

벼사고을 저감을 위한 154 kV 송전선의 차등절연 적용 방안 연구

곽주식, 강연욱, 우정욱, 심용보, 김우겸**
한전 전력연구원, **한전 송변전처

A study on the Unbalanced Insulation of the Double Circuit 154 kV Transmission Lines to Reduce Lightning Failure Rate

J.S. Kwak, Y.W. Kang, J.W. Woo, E.B. Shim, W.G. Kim**
KEPRI, KEPCO**

Abstract - According to the records, approximately 50 percent of power failure were caused by lightning. Conventional fault preventive measures against lightning include reduction of the footing resistance of the tower, multiplication of overhead ground wires and unbalanced insulation of the double circuit transmission tower. In addition to these, transmission line arresters have been recently appeared as an alternatives.

In this paper an unbalanced insulation method with transmission line arrester was assumed as another countermeasure against simultaneous double circuit trip of 154 kV transmission line by lightning strike. The lightning performance of line arrester was compared with conventional insulation concept using different numbers of porcelain and glass insulator. Larger numbers of insulator simply increase flashover current level by lightning but the lightning performance doesn't proportional to it. EMTP simulation and predictive calculation of lightning failure rate were carried out to evaluate the performance.

송전선로는 가공선로가 대부분이어서 직격뢰에 대한 피해가 종종 발생되고 있다.

뇌격이 송전철탑에 침입하면 전류가 철탑체와 접지를 통하여 방전하면서 임피던스에 비례하는 과전압이 발생하게 되고 이 전압의 크기가 송전선의 절연 내력보다 커지게 되면 절연이 파괴되는 섬락사고로 이어진다. 섬락 고장전류는 변전소의 차단기가 성공적으로 동작하면 고장파급이 저지되나 실패하게 되면 정전으로 진전하게 된다. 차단기가 고장전류를 성공적으로 제거한다 하더라도 전압강하나 순간 정전등을 유발하여 공급전력의 품질을 저하시킬 수 있다.

표 1. '01 ~ '02년 낙뢰에 의한 송전사고

전압 계급	총 고장 [건]	낙뢰사고 [건]	낙뢰사고비율
66 kV	35	17	48.5%
154 kV	382	248	64.9%
345 kV	89	53	59.5%
합계	507	318	62.7%

1. 서 론

송전선로는 넓은 지역을 경과하며, 특히 가공 송전 선로는 직접 자연에 노출되어 있으므로 뇌방전에 의한 이상 전압이라든가 염진해, 설해 등에 의한 섬락 사고가 자주 발생하고 또 송전 계통 구성이 복잡화됨에 따라 여러 가지 이상현상이 발생해서 선로 절연 및 기기 절연을 위협하게 된다. 송전 계통에 나타나는 이상 전압을 크게 두 가지로 나누면 첫째는 그 원인이 계통 내부에 있는 경우와 둘째는 그 원인이 외부로부터 주어지는 경우이다. 전자는 계통 조작시, 즉 차단기의 투입이나 개방 시에 나타나는 과도 이상 전압으로 개폐 썬지라고 한다. 송전선로에 발생하는 고장 가운데 자연 현상에 의한 장해로서 뇌운이 송전선로에 직접 방전(직격뢰)하는 것이 많은데, 154 kV 이상의 선로에서는 고장의 50~60% 이상이 뇌방전에 의한 것이라고 보고 되고 있다. 대부분의 경우 지상에서 높이가 큰 철탑에 침입하는데 때로는 경간 중의 가공 지선이라든가 송전선 도체에 직격하기도 한다. 직격뢰에 의한 이상 전압은 파고 값이 아주 높고 전선로의 경과지에 따라서는 발생 빈도가 높기 때문에 이상 전압으로서 가장 가혹한 조건이 된다. 송전선로의 도선, 지지물 또는 가공지선이 뇌의 직격을 받아 그 뇌격 전압으로 선로의 절연이 위협받게 되는 경우가 바로 직격뢰인데, 현재의

섬락고장을 유발하는 낙뢰에 대한 통상적인 대책으로는 송전철탑의 접지저항 저감, 가공지선의 다조화, 2회선 송전선에서 차등절연 등이 있다. 타각 접지저항의 저감은 대부분 산악지를 통과하는 송전선의 여건상 어느 정도 이하로 낮추기가 어려우며, 154 kV급 이상의 신규 송전선에서는 가공지선을 2조 설치 하고 있다. 기설 2회선 송전선에서 차등절연의 적용에는 시공상의 제한 요소가 있다. 이러한 통상적인 방법에 추가하여 송전선에 피뢰기를 설치하여 낙뢰에 의한 고장을 감소시키려는 연구가 미국, 프랑스, 일본 등에서 지난 수십 년간 계속되어 왔으며 일본에서는 산화아연 소자를 폴리머하우징에 내장한 송전선용 피뢰기가 500 kV급까지 개발되었다. 송전선용 피뢰기는 일반적으로 갭(gap)형과 갭리스(gapless)형의 2종류로 나누어진다. 현재 상업용으로 제품은 일본의 NGK, TM T&D에서 갭타입을, 유럽의 ABB에서는 갭리스형의 제품을 생산 판매하고 있다. 일본 외에도 남아프리카공화국, 멕시코, 대만, 태국, 말레이시아가 시험적용을 하고 있다. 프랑스에서는 90 kV 및 275 kV 급의 갭형의 피뢰기를 적용하기 시작하였으며 66 kV 급의 갭리스형도 자체 개발하여 사용하고 있다.

