

362kV GIS 외함 순환전류에 의한 접지본드 과열현상 및 대책

이제희\*, 김승규\*, 김순태\*, 신명철\*\*  
한국전력공사\*, 성균관대학교\*\*

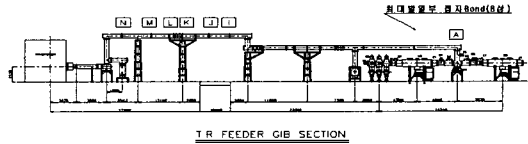
Investigation and Countermeasure of Sheath Circulating Current in the 362kV GIS

J.H Lee\*, S.K Kim\*, S.T Kim\*, M.C Shin\*\*  
KEPCO\*, S.K Univ\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 362kV GIS 외함 유도 순환전류에 의한 접지본드과열에 대하여 원인을 분석하고 대책을 마련하는 것을 목적으로한다. 원인분석에는 접지본드 과열현상과 과열원인을 GIB 시스템계산식을 이용하여 계산결과를 도출하였고 전자과도해석 프로그램(EMTP : Electromagnetic Transient Program)에 의한 분석을 통하여 원인을 분석하고 대책을 마련하여 과열현상을 방지하고자 한다.

GIB 플랜지 부위별 온도측정결과에 의하면 온도가 M.Tr에서 개폐기부로 갈수록 상대적으로 높게 나타남을 알수 있는데, GIB 플랜지부위별 구분은 그림2-1에 나타난바와 같고, 각 부위별 평균온도 상승치는 표2-2에 나타난바와 같다.

그림2-1. 플랜지 부위별 발열온도



1. 서 론

한전에서는 우리나라 중서부 지역의 발전단지에서 생산하는 전력수송의 핵심역할을 수행할 765kV 계통을 2002년에 준공하여 운전하고 있다.

전압의 격상과 친환경 송변전설비 건설에 따라 GIS설비(Gas Insulated Switchgear)로 건설되어 운전하고 있는 변전소에서 부하의 증가 및 접지본드 용량부족등으로 362kV GIS 외함 유도 순환전류에 의한 접지본드 과열현상이 발생되었다.

본 논문에서는 온도상승 요인을 규명키위해 GIB 시스템 계산을 및 전자과도해석 프로그램 (EMTP : Electromagnetic Transient Program)에 의한 분석으로 GIS 외함 유도순환전류에 의한 과열방지 방안을 마련코져 한다.

2. 본 론

2.1 과열 현상 및 원인

2.1.1. 접지본드 과열현상

과열발생설비는 765kV신안성S/S 362kV GIS B상 GIB 플랜지부 (\* 기기제원 : 362kV / 4000A / 63kA) 이고 발생부위는 362kV GIS #4M.Tr 2차 인출 D.S 상부 B상 GIB 플랜지부분 접지본드에서 상대적으로 높은온도가 발생되었다. 온도측정치는 표2-1과 같다.

표2-1. 플랜지 부위별 각 상 발열온도

상별 온도	상별 측정온도(℃)			비 고
	A상	B상	C상	
플랜지 부위				
A 부분	35 ℃	39 ℃	35 ℃	*측정시부하 (140만kW (2300A)) *측정장비 ☞ 씨머비전
B 부분	85 ℃	187 ℃	88 ℃	
C 부분	70 ℃	113 ℃	70 ℃	
D 부분	70 ℃	103 ℃	71 ℃	
E 부분	85 ℃	94 ℃	80 ℃	
F 부분	86 ℃	87 ℃	140 ℃	
G 부분		93 ℃		
H 부분		120 ℃		
I ~ N 부분	50~73 ℃			

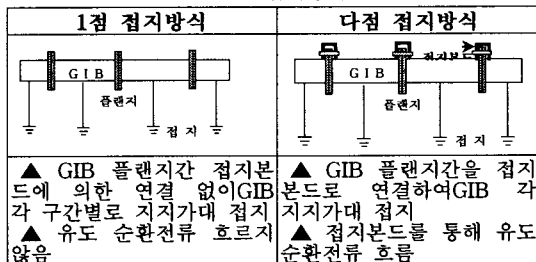
표2-2. GIS 플랜지별 상승온도

플랜지별	상승온도	비 고
B번 플랜지	약 200 ℃	△ 주위온도 : 26 ~ 28 ℃
C ~ H번 플랜지	약 120 ~ 140 ℃	△ 온도측정시 부하 : 1500~1600MW
I ~ M번 플랜지	약 100 ℃	△ 측정장치 : 씨머비전(원거리 측정)

