

염해오손도와 낙뢰고장가능성을 고려한 송전선로의 절연거리 산정

곽주식*, 강연욱, 구교선, 권동진
한전 전력연구원*

Determination of insulation distance in transmission line considering probability of contamination induced fault and lightning induced fault

Joosik Kwak*, Yeon-woog Kang, Kyosun Koo, Dong-jin Kweon
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 운전중인 154 kV 및 345 kV 송전선로에서 첩탑 구조의 변경 없이 애자의 수량을 증결하여 절연성능을 보강하는 방안에 대한 연구결과를 제시하고 있다. 송전선로에서 발생 가능한 상용주파과전압과 개폐과전압의 최대값을 EMTP 해석모델을 이용하여 계산하고 이로부터 뇌섬락 고장확률과 급속오손고장확률을 고려한 절연거리 증대 및 소요애자수량 방법을 제시하고 있다.

에서와 같이 각 부분의 공기절연특성을 살펴보면, 아킹혼간의 공기절연특성과 절연거리 A에 해당하는 공기절연특성은 각각 봉-봉(도체-도체) 및 봉-평판(도체-첩탑)의 사이의 섬락특성에 해당한다. 아킹혼간의 섬락전압이 A 사이의 섬락전압보다 높은 특성을 보이므로 뇌과전압을 아킹혼간(Z)으로 유도하기 위해서는 다음의 조건을 만족하도록 아킹혼 간격과 A의 길이가 다음의 관계를 만족하도록 결정되어야 하며 한전의 설계기준에서 적용하고 있는 관계이다.

1. 서 론

$$\text{표준절연간격}(A) \geq 1.115Z + 0.021 \text{ [m]} \quad \dots\dots (1)$$

2003년 9월 태풍 "매미"가 발생한 당시 00원자력발전소 인출 345 kV 송전선로와 인근 지역을 경과하는 154 kV 송전선로들에서 해일에 기인한 급속오손 고장이 발생하였다. 대책으로 2005년 9월 내오손 특성이 우수한 반도체 애자가 설치되어 사용되어 왔다. 그러나 최근 해당 애자 제조사에서 생산되어 사용중인 반도체 애자들에서 불량사례가 다수(대만, 인도네시아)가 확인되었다. 이에 따라 사용중인 반도체 애자의 상태 점검이 이루어졌다. 검사결과 이상이 발견되지는 않았지만 유사한 고장발생에 의한 공급지장을 방지하고자 한전에서는 이를 일반 애자로 전량 교체하는 계획을 수립하게 되었다. 애자 교체시 첩탑의 기존 구조의 변경없이 강화된 한전의 설계기준에 맞추어 애자의 수량을 현재보다 증결하여 선로의 절연성능을 보강방안이 연구되었다. 본 연구에서는 해당 송전선로들에서 발생가능한 과전압 배수를 EMTP 해석모델을 이용하여 검토하고 뇌섬락고장확률과 급속오손고장확률을 고려한 증결 가능한 애자의 수량을 산출하였다.

그러나 검토대상 송전선로들에서는 첩탑의 변경을 고려하지 않고 있으므로 애자증결로 애자런길이와 아킹혼 간격(Z)이 증가하면서 그림1의 절연거리 A가 감소하는 것을 피할 수 없게 된다. 이로부터 A 길이의 감소분만큼 뇌 섬락 고장 가능성이 증가를 예상할 수 있다. 본 연구에서는 급속오손에 의한 섬락고장시의 개통 과급정도와 뇌 고장발생시의 과급정도를 고려하여 애자 증결시 길이 A가 감소하는 한계를 산정하였다. 그 한계 값은 개폐과전압에 견딜 수 있는 수준까지 절연거리 b에 해당하며 이 값은 선로에서 발생 가능한 최대 값의 개폐과전압으로부터 결정되어진다.