차등절연은 2회선의 송전선로에 낙뢰에 의한 고장이 발생하는 경우 절연등급이 낮은 쪽으로 섬락이 발생하도록 유도하여 절연등급이 높은 쪽의 고장을 억제함으로써 송전 지장을 저감하고자 하는 방법의 절연이다. 절연등

급의 차이는 애자 수량을 달리하거나 피뢰기를 설치하여 얻어 질 수 있다

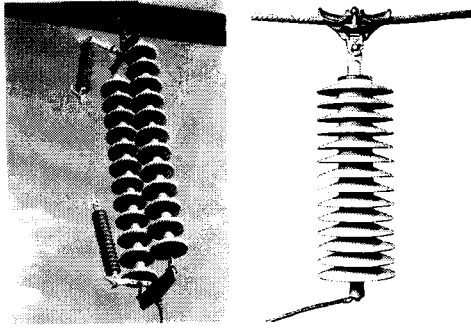


그림 1. 갱타입 피뢰기 그림 2. 갱리스피뢰기

본 연구에서는 애자수량을 154 kV 표준애자길이보다 2개와 4개를 증가시킨 경우와 절연과피전압의 발생으로 인한 섬락시 내구성이 자기애자에 비하여 우수한 유리아자와 자기애자로 혼합 구성하는 방법, 그리고 송전선용 피뢰기를 적용한 차등절연방법에 대하여 전자계 과도해석 프로그램 EMTP와 뇌사고울 계산 프로그램을 이용하여 내뢰성능을 분석하였다. 각 애자 구성에 대하여 가공지선 숫자와 철탑의 접지 저항값 별로 섬락을 일으키는 최소 뇌격전류의 크기를 계산하고 이로부터 뇌사고울을 분석하였다. 뇌사고울의 계산은 일본 전력중앙연구소(CRIEPI)에서 개발한 LORP와 미국의 EPRI에서 개발한 FLASH 그리고 전력연구원에서 개발한 알고리즘을 이용하였다.

2. 본 론

2.1 송전선의 차등절연 방안과 EMTP 해석 모델

표 2.에 정리된 각 애자 구성에 대하여 가공지선 숫자와 철탑의 접지 저항값 별로 섬락을 일으키는 최소 뇌격전류의 크기를 계산하고 이로부터 뇌사고울을 분석하였다. 뇌사고울의 계산은 일본 전력중앙연구소(CRIEPI)에서 개발한 LORP와 미국의 EPRI에서 개발한 FLASH 그리고 전력연구원에서 개발한 알고리즘을 이용하였다. 뇌사고울의 계산은 역섬락 사고율과 차폐실폐율의 합으로서 계산되어진다.

표 2. 154 kV 2회선 송전선의 차등절연 방안

구 분	애자련-1 (#1 회선)	절연 거리 [mm]	애자련-2 (#2 회선)	절연 거리 [mm]
조건 - 1	유리아자 10 개	1460	자기애자 10 개 + 아킹혼	1120
조건 - 2	자기애자 12 개 + 아킹혼	1344	자기애자 10 개 + 아킹혼	1120
조건 - 3	자기애자 14 개 + 아킹혼	1568	자기애자 10 개 + 아킹혼	1120
조건 - 4	자기애자 10 개 + 송전선용피뢰기	650	자기애자 10 개 + 아킹혼	1120

154 kV 송전선로에 섬락을 일으키는 뇌격 전류의 최소 값을 구하기 위하여 아킹혼 섬락모델을 이용하였다.

아킹혼은 CIGRE V-t 특성 곡선과 리더 진전시의 피뢰기 갭 및 아킹혼간 등가임피던스를 표현하고 이를 EMTP의 스위치 모델을 사용하여 아킹혼과 피뢰기 직렬갭등에 발생하는 과전압과 비교하므로써 섬락 전류를 계산하였다. 해석을 위한 철탑은 피뢰기 시험적용 대상인 154 kV 서천 선로 구간의 철탑들의 기하학 평균값을 사용하였다.

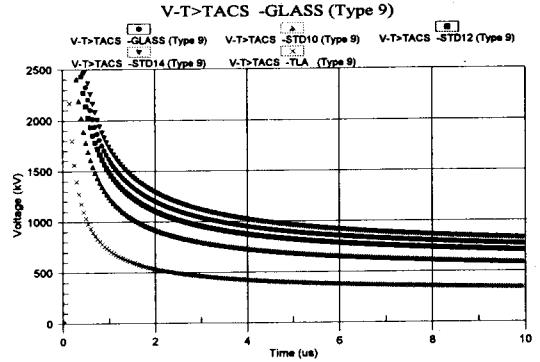


그림 3. 애자련에 따른 아킹혼의 절연내력 특성
GLASS : 유리아자10개, STD10 : 자기애자10개
STD12 : 자기애자12개, STD14 : 자기애자14개
TLA : 피뢰기

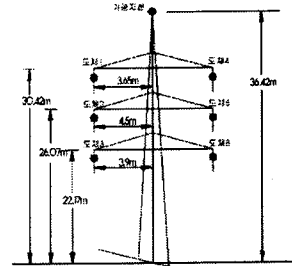


그림 4. 가공지선 1조 철탑

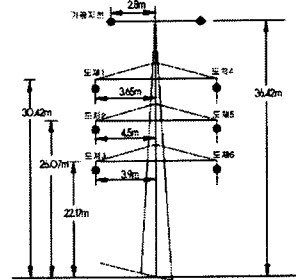


그림 5. 가공지선 2조 철탑

뇌격 전류는 2/70 μ s의 램프파가 철탑에 뇌격되어 역섬락을 일으키는 경우를 대상으로 하였으며, 그 크기는 10 kA ~ 200 kA 범위로 하였다. 철탑모델에는 4단 철탑모델을 이용하였으며, 선로정수는 K. C. LEE 모델을 이용하였다. 철탑은 가공지선이 1조인 경우와 2조의 경우를 대상으로 하였으며, 탑각 접지저항이 5, 10,

15, 20, 100 Ω 일 때의 탐각접지저항에 따른 섬락특성을 검토하였다.

아킹혼간에 나타나는 과전압은 내압특성을 나타내는 CIGRE 실험식을 이용하였다.

