

**EMTP를 이용한 초고압 송전선로의 뇌격에 의한 섬락현상 모의계산**

곽주식, 우정욱, 조성준, 김우겸, 김인섭  
 한전 전력연구원, 한국전력공사

**EMTP Simulation study for flashover phenomenon due to lightning in EHV transmission line**

J. S. Kwak, J. W. Woo, S. J. Jo, W. G. Kim, I. S. Kim  
 Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

**Abstract** - 본 논문에서는 2회선 초고압 송전선로의 4.5 km 이격한 서로 다른 송전철탐에서 발생한 섬락사고의 원인을 규명하기 위한 연구결과를 소개하고자 한다. 섬락사고는 낙뢰가 원인을 제공한 것으로 추정되었으며 2회선중 각각 1개 상의 섬락고장을 동시에 유발하였다. 뇌고장은 낙뢰의 송전선 침입 위치에 따라 역섬락과 차폐실패 고장으로 분류하고 각기 다른 대책을 적용한다. 연구에서는 고장유발 낙뢰의 크기를 모의계산을 통하여 추정하고 낙뢰에 의한 섬락 형태를 밝히고자 하였다.

**1. 서 론**

가공 송전선 고장의 대부분은 낙뢰가 원인으로 발생하고 있으며 전체 고장의 약 60% 이상을 차지하고 있다. 뇌가 송전선에 침입하면 뇌색지전류에 의하여 철탐체나 전력선의 전위를 급속하게 상승시킨다. 이 뇌과전압이 전연내력을 초과하는 경우 섬락고장이 발생하게 된다. 뇌과전압에 의한 고장은 낙뢰가 송전선로의 어느 위치에 침입하느냐에 따라 요구되는 대책이 달라지게 된다. 낙뢰가 주로 철탐체나 가공지선에 발생한다면 접지저항을 낮추는 방향으로 기본적인 대책이 수립될 것이며 전력선이 뇌에 노출되는 확률이 높다면 차폐각을 확충하여야 할 것이다. 송전선로의 건설 이전에 이미 내뢰성능에 대한 충분한 설계가 이루어지고 있지만 대응량의 전력을 수송하는 초고압 송전선의 특성상 뇌사고 저감을 위한 노력은 지속적으로 기울여지고 있다. 송전선의 운영과정에서 발생하는 뇌 고장에 대해서는 고장 재발 억제에 의해 정확한 원인규명이 시도되고 있다.

본 논문에서는 2회선 초고압 송전선로의 4.5 km 이격한 서로 다른 송전철탐에서 발생한 섬락사고의 원인을 규명하기 위한 연구결과를 소개하고자 한다. 섬락사고는 낙뢰가 원인을 제공한 것으로 추정되었으며 2회선중 각각 1개 상의 섬락고장을 동시에 유발하였다. 뇌고장은 낙뢰의 송전선 침입 위치에 따라 역섬락과 차폐실패 고장으로 분류하고 각기 다른 대책을 적용한다. 연구에서는 고장유발 낙뢰의 크기를 모의계산을 통하여 추정하고 낙뢰에 의한 섬락 형태를 밝히고자 하였다.

해석을 위하여 송전선로의 임피던스는 가공지선을 포함한 8상의 EMTP의 K.C.LEE 모델을 이용하여 표현하고 뇌격이 발생한 철탐을 중심으로 주변의 2기를 각각 좌우로 배치하고 그 이후의 철탐은 정합저항 매트릭스(Matching Resistance Matrix)로 처리하여 진행파의 투과와 반사가 없도록 모의하였다. 철탐은 전체 15기에 대한 기하학 평균값으로 모델링 하였으며 아킹흔의 내전압 특성은 CIGRE의 전압-시간 곡선을 적용하였다. 역섬락 고장과 관계가 깊은 탐각접지저항은 실측값을 기준으로 계산하였으며, 미지의 변수를 고려하기 위하여 별도의 접지저항 값들을 모델링에 포함하였다.