2.1.2 접지본드 과열원인

과열원인으로는 설계측면에선 접지본드 통전용량 부족을 들 수 있는데 362kV GIS 외함 유도 순환전류(약 3200A)에 대한 접지본드 설계시 1점 접지방식(신안성 S/S:다점 접지방식)의 접지본드 개수(2개) 적용으로, 접지본드 통전용량(600sq/허용전류: 1500A)이 통전전류 크기(약 3200A)보다 부족함으로써 접지본드에서 과열현상이 발생함을 알 수 있다(표2-3 참조). 362kV GIS 외함의 일반적인 유도 순환전류는 주 전류의 약 50 - 80% 정도이며 신안성S/S 362kV GIS 외함 유도 순환전류 측정치는 주전류의 약 54 - 80%이다. GIB 시스템 계산을 주 전류의 60% (계산명세 : 본문 2.2 참조)이며 신안성S/S 유도순환전류 크기는 주 전류가 4000A 인 경우 최대 약 3200A (=4000×0.8)임을 알 수 있다.

표2-3. GIS 접지방식 비교



제작 및 시공측면으로는 접촉 및 볼트체결 불량등으로 362kV GIS 접지본드 과열시 부하전류가 950 - 2,200A(1,500MW) 정도였는데, 이때 유도 순환전류는 760 - 1,760A 정도로 추정할 수 있으므로, 취부된 접지본드의 통전용량(약 1500A) 부족을 감안하더라도 일부 특정부위에서 과열 정도가 심하게 나타난 것은 접지본드의 접촉상태 불량(접촉부위 일부 도장 잔존, 플랜지와 본드간 공차 발생) 등으로 인한 유효접촉면적 감소로 접촉부 온도가 국부적으로 상승함으로써, 순환전류에 Unbalance가 발생하여 GIB 전체 온도상승에 영향을 미친 점 또한 무시할 수 없는 요인으로 볼 수 있다

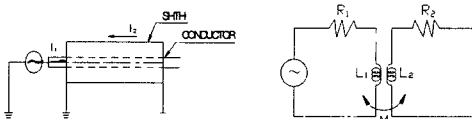
기타원인으로는 접지본드 체결불량으로 볼트 체결개소 과열 및 산화로 플랜현상 정확한 판단 불가하고, 접지본드 체결불량은 전기동(99.9% 순동) 사용으로 가능성 극히 희박하며 내부 도체 과열은 과열부 해체 점검결과 도체 조립상태 정상, 과열 흔적 없었으며 운전전류 과다 부분은 변압기 과부하 운전실적이 없고, 상간 전류 Unbalance 차가 수십 암페어에 불과하다.

전식은 접지본드 체결후 Scaling 처리로 우수 침투 가능성 희박함으로 원인이 될 수 없다.

## 2.2 362kV GIB 시스전류 계산

362kV GIB의 등가회로는 그림2-2와 같이 표시되며 계산결과는 아래와 같다.

그림2-2. 등가회로



$R_1$ =도체의저항,  $R_2$ =시스의저항

$L_1$ =도체의인덕턴스,  $L_2$ =시스인덕턴스

M= 도체와 시스의 상호 인덕턴스

$\Delta E$ = 전압강하

$$\Delta E = R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \quad \text{-----①}$$

$$0 = R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 \quad \text{-----②}$$

②식으로 부터

$$(R_2 + j\omega L_2) I_2 = -j\omega M I_1$$

$$I_2 = -\frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2} \times I_1 \quad \text{-----③}$$

$$\therefore I_2 = \sqrt{\left(\frac{\omega^2 L_2 M}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega M R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}\right)^2} \times I_1 \quad \text{-----④}$$

여기서 도체와 시스의 인덕턴스M은 도체전류에 의해서 생기는 자속이 용기와 쇠교하는 총자속수이기 때문에 도체와 시스가 같은 원통형의 경우에는 시스의 전류에 따라 생기는 자속이 외함과 쇠교하는 자속수, 결국 시스의 인덕턴스 L2와 같게되기 때문에 식④는 아래와 같게 된다.

$$I_2 = \sqrt{\left(\frac{\omega^2 L_2^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega L_2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}\right)^2} \times I_1 \quad \text{-----⑤}$$

이것이 시스에 흐르는 전류로 된다.

$$k = \sqrt{\left(\frac{\omega^2 \times L_2^2}{R_2^2 + \omega^2 \times L_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega \times L_2 \times R_2}{R_2^2 + \omega^2 \times L_2^2}\right)^2} \quad \text{-----⑥}$$

$$I_2 (\text{시스전류}) = k \times I_1 (\text{주회로전류}) \quad \text{-----⑦}$$

따라서 상분리형 GIS의 시스전류를 구할 때는 회로정수 k를 구하면 된다.