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

$$K_1 = 0.4W, K_2 = 0.71W$$

$$W = \text{Length}$$

그림 6은 애자련을 EMTP에서 계산하기 위해 표현한 것으로 피뢰기 갭은 0.65 m, 아킹혼은 1,120 mm, 1,344 mm, 1,460 mm, 1,568 mm 이다. 피뢰기의 직렬 갭에 인가되는 전압은 직렬 갭의 부유 정전용량(Stray Capacitance)과 ZnO 소자의 정전용량의 분압비에 의해 결정된다. C₂에 걸리는 전압이 V₂이면 V₂는 다음과 같이 되며, 통상 C₁은 C₂의 4~5배 정도의 값을 가져 다음 식과 같이 된다.

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot V$$

$$C_1 = 4 \times C_2, V_2 = \frac{4C_2}{5C_2} = 0.8 \cdot V$$

즉, 위와 같은 전압이 직렬 갭에 걸린다. ZnO가 설치되어 있지 않다면 1.0×V의 전압이 직렬갭간에 걸리게 되지만 ZnO 소자와 연결된 직렬 갭의 내전압은 1.25 배로 높아진다.

피뢰기쪽 갭과 아킹혼간을 아래 식과 같이 비선형 인덕턴스 L(i)와 섬락후의 정상아크 인덕턴스인 L의 조합으로 표현하였다.

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

$$L(i) = L_n / (1 + i/I_0)^n$$

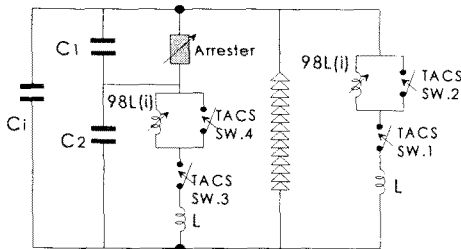


그림 6. EMTP 해석 모델

리더 개시 시각과 섬락 시각을 SW(SPAK1, SPAK2)로 표시해서 EMTP에서의 TACS 기능을 이용하여 제어하였다. SW(SPAK1)는 리더전개시를 표현하는 스위치로서 아킹혼 전압이 V-t 특성곡선과 일치하는 시각에 닫힌다. SW(SPAK2)는 섬락을 나타내는 I_F가 되는 시각, 혹은 혼간 전압이 영이 되는 시각에 닫힌다. 같은 원리로 피뢰기 갭쪽을 비선형 L과 스위치 조합으로 표현했다.

2.2. 유리애자-자기애자를 이용한 차동절연(조건-1)

국내에서 운용중인 송전선로에는 자기애자가 거의 대부분 사용되고 있으며, 섬락사고로부터 애자련을 보호하는 아킹혼이 함께 설치되어 운용되고 있다. 154 kV 송전선의 경우 아킹혼은 1,120 mm 최소간격을 유지하고 있다.

아킹혼은 애자련의 길이보다 짧은 공기 절연거리를 갖으며 섬락 발생시 아크를 유도하여 애자 표면의 손상을 억제하는 기능을 한다.

자기재의 애자는 상용주파의 고장전류의 섬락시 애자표면 강도가유리 재질의 애자에 비하여 상대적으로 다소 특성이 불리한 것으로 평가되고 있다. 유리애자의 사용을 가정하는 경우 아킹혼을 설치하지 않아도 섬락에 의한 손상을 최소화할 수 있으므로 자기애자와 동일한 수량으로 애자련을 구성하면 아킹혼 간격보다 긴 1,460 mm의 공기절연거리를 확보할 수 있다.

따라서 2회선중 1회선은 기존의 자기애자로 절연하고 나머지 회선은 유리애자로서 다소 높은 절연을 확보할 수 있다. 기존의 자기 애자를 유리 애자로 교체할 경우 설계된 철담구조나 절연거리에 변화 없이 적용하는 것이 가능하므로 자기애자수를 늘리는 것 보다는 수월한 대안이 될 수 있다. 단, 전계완화를 위한코로나 쉴드링 등의 패용은 추가로 검토하여야 한다.

계산된 결과는 표 3과 4에 정리되어 있다. 아킹혼 간격 1,120 mm의 자기 애자련은 가공지선이 1조이고 접지저항이 15 Ω 인 경우 51 kA, 저항이 20 Ω 인 경우에는 46 kA 이상의 뇌격전류에 의하여 애자 섬락이 발생한다. 가공지선이 2조인 경우에는 저항이 15 Ω 인 경우에는 68 kA, 저항이 20 Ω 경우에는 60 kA 이상의 뇌격전류에 의하여 애자련 섬락이 발생한다. 반대편의 유리애자는 아킹혼이 설치되지 않은 조건으로 자기 애자련보다 긴 절연거리를 갖고 있어 섬락을 일으키기 시작하는 뇌격 전류의 값이 커지게 된다. 가공지선 1조이고 접지저항이 15 Ω 경우 98 kA에서 동일한 접지에 대하여 가공지선이 2조인 경우에는 126 kA 이상의 뇌격전류부터 섬락을 발생하는 것으로 나타나고 있다. 가공지선이 1조인 경우에는 접지저항이 100 Ω ~ 5 Ω의 범위에서 38 kA ~ 122 kA 이상 그리고 가공지선이 2조인 경우에는 47 ~ 160 kA 이상의 뇌격전류는 유리애자련을 섬락시킬 수 있으며 2회선에 동시 지락고장을 유발할 수 있다.

