345kV/154kV 계통 과전압 해석과 공기절연간격 산정

심 응 보* 우 정 욱* 곽 주 식* 윤 상 훈** 김 경 호**
한전 전력연구원* 한국전력공사**

Overvoltage Analysis and Air Clearance Design of 345kV/154kV Transmission Tower

E. B. Shim* J. W. Woo* J. S. Kwak* S. H. Yoon** K. H. Kim**
Korea Electric Power Resaerch Istitute* Korea Electric Power Corporation**

Abstract - This paper described the switching overvoltage analysis on the 345kV and 154kV transmission system by EMTP(Electromagnetic transient Program) for the enactment of current insulation design standards of KEPCO. The air clearance design of current transmission tower was reviewed and revised by the calculated result, considering swing angle for the each type of insulator string by the wind velocity.

1. 서 론

송전철탑은 전력계통에 침입하는 낙뢰와 기기 조작시에 발생하는 개폐과전압에 대하여 허용사고율을 만족하도록 설계하여야 한다. 본고에서는 한전 계통의 개폐과전압을 새로이 해석하고 발생되는 개폐과전압에 대하여 송전철탑이 필요한 신뢰성을 갖도록 하기 위한 공기절연거리를 산정하여 기존의 규격과 비교하였다. 상-대지간에 발생되는 개폐과전압과 상간의 개폐과전압의 발생확률을 계산하여 신뢰구간 98 % 이상의 절연내력을 갖도록 공기절연거리를 산정하였으며, 풍압에 의한 애자련의 횡진각과 공기절연거리 실증시험 결과를 이용하여 애자련의 종류별로 크리어런스 다이어그램을 결정하였다.

2. 본 론

2.1 개폐과전압의 해석

개폐과전압의 해석은 현재의 송전계통과 증설 예상 계통의 용량, 송전선로 긍장, 가공선로와 지중송전 케이블의 조합 및 송전선로의 투입 및 재투입 조건을 상정하여 다양한 조건에서 해석을 하였다. 차단기의 동작은 200회의 통계스위치를 이용하여 확률적으로 해석하였다. 상용주파 단시간과전압의 해석은 계통의 정상 임피던스와 역상 임피던스의 비율 및 선로긍장 및 중성점 부동운전을 상정하여 해석하였다.

2.1.1 상-대지간 개폐과전압 배수

상-대지간 개폐과전압의 계산은 가공송전선로만 있는 경우(OH)에는 재투입시의 과전압을, 지중케이블과 가공송전선로구간이 혼재(OH+CA)하는 경우에는 투입시의 과전압을 상정하여, 각각 케이블 구간 및 가공송전선로 구간에서 발생하는 최대과전압을 구하였다. 표 1은 각 154kV 계통의 해석결과의 예로서 조건별 개폐과전압 배수를 나타내고 있으며, 그 히스토그램은 그림 1과 같다.

345kV 계통에서는 차단기에 투입저항을 사용하여 개폐과전압을 억제하고 있으므로 최대과전압은 약 2.5 p.u.가 발생하였다.

2.1.2 상간 개폐과전압 배수

상간 개폐과전압 배수는 상-대지간 개폐과전압 계산과 동일한 조건에서 계산하였다. 신뢰구간 98 %로 설계하였으며, 가공송전선로와 케이블의 혼재선로를 투입하는 조건에서 약 4.6 p.u.의 최대과전압이 발생하였다. 표 2는 상간의 개폐과전압 계산 결과를 나타내고 있다.

한편, 345kV 계통에서는 약 4.0 p.u.의 상간 개폐과전압이 발생하였다. 표 3은 345kV 계통의 상-대지간 및 상간 과전압의 계산 결과를 나타낸 것이다.

