

500 kV 송전계통의 개폐과전압과 공기절연거리 설계

심응보, 광주식, 우정욱, 한기선, 권동진
한전 전력연구원

Switching Surge Overvoltage and Air Clearance Design of 500 kV Transmission System

E. B. Shim, J. S. Kwak, J. W. Woo, K. S. Han, D. J. Kwon
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - The air clearance of the transmission tower is determined by the switching overvoltage of the system, and the insulator length is determined by contamination design. This paper described the switching overvoltage analysis result of 500 kV system and air clearance design. The overvoltage include fault initiation, fault clearing, closing and reclosing overvoltages. We illustrated the contamination design example, air clearance design of a tower considering swing angle of the conductor.

1. 서 론

송전계통의 공기절연거리는 해당 계통의 개폐과전압의 배수에 따라 정하여진다. 송전선로의 애자련의 길이는 통상 오손설계를 만족하는 범위에서 결정되며, 도체와-탑체 및 아킹혼 간의 절연거리는 공기절연거리 실증시험 결과를 이용한 실험식과 개폐과전압의 해석 결과를 이용하여 정한다. 통상 송전전압계급이 낮은 경우에는 오손에 의한 설계가 지배적으로 되지만, 500 kV급의 계통에서는 오손설계에 필요한 절연거리 이외에도 공기절연거리를 만족하는지의 여부도 동시에 검토하여야 한다.

본 논문에서는 특정 500 kV 계통의 개폐과전압 해석 결과와 공기절연 실증시험식을 이용한 공기절연거리 산출 결과를 소개하였다. 개폐과전압은 지락고장시, 고장차단시, 투입 및 재투입시의 과전압을 계산하였으며, 애자련의 오손설계 사례와 도체의 횡진을 고려한 적정 공기절연거리 설계 결과를 예시하였다.

2. 본 론

2.1 계통 구성 및 모의계산 모델

최종 계통 규모를 고려한 발전량과 계통 구성을 고려하여 예상한 PSS/E 데이터를 등가로 축약하여 그림 1과 같은 EMTP 모델을 만들고, 상용주파단시간과전압 및 개폐과전압을 계산하였다.

BUS 1 BUS 2 BUS 3

220 km 195 km

그림 1. 500 kV 송전계통 모델

해석 대상구간은 500 kV 변전소 A(BUS1)에서 변전소 B(BUS2)까지의 220 km구간과, 500 kV 변전소 B(BUS2)에서 변전소 C(BUS3)까지의 195 km 구간이다. 500 kV 송전선로 모델은 2개의 가공지선(97 mm sq.)과 3상의 전력선(330 mm sq. x 4 bundle)으로 이루어진 1회선 수평배열 선로를 가정하였다.

2.2 상용주파 과전압에 대한 오손 설계

EMTP 해석 모델을 위해서 2008, 2011, 2021, 2031년에 대해서 PSS/E를 이용하여 계통 등가 임피던스를 계산하였다. 측정지점은 송전선로 단위 구간 및 A, B, C 변전소 모선이다. 영상분 임피던스는 PSS/E로부터 구하였고, 일부 데이터는 발표된 다른 논문을 이용하여 가정하였다.

2.2.1 오손 설계를 위한 상용주파 과전압 해석

해석 모델에서 송전선로는 각 20 km 단위로 분할하였으며, 분할된 각각의 위치에서 각 상별로 고장을 모의하였다. 220 km선로에서의 최대 상용주파 일시과전압은 M변전소로부터 약 140 km지점에서 1.14 p.u.이었다. 따라서 1.2 p.u.를 송전선로의 오손설계 값으로 정하였다.