1. 시스의 자기 인덕턴스

$$L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2}{r} - 1\right) = 2.12 \times 10^{-7} (H/m)$$

$$\mu_0 (\text{진공중의 투자율}) = 4\pi \times 10^{-7} (H/m), \quad r: 0.254m$$

2. 시스의 저항

$$R_{sa} = \rho \frac{l}{A} = 86.6 \times 10^{-6} \Omega$$

$\rho$ (시스의 고유저항): SUS304:  $70 \sim 82 \times 10^{-6} \Omega$

A: 시스의 단면적( $m^2$ )

l: 단위길이(m)

플랜지 접촉부의 접촉저항은 접지본드를 취부한 상태에서의 플랜지 정수부의 1개소당 저항치는 실측치에 따르면  $10 \sim 20[\mu\Omega/\text{개소}]$  이다. 따라서 5m당 1개소의 접촉부가 있는 것으로 가정한다.

따라서 362kV 63kA 단상 GIB의 시스전류 계산은

$$R_2 = 86.6 \times 10^{-6} \Omega (\text{SUS304시스}) + 20 \times 10^{-6} \Omega (\text{플랜지접속부}) = 106.6 \times 10^{-6} \Omega/m$$

$$L_2 = 2.12 \times 10^{-7} (H/m)$$

$$R_2^2 + \omega^2 L_2^2 = (106.6 \times 10^{-6})^2 + (2\pi \times 60)^2 (2.12 \times 10^{-7})^2 = 1.78 \times 10^{-8}$$

$$\omega^2 L_2^2 = (2\pi \times 60)^2 (2.12 \times 10^{-7})^2 = 6.43 \times 10^{-9}$$

$$\omega L_2 R_2 = (2\pi \times 60) \times 2.12 \times 10^{-7} \times (106.6 \times 10^{-6}) = 8.55 \times 10^{-9}$$

계산한 값을 식⑥에 대입하면

$$k = \sqrt{\left(\frac{6.43 \times 10^{-9}}{1.78 \times 10^{-8}}\right)^2 + \left(\frac{8.55 \times 10^{-9}}{1.78 \times 10^{-8}}\right)^2} = 0.60$$

그러므로 시스에는 주회로 전류의 약 60%정도의 전류가 흐른다.

계산결과는 아래와 같고 계산식은 표2-4와 같다.