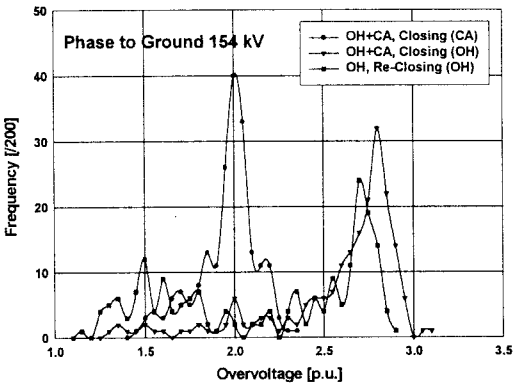


그림 1. 상-대지간 개폐과전압 발생빈도

표 1. 154kV 송변전설비 상-대지간 개폐과전압 배수

구 분		Mean(M) [p.u.]	Standard Deviation(σ)	M+2σ [p.u.]
구 성	OH+CA	1.932	0.171	2.274
기준구간	CA			
구 성	OH+CA	2.552	0.373	3.298
기준구간	OH			
구 성	OH	2.161	0.544	3.249
기준구간	OH			

[주] 1. OH : 가공 송전선로, CA : 송전용 케이블

표 2. 154kV 송변전설비 상간 개폐과전압

구 분		Mean(M) [p.u.]	Standard Deviation(σ)	M+2σ [p.u.]
구 성	OH+CA	2.9323	0.3530	3.6383
기준구간	CA			
구 성	OH+CA	3.4518	0.5688	4.5894
기준구간	OH			
구 성	OH	2.9130	0.5074	3.9278
기준구간	OH			

2.1.3 상용주파 단시간과전압 배수

345kV 계통과 154kV 송전계통의 상용주파 단시간 과전압의 해석결과는 모두 동일하게 상-대지간 1.35 p.u., 중성점 부동운전시 중성점의 전위상승은 0.68 p.u.이었다.

표 3. 345kV 상간 개폐과전압 배수

구 분		Mean(M) [p.u.]	Standard Deviation(σ)	M+2σ [p.u.]
구 성	OH+CA	3.0433	0.4765	3.9963
기준구간	CA			

2.2 절연설계 목표내전압 및 임계섬락전압

개폐과전압의 계산 결과를 이용하여 절연설계 목표내전압을 구하고, 이 목표내전압을 초과하지 않는 확률을 고려하여 임계섬락전압을 구하였다. 임계섬락전압의 표준편차는 공기절연거리 실증시험 결과를 근거로 하여, 상용주파과전압에 대한 절연강도 확률분포의 표준편차 σ_s는 3 %, 개폐과전압에 대한 표준편차는 5 %를 기준으로 하였으며, 개폐과전압 배수로부터 절연설계 목표내전압과 임계섬락전압을 구하기 위한 실험식은 다음의 식 1 및 식 2와 같다. 여기에서 적용배수는 3을 적용하였으며 이 임계섬락전압을 초과할 확률은 1000회 개폐시 1회 정도이다.

$$V_W = V_B \times n \times k_1 \quad [kV] \text{ ---------- (1)}$$

단, V_B : 1 p.u당 기준전압

n : 과전압 배수

k_1 : 기상보정계수(개폐과전압 : 1.082, 상용주파단시간과전압 : 1.165)

$$V_{50\%} = \frac{V_W}{1 - m \cdot \sigma_s} \text{ ---------- (2)}$$

2.3 절연요소의 섬락 및 내전압 특성

각종 과전압에 대한 공극 및 애자련 등 섬락요소의 섬락 및 내전압 특성은 일본 전력중앙연구소의 실험식과 전력연구원에서 수행한 공기절연거리 실증시험 결과를 이용하였다.

2.3.1 상용주파 단시간과전압에 대한 특성

상용주파 단시간과전압에 대한 공기절연의 섬락 특성은 식 3을 이용하였다.

$$V_{50\%} = k \cdot 1080 \cdot \ln(0.46 \cdot d + 1) \quad [kV] \text{ ---- (3)}$$

단, k는 공극계수, d는 절연거리(m)이다.

2.3.2 개폐과전압에 대한 특성

상-대지간 개폐과전압에 대한 특성은 식 4의 전력연구원의 실증시험식을, 상간 개폐과전압에 대하여는 식 5를 이용하였다.

$$V_{50\%} = k \cdot 950 \cdot \ln(0.57 \cdot d + 1) \text{ [kV] ----- (4)}$$

$$V_{50\%} = 2570 \cdot \ln(0.25 \cdot d + 1) \quad [kV] \text{ ----- (5)}$$

단, k는 공극계수, d는 절연거리(m)이다.