**2. 본 론**

**2.1 낙뢰유형별 고장발생 가능성 검토**

**2.1.1 송전선로 임피던스**

송전선로는 가공지선 2조를 포함한 8상의 K.C.LEE 모델 (EMTP의 선로정수 계산 기능)을 이용하였으며, 뇌격전류의 주파수는 500kHz로 하였다. 경간은 500m를 표준으로 하고 섬락이 발생한 각 2개의 송전철탐을 중심으로 주변의 2기를 각각 좌우로 배치하고 그 이후의 철탐은 정합저항 매트릭스(Matching Resistance Matrix)로 처리하여 진행파의 투과와 반사가 없도록 모의하였다. 해당선로의 실 데이터(선종, 경간, 철탐종류, 접지저항값, 아킹흔 길이 등)를 이용하여 송전선로의 임피던스를 계산하였다.

**2.1.2 철탐 임피던스**

철탐은 전체 15기의 평균높이를 적용하였으며, 4단 분할모델을 적용하였다. 아킹흔의 내전압 특성은 CIGRE의 전압-시간 곡선을 적용하였다. 이 곡선은 실험식에 근거하여 아킹흔이 시간조건에 따라 견딜 수 있는 내전압이 정의되어 있는 것으로, 뇌격전류에 의해 발생되어 아킹흔간에 인가된 전압이 절연내력의 임계치에 도달했을 경우에 섬락이 발생여부 판정시 기준으로 사용하였다.

역섬락 고장과 관계가 깊은 탐각접지저항은 실측값은 5 Ω 전후이어서 이 값을 중심으로 계산하였으며, 또한 계산 조건을 더욱 가혹하게 하고 미지(未知)요소를 고려하기 위하여 여러 저항값을 상정하였다.

계산의 정확도를 높이기 위하여 실제 해당선로의 실 데이터(철탐 종류 등)를 이용하여 각 철탐의 4단자 모델 값을 도출하였다. 또한 투반사의 영향을 고려하기 위하여 4단자 모델의 값을 각 조건별로 검증하였다.

**2.1.3 낙뢰관측 결과 및 주변 기상상태**

한반도 전체를 영역으로 낙뢰의 발생여부를 판단하는 설비는 한국전력거래소에서 운용중인 LPATS(Lightning Positioning and Tracking System)와 기상청에서 운용 중인 IMPACT & LDAR가 있다.

표 1. 주변 지역 낙뢰발생 현황(LPATS 자료)

03/10/05 18:46:26.95615 LAT	37.2882 LON	127.20307 ANP	-11.25KA
03/10/05 18:46:33.2251000 LAT	37.30096 LON	127.61929 ANP	30.28KA
03/10/05 18:55:58.1129757 LAT	37.45962 LON	128.21981 ANP	32.43KA
03/10/05 19:10:33.8809421 LAT	37.04318 LON	127.31136 ANP	0.00KA
03/10/05 19:10:34.3664231 LAT	37.05224 LON	127.27076 ANP	-24.56KA

표 2. 주변 지역 낙뢰발생 현황(기상청 자료)

03/10/05,18:10:47.222, LAT= 37.1838, LON= 126.3962, AMP= -12.4KA
03/10/05,18:10:51.300, LAT= 37.5738, LON= 127.3470, AMP= -7.0KA
03/10/05,18:10:51.437, LAT= 37.5131, LON= 127.2749, AMP= -5.2KA
03/10/05,18:10:51.612, LAT= 37.5615, LON= 128.3385, AMP= -81.1KA
03/10/05,18:10:51.623, LAT= 37.5507, LON= 128.3518, AMP= -4.0KA
03/10/05,18:10:51.638, LAT= 37.5481, LON= 128.3506, AMP= -22.7KA
03/10/05,18:10:56.721, LAT= 36.8307, LON= 124.1868, AMP= -129KA

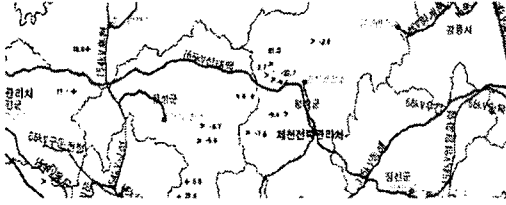


그림 1. 주변 지역 낙뢰발생 현황(기상청 자료)

낙뢰위치표정시스템에 의해 관측된 자료는 <표 1>과 같다. 사고 발생시점인 18시 10분 전후에는 낙뢰를 관측하지 못했고, 단지 유사 영역에서는 최대 32kA 정도의 낙뢰가 관측되었다.

