) 발생
- ㉡ 진공도가 0.1~0.5Torr인 경우 GIS내부 절연파괴전압이 546.6[Vpeak] 까지 저하
- ㉢ 송전선로 유도전압에 15분 이상 노출되어 급격한 절연내력 저하 발생
- ㉣ GIS 내부소손 발생 상태로 기기가압 ⇒ 내부절연 파괴고장으로 진전

※ 유사사례 : 20△△년 ○○변전소에서 ▽▽#T/L용 170kV GIS

단로기부 누기보수를 위한 진공작업중 단로기내부 소손발생

5. 문제점 : “진공작업중 송전선로용 접지개폐기 개방조작 시행

6. 재발방지 대책

- 휴전작업시 검전·접지 시행 철저
 - 송전선로용 GIS(GCB) 휴전작업시 작업구간 양단 뿐아니라, 선로측에도 반드시 접지시행 확인철저
- GIS(GCB) 진공작업중 기기조작 및 시험 금지
 - 진공작업시 단로기 및 차단기 조작 또는 선로측 접지개방 등의 기기조작 행위 절대금지
 - 특히, 병행작업시 휴전시간 단축을 위한 무리한 시험 및 조작금지
 - 진공작업중 Megger를 사용한 절연저항 측정 금지 등
- 변전원 교육시 유사사례 방지교육 및 사례전파 시행

- 붙임 : 1. AAS/S 170kV 내부 절연파괴 원인분석결과 (전력연구원)
- 2. 송전선로 유도전압 분석자료 1부.
- 3. 가스구획도 1부.
- 4. 고장관련 사진 1부. 끝.

[붙임 1]

1. 개요

154 kV AA S/S - BB #2 T/L간 170 kV GIS 내부절연파괴 원인분석

2. 검토 방법 및 조건0

- 가. 검토방법
 - 전자기 과도현상 해석 프로그램(Electro-Magnetic Transient Program)을 이용하여 검토대상선로의 유도전압을 계산하였다.
- 나. 검토조건
 - 송전선로 4회선 및 2회선 병행 선로 20.97 km
 - 부하조건 : AA-BB #1 T/L 196 MW, AA-BB #2는 휴전중

3. 검토 결과

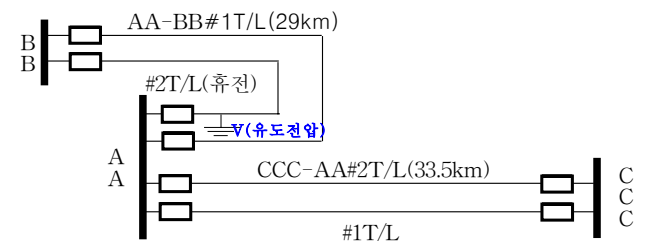
- 가. 전자유도전류(선로 양단 ES on)/활선선로 전류 734 A(196 MW)
 - 30 ~ 40 Arms
- 나. 편단접지 개방상태에서의 정전유도전압
 - 400 ~ 550 Vrms (600 ~ 800 Vpeak)
- 다. 편단접지 개방 동작시
 - 과도전압(Peak) : 약 1,500 Vpeak
 - 편단접지 개방동작시 전류제한 현상에 의한 과전압 모의 결과

제한 전류 [A]	과도전압	
	최대값 [kVpeak]	실효값 [Vrms]
1	1.8	530
2	2.2	530
3	3.0	550
4	3.0	560
5	5.9	695

- 라. AA S/S ES open 후, BB S/S ES open
 - 13,000 Vpeak(9.0 kVrms)

[붙임 2]

1. 관련계통도



- AA~BBT/L 총공장 29.47km (4회선 병가구간 8.5km, 2회선 병가 20.97km)
- 당시 부하(2/26. 18H)
 - CCC~AA#1T/L : 104MW
 - CCC~AA#2T/L : 103MW
 - AA~BB#1T/L : 196MW
 - AA~BB#2T/L : 0 MW(휴전중)