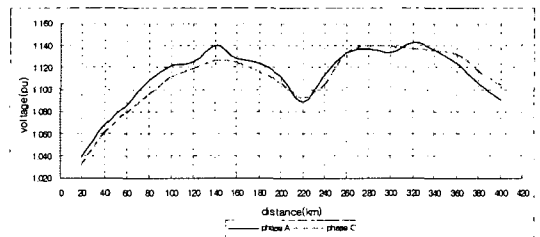


그림 2. 고장 위치에 따른 상용주파 일시과전압 (M-T-K 변전소)

2.2.2 지기애자의 설계기준값에 의한 오손설계

오손설계를 위한 목표 내전압은 대기중 계통 최고전압 및 상용주파단시간과전압을 고려하여 다음 식에 의해 계산된다.

$$\frac{550 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \times 1.2 = 381 \text{ [kV]} \quad (\text{식 1})$$

여기서 1.2는 상용주파 일시과전압배수이다..

애자의 개당 설계 내전압치는 애자의 수에 비례한다. 표 1은 현수애자의 설계 내전압치를 ESDD 등급에 따라

나타낸 것이다.

표 1. 현수애자의 오손정도에 따른 개당 내전압

애자 종류	애자 규격			ESDD(mg/m ²)					
	직경 (mm)	연결 길이 (mm)	누설 거리 (mm)	0.03 (mg/m ²)	0.06 (mg/m ²)	0.12 (mg/m ²)	0.25 (mg/m ²)	0.3 (mg/m ²)	0.5 (mg/m ²)
210kN	280	170	370	13.0	11.2	9.7	8.3	8.1	7.4
300kN	320	195	460	15.0	12.9	11.2	9.6	9.3	8.5

만약 500 kV 선로의 등가염분밀도가 0.03 [mg/m²] 이 하이고 210 kN 이나 300 kN 자기애자가 사용된다면, 필요한 애자 수량은 다음과 같이 계산된다.

$$381 \text{ [kV]} / 13.0 \text{ [kV/disc]} = 29.3 \approx 30 \text{ discs}$$

$$381 \text{ [kV]} / 15.0 \text{ [kV/disc]} = 25.4 \approx 26 \text{ discs}$$

표 2는 ESDD에 따른 필요 애자 수량을 보여준다.

표 2. 현수애자의 오손등급에 따른 소요수량

애자 종류	ESDD(mg/m ²)						
	0.03	0.06	0.12	0.25	0.3	0.5	
550kV	210kN	30	34	40	46	47	52
	300kN	26	30	34	40	41	45

2.2.3 폴리머 애자의 오손설계

고분자 폴리머 애자를 위해서는, 누설거리가 자기애자의 합보다 같거나 크게 설계되어야 한다. 210 kN과 300 kN 애자의 누설거리의 합은 다음과 같이 계산된다.

$$370 \text{ [mm/disc]} \times 30 \text{ [disc]} = 11,000 \text{ [mm]}$$

$$460 \text{ [mm/disc]} \times 26 \text{ [disc]} = 11,960 \text{ [mm]}$$

따라서 고분자 폴리머 애자의 등가 누설거리는 적어도 11,960 [mm]가 되어야 한다. 그러나, 다른 전기적 특성은 자기애자와 같지 않으며 ANSI에서는 표 3과 같은 전기적 특성을 추천하고 있다.

표 3. 36,000 lbs. or 40,000 lbs. SML, oval eye-ball end fitting combination(ANSI C29.12-1997(R2002))

ANSI class	Section Length Nominal Range	Electrical Values			
		Low Frequency Flashover		Critical Impulse Flashover Volt.	
	Inches [mm]	Dry [kV]	Wet [kV]	Pos. [kV]	Neg. [kV]
70-9	151.0 - 159.0 [3835 - 4039]	1180	1010	2125	2175
70-10	165.0 - 175.0 [4191 - 4443]	1275	1090	2365	2425

2.3 개폐과전압 해석과 공기절연거리 산정

모델계통의 각 요소들은 다음과 같은 대표 값을 이용하여 계산하였다.

- 송전선로 : 주파수 독립모델
- 전원 : 등가임피던스를 가진 일정 전원
- 지락저항 : 0.1
- 투입저항 : 100 ~ 1000 Ω

송전선로에서의 개폐서지는 투입, 재투입, 지락서지, 지락차단서지 등을 포함하고 있다.

