

국내에서 발생한 낙뢰고장 분석을 통한 직격뢰 및 역섬락 고찰

최한열*, 민병욱*, 박순규*, 이봉희*,구성완**, 한국전력*, 대한전기학회**

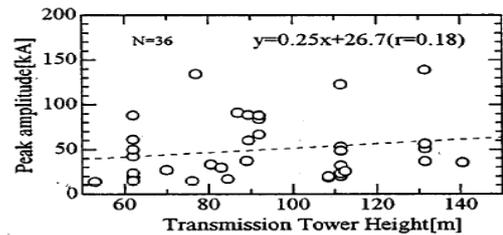
Consideration on shielding failure and back flashover through lightning fault analysis within the country.

Han-Yeol Choi*, Byeong-Wook Min* Soon-Kyu Park* Bong-Hee Lee* Sung-Wan Gu**
Korean Electric Power Corporation*, Korean Institute Electrical Engineers**

Abstract - The past 3 years study on the lightning faults data shows that the main reason is shielding failure rather than back flashover. Accordingly, we need to thoroughly consider about shielding failure angle of tower. Also, transmission line damage caused by shielding can be minimized if we avoid the steep slope area as a transmission line route.

하였는데, 뇌격전류의 분포는 60m까지의 철탑 높이와는 관련성이 없다고 하였다. (Narita et al.2000)으로부터의 그림 1은 60~140m철탑 구조물은 Peak amplitude 에 대하여 미미한 변동을 보임으로써 Anderson과 Eriksson의 아이디어를 뒷받침하고 있다.

1. 서 론



<그림 1> Peak amplitude와 철탑 높이와의 연관성

KEPCO를 비롯한 많은 세계 각국의 전력회사들은 여전히 뇌격으로 인하여 송전선로의 중요한 고장이나 순간정전, 그리고 신뢰도와 유지보수 문제들이 발생하고 있다. 다회선 선로에서 2회선 혹은 더욱 많은 회선의 낙뢰에 의한 동시 섬락고장은 전력공급에 부분적으로 심각한 장애를 일으킬 수 있다. 2회선 철탑에서 섬락의 40~60%는 대개 양쪽 회선에 영향을 미치는 것으로 보인다. 뇌격은 애자런에 수백만 볼트의 전압을 유기시키고 때때로 애자에 흔적(Track)을 남기거나 구멍을 뚫고 애자의 갓(Shed)에 손상을 일으킨다. 뇌격의 섬락에 의해서 야기되는 상용주파 아크는 전력선과 코로나 링 및 금구류 등의 용융과 소손 및 구멍이 뚫리는 중요한 원인으로 작용한다. 철탑에서의 섬락 혹은 차폐실패에 의해 상 도체에 유입된 고전압 진행과는 먼 거리를 이동해서 변압기나 차단기 그리고 다른 변전 기기들에 들어가 심각한 손상을 일으킬 수 있다.[1]

따라서 최근 3년간 국내에서 발생한 낙뢰고장 분석을 통해 전력설비에 주로 영향을 미치는 낙뢰의 특성을 연구하여 향후 송전선로 건설을 위한 경과지 선정과 송전설비 절연설계 등에 있어서 전력설비의 안정성을 증가시키기 위한 방안을 모색하고자한다.

2. 본 론

2.3 차폐실패 과정

높은 음전하를 포함한 하향 리더가 송전선로 근처에 접근하면서 일어나는 기본적인 차폐실패 과정이 그림 2에 나타나 있다. 하향리더가 지상으로 접근할 때 송전선로의 도체들과 아래의 지표면에서는 양전하가 유기된다. 양전하들은 가공지선과 가장 오른쪽의 상에서 그리고 몇몇 경우에는 아래 지표면으로부터 하향 리더의 끝 부근까지 정극성 상향 리더를 촉발시키기에 충분한 크기로 가공지선 및 전력선(wires) 위에서 형성된다. 이 순간 가공지선 리더와 전력선 상 도체 리더 사이에서 어느 것이 먼저 하향리더에 닿아 회회로를 형성할 것인지를 결정하게 될 경주(race)가 시작된다. 만약에 전력선의 상 도체 리더가 하향리더 끝에 먼저 도달하면 차폐실패가 일어나는데 이러한 차폐실패는 뇌격 전류의 크기, 절연강도, 도체의 세지 임피던스에 따라서 섬락이 일어날 수도 혹은 안 일어날 수도 있다. 만약 하향리더가 충분히 멀리 떨어져 있다면 가공지선이나 전력선으로부터 리더는 하향리더에 닿을 수 없으며, 지표면에서 소멸하게 된다. 그림 3에서 알 수 있듯이 리더가 송전선로에 접근할 때 각각의 도체는 가공지선에서는 뇌격흡인거리(Strike Distance) Rs를 전력선 도체에서는 Rp의 상향리더를 방사한다. 만약 하향 리더의 말단이 A지역을 통과하면 가공지선에서 뇌격이 일어나며, B지역을 통과하면 차폐실패가 일어나며, C지역이라면 섬락이 지표면에서 발생한다. 뇌격흡인거리 Rs와 Rp는 하향 리더의 전하에 의해 결정되며 최초의 뇌격전류에 의한 섬락이 일어난다.

