

## 보조접지선 시공에 의한 송전선로의 내뢰성 향상효과 모의

곽주식, 심정운, 심용보, 최종기  
한전 전력연구원

### A Simulation of Lightning Faults Reducing Effects on the 154 kV Transmission Tower by Auxiliary Grounding

Kwak Joo-sik\*, Shim Jeong-woon, Shim Eung-bo, Choi Jong-gi  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** -This paper describes the fault reducing effects of the 154 kV transmission tower by auxiliary grounding from the top of the tower to ground. The grounding surge impedance of the auxiliary grounding system is calculated by CDEGS(:Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure Analysis), and the critical lightning back flashover current and arcing horn dynamic characteristics are simulated by EMTP/TACS(:Electromagnetic Transient Program/Transient Analysis of Control Systems). The calculated results of total LFOR(Lightning Flashover Rate) shows that the LFOR can be reduced from 5.2(count/100km. year) to 3.4 by auxiliary grounding on the 154 kV transmission tower with one ground wire shielding system.

#### 1. 서 론

뇌사고는 뇌격이 직접 송전선에 침입하여 일어나는 차폐실패사고와 가공지선에 의하여 차폐는 되었으나 철탑의 전위상승에 의하여 발생하는 역설락사고로 나눌 수 있다. 이러한 뇌사고에 대한 대책으로는 역설락사고 감소를 위한 탑각접지저항의 저감과 가공지선의 적정차폐에 의한 차폐실패 감소가 유효한 방법이다. 신설되는 송전선에서는 목표사고율을 만족하는 적정 차폐각의 유지와 탑각접지저항 설계에 의해서 뇌사고를 감소시킬 수 있으나, 기설 송전선에서 가능한 방법은 탑각접지저항을 낮추는 방법이 가장 전통적인 방법이다. 그러나 탑각접지저항의 저감은 그 한계가 있으며 매설지선에 의한 접지계는 고주파영역에서 유도성의 접지저항을 갖는 경우가 많다. 또한 기설 송전선중 가공지선이 1조인 선로를 2조화하는 경우에는 철탑의 가공지선

암의 변경에 필요한 기계력을 유지하기 어려운 경우가 많다.

뇌씨지 전압은 아킹흔의 섬락특성, 송전선의 결합계수, 철탑의 써지임피던스, 탑각접지저항등의 여러 가지 파라메터의 영향을 받기 때문에, 이러한 요소들을 종합적으로 고려해서 절연설계를 하여야 한다. 본 논문에서는 철탑의 가공지선에 보조접지선을 포설하고 별도의 접지를 시공하여 역설락사고를 감소시키고자 할 경우 송전선에 역설락을 발생시키는 뇌격전류의 크기를 전자계 과도현상 해석프로그램(EMTP)과 접지계 해석프로그램(CDEGS)을 이용하여 구하였다. 또, 이 계산 결과와 뇌사고율 계산 프로그램을 이용하여 154 kV 모델 송전선로의 뇌사고율을 예측 계산하였다.

#### 2. 본 론

철탑에 보조접지선을 연결한 경우 상용주파동의 저주파수 영역에서는 접지선 임피던스가 매우 작으나 뇌격과 같은 수 MHz대의 고주파 영역에서는 접지선의 임피던스가 매우 커지게 되므로 접지선의 임피던스를 충분히 고려하여야 한다. 또한 보조 접지계통의 접지저항의 크기에 따라 역설락 여부가 크게 영향을 받으므로 접지계의 토양구조와 접지봉 간의 상호간섭 및 전류의 분포에 따른 해석을 하고 고주파전류를 주입하여 탑각접지저항을 예측 계산하였다. 뇌사고율은 자체개발한 프로그램을 이용하였다.

##### 2.1 역설락을 일으키는 뇌격전류의 계산

역설락을 발생시키는 뇌격전류의 계산은 EMTP를 이용하여 계산하였다. 송전선로는 8상 비연가 K. C. LEE 모델을, 철탑은 높이와 암간의 간격을 고려한 4단 분할의 분포정수모델을 이용하였으며, 아킹흔의 섬락특성은 뇌임펄스에 대한 CIGRE의

전압-시간 특성곡선과 리더 진전시의 아킹흔간의 등가임피던스 변화를 표현한 근사식을 사용하여 EMTP /TACS를 이용한 스위치로 모의하였다.