표 3. 역섬락을 일으키는 최소 뇌격전류(GW1)

조건-1	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 1조	애자련종류	유리애자-10	자기애자-10	
	아킹혼 유/무	무	유	
	아킹혼 및 절연길이 [mm]	1460	1120	
No.1	탐각접지 저항[Ω]	섬락 발생 최소 뇌격 전류 [kA]	섬락여부	섬락여부
		5	71	X
	10	60	X	O
	15	51	X	O
	20	46	X	O
	100	20	X	O
	5	134	O	O
	10	112	O	O
15	98	O	O	
20	88	O	O	
100	41	O	O	

표 4. 역섬락을 일으키는 최소 뇌격전류(GW2)

조건-1	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 2조	애자런종류	유리애자-10	자기애자-10	
	아킹혼 유/무	무	유	
	아킹혼 및 절연길이 [mm]	1460	1120	
	탑각접지 저항[Ω]	섬락발생 최소뇌격 전류 [kA]	섬락여부	섬락여부
	5	98	X	O
	10	81	X	O
	15	70	X	O
	20	62	X	O
	100	28	X	O
	5	174	O	O
	10	146	O	O
15	126	O	O	
20	112	O	O	
100	52	O	O	

2.3. 자기 애자를 이용한 차등절연(조건-2, 조건-3)

표 5. 역섬락을 일으키는 최소 뇌격전류(조건-2, GW1)

조건-2	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 1조	애자런종류	자기애자-12	자기애자-10	
	아킹혼 유/무	유	유	
	아킹혼 및 절연길이 [mm]	1344	1120	
	탑각접지 저항[Ω]	섬락발생 최소뇌격 전류[kA]	섬락여부	섬락여부
	5	71	X	O
	10	60	X	O
	15	51	X	O
	20	46	X	O
	100	20	X	O
	5	122	O	O
	10	104	O	O
15	92	O	O	
20	82	O	O	
100	38	O	O	

154 kV 송전선에는 10여개 내외의 애자가 주로 사용되고 있다. 현수애자 10개를 기준으로 한때 애자런의 길이는 1,460 mm 이며 아킹혼 간격은 1,120 mm 이다. 애자 2개를 추가하면 애자런 길이는 292 mm가 증가한 1,752 mm가 되며 아킹혼의 길이는 1,344 mm 가 된다. 또한 애자를 4개 추가하게 되면 애자런의 길이는 584 mm가 증가한 2,044 mm가 되며 아킹혼의 길이는 1,568 mm 가 된다. 그림 3은 애자런 길이에 따른 내전압 v-t 특성을 보여주고 있는데 맨 아래에서 두 번째 곡선부터 위쪽으로 애자 10개, 애자 12개 애자 14개에 해당하는 내전압 특성을 나타내고 있다. 표 5부터 표 8 까지에서 1회선의 섬락고장을 일으키는 뇌격전류와 2회선 모두에 섬락을 일으키는 뇌격 전류의 크기

가 가공지선 조수와 첩탑 접지저항에 크기에 따라 계산된 결과를 정리되어 있다. 애자의 숫자가 늘어남에 따라 절연거리의 증가로 섬락고장이 보다 큰 뇌격전류에 의하여 발생됨을 예상대로 확인할 수 있다. 그러나 기존의 운용중인 송전선로에서 애자의 숫자를 늘리려면 절연거리의 유지, 바람에 의한 횡진 등을 면밀히 검토하여야 하며 첩탑의 기하학적 변형을 배제하여야 한다고 할 경우에는 시공상의 한계가 존재함을 예상할 수 있다.

표 6. 역섬락을 일으키는 최소 뇌격전류(조건-2, GW2)

조건-2	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선	애자런종류	자기애자-12	자기애자-10	
	아킹혼 유/무	유	유	
	아킹혼 및 절연길이 [mm]	1344	1120	
	탑각 접지 저항[Ω]	섬락 발생 최소 뇌격 전류 [kA]	섬락여부	섬락여부
	5	98	X	O
	10	81	X	O
	15	70	X	O
	20	62	X	O
	100	28	X	O
	5	160	O	O
	10	134	O	O
15	116	O	O	
20	103	O	O	
100	47	O	O	

표 7. 역섬락을 일으키는 뇌격전류(조건-3, GW1)

조건-3	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 1조	애자런종류	자기애자-14	자기애자-10	
	아킹혼 유/무	유	유	
	아킹혼 및 절연길이[mm]	1568	1120	
	탑각 접지 저항[Ω]	섬락 발생 최소 뇌격 전류 [kA]	섬락여부	섬락여부
	5	71	X	O
	10	60	X	O
	15	51	X	O
	20	46	X	O
	100	20	X	O
	5	142	O	O
	10	122	O	O
15	105	O	O	
20	94	O	O	
100	44	O	O	

표 8. 역섬락을 일으키는 뇌격전류(조건-3, GW2)

조건-3	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 2조	애자련종류	자기애자-14	자기애자-10	
	아킹흔 유/무	유	유	
	아킹흔 및 절연길이[mm]	1568	1120	
	탐각 접지 저항[Ω]	섬락 발생 최소 뇌격 전류 [kA]	섬락여부	섬락여부
	5	98	X	O
	10	81	X	O
	15	70	X	O
	20	62	X	O
	100	28	X	O
	5	186	O	O
	10	158	O	O
15	136	O	O	
20	120	O	O	
100	55	O	O	

2.3. 송전선용 피뢰기를 이용한 차등절연(조건-4)

154 kV 송전선의 자기 애자 10개의 애자련에 병렬로 직렬갭 650 mm의 피뢰기를 부가하는 방법이다. 그림 7은 아킹흔 섬락 특성의 한 예를 보여준다. 뇌격에 의한 피뢰기 갭간 및 아킹흔간 전압이 각 간격에 따른 v-t 특성 곡선과 만나는 지점에서 아킹흔간 전류가 증가하기 시작한다.

역섬락을 발생시키는 뇌격 전류의 크기를 탐각 접지 저항으로 피뢰기 설치의 유무 및 가공지선의 설치 조수에 따라 계산하여 표 9와 표 10에 정리하였다. 탐각 접지 저항이 20 Ω이고 가공지선이 1조인 송전선을 기준으로 하면, 피뢰기가 없을 경우에는 46 kA에서부터 역섬락이 일어나나 피뢰기를 설치하면 60 kA 이상에서 역섬락이 발생하게 된다.