2.3.1 지락고장시 과전압

그림 3은 고장 위치에 따른 고장개시 과전압을 나타낸다. B상이 지락고장시 A상과 C상에 1.96 p.u.와 1.98 p.u.가 각각 나타났다.

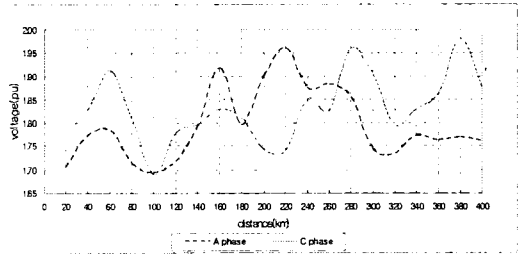


그림 3. 고장위치에 따른 지락고장시 과전압

2.3.2 고장차단시 과전압

그림 4는 고장 차단시의 과전압을 나타낸다. 최대 1.96 p.u.로 2.0 p.u.를 초과하지 않았다.

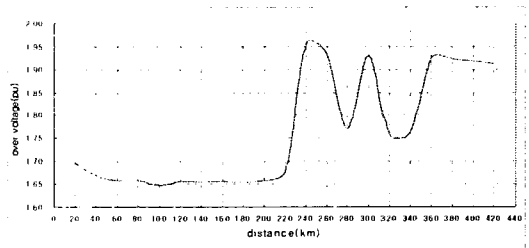


그림 4. 고장위치에 따른 지락고장 차단시 과전압

2.3.3 초기과전압을 위한 차단기 투입시 과전압

그림 5는 100 ~ 1000 ohms의 투입저항값을 가지고 투입하였을 때의 과전압을 보여준다. 표 4는 투입저항이 500 ohm일 때 220 km 및 195 km 송전선로의 최대과전압을 보여준다. EMTP에서 개폐 순간은 통계스위치를 이용하여 100개의 다른 포인트에서 투입된다.

표 4. 투입저항 500 Ω에서 투입과전압

선로길이	과전압 [p.u.]		투입저항
	상-대지간	상간	
220 km	1.93	3.32	500 Ω
195 km	1.85	3.14	

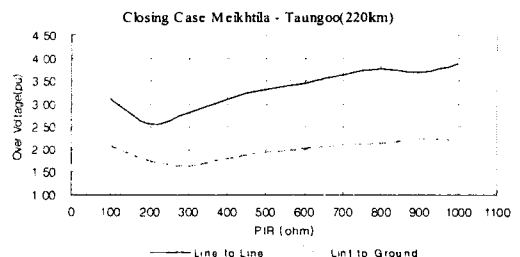


그림 5. 투입저항값에 따른 투입과전압

2.3.4 송전선로 재 투입시 과전압

표 5는 투입시와 동일한 조건에서 선로의 초기 충전전하가 있는 경우를 가정하여, 투입저항이 500 ohm일때 220 km 및 195 km 송전선로의 최대 재투입과전압을 보여준다.

표 5. 투입저항 500 [Ω]에서 재투입과전압

선로길이	과전압 [p.u.]		투입저항
	상-대지간	상간	
220 km	1.93	3.30	500 Ω
195 km	1.94	3.26	

2.3.5 개폐 과전압의 대표 값 선정

그림 6은 모든 개폐과전압의 전체결과를 보여주고 있으며, 최대과전압은 2.0 p.u.보다 적다. 따라서 개폐과전압 배수를 상대지간 2.0 p.u.로 제안하였다. 상간 개폐과전압은 3.32 p.u.가 발생하였으며, 개폐과전압배수를 상간 3.5 p.u.로 제안하였다.