### 2.1.1. 보조접지선의 인덕턴스

보조접지선의 임피던스는 외국의 문헌을 참고로 하여 다음과 같이 가정하여 계산하였다.<sup>[1]</sup>

$$l = 0.2 \ln\left(\frac{4}{d}\right) [\mu H/m]$$

이 식은 땅속에 묻히는 접지봉의 인덕턴스를 구하기 위한 수식이지만 접지 연결선의 인덕턴스를 구하는데 사용하여도 실용상 문제점이 없을 것이다. 저항성분은 계산결과에 미치는 영향이 매우 적으므로 무시하였다.

### 2.1.2. 보조 접지계의 접지저항값 계산

CDEGS에 의한 보조접지계의 접지저항은, 대지 고유저항 600[ohm · m], 공기에 대한 비투자율 및 비유전율을 각각 1.0, 접지동봉(14Φ x 1000[mm])은 2 m 간격으로 5개를 0.75 m 깊이에 배설하는 것을 가정하여 계산하였다. 계산결과 2 μS 파두장에 대한 임펄스 임피던스는 65.59[Ω]이었으며 접지의 시공형태와 접지저항은 그림 1 및 그림 2와 같다.

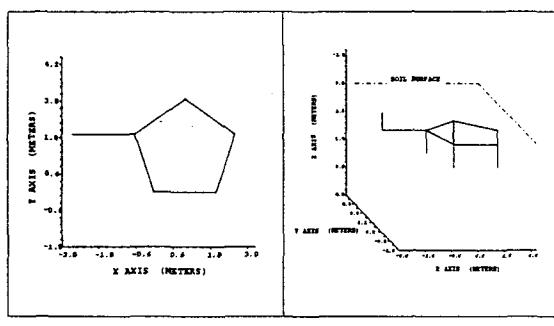


그림 1 보조접지계의 시공형상

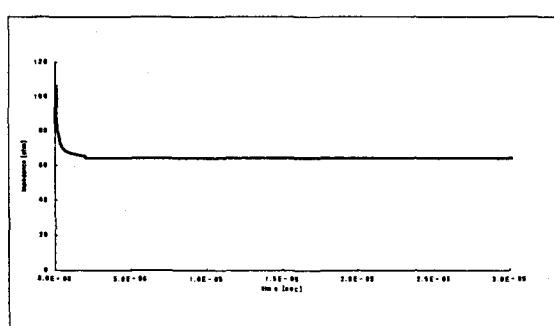


그림 2 보조접지계의 임펄스 임피던스

### 2.1.3. 아킹흔의 섬락 동특성 모의

아킹흔의 전압-시간 특성은 CIGRE의 실험식을 이용하였으며 아킹흔간에서 발생되는 전압이 아킹흔의 내전압을 초과하면 역설락이 일어나도록 모의하였다. 사용된 수식은 다음과 같다.<sup>[2]</sup>

$$V = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}} [MV]$$

$$\text{여기서 } K_1 = 0.4W, K_2 = 0.71W$$

$$W = \text{아킹흔(애자린)길이}$$

아킹흔의 인덕턴스는 초기의 비선형 인덕턴스  $L(i)$ 와 섬락후의 정상 인덕턴스  $L$ 의 조합으로 표현하였다.<sup>[3]</sup>

$$L_{total} = L_{(i)} + L$$

비선형 인덕턴스( $L(i)$ )는 초기에는 매우 큰 값을 가지나 아크의 진전에 따라 매우 작은 값으로 되어 결국은 완전 섬락으로 진전된다. 완전섬락에 도달하는 순간은 등가 임피던스가 정상아크의 등가 임피던스( $1 [\mu H/m]$ )가 되는 시간 또는 아킹흔간의 전압이 영이 되는 시각을 섬락시간으로 판단하도록 하였다. 비선형 인덕턴스( $L(i)$ )의 값은 일본에서의 실험식을 그대로 이용하여 계산하고 EMTP의 Type98 비선형 인덕턴스로 등가화 하였다.<sup>[4]</sup> 계산에 사용된 아킹흔 모델의 개념도는 그림 3과 같다.