반면, 기상청에 의해 관측된 낙뢰정보는 <표 2>와 같이 상당한 낙뢰가 관측되었다. 특히 18시 10분 51초대의 낙뢰가 유사영역에서 관측이 되었을 뿐 아니라 뇌격의 크기 또한 81 kA 부근의 높은 크기의 뇌격이 관측되었다. 뇌관측 원리에 기준하여 판단하여보면 상대적으로 상당히 큰 값으로 판단된다. 따라서 실제로는 100 kA 이상의 뇌격이 될 수도 있다고 판단한다.

또한, 현장관계자에 따르면 당일 구름의 위치가 철탁의 상부를 덮고 있었다고 한다. 이는 전형적인 동계뢰의 특성을 보여주고 있다. 일반적으로 하계뢰의 경우는 운고가 지상으로부터 약 10km이내 반면 동계뢰의 경우는 1~2km 이내라고 알려져 있어, 산의 높이와 철탁의 높이를 감안하면 낙뢰의 발생여건이 충분했 것으로 추정된다.

2.1.4 조건별 섬락 발생 뇌격전류의 임계값

(1) 접지저항값과 뇌격전류 크기별 역섬락 가능성

표 3. 역섬락발생 임계 뇌격전류(계산 결과)

TFR(Ω)	10	15	20	30	40	50
임계섬락 뇌격전류(kA)	130	128	124	118	114	110

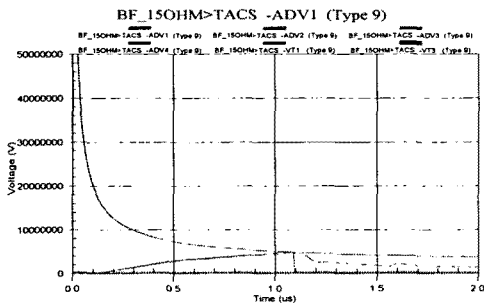


그림 2. 역섬락발생 임계 뇌격전류의 크기 예

일반적으로 일정크기 이상의 뇌격이 철탁에 침입하면 초고압 송전선의 아킹흔에서 역섬락이 발생한다. 또한 섬락은 도체의 위치에 따라 달라지는데 역섬락이 어느상에서 먼저 발생하는지 검토하였다.

조건은 타각접지저항은 15Ω을 기준으로 가변시켰

으며, 아킹흔의 간격은 4.6m로 하여 계산하였다. 뇌격이 철탁의 탑정에 침입하여 역섬락을 발생시키는 뇌격전류의 임계값을 표 3에 나타내었다.

이 경우는 A철탁에 뇌격이 침입하면 A철탁에 역섬락이 먼저 발생하게 되고 10기 경간 떨어진 B 철탁에는 역섬락이 발생하지 않는다. 또한, 345 kV 이하 송전선로에서는 상단암에서 먼저 역섬락이 일어났으나, 이번 경우처럼 철탁의 높이가 상대적으로 높은 초고압 송전선에서는 중단암도 먼저 역섬락이 날수 있음을 알 수 있었다. 반면 접지저항에 의한 차이는 철탁 높이가 높음으로 인하여 그 영향이 상대적으로 적게 나타났다.