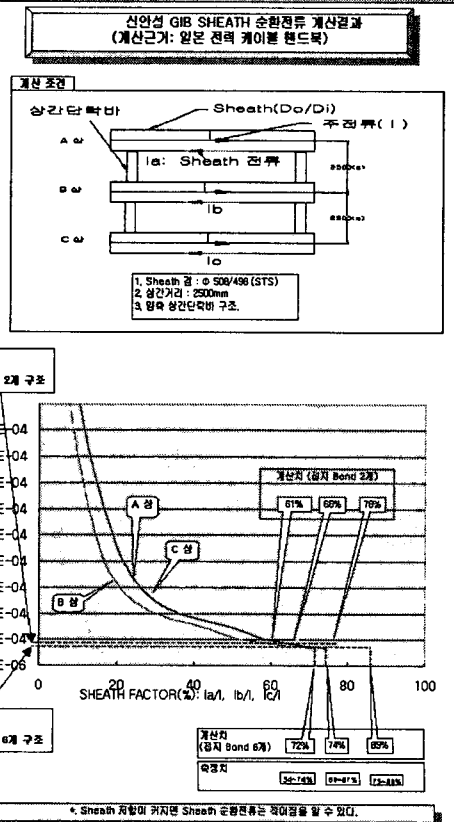


표2-4. 계산식

구분	계산식																					
입력값	S: 상간거리(m), Di: SHEATH 내경 (m) Do: SHEATH 외경(m)																					
중간 계산식	$Co = \frac{Di + (Do - Di)/2}{2}$																					
	$Ro = 5.71 \times 10^{-7} \cdot (1 + 0.0052 \cdot (40 - 20))$ 여기서 $5.71 \times 10^{-7}$ : Sheath의 고유저항 (Ωm), 계정STS 0.0052: 온도계수 (1/°C), 40: 대표온도 (°C)																					
	$R1 = \frac{Ro \cdot 4}{\pi \cdot (Do^2 - Di^2)}$ $\omega = 2\pi \cdot f$ 여기서 f: 주파수(HZ)																					
	$X = 2 \cdot \omega \cdot LOG\left(\frac{S}{Co}\right) \cdot 10^{-7}$																					
	$Aa = 2 \cdot \omega \cdot LOG(2) \cdot 10^{-7}$ $Bb = 2 \cdot \omega \cdot LOG(5) \cdot 10^{-7}$ Y=X+Aa Z=X-Aa/3																					
순환 계산식	i는 1부터 100까지 R(i)=R1*i M=R(i)/Y N=R(i)/Z																					
상별 계산식	<table border="1"> <thead> <tr> <th>A 상</th> <th>B 상</th> <th>C 상</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>A = -(1 - \sqrt{3} \cdot N)</math></td> <td>A=0</td> <td><math>A = -(1 + \sqrt{3} \cdot M)</math></td> </tr> <tr> <td><math>B = M + \sqrt{3}</math></td> <td>B=-1</td> <td><math>B = M - \sqrt{3}</math></td> </tr> <tr> <td><math>C = 2 \cdot (M \cdot N - 1)</math></td> <td>C=N</td> <td><math>C = 2 \cdot (M \cdot N - 1)</math></td> </tr> <tr> <td><math>D = 2 \cdot (M \cdot N)</math></td> <td>D=1</td> <td><math>D = 2 \cdot (M \cdot N)</math></td> </tr> <tr> <td><math>Ka = K \cdot 100(\%)</math></td> <td><math>Kb = K \cdot 100(\%)</math></td> <td><math>Kc = K \cdot 100(\%)</math></td> </tr> <tr> <td><math>Ia = I \cdot 100(\%)</math></td> <td><math>Ib = I \cdot 100(\%)</math></td> <td><math>Ic = I \cdot 100(\%)</math></td> </tr> </tbody> </table>	A 상	B 상	C 상	$A = -(1 - \sqrt{3} \cdot N)$	A=0	$A = -(1 + \sqrt{3} \cdot M)$	$B = M + \sqrt{3}$	B=-1	$B = M - \sqrt{3}$	$C = 2 \cdot (M \cdot N - 1)$	C=N	$C = 2 \cdot (M \cdot N - 1)$	$D = 2 \cdot (M \cdot N)$	D=1	$D = 2 \cdot (M \cdot N)$	$Ka = K \cdot 100(\%)$	$Kb = K \cdot 100(\%)$	$Kc = K \cdot 100(\%)$	$Ia = I \cdot 100(\%)$	$Ib = I \cdot 100(\%)$	$Ic = I \cdot 100(\%)$
	A 상	B 상	C 상																			
$A = -(1 - \sqrt{3} \cdot N)$	A=0	$A = -(1 + \sqrt{3} \cdot M)$																				
$B = M + \sqrt{3}$	B=-1	$B = M - \sqrt{3}$																				
$C = 2 \cdot (M \cdot N - 1)$	C=N	$C = 2 \cdot (M \cdot N - 1)$																				
$D = 2 \cdot (M \cdot N)$	D=1	$D = 2 \cdot (M \cdot N)$																				
$Ka = K \cdot 100(\%)$	$Kb = K \cdot 100(\%)$	$Kc = K \cdot 100(\%)$																				
$Ia = I \cdot 100(\%)$	$Ib = I \cdot 100(\%)$	$Ic = I \cdot 100(\%)$																				
SHEATH FACTOR 계산식	F: 주전류, Ia, Ib, Ic: SHEATH 전류 $X1 = \frac{A \cdot C + B \cdot D}{C^2 + D^2}$ $Y1 = \frac{B \cdot C - A \cdot D}{C^2 + D^2}$ $K = \sqrt{X1^2 + Y1^2}$																					

2.3 접지본드 과열현상별 원인분석

2.3.1 B상 GIB의 상대적 온도상승

접지본드 설계상 문제점(접지본드 통전용량 부족) 및 시공불량(접촉면 산화, 접지본드 체결 부적정 등)에 의한 접촉저항 증가로 극부적인 온도상승이 발생하여 볼트 통전 및 GIB 상간 임피던스 불균형이 발생함으로써, 극부과열이 발생한 B상 온도가 다른상 보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

정상상태에서 상간 온도차와 접지본드 보강후 A, B, C상 상승온도를 비교한 결과 온도차가 미미함을 알수있고 GIB 외함 임피던스 크기에 따라 자체 및 상간 전류크기 변화였다.