2.1 송전선로의 뇌격 보호

전력산업에서 낙뢰로부터 전력선을 보호하기 위하여 가공지선의 사용을 최초로 시작하였다. 나이가가라 폭풍에서부터 시작된 최초의 송전선로를 위한 원래 계획은 각각의 전력선 도체 위쪽에 가공지선을 만들어서 철탑 한기당 총 7개의 가공지선이 존재하도록 했던 것처럼 보인다. 하지만 전력업계에서는 도체의 수 미터 위에 한 가닥의 가공지선만을 사용하였는데 훨씬 낮은 설치비로 거의 완벽한 송전선로 보호를 하였다. 그러나 뇌격보호에 있어서 가공지선의 진정한 역할은 뇌격 진행 메카니즘의 적절한 이해를 낳은 사진술이 발전한 후인 1930년대까지 완벽하게 설명할 수 없었다.

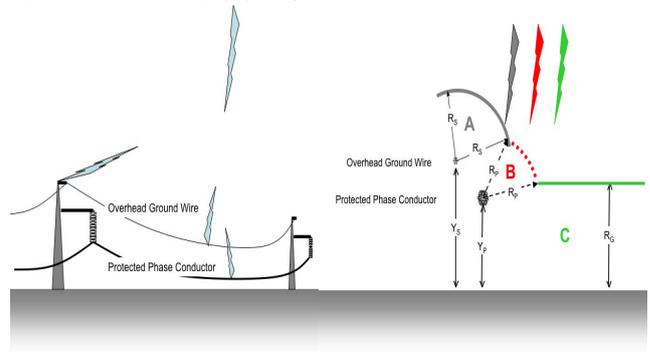
2.2 60-140m 철탑들에 대한 실증

Narita(Narta et al. 2000)은 60m에서 140m에 이르는 송전선로 철탑에서의 뇌격 전류 36건을 측정하였다. 표 1은 피크 전류의 특성들을 보여주고 있는데 최초의 부극성 하향 섬락을 위한 (Berger et al.1975;CIGRE1991)와(Eriksson 1987; Visacro et al. 2004) 값들로부터 피크전류의 특성을 알 수 있다.

<표 1> Peak Current Statistics의 비교

Reference	95% Value	50% Value	5% Value	Sample Size
Berger 1975	14kA	30kA	80kA	101
CIGRE 1991	6kA	31kA	90kA	408
Narita 2002	11kA	39kA	135kA	36
Eriksson 1987		36kA		22
Visacro 2004	22kA	40kA	75kA	79

Anderson과 Eriksson은 60m 높이까지의 구조물들에 대한 이론을 개선



<그림 2> 가공지선과 전력선 상향리더 경쟁 <그림 3> 뇌격흡인거리

2.3.1 차폐실패 모델의 비 차폐 영역

차폐실패의 고전적인 전자계 분석은 섬락과정이 하향 리더의 끝에서 발생하는 것으로 간주되었다. 하향 리더는 전력선 도체들과 지표면 사이의 구분점에 도달할 때까지 아래쪽으로 향한다. 리더로부터 도체까지