2. 본 론

2.1 절연거리 산출 방법

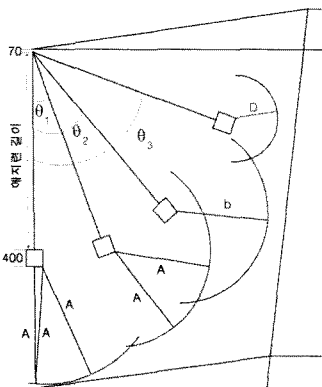
송전선로의 절연거리를 결정하는 요소 가운데 해당 송전선로들에서 발생 가능한 상용주파일시 과전압과 4종류의 개폐 과전압을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 계산하고, 이로부터 최소 절연거리를 산출하였다. 산출된 절연거리와 현재 각 해당선로에 적용중인 절연거리의 차이로부터 증결 가능한 애자의 수량을 산정 하였다.

2.1.1 송전선로 개폐 과전압

EMTP를 이용한 컴퓨터 해석결과 검토 대상 345 kV 송전선로에 발생하는 최대 개폐과전압은 1.9 P.U.로 한전의 설계기준 적용값보다 낮은 값을 나타내고 있다. 154 kV 송전선로의 경우도 설계기준 적용값보다 낮은 2.1 P.U의 값으로 확인 되었다.

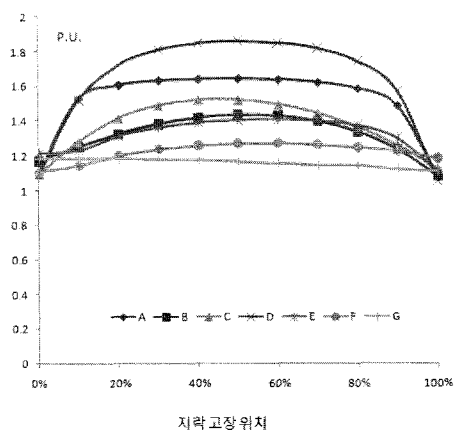
<표 1> 송전선로 개폐 과전압 [단위 : P.U.]

선로명	TOV	1선지락 과전압	지락차단 과전압	투입 과전압	재투입 과전압	과전압 배수(n)
345 kV	A	1.173	1.753	1.64	1.179	1.9
	B	1.111	1.599	1.433	1.247	
	C	1.131	1.702	1.519	1.174	
	D	1.132	1.877	1.858	1.185	
154 kV	E	1.161	1.746	1.405	1.811	2.1
	F	1.112	1.403	1.269	2.510	
	G	1.052	1.566	1.183	1.570	



<그림 1> 345kV 4도체 현수형 첩탑의 Clearance diagram

송전선로의 절연거리를 결정하는 요소로 상용주파 일시과전압 (TOV), 개폐과전압, 뇌 과전압이 있다. 그림 1은 345 kV 현수형 도체의 clearance diagram이다. 이 그림에서는 세 가지의 절연거리 뇌 과전압을 고려하여 전선과 하부 첩탑체와의 절연거리 A가 결정이 되며, 선로의 개폐과전압으로부터 절연거리 b, 그리고 이상시의 절연거리 D는 상용주파 일시전압상승에 견딜 수 있는 값으로 결정되어진다. 여기서, 그림 2



<그림 2> 선로내 고장 위치별 1선 지락과전압

2.1.2 상용주파 일시과전압에 대한 절연거리(D)

시뮬레이션으로 확인된 과전압 배수로부터 설계기준에서 제시하는 다음의 식(2)~식(4)을 이용하여 상용주파 일시과전압에 견디는 절연거리(D)를 산출하여 보면 다음과 같다.

$$V_{50\%} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_m \times n \times k_1 \times k_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, V_m : 계통최고전압의 실효치 [kV]
 n : 과전압배수 [p.u.]
 k_1 : 기상보정계수
 k_2 : 내압계수

이 50% 섬락전압에 대한 공기절연간격은 식 (3)을 이용하였다.

$$V_{50\%} = 950 \cdot k \cdot \ln(0.57 \cdot D + 1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)을 공기절연간격 D 에 대하여 풀어쓰면 식 (4)와 같다.

$$D = \frac{1}{0.57} (e^{\frac{V_{50\%}}{1.24 \cdot 950}} - 1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

위의 식 (2)에 154 kV의 경우는 $V_m = 170$, $n = 1.17$ (계산결과 1.161), $k_1 = 1.176$, $k_2 = 1.082$ 를 각각 대입하면 $V_{50\%}$ 는 207 kV가 된다. 식 (4)로부터 공기절연간격을 계산하면 $D = 336$ mm가 된다.