(2) 인근 철탁의 뇌격에 의한 역섬락 가능성

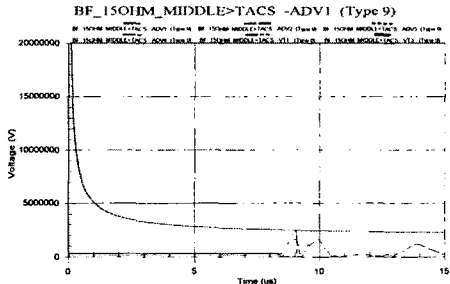


그림 3. 역섬락발생 임계 뇌격전류의 크기 예

4.5 km의 이격되어 있는 철탁 A호와 철탁 B호에서 역섬락이 동일시각에 서로 다른 회선의 중단암에서 발생하였기에 10기 경간의 가운데 철탁 탑정에 낙뢰가 침입하여 각각 좌우 5기 떨어진 철탁 A호및 철탁 B호에서의 역섬락여부를 확인하였다.

이 두철탁에서 역섬락이 동시에 발생할 수 있는 임계뇌격은 약 440 kA의 매우 큰 뇌격이어야 하는 것으로 계산되었다. 이는 전혀 불가능한 것은 아니나 일반적인 낙뢰 관측 결과에 의하면 200 kA 이상인 경우는 발생 확률이 매우 작다.

(3) 차폐실패에 의한 섬락발생 임계 뇌격전류

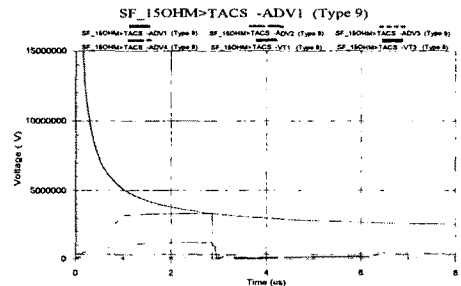


그림 4. 직격뢰시 임계 뇌격전류의 크기 예

기상조건에 의해서 구름이 철탁 상부를 감싸고 있었다면 구름 내에서 중단상 도체를 직격했을 가능성에 대해 검토하였다. EMTP에 의해 계산된 섬락 임계 뇌격전류는 약 22 kA의 뇌격이 중단상에 직격했을 때 섬락이 발생하기 시작했다. 앞의 기상청의 자료에 의하면 충분히 가능한 조건이라 판단된다. 직격뢰의 경우는 4.5km 떨어진 철탁 A호와 철탁 B호에 초단위까지 동일한 시간에 동시에 낙뢰가 침입되었을 가능성은 매우 적다고 판단된다.

(4) 송전철탁기별 조건을 반영한 검토

## 2. 철탍A호 탐정에 낙뢰가 침입 가정

철탍A호에 낙뢰가 떨어졌을 경우 이전의 결과에서 예상 가능하듯이 해당 철탍에서 역섬락이 발생할 가능성은 160 kA 정도의 높은 값을 지닌 낙뢰가 침입했을 경우 역섬락이 발생한다. 그림 5의 계산결과에서처럼 상단암에서 섬락이 먼저 발생하기 시작한다. 해당 철탍에서 역섬락이 발생한 경우에는 인근 철탍에서는 다시 역섬락이 발생할 만큼의 뇌과전압은 생성되지 않는다. 따라서 낙뢰가 철탍 A호에 발생했을 경우에는 해당 철탍만 역섬락이 발생하고 인근 철탍에서는 역섬락이 발생하지 않는다.

BF\_151\_160KA>TACS -ADV51M(Type 9)

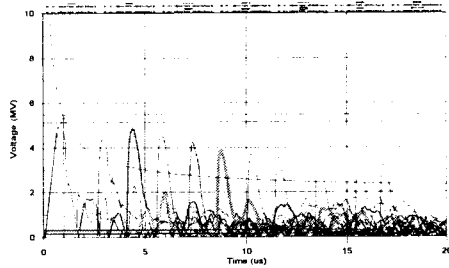


그림 5. 160 kA 뇌격시 역섬락 특성

BF\_151\_180KA>TACS -ADV51M(Type 9)

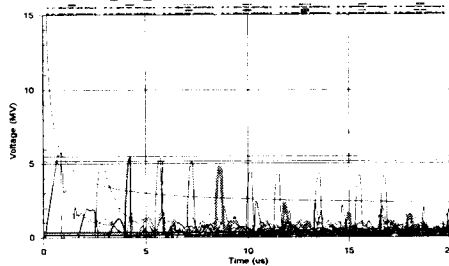


그림 6. 180 kA 뇌격시 역섬락 특성

그림 6은 뇌격전류가 180kA 정도의 값을 가졌을 때의 결과이다. 이 경우 철탍에서뿐 아니라 인근 3개의 철탍에서도 역섬락이 발생하였다.