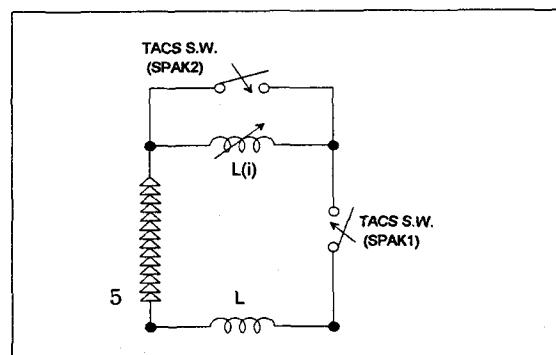


그림 3 비선형 인덕턴스를 이용한 아킹흔 모델

### 2.1.4. 송전선로 모델 및 기타 정수

역설락 발생 뇌격전류의 계산 및 뇌사고율 계산에 사용된 송전선로의 모델은 그림 4와 같다. 뇌격전류는 2/70 μS의 삼각파로 모의하고, 탑각 접지저항은 실측 평균치인 15 [Ω], 평균 철탑 경간 300 m, 전선은 ACSR 330 x 1조, 가공지선은 ACSR 97 mm² x 1조, 보조 mm² 접지용 인하선은 38 mm²를 기준으로 하여 400 mm² 까지 검토하였다.

### 2.1.5. 역설락발생 뇌격전류의 계산결과

표 1은 보조접지 리드선의 단면적이  $38 \text{ mm}^2$  일 때 송전선에 역설락을 일으키는 뇌격전류의 크기이다. 보조접지선의 단면적은  $100 \text{ mm}^2 \sim 400 \text{ mm}^2$ 로 한 경우 역설락발생 뇌격전류를 표 2에 나타내었다. 보조접지계의 접지저항이  $30[\Omega]$ 인 경우는 보조접지선 단면적의 증가에 따라 전류치도 증가하였으나,  $65[\Omega]$ 인 경우는 접지선 단면적을 증가시켜도 그 효과는 나타나지 않았다.

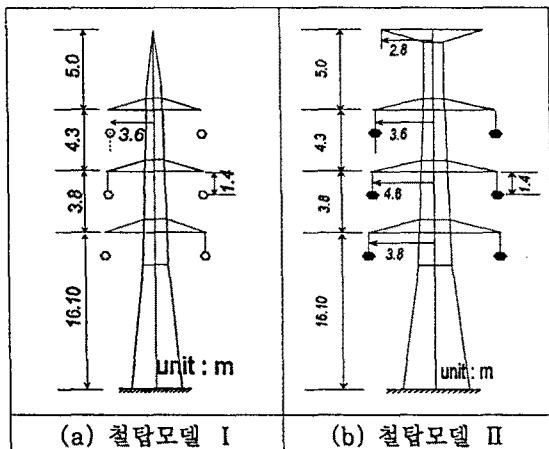


그림 4 해석에 사용된 철탑모델

표 1 역설락발생전류와 보조접지선의 효과

단위: kA

보조접지	가공지선 1조		가공지선 2조		비 고
	없음	있음	없음	있음	
$65[\Omega]$	54	76	82	116	$\rho = 600 \Omega \cdot \text{m}$
$30[\Omega]$	54	90	82	140	$\rho = 300 \Omega \cdot \text{m}$

표 2 역설락발생전류와 리드선 단면적

단위: kA

보조접지	단면적	38	100	150	200	250	400
	65[\Omega]	76	76	76	76	76	76
30[\Omega]	90	106	110	114	116	120	

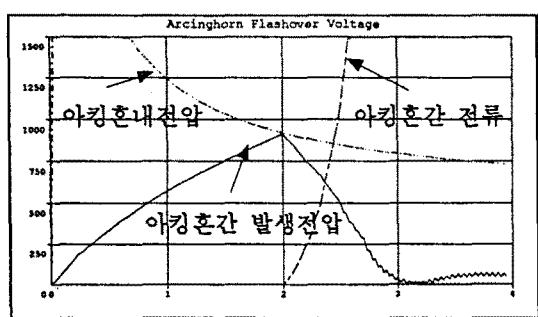


그림 5 아킹흔의 발생과전압 해석파형 예

### 2.2. 뇌사고율의 계산

역설락사고율은 계산을 위한 전제조건을 다음과 같이 가정하고 EMTP에 의한 철탑의 역설락전류를 이용하여 계산하였다.