2. 송전선로 조건

○ 송전선로 및 철탑 조건

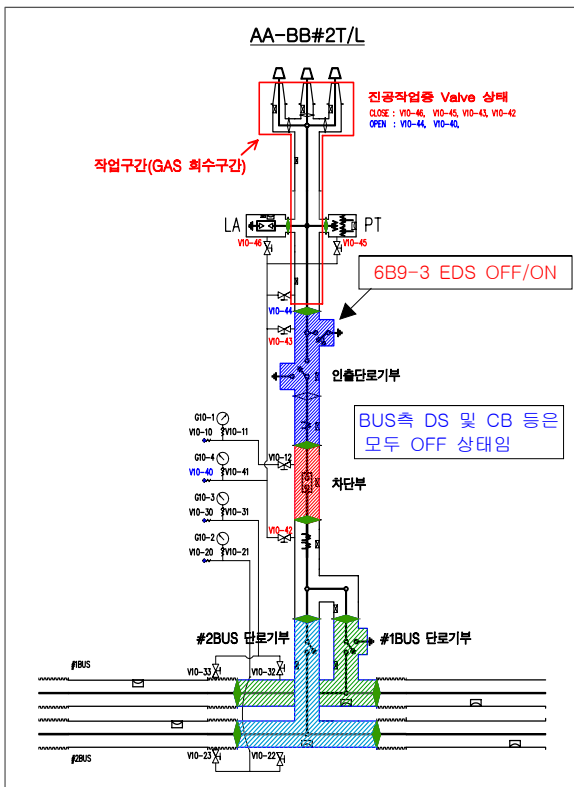
선로명	상	Rin	Rout	Horiz	Vtower	Dip	NB
가공지선	2조	0.48	0.8	0	67.4	57.4	0
CCC-AA #1T/L	A	0.525	1.425	7.4	70.3	11	2
	B	0.525	1.425	9.8	66	11	2
	C	0.525	1.425	7.8	62.2	11	2
CCC-AA #2T/L	C	0.525	1.425	-7.8	62.2	11	2
	B	0.525	1.425	-9.8	66	11	2
	A	0.525	1.425	-7.4	70.3	11	2
AA-BB #1T/L	C	0.525	1.425	10.2/7.2	50/26	9	2
	B	0.525	1.425	8.8/9.6	54.3/29.8	9	2
	A	0.525	1.425	10/7.8	58.1/34.1	9	2
AA-BB #2T/L	A	0.525	1.425	-10/7.8	58.1/34.1	9	2
	B	0.525	1.425	-8.8/9.6	54.3/29.8	9	2
	C	0.525	1.425	-10.2/7.2	50/26	9	2

주) AA~BBT/L 4회선 병가시/2회선병가시

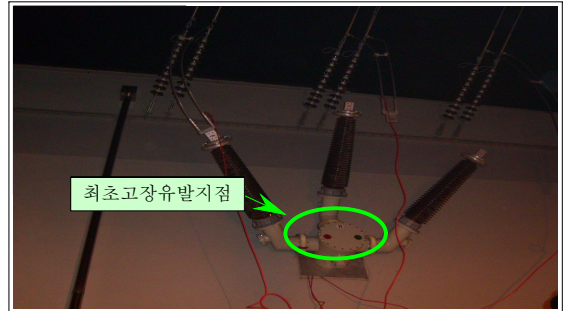
○ 검토조건

- 선종 : 4회선 모두 ACSR 410sq * 2B
- AA-BBT/L 총공장 29.47km (4회선 병가구간 8.5km, 2회선 병가 20.97km)
- 가공지선 : 전구간 2조
- 대표 철탑형 : 4회선 구간(B4 50m), 2회선 구간(B2 26m)

[붙임 3]



[붙임 4]



AA-BB#2T/L 인출 Wall bushing (철거작업 중)



AA-BB#2T/L 인출 Wall bushing 연결 상부Tank 내부도체



AA-BB#2T/L 인출 Wall bushing 도체와 외함간 아크 흔적



AA-BB#2T/L 인출 Wall bushing 도체 접속부(아크 흔적)