뇌격이 절탐에 침입하면 애자련의 아킹흔과 피뢰기의 직렬갭간의 전위가 상승하게 되며 내전압이 낮은 피뢰기의 직렬 갭을 통하여 방전이 먼저 일어나게 된다. 피뢰기 갭의 방전으로 아킹흔간의 과전압은 낮아지게 되어 섬락으로 진전하지 않게 된다.

한편 아킹흔간에 섬락으로 발생한 방전전류가 차단기의 트립으로 이어지면 송전능력이 상실되게 되지만 직렬 연결된 피뢰기는 교류전원의 1/2 주기 이내에 방전 전류를 소호하므로 변전소의 차단기 동작이전에 송전능력이 회복하게 된다. 그림 7은 가공지선이 1조이고 접지 저항이 20 Ω인 선로 1회선에 피뢰기가 설치된 경우에 100 kA의 뇌격전류가 철탑상부에 침입하는 조건을 계산한 결과를 보여주고 있다. 뇌격으로 아킹흔과 피뢰기의 직렬갭간에 전압이 상승하게 되고 피뢰기측 갭의 전압이 내전압을 넘어서는 순간 방전이 발생하면서 피뢰기가 설치된 아킹흔과 직렬 갭의 전압이 감소하고 있다. 그러나 피뢰기 설치되어 있지 않은 애자련에서는 섬락이 발생하였지만 2회선의 동시 고장은 발생하지 않음을 알 수 있다. 그림 8은 보다 큰 180 kA의 뇌격이 침입한 경우의 계산결과로 피뢰기가 2회선 모두에 설치되어 있어 섬락이 발생하지 않고 있다. 그림 9는 2회선의 상단 암의 A상과 C상의 피뢰기가 180 kA의 뇌격전류에 의

한 과전압을 피뢰기를 통하여 방전하는 전류의 파형이며 A상이 9.87 kA peak, C상은 9.22 kA의 값을 보이고 있다.

표 11은 뇌격이 가공지선에 의하여 차폐되지 않고 상단암 도체에 직격하였을 때의 차폐고장전류의 크기를 계산한 결과를 정리한 것이다. 피뢰기가 없는 경우 154 kV 선로는 7 kA의 뇌격 전류의 도체 직격으로 섬락이 발생하게 된다. 그러나 피뢰기가 1회선에 설치되면 가공지선 1조인 경우 32 ~ 38 kA 그리고 가공지선 2조인 경우라면 34 ~ 42 kA의 뇌격전류까지 차폐 고장이 발생하지 않는 결과를 보여주고 있다.

이러한 결과에서 피뢰기를 설치했을 때 정격이내의 방전전류는 최대 1/2주기 이내에 소호되어 피뢰기가 설치된 애자련에서는 섬락으로 이어지는 과전압 발생이 나타나지 않으며 이로서 편단의 송전선에 피뢰기를 설치시 뇌격에 의한 2회선 동시섬락은 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

표 9. 역섬락을 일으키는 뇌격전류(조건-4, GW1)

조건-4	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 1조	애자련 구성	자기애자-10, TLA	자기애자-10	
	피뢰기 유/무	유	무	
	아킹흔 및 절연길이 [mm]	650	1120	
	탐각 접지 저항[Ω]	섬락 발생 최소 뇌격 전류 [kA]	섬락여부	섬락여부
	5	92	X	O
	10	78	X	O
	15	68	X	O
	20	60	X	O
	100	28	X	O

표 10. 역섬락을 일으키는 뇌격전류(조건-4, GW2)

조건-4	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 2조	애자련종류	자기애자-10, TLA	자기애자-10	
	피뢰기 유/무	유	무	
	아킹흔 및 절연길이[mm]	650	1120	
	탐각 접지 저항[Ω]	섬락 발생 최소 뇌격 전류 [kA]	섬락여부	섬락여부
	5	122	X	O
	10	102	X	O
	15	88	X	O
	20	78	X	O
	100	36	X	O

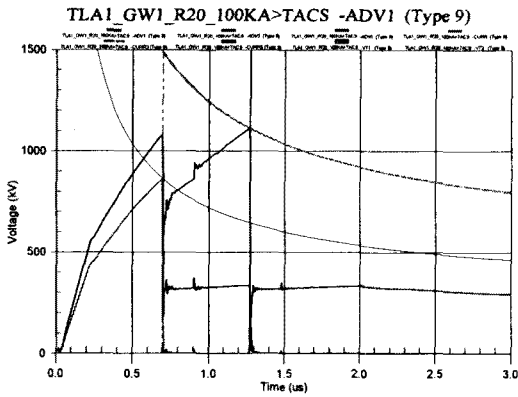


그림 7. 100 kA 뇌격에 의한 피뢰기의 동작
(피뢰기 1회선 설치, 접지저항 20 Ω, 가공지선 1조)

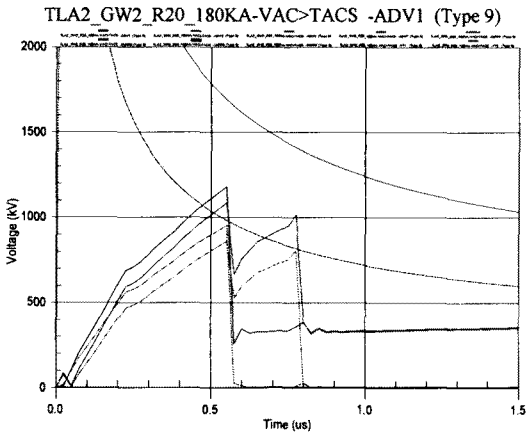


그림 8. 피뢰기 2회선 설치, 180 kA 뇌격시 과전압
(접지저항 20 Ω, 가공지선 2조, 도체별 위상차 영향)