의 뇌격흡인거리 모델과 그림 3에서와 같은 유인 반경은 전류 레벨과 높이에 대한 적절한 민감도의 범위를 증가시키면서 다각적인 면에서 많은 공통성을 갖고 있다. 뇌격 전류와 도체 높이의 함수로서 뇌격 흡인 거리의 식은 차폐실패의 전자기학의 이론을 토대로 요약할 수 있으며, 이들 식의 많은 변수들이 제안되었다. 뇌격 흡인 거리와 유인 반경 식들을 직접 비교하는 것은 혼란 일로 이들 둘은 같은 과정의 불완전한 모델이기 때문이며, 리더의 전계가 현재는 양쪽 끝으로부터 중간을 향해서 나아가는 것이 관찰되었다.[1]

2.4 역섬락의 과정

부극성의 최초 하향 뇌격으로 인한 역섬락은 송전선로 일시 정전의 주요원인이다. 역섬락은 가공지선에 의한 번개의 차단과 더불어 시작한다. 대부분의 차단된 뇌격 섬락 때문에, 철탁에서는 전력선 도체에 비해 전압이 올라간다. 이러한 조건하에서 스트리머가 철탁으로부터 전력선 도체까지 형성될 수 있고, 리더 내부로 이온화 되면서 철탁과 도체의 공극을 빠르게 연결하는 과정을 그림 4에서 알 수 있다. 스트레스에 반대하여 교류전압을 가진 상 도체들은 가장 효율적으로 리더를 전개시키는 경향을 갖고 있으며, 철탁으로부터 도체까지 역섬락을 가장 잘 일으킬 수 있다. 일단 리더가 공극을 연결하면 교류 전류는 이 플라즈마 통로를 지속해서 유지할 수 있다. 이 순간, 보호계전기는 고장을 감지할 수 있어야 하며, 그 결과 차단기는 아크를 소호할 충분한 시간을 갖으면서 전압을 제거할 수 있다. 가공지선에 뇌격이 칠 경우 뇌격에 의해 애자런에 걸리는 전압은 철탁 Arm의 전압과 전력선에 유도되는 전압과의 차이이며 전력선에 유도되는 전압은 결합계수에 의해 산출된다. 또한 이들 전압은 가공지선의 뇌격전행과로 인접 철탁 등에서 반사되는 부전압과에 의해 변화한다. 이 모든 요소들은 철탁 및 Surge Impedance 등을 사용하여 진행과 이론으로 해결할 수 있다. 가공지선의 뇌격에 의한 철탁의 전위상승과 전력선에 유도되는 전위와의 차가 애자런의 내전압보다 크면 섬락이 발생하고, 작으면 섬락이 일어나지 않는다.



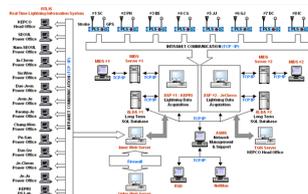
〈그림 4〉 뇌격에 의한 역섬락 과정

2.5 송전선로 뇌격의 EMTP 분석 및 KLDNet 기록

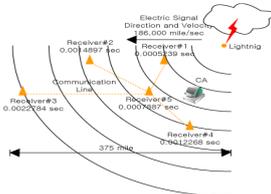
최근 3년간 14개 송전선로 구간내 낙뢰고장 발생 실적을 토대로 EMTP 시뮬레이션 분석과 KLDNet 관측기록을 이용하여 송전선로 뇌격고장의 차폐실패와 역섬락을 구분할 수 있다.

2.5.1 KLDNet의 낙뢰 관측 및 전류 크기 측정 원리

KLDNet은 한국전력연구원에서 운영중인 실시간 낙뢰정보 취득을 위한 시스템과 관련 네트워크를 말하는 것으로 그림 5과 같은 구조로 TOA(Time Of Arrival)방식을 이용하여 번개를 감지하여 실시간으로 표시해주는 장치로서 각 수신기의 시각동기(time synchronize)를 위해 GPS(Global Position System)를 이용하여 인공위성으로부터 시각 신호를 수신한다.



〈그림 5〉 Detection Network



〈그림 6〉 TOA 방식에 의한 낙뢰관측

TOA 방식은 원리상 3개의 센서로부터 3개의 원의 방정식을 유도하여 3개의 미지수 낙뢰지점의 좌표(X_0, Y_0)와 발생 시간 T_0 에 대한 해를 얻을 수 있다. 그러나 그림 6과 같이 4개의 센서로부터 3개의 미지수를 갖는 4개의 원의 방정식을 유도하고 이 식을 변형하여 3개의 식을 얻으면 보다 효과적으로 미지수의 해를 구할 수 있다.