2.4 공기절연간격의 산정

각종 과전압 배수의 계산 결과, 목표내전압, 임계섬락전압, 아킹혼의 간격 및 공기절연 실증시험식 3, 4, 5를 이용하여 산정한 애자련의 형태별 공기절연간격은 표 4 및 표 5와 같다. 여기에서 아킹혼의 간격은 154kV 송전철탑에 대하여는 1,120mm, 345kV 송전철탑에 대하여는 2,340mm를 기준으로 하였다.

2.4.1 표준절연간격의 산정

뇌에 의한 섬락을 아킹혼간으로 유도하기 위하여 도체-하단암 간에 유지하는 간격으로, 다음 식 6에 의하여 산출하였다.

$$\text{표준절연간격(A)} = 1.115Z + 0.021 \text{ (m)} \text{ ----- (6)}$$

단, Z : 아킹혼 간격(m)

2.4.2 최소절연간격의 산정

개폐과전압에 의한 섬락을 아킹혼 간으로 유도하기 위하여, 도체-하단암, 도체-탑체, 도체-상단암간에 유지하는 간격으로, 도체와 상·하단암 및 탑체간의 개폐내전압 특성으로부터 산출하였다.

2.4.3 이상시절연간격의 산정

상용주파단시간과전압에 대하여, 도체-탑체, 도체-상단암간에 유지하여야 하는 간격으로서 상용주파단시간과전압에 대한 내전압 특성으로부터 산출하였다.

2.4.4 상간절연간격의 산정

상간 과전압에 대하여 상간에 유지하여야 하는 간격으로서, 도체-도체의 내전압 특성으로부터 산출하였으며, Jumper, 수평각, 카테나리각 등의 기계적 사항을 감안하였다.

표 4. 154kV 철탑의 공기절연간격 (Clearance)

구 분		절연간격	기호
표준절연간격 (㎜)	현수	1,300	A
	내장	1,300	
최소절연간격 (㎜)	현수	1,150	b
	내장	1,150	
이상시절연간격 (㎜)		450	D
상간절연간격 (㎜)		1,500	-

표 5. 345kV 철탑의 공기절연간격 (Clearance)

구 분		절연간격	기호
표준절연간격 (㎜)	현수	2,700	A
	내장	2,700	
최소절연간격 (㎜)	현수	2,200	b
	내장	2,200	
이상시절연간격 (㎜)		1,000	D
상간절연간격 (㎜) (주)		3,200	-

[주]상간절연간격은 도체간(metal-to-metal)에 유지하여야 하는 최소 절연간격을 말함.

2.4.5 변전소 인입부 철탑 상간절연간격의 산정

변전소 인입부 철탑은 역섬락시 변전설비의 과전압을 매우 높게하므로 절연을 강화하고 있다. 표 6은 변전소 인입부의 상간 공기절연간격의 계산 예이다.

표 6. 변전소 인입부 철탑의 상간절연간격

구 분	154kV 철탑 [㎜]		345kV 철탑 [㎜]	
	상-대지간	상간	상-대지간	상간
최소	1,500	1,900	2,900	3,600
표준	1,900	2,700	3,300	4,400

2.5 횡진각에 따른 공기절연간격의 산정

강풍시 애자련의 횡진에 따른 절연간격은 별도의 계산식을 이용하여 구하였으며, 본고에서는 그 계산 결과만을 이용하여 공기절연간격을 산정하였다. 이전의 설계방식은 최대횡진시에도 개폐과전압을 고려한 최소절연간격을 유지하는 것으로 하였으나, 최근에는 최대횡진시에 개폐과전압이 동시에 최대로 될 확률이 적음을 고려하여, 최대횡진시에는 상용주파과전압에 대한 절연간격만을 유지하는 것으로 하고 있다.

표 7및 표 8은 기존의 횡진각 계산과 본 논문에서 검토한 횡진각의 추이를 나타내고 있다.