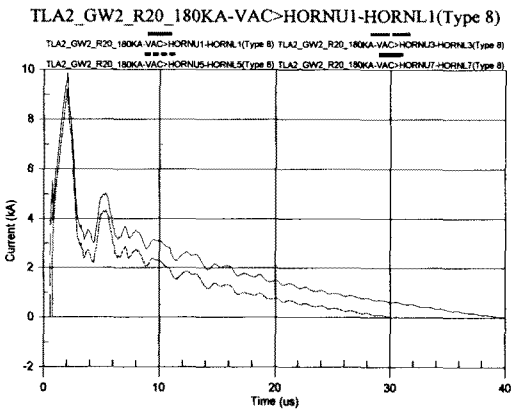


그림 9. 180 kA 뇌격시 피뢰기 동작 전류
(피뢰기 2회선설치, A상9.87 kA peak, C상9.22 kA)

표 11. 섬락을 일으키는 최소 뇌격전류(차폐실패)

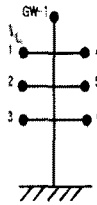
차폐실패	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2
가공지선 1, 2조	애자런종류	자기애자-10,TLA	자기애자-10
No.1 	피뢰기 유/무	무	무
	아킹혼 및 절연길이[mm]	1120	1120
	섬락발생최소 뇌격전류 [kA]	섬락여부	섬락여부
	5 -100	7	O

표 12. 섬락을 일으키는 최소 뇌격전류(차폐실패)

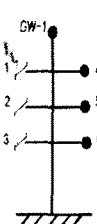
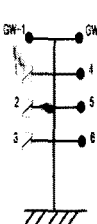
차폐실패	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 1조	애자런종류	자기애자-10,TLA	자기애자-10	
No.1 	피뢰기 유/무	유	무	
	아킹혼 및 절연길이[mm]	650	1120	
	차폐실패 섬락최소 뇌격전류 [kA]	섬락여부	섬락여부	
	5	32	섬락후회복	X
	10	32	섬락후회복	X
	15	34	섬락후회복	X
20	36	섬락후회복	X	
100	38	섬락후회복	O	

표 13. 섬락을 일으키는 최소 뇌격전류(차폐실패)

차폐실패	154 kV 2회선	회선 no.1	회선 no.2	
가공지선 2조	애자런종류	자기애자-10,TLA	자기애자-10	
No.1 	피뢰기 유/무	유	무	
	아킹혼 및 절연길이[mm]	650	1120	
	섬락발생최소 뇌격전류 [kA]	섬락여부	섬락여부	
	5	34	섬락후회복	X
	10	34	섬락후회복	X
	15	36	섬락후회복	X
20	36	섬락후회복	X	
100	42	섬락후회복	O	

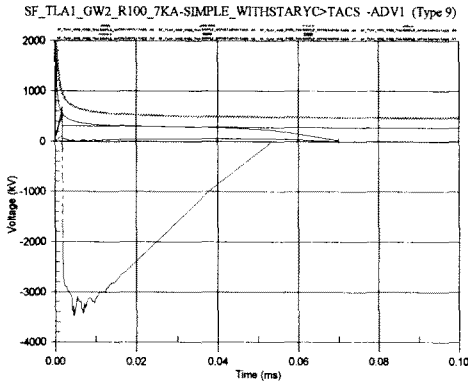


그림 10. 차폐실패사고시 피뢰기 동작 전류파형 (뇌격전류 7 kA, 가공지선 2조)

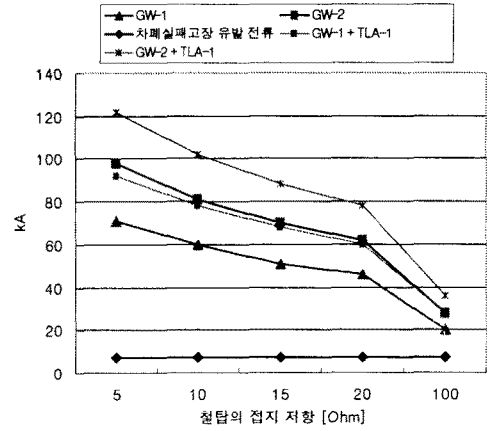


그림 13. 애자 섬락 고장을 발생하는 최소 뇌격 전류

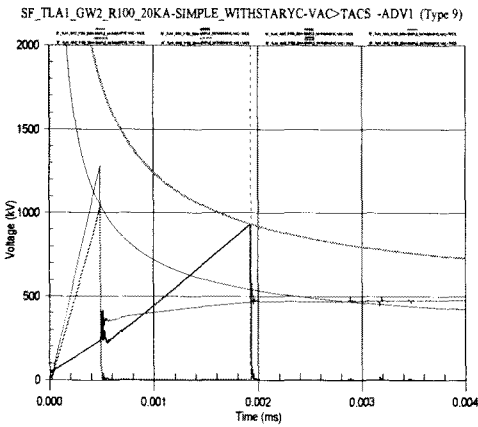


그림 11. 차폐실패사고시 피뢰기 동작 전압파형 (뇌격전류 20 kA, 가공지선 2조)

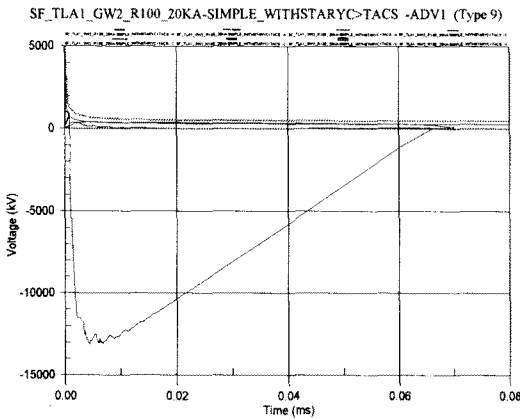


그림 12. 차폐실패사고시 피뢰기 동작 전류파형 (뇌격전류 20 kA, 가공지선 2조)

2.4. 송전선로의 뇌 사고율 예측 계산

본 연구에서는 154 kV 서천 T/L을 대상으로 7년간 뇌사고 실적과 LORP 2002-2 및 미국 EPRI의 이론을 기본으로 자체 개발한 뇌 사고율 예측 계산 프로그램에 의하여 사고율을 각각 계산하였다. LORP 2002-2와 일본 CRIEPI 계산식 이용하는 KEPRI 알고리즘 이용하여서는 송전선용 피뢰장치 설치시 적용 효과를 검토하였다.