#### 2.2.1. 역설락사고율의 계산을 위한 가정조건

송전선에의 뇌격은 Armstrong-Whitehead의 이론을 따랐으며, 대지 뇌격전류의 확률분포는 다음과 같다.

$$P(I_0) = 0.0475 e^{-I_0/20} + 0.001 e^{-I_0/50}$$

$$\left( \int_0^{\infty} P(I_0) dI_0 = 1.0 \right)$$

뇌방전의 흡인거리  $r_{ss}$ 는 다음식에 따른다.

$$r_{ss} = 6.72 I_0^{0.8} \quad (\text{여기서 } I_0 \text{의 단위는 } kA)$$

뇌격의 침입각도  $\theta$ 의 분포는 다음의 확률밀도함수  $P(\theta, m)$ 에 따른다.

$$p(\theta, m) = K_m \cos^m \theta,$$

$$\left( K_m = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} p(\theta, m) d\theta = 1.0 \right)$$

철탑뇌격에 의한 설락은 전부 역설락으로 계산하고 경간 역설락은 무시한다.

#### 2.2.2. 역설락사고율의 계산식 [5]

역설락 사고율은 대지뇌격밀도, 대지경사각, 뇌격의 침입각 분포, 역설락을 발생시키는 뇌격전류가 발생할 확률 분포에 의하여 송전선 제 n 상의 뇌격확률은 다음식으로 계산된다.

$$P(n) = \frac{N}{10} \int_0^{\infty} \int_{\theta_{n1}}^{\theta_{n2}} P(I_0) \cdot \delta P(I_0) \cdot P(\theta, m) dI_0 \cdot d\theta$$

단 여기서 N은 대지뇌격밀도 (회/km<sup>2</sup>.년),  $\delta P(n)$ 은 대지뇌격전류  $I_0$ , 뇌격각도  $\theta$ 의 뇌격이 제 n상에 포착되는 비율이다.

#### 2.2.3. 뇌차폐실패율의 계산 [6]

뇌차폐실패율의 계산은 다음의 식을 이용하였다.(참고문헌)

$$n = N \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P(I_0) r_s \cdot \int_{\theta_2}^{\theta_1} \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} \cdot f(\alpha) \cdot da \cdot d\theta \cdot dI_0$$

여기서

N : 대지뇌격밀도 (회/km<sup>2</sup>.년)

$P(I_0)$  : 뇌격전류의 확률 밀도함수

$r_s$  : 대상 상도체의 뇌격거리 (m)

$\alpha$  : 낙뢰침입각

$f(\alpha)$  : 뇌격 침입각 확률분포수

- $\theta$  : 대상 상도체의 중심으로부터 노출각상에 존재하는 임의의 점에 그은 직선이 수평선과 이루는 각도
- $I_{0\min}$  : 이 뇌격전류 이하에서는 대상도체에 뇌격이 있어도 섬락을 일으키지 않는 뇌격전류(kA)
- $I_{0\max}$  : 완전차폐가 되는 한계 뇌격전류(kA)

### 2.3. 뇌사고율의 계산결과

보조접지선의 단면적에 따른 역섬락사고율의 계산 결과를 보면, 보조접지계의 접지저항이 30 [Ω]인 경우에는 단면적의 증가에 따라 뇌사고율의 감소효과가 나타나고 있으나 접지저항이 65 [Ω]인 경우에는 뇌사고율 감소효과가 거의 나타나지 않고 있다. 그림 #111에 보조접지선의 단면적에 따른 뇌사고율을 나타내었다.