2.5.2 송전선로 뇌격의 KLDNet기록

송전선로에 발생하는 뇌고장의 유형은 낙뢰전류의 크기에 따라 3가지 경우로 구분할 수 있다.

(I) 직격뢰에 의한 1회선 차폐실패 고장

차폐실패 임계전류 이상 < 낙뢰전류 < 1회선 역섬락 임계전류

(II) 역섬락에 의한 1회선 고장(1회선 역섬락 임계전류 이상- 2회선 역섬락 임계전류 미만)

1회선 역섬락 임계전류 < 낙뢰전류 < 2회선 역섬락 임계전류

(III) 역섬락에 의한 2회선 고장(2회선 역섬락 임계전류 이상)

2회선 역섬락 임계전류 < 낙뢰전류

154kV 구레 T/L 등 총 14개 T/L 26건의 고장을 대상으로 낙뢰고장 실적 이 표 2에 나타나 있다. KLDNet 기록과 EMTP 분석 결과에 의하면 차폐실패의 경우 뇌격전류가 최소 4kA 이상이 되어야 하며, 역섬락 1회선 고장의 경우 50kA 그리고 역섬락 2회선 고장은 80kA 이상이 되어야 한다.

〈표 2〉 낙뢰로 인한 고장개소의 EMTP결과 및 KLDNet 기록

선로명 (T/L)	고장 개소 (No.)	고장 내용	임계전류[kA]		KLDNet [kA]
			차폐실패	역섬락	
구레 #1,2	50	중단(B)	7~11	74	
	43	상단(C)	2.8~15	79	19.8~27.1
	43	중단(B)	2.8~15	64	17.8~27.1
	43	중단(B)	2.8~15	64	21.7~22.4
	47	상단(C)	2.8~15	64	12.2~22.4
	65	중단(B)	2.8~18	70	8.6~16.5
완도 #1,2	18, 20, 21, 26	상단(A) 중단(B) A,B,C A,B,C	2.7~39	64	10~30
	15, 18, 21	하단 상,하단 상,하단	2.6~26	67	35.7
	28, 29	1회선	2.7~35	64	12.9~35.4
	26, 30	중,하단	2.7~16	65	10~43.2
	37	중단	2.7~18	65	14.6
	4	중단	2.6~33	50	13.4
	29	No.24,29	2.6~33	50	11.2~68
서천 #1,2	No.42,43	상단	3.4~148	62	62~120추경
	No.44	상단	3.4~148	62	62~120추경
	No.52	중단	3.4~148	62	4.9~16
양수 #1,2	No.99	2회선 고장	4~	80	7~15.4
삼랑진 (양수#4)	No.84	하단	4~	80	6.5~32.8
남해 #1,2	14호	하단	4~	80	2.8~34.3
	8,12,17호	1회선	4~	80	11.3~26
북성 (한성)	No.83	중단	4~	78	10~30

3. 결 론

국내에서 발생한 송전선로 고장실적을 보면 대부분의 뇌격전류가 역섬락 1회선 고장의 경우에도 50kA 이상이어야 한다. 그러나 우리나라의 뇌격전류 크기 통계분석자료에서 50kA 이상의 뇌격전류는 약 4% 이내이다[3]. 이는 대부분의 뇌격고장이 차폐실패로 인한 결과로 보여진다. 특히 송전선로가 주로 산악지를 경유하고 있어 뇌격에 의한 차폐실패는 더욱 빈번하게 일어난다.

따라서 송전설비 절연설계에서 뇌격에 의한 차폐실패(Shielding failure)에 대하여 가공지선을 추가 설치하는 등의 철탁의 형상(차폐각)에 대한 새로운 접근 방법이 요구되며 경과지 선정 등에 있어서도 철탁의 대지 경사각(주변지형) 등을 고려함으로써 차폐실패 고장을 최소화할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] EPRI, "AC Transmission Line Reference Book", 2005
- [2] 한국전력, "765kV 송전선로 절연설계지침", 1994
- [3] 강연옥, "송전선로뇌사고을 예측계산프로그램", 전기설비학회, 2008
- [4] KEPCO Academy "송변전실무반 교재", 2007.8
- [5] 최현열, "송전선로 피뢰기 현장설치 효과분석", 전기설비학회, 2008