가. 뇌사고율 예측 계산 프로그램

일본 전력중앙연구소에서 개발한 LORP 2002-2 및 미국 EPRI의 뇌사고율 예측 계산 알고리즘을 적용하여 자체 개발중인 FLASH 프로그램을 이용하여 154 kV 서천 T/L 뇌사고율 예측 계산 하였으며, 7년간의 사고 실적과 비교하였다. 또한 송전용 피뢰장치 적용 효과 분석을 위하여 LORP 2002-2를 이용하였다.

나. 뇌 사고율 예측 계산을 위한 주요 입력 데이터

154 kV 서천 T/L 뇌사고율 예측 계산을 위한 입력 데이터로서 선로의 총 길이는 약 28.3 km이고, 이중 송전용 피뢰장치를 설치하는 구간은 약 4.1 km이다. 대지 경사각은 전 구간을 모두 평균 10°로 설정하였으며, 연평균 총 뇌격 수는 96, 97, 02년을 기준으로 829회(하계회 80%, 동계회20%)로 산정하였다.

다. 뇌사고율 예측 계산 결과

1) 뇌사고율 실적과 프로그램별 계산결과

그림 14와 같이 1997년~2002년(7년간) 사이 서천 T/L의 뇌 사고율은 5.2947[건/100km·년]으로 조사되었으며, LORP 2002-2로 예측 계산한 결과는 5.4718[건/100km·년], FLASH로 계산한 결과는 6.302[건/100km·년], KEPRI 알고리즘에 의한 결과는 5.990 [건/100km·년]이다.

역섬락을 일으키는 최소 뇌격 전류로부터 KEPRI 알고리즘을 이용하여 각 검토 조건별로 역섬락사고율과 차폐실패사고율을 계산하였다. 그림 15와 16에는 애자선의 길이에 따른 차등절연에 의한 뇌사고율의 변화를 보여주고 있다. 그림 15에서처럼 아킹혼을 사용하지 않는 유리애자선과 자기애자 10개와 아킹혼으로 구성된 2회선 선로(조건-1)에서의 사고율은 가공지선이 1조인 경우에는 4.31[건/100km·년]이고 가공지선이 2조로 늘어난다면(그림 16) 1.35[건/100km·년]의 결과를 보여주고 있다.

애자선의 수를 2개 늘려 12개로 차등절연하면 가공지

선 1조인 경우는 4.42[건/100km·년], 4개를 늘리면 4.21[건/100km·년]이 된다. 가공지선이 2조인 경우를 보면 애자를 12개와 14개로 차등 절연한 선로의 경우 사고율은 각각 4.42[건/100km·년], 4.21[건/100km·년]으로 계산되었다. 애자련의 숫자를 2개 이상 늘려도 사고율은 크게 감소하지 않음을 확인할 수 있다.

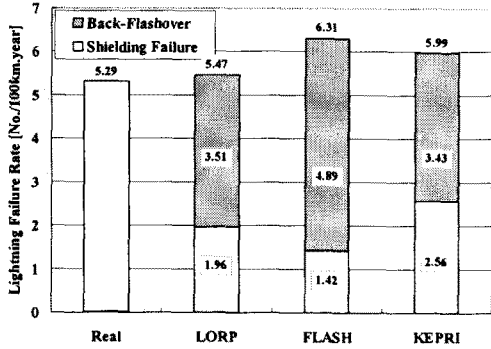


그림 14. 뇌사고 실적과 예측계산 결과 비교

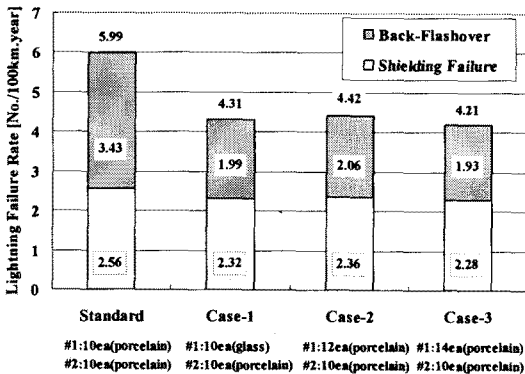


그림 15. 애자련 증결에 의한 차등절연효과 (GW1)

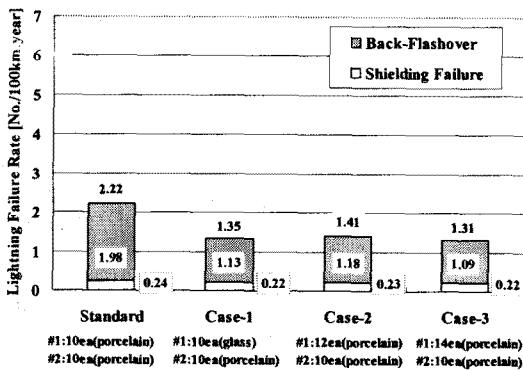


그림 16. 애자련 증결에 의한 차등절연효과 (GW2)

다. 송전선용 피뢰기 적용 효과

송전선용 피뢰장치 적용 효과를 검토할 수 있는 LORP 2002-2를 이용하여 서천 T/L의 피뢰장치 적용 효과를 검토한 결과는 그림 32 및 그림 33과 같다. 피뢰장치를 전 구간에 설치할 경우 뇌사고율은 5.47[건/100km·년]

에서 약 51.4% 감소한 2.66[건/100km·년]으로 되고, 94기 첩탑중 중요하다고 판단되는 10개 첩탑만 설치할 경우 약 7.6% 감소한 5.06[건/100km·년]으로 예측 계산된다.