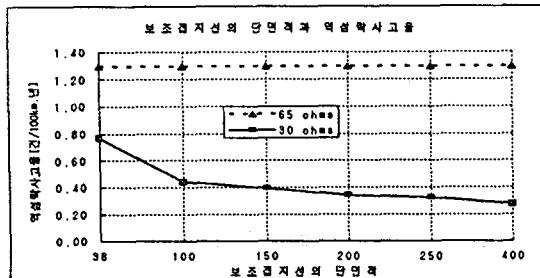


그림 6 보조접지선 단면적과 역섬락사고율

보조접지계의 접지저항이 65.59[Ω], 30[Ω], 가공지선이 1조, 2조인 경우 뇌사고율은 표 3 및 그림 7 와 같다. FLASH 프로그램에 의한 뇌사고율 계산결과는 가공지선 2조 설치시는 1.64 [건/100km.년]으로 유사하나, 가공지선 1조 설치시는 2.56 [건/100km.년]으로 다소의 차이를 나타내었으며, 차폐실패율에서 큰 차이를 나타냈다.

표 3 보조접지선의 뇌사고 감소효과

단위 : 건/100 km. 년

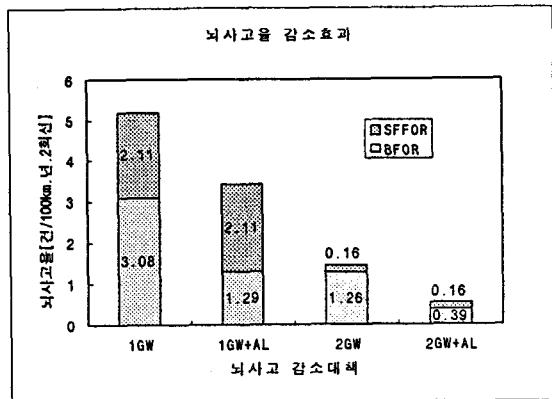
가공지선 조수	보조접지	1조설치		2조설치	
		미시공	시 공	미시공	시 공
65.59 [Ω]	BFOR	3.08	1.29	1.26	0.39
	SFFOR	2.11	2.11	0.16	0.16
	LFOR	5.19	3.40	1.42	0.55
	보조접지	미시공	시 공	미시공	시 공
30.0 [Ω]	BFOR	3.08	0.77	1.26	0.18
	SFFOR	2.11	2.11	0.16	0.16
	LFOR	5.19	2.88	1.42	0.34

주 BFOR: 역섬락사고율(Back Flashover Rate)

SFFOR: 차폐실패사고율

(Shielding Failure Flashover Rate)

LFOR : 뇌사고율(Lightning Flashover Rate)



주. 1GW: 가공지선 1조, 1GW+AL: 가공지선 1조 + 보조접지  
2GW: 가공지선 2조, 2GW+AL: 가공지선 2조 + 보조접지

그림 7 보조접지선의 뇌사고율 저감효과

### 3. 결 론

가공송전선로의 뇌격피해를 감소시키기 위한 방안으로, 154 kV 급 철탑에서 가공지선을 2조로 시공할 수 없는 선로에서 보조접지선을 설치하고자 하는 경우 그 적용효과를 모의 계산하였다. 보조접지선을 시공할 경우 역섬락사고율이 저하되어, 뇌사고율을 5.2 [건/100km.년]에서 3.4 [건/100km.년]정도로 낮출 수 있음을 보였다. 이는 가공지선을 2조로 하여 차폐실패 사고율을 낮추는 방법보다는 효과가 적으나, 보조접지계의 접지저항을 낮출 경우 상당한 내회성 향상 효과가 있음을 알 수 있다. 가공지선을 2조화 하고 보조접지선도 시공할 경우는 뇌사고율을 0.55 [건/100km.년]으로 낮출 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- Rudenberg, Reinhold, "Electric Shock Waves in Power Systems", Harvard Univ. Press, Massachusetts, PP.273-277, 1968
- EPRI, "Transmission Line Reference Book", EPRI, PP.561-597, 1982
- Naoto Nagaoka, "A Flashover Modeling Using a Nonlinear Inductance", 日本電學論B, 111권 5호,
- ATP, "EMTP Rule Book", 1986
- 정재기 외, "뇌차폐실패율 계산을 위한 신형 알고리즘 개발과 국내의 765 kV 송전선로에의 적용", 대한전기학회논문지, 제4권 8호 PP.1093 - 1099, 1995