345 kV의 경우는 같은 식 (2)에 $V_m = 362$, $n = 1.18$ (계산결과 1.173), $k_1 = 1.176$, $k_2 = 1.082$ 를 각각 대입하면 아래와 같이 $V_{50\%}$ 는 440 kV가 된다. 이 때, 식 (3)을 D에 관해서 풀어 쓴 식 (4)에 이를 대입하면, $D = 803$ mm 가 된다.

2.1.3 개폐과전압에 대한 절연거리(b) 및 증결가능 애자수량

위의 식(2), (3), (4)로써 이용하여 154 kV 선로에 대하여 개폐과전압 배수 $n = 2.1$ 을, 345 kV 선로에 대하여는 $n = 1.9$ 를 대입하여 해당 송전선로에서 발생 가능한 최대 개폐과전압으로부터 도체-하단암, 도체-탑체, 도체-상단암간에 유지하는 간격으로, 도체와 상하단암 및 탑체간의 개폐과전압 특성으로부터 산출하였으며 절연거리를 산출한 결과는 표2와 같다.

<표 2> 현수 애자리의 개폐과전압에 대한 최소공기절연간격

전압	절연의 구분	암의 종류	공극계수	단위 : mm		
				계산결과 (A)	설계기준 (B)	여유 (B-A)
154 kV	도체-하단암	3각암	k=1.48	534	950	416
		4각암	k=1.37	578	1,000	422
	도체-탑체		k=1.24	649	1,150	501
345 kV	도체-하단암	3각암	k=1.48	1,162	1,700	538
		4각암	k=1.37	1,283	1,900	617
	도체-탑체		k=1.24	1,463	2,200	737

개폐과전압 배수가 설계기준보다 낮은 값으로 계산되어 설계기준에서 제시하는 도체-하단암간 절연거리(b)는 345 kV 선로의 경우 (b')인 1463 mm 까지 줄일 수 있어 +737 mm의 절연 여유거리가 존재한다. 또한, 154 kV 선로의 경우에서도 검토된 과전압 배수 $n = 2.1$ 을 적용하면 649 mm 까지 절연거리(b)의 축소가 가능하여 추가로 +501 mm의 절연 거리의 여유가 존재하는 것으로 계산되었다.

<표 3> 도체-하단암간 절연거리(b) 및 증결가능 애자 수량

선로 구분	과전압배수(n) 상-대지간[p.u.]		절연 거리[mm]			애자 증결 가능 수량
	설계기준	검토결과	설계기준 (b)	검토결과 (b')	절연여유 ($\Delta b = b - b'$)	
345 kV	2.5	1.9	2200	1463	+737	3~4 (주1)
154 kV	3.3	2.1	1150	649	+501	3 ea (주2)

※주1) 절연여유/애자단위길이 = 737/195 ≒ 3개 (300kN 애자 기준)
 절연여유/애자단위길이 = 737/170 ≒ 4개 (210kN 애자 기준)
 ※주2) 절연여유/애자단위길이 = 501/146 ≒ 3개

2.1.4 뇌과전압에 대한 공기절연간격 (표준절연간격 : A) 검토 결과

표준절연간격은 뇌에 의한 섬락을 아킹혼간으로 유도하기 위하여 도체-하단암 간에 유지하는 간격으로, 식(1)로부터 산출한다. 154 kV의 경우, 위의 식 (1)에 아킹혼 간격 $Z = 1,120$ mm를 대입하면

$A = 1,270 \approx 1,300$ [mm]가 된다. 345kV의 경우, 위의 식 (4)에 아킹혼 간격 $Z = 2,340$ mm를 대입하면

$A = 2,630 \approx 2,700$ [mm]가 된다. 현재보다 345 kV 선로의 경우 애자수량이 늘어나면 아킹혼 간격이 증가된 절연거리(A')로 유지될 필요가 있다. 그러나 절탑의 변경이 수반되지 않는 한 A는 오히려 더 짧은 값으로 줄어들게 된다. 증가된 애자리 간격(Z')에 대응하는 (A')이상의 절연거리를 유지 할 수 없게 되면 아킹혼간으로 뇌과전압을 확실히 유도할 수 없게 된다. 따라서 애자가 현재 보다 숫자가 늘어나는 경우 감소된 A의 절연거리가 설계기준 2700 mm 보다 더 긴 값이어야 하며 증가된 절연거리 A' 이상의 값이어야 한다.