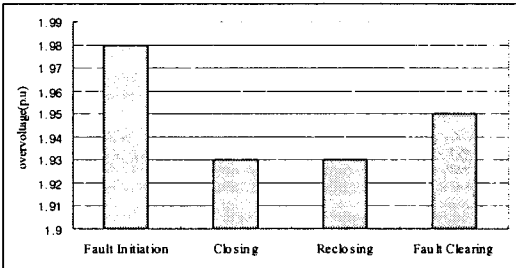


그림 6. 상-대지간 개폐과전압 요약

2.3.6 도체 횡진각의 계산

횡진각은 다음의 조건으로 계산하였으며, 해발고도 1000 m 이하에 대한 계산 결과는 표 6과 같다.

- 철탑경간 : 350, 400, 500 meters
- 철탑 수평각 : 3 degrees
- 애자수량 : 25 - 30 EA(210kN)
- 풍속 : 30m/s (현수애자)

표 6. 도체횡진각 계산 결과

풍속 [m/sec]	기호	최대횡진각[도]	
		내장철탑	현수철탑
10	<i>t</i> 1, <i>t</i> 2	10	20
20	<i>t</i> 3	30	40
30	<i>t</i> 4	50	60

2.3.7 공기절연거리의 계산

상-대지간 공기절연거리의 계산은 한전전력연구원의 실험식 (1)을, 상간 절연거리는 일본 전력중앙연구소의 실험식 (2)를 이용하였다.

$$-절연강도(P-G) : V_{50} = k \cdot 950 \cdot \ln(0.57D + 1) \quad (1)$$

$$-절연강도(P-P) : V_{50} = 2570 \cdot \ln(0.25D + 1) \quad (2)$$

여기서 k 는 1.24, D 는 공기절연거리

$$-스트레스: V_{50} = U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot n \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (3)$$

여기에서 U_m : 계통 최대 전압

n : 개폐과전압 배수(=20)

$k_1(1.18)$: 통계적 확률(= $\frac{1}{1-3\sigma}$)

$k_2(1.08)$: 기상보정계수

표 7. 혼잡 길이와 공기절연간격

unit : mm

구분		일반지역	오손지역
상-대지간	혼잡 길이	3,300	3,800
	절연간격 (<i>t</i> 1, <i>t</i> 2)	3,800	4,400
	절연간격 (<i>t</i> 3)	2,900	2,900
	절연간격 (<i>t</i> 4)	1,500	1,500
상간		5,000	

2.3.8 철탑의 클리어런스 다이어그램

그림 7은 계산된 절연거리를 이용한 500 kV 수평배열 1회선용 현수형 철탑 상부의 클리어런스 다이어그램의 예이다.

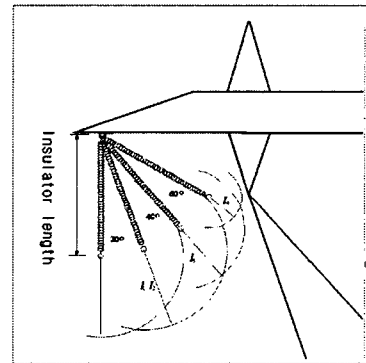


그림 7. 수평배열 1회선용 현수형 철탑의 클리어런스 다이어그램 예

3. 결 론

500 kV 송전계통의 여러 가지 과전압 해석과 공기절연거리 실증실험식을 이용하여 애자의 오손설계와 공기절연거리를 설계하였다.

- 상용주파 과전압배수는 1.2 p.u.를 넘지 않았다.
- 상용주파과전압을 고려한 오손설계는, 청정지역 기준으로 210 kN 애자 30개가 필요하다.
- 계통의 상-대지간 개폐과전압은 2.0 p.u.를, 상간 개폐과전압은 3.5 p.u.를 넘지 않았다.
- 상-대지간 최소 공기절연거리는 2900 mm, 상간 최소 공기절연거리는 5,000 mm로 계산되었다..

[참 고 문 헌]

[1] ATP, "EMTP Rule Book", Vol. 1, II, 1987
 [2] 일본 전력중앙연구소, "UHV 송전계통의 절연, 절연부회보고서, 1982
 [3] 한전전력연구원, "765 kV 증설계통의 과전압해석 연구", 최종보고서, 1999