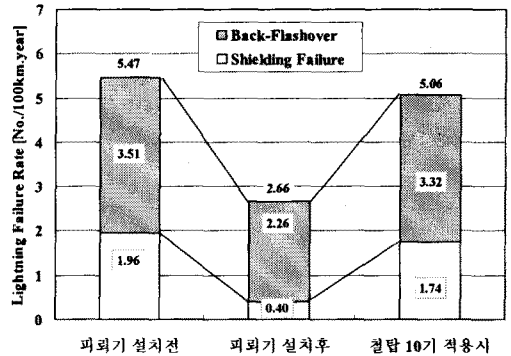


그림 17. 송전선용 피뢰장치 적용효과

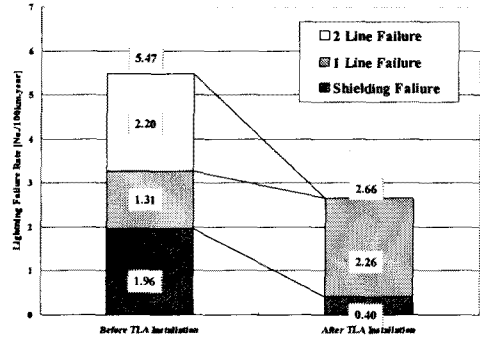


그림 18. 피뢰기에 의한 2회선 동시사고 감소효과

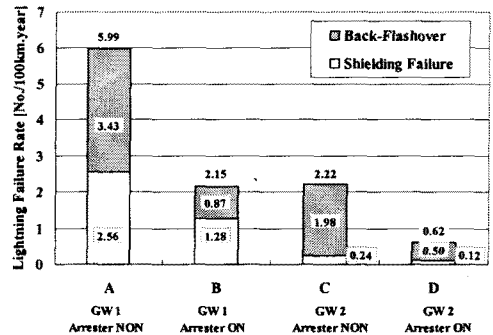


그림 19. 피뢰기 설치에 의한 고장감소 효과

KEPRI 알고리즘에 의한 결과도 피뢰기를 설치하면 2.15[건/100km·년]으로 사고가 감소하는 것으로 계산되었다. 가공지선이 2조인 선로의 1회선에만 피뢰기를 설치한다고 하면 사고율은 2.22[건/100km·년]에서 0.62[건/100km·년]으로 감소하는 결과를 보여준다.

또한, 2회선 동시사고 방지 효과를 검토한 결과, 송전선용 피뢰장치 설치 전에 2.207[건/100km·년]인 2회선 동시사고가 설치 후에 전혀 발생하지 않으며, 차폐실패 사고도 감소함을 알 수 있다. 피뢰기의 동작으로 2회선 사

고가 1회선 사고로 고장종류가 변화되어 1회선 역섬락 사고건수는 증가하는 것으로 분석된다.

표 14. 154 kV 송전선용 피뢰기의 주요 사양

항 목	정 격	항 목	정 격
최대전압	170 kV	방압특성	40 kA, 0.2초 400 A, 2초
정격전압	144 kV	외장재	플리머
방전전류	10 kAp(2/20 μ s) 30 kAp(4/10 μ s)	무게	8 kg
속류차단	60 Hz 1/2 주기이내	오손특성	0.35 μ / μ
개폐써지 내전압	3.3 p.u.	설치방법	아킹흔에 볼트고정

3. 결 론

가공지선이 1조이고 접지저항이 15 Ω 인 송전선로에서 애자수량이 표준보다 2개 4개가 추가로 증가되면 섬락이 발생하기 시작하는 최소뇌격전류의 크기가 51 kA에서 92 kA, 105 kA로 증가하게 되지만 뇌사고율은 5.99 [건/100 μ ·년]에서 4.42[건/100 μ ·년], 4.21[건/100 μ ·년]으로 감소율이 크지 않다. 기설의 선로에서 애자수량의 증가가 철타의 구조변경을 일으키지 않는 범위내에서 가능하다 하더라도 뇌사고율의 저감 효과는 매우 작은 것을 EMTP 해석과 뇌사고율 계산을 통하여 확인할 수 있다.

한편, 2회선중에 1회선에 피뢰기를 설치하게 되면 뇌사고율은 피뢰기 설치전의 사고율이 해석 대상 선로에서 5.47[건/100 μ ·년]에서 2.66[건/100 μ ·년]으로 48.6% 감소하는 것을 확인할 수 있다. 예측계산결과에 따르면 피뢰기 설치 전 2.2건의 2회선 동시사고가 피뢰기의 설치후에는 발생하지 않게 되는 결과를 보여주고 있다. 송전선용 피뢰기를 이용하면 송전선의 2회선 동시사고와 뇌사고율을 효과적으로 저감이 가능함을 예측할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 심용보, 우정욱, "154 kV 송전선에 피뢰기 설치시 내뢰성 향상효과 모의", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1642 ~ 1644, 1997
- [2] 심용보외 "154 kV 송전선의 낙뢰에 의한 2회선 동시 트립 방지대책", 전력산업연구개발 중간보고서, 2003
- [3] T.Gawamura, et al, "Development of Metal-Oxide Transmission Line Arrester and its Effectiveness", CIGRE 1994 Session, SC33-201, 1994
- [4] 松原廣治, "送電用避雷器の適用方法とその効果", 電力中央研究所, T89067, pp.26-27, 1990
- [5] 日本電氣學會, "送電用避雷裝置の開發現況と適用效果", 日本電氣學會志, II부 제367호, pp.5-22, 1991
- [6] 日本碍子, "送電用 キャップ式 避雷がよい裝置", NGK レビュー, NO.49 별책, pp.1-14, 1989
- [7] 明電舎, "MEIDEN REVIEW (International Edition)", Series No. 96, pp.10-16, 1992
- [8] C.H.Shin, et al, "Application of Special Surge Arresters on 138 kV Lines of Appalachian Power Company" IEEE Summer Meeting, 85SM 207-6, 1985