표 7. 154kV 철탑의 횡진각 비교

구분	기존의 규격			개정 규격(안)		
	횡진각	구분	절연간격 [mm]	구분	횡진각	절연간격 [mm]
현수	20°	표준	1,400	표준	20°	1,300
	40°	최소	1,150	최소	40°	1,150
	60°	이상시	900	이상시	70°	450
내장	15°	표준	1,400	표준	15°	1,300
	15°	최소	-	최소	15°	1,150
	40°	이상시	900	이상시	40°	450

표 8. 345kV 철탑의 횡진각 비교

구분	기존의 규격			계산결과		
	횡진각	구분	절연간격 [mm]	구분	횡진각	절연간격 [mm]
현수 (4도체)	15°	표준	2,700	표준	20°	2,700
	40°	최소	2,200	최소	40°	2,200
	-	이상시	-	이상시	70°	1,000
내장 (4도체)	15°	표준	2,700	표준	20°	2,700
	35°	최소	2,200	최소	20°	2,200
	-	이상시	-	이상시	50°	1,000

2.6 크리어런스 다이어그램

그림 2, 3은 이상의 계산 결과에 의한 345kV 철탑의 크리어런스 다이어그램의 예이다.

3. 결 론

345kV 및 154kV 송전계통에 대한 과전압 해석결과, 공기절연거리 실증시험 및 풍압에 의한 전선의 횡진을 고려하여 송전철탑의 크리어런스 다이어그램을 작성하였다. 횡진각은 기존에 비하여 증가하였으나, 최대횡진시 상용주파과전압에 대한 절연간격을 유지하도록 하면, 기존의 철탑 크기에 비하여 다소의 축소가 가능할 것으로 검토하였다.

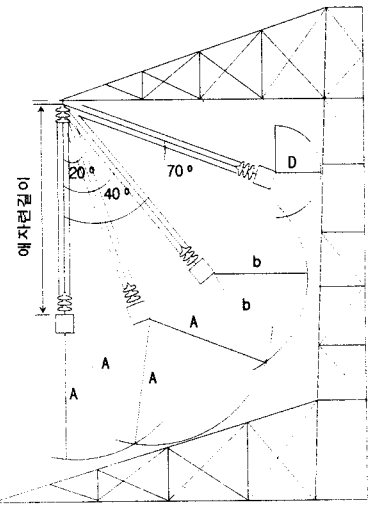
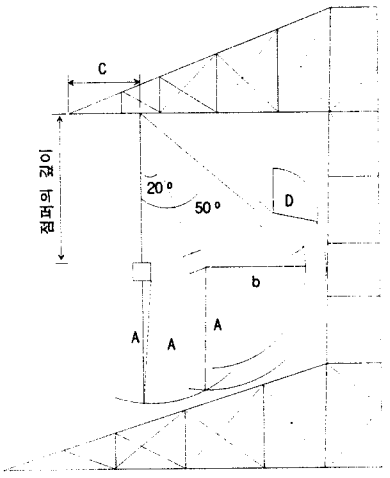


그림 2. 345kV 4도체 현수형의 예



(C : 수평각에 의한 점퍼의 이동거리)

그림 3 345kV 4도체 내장형의 예

[참 고 문 헌]

[1] 한국전력공사, "설계기준 1031 (154kV 직접접지계의 절연협조기준)",

[2] 전력연구원, "345kV 및 154kV Gapless형 피뢰기 정격 규격 및 기준정립 연구", 2000년

[3] 전력연구원, "765kV 송전선로 공기절연거리 실증연구", pp 152~152, 1996년

[4] 전력연구원, "765kV 계통 절연협조 연구", pp 104~105, 1995년

[5] 일본전력중앙연구소, "187kV~1,100kV 교류송전선의 전기적설계 핸드북", 소화61년

[6] Commonwelth Associate Inc., "PLANNING AND DESIGN STUDIES FOR 345kV TRANSMISSION SYSTEM OF KOREA ELECTRIC COMPANY", Engineering Report R-1271, pp V-2, 1969