<표 4> 애자 증결과 표준 절연간격과 아킹혼 간격의 변화

전압	애자 종류	애자 증결 수량	아킹혼 간격 일정 경우 [mm]		아킹혼 간격 증가 경우 [mm]		설계 기준 [mm]
			Z	A	Z'	A'	
345 kV	300 kN	1	2340	2700	2535	2848	Z=2340 A=2700
		2	2340	2700	2730	3065	
		3	2340	2700	2925	3282	
	210 kN	1	2340	2700	2510	2820	
		2	2340	2700	2680	3009	
		3	2340	2700	2850	3199	
154 kV	120 kN 160 kN	1	1120	1350	1266	1433	Z=1120 A=1350
		2	1120	1350	1412	1595	
		3	1120	1350	1558	1758	

2.2 내리 성능을 고려한 애자 증결방법의 고찰

애자 증결에 따라 아킹혼 간격을 일정하게 유지하는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분하고 해당 선로에서의 섬락 오손 고장확률과 낙뢰 고장확률을 고려하여 증결 수량을 결정할 필요가 있다.

- 뇌 섬락 고장확률 > 오손 섬락 고장확률 경우
 - 애자 증결 가능 조건 : $A > 1.15Z + 21$ [mm]
- 뇌 섬락 고장확률 < 오손 섬락 고장확률 경우
 - 애자 증결 가능 조건 : $A > b$ [mm]

2.3 검토대상 선로의 뇌사고율 분석

154 kV와 345 kV 송전선로의 뇌사고율 허용 설계값은 각각 연간 2.0건/100 km 와 1.0건/100 km 이지만 한전 전체 송전선로의 운전 기간 중 실제 발생 한 사고율의 평균값은 설계값의 50% 수준으로 각각 연간 2.0건/100 km와 1.0건/100 km으로 분석되고 있다. 345 kV 선로의 경우 B T/L에서 가장 높은 값으로 50년간 0.45건(설계기준 환산값 : 0.899건)의 뇌사고 확률을 예측할 수 있다. 154 kV 선로의 경우 E T/L에서 가장 높은 50년간 1.107건(설계기준 환산값 : 2.213건)의 뇌사고율을 예측할 수 있다.

3. 결 론

연구 대상 송전선로에서 애자의 증결방안을 결정할 경우 뇌사고 확률과 오손에 의한 섬락고장 확률은 물론 동시에 고장유형에 따른 파급 정도를 고려할 필요가 있다. 뇌사고의 경우 일반적으로 뇌격에 노출된 지점에 대하여 국지적(절탑 1 또는 2 경간)으로 섬락고장이 일어나는 양상을 보이며 파급범위와 정도는 상대적으로 작다. 또한 대개의 경우 고장상태가 선로의 재폐로 동작으로 해소되는 빈도가 높다. 오손에 의한 섬락 고장은 뇌고장에 비하여 발생확률이 비록 낮은 경우라도 애자의 손상으로 이어져 고장의 파급영향이 뇌고장에 비하여 높다.

본 연구에서는 애자 증결시 뇌과전압을 아킹혼으로 안전하게 유도할 수 없는 경우에는 뇌사고율을 설계기준 내에서 허용하는 수준으로 애자의 증결을 고려하여 내오손 성능을 보장하는 방안을 연구결과로 제안한다. 345 kV 선로의 경우 210 kN은 4개, 300 kN은 3개 까지 증결이 가능하며 154 kV 선로의 3개의 애자를 증결가능한 것으로 연구되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 765 kV 계통절연협조연구, 한전 전력연구원 1996년
- [2] 765 kV 증설계통의 과전압 해석연구, 한전 전력연구원 1999년
- [3] 한국전력공사 송전설계기준