발열(=I²R)요인 추정으로 접지본드 전류(I) 증가는 A, C상에 비해 B상 GIB 외함의 재질 및 두께 등에 차가 있어 B상 저항이 상대적으로 낮은 경우 발생 가능하나 현 운전설비는 동일 재질, 동일 두께의 설비로 가능성이 없다.

접지본드 접촉저항(R) 증가는 접지본드와 플랜부와의 접촉불량시 발생 가능하며 GIB 조립시 시공결합이 있는 경우 접촉불량에 의한 접촉저항 증가 가능성이 있다.

시공결합 내용으로는 접촉면 산화(우천작업 등), 체결력 부족 또는 파다, 접지본드 자체결함으로 플랜지부와의 불완전 밀착, 체결전 액체 패킹 주입 등이 있고 추정근거는 B상 접지본드 일부에 액체패킹이 스며들어난(전체면의 30%) 흔적이 있었다.

A, C상 누설자속 영향에 의한 B상 외함 온도 상승은 GIB 상간거리가 2.5m 이고, 다중 접지된 점을 고려시 누설자속 영향에 의한 온도상승정도는 극히 미미(계산시 약 1°C)하다.

2.3.2 GIB 접지본드 및 접촉저항 변화시 3상 시스전류 EMTP 해석결과

해석조건은 Shunt Bar가 Tr측 및 CB측에 모두있 는것으로 가정하고, 주전류(I1) = 1100A, 분기전류(I2=I3) = -550A, 플랜지당 접지본드 저항 (접촉저항 포함)[μΩ]은 표2-5와같이 조건을 설정했다.

표 2-5. 플랜지당 접지본드 저항

No.	A상	B상	C상
1	100	50	100
2	100	30	100
3	100	20	100

임피던스 크기차에 의한 전류치 변화 해석결과(3상 위스전류)는 각각 그림 2-3, 2-4, 2-5와 같다. 그림2-3.B상 저항이 50 μΩ인 경우(A, C상 100 μΩ)

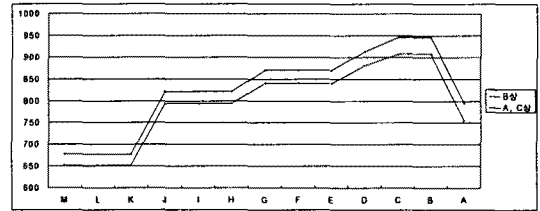


그림2-4. B상 저항이 30 μΩ인 경우(A, C상 100 μΩ)

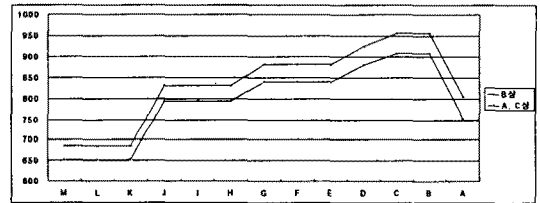
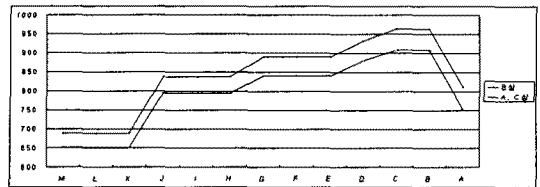


그림2-5. B상 저항이 20 μΩ인 경우(A, C상 100 μΩ)



3. 결 론

362kV GIS 접지본드 과열 방지대책으로 접지본드의 개수를 현 2개에서 적정개수 4개(허용전류 : 3200A) 이상으로 설계하고 유효 접촉면적 확대를 위해 접지본드 체결용 와셔(일반와셔φ18/30→Wood와셔φ18/52)를 변경하여 접촉면 도장 제거면적을 충분히 함으로써 유도 순환전류에 의한 온도상승은 억제될것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 일본중양연구소, 일본전력 케이블 핸드북
- [2] EMTP Rule Book, ATP Salford Version, I, II, 1987
- [3] EMTP Case Study Workbook I ~ IV, Electrotek Concept, Inc, January 1997