이 또한 상단암에서 역섬락이 발생했으며, 인접한 철탍에서는 역섬락이 나지 않은 점으로는 접지저항이나 아킥온의 조건 등에 따라 꼭 인접한 철탍에서 우선적으로 역섬락이 발생한다고는 단정하기 어렵다. 하지만 10호기 경간을 건너서 한곳에서만 역섬락이 난다는 것은 현상적으로 나타날 수 없다고 판단된다. 또한 시간상으로 그림에서 보듯이 해당 철탍인 철탍 A호의 한경간, 두경간 철탍에서는 약간의 시간차를 두고 역섬락이 발생하고 있다.

## 2.2. 계산 및 검토 결과

### 2.2.1 역섬락이라 가정했을 경우

기상청의 자료 및 관련자의 증언에 의하면 초고압 송전선로에서의 뇌격에 의한 한 회선 특히 중단암에서의 역섬락의 가능성은 존재한다. 또한, 사고 시간과 기상청 자료의 낙뢰데이터가 일치하는 점으로 미루어보아 해당 낙뢰(81kA)가 사고에 영향을 미쳤을 가능성이 매우 높다. 또한, 이 낙뢰는 일반적으로 30 %의 오차를 감안한다면 약 120kA 전후의 낙뢰일 가능성이 높다. 단, 서로 다른 철탍에서, 서로 다른 2회선에서 역섬락이 일어날 조건이 성립되면 뇌격전류의 크기가 400kA 이상인 아주 큰 뇌격이어야 가능하다.

따라서, 관측된 가장 큰 뇌격이, 동일한 운내에서 방전 시 근원지는 같으나 방전 경로가 나뉘어진 형태로 철탍 A호와 161호에 동시에 맞았다면 가장 신빙성 있는 원인

이 될 수 있으리라 판단된다.

### 2.2.2 직격뢰라 가정했을 경우

기상청의 자료 및 관련자의 증언에 의하면 초고압 송전선 철탍의 상부에 낙뢰를 유발하는 구름이 존재했다면 동시에 서로 다른 철탍에 서로 다른 뇌격이 맞았을 가능성도 높다. 또한 구름내에 철탍이 존재했기 때문에 직격뢰의 가능성은 더욱 높다.

직격뢰의 경우는 약 20kA 이상의 적은 뇌격전류에도 섬락이 발생할 수 있다. 이 경우는 어떤 형태로든 뇌격이 침입한 흔적을 찾을 수 있을 것으로 판단한다. 단, 서로 다른 회선의 B상이 시간상으로 완전히 일치한다는 것은 재검토되어야 할 대상으로 여겨진다.

### 2.2.3 복합적인 원인일 경우

관측된 뇌격(81kA)이 한 상을 충분히 역섬락시킬 수 있는 뇌격이어서, 한 쪽은 역섬락이면서 다른 한쪽은 직격뢰일 경우도 가능하다.

### 2.2.4 실패데이터 적용을 통한 추가검토 결과

철탍 A호에 낙뢰가 떨어졌을 경우, 해당 철탍에서 역섬락이 발생할 가능성은 160kA 정도의 높은 값을 지닌 낙뢰가 침입했을 경우이다. 이 철탍에서 역섬락이 발생한 경우에는 인근 철탍에서는 다시 역섬락이 발생할 만큼의 뇌과전압은 생성되지 않는다. 그러나 180kA 이상의 높은 뇌격이 침입했을 경우는 인근 2~3개의 철탍에서도 역섬락이 발생가능하나, 몇기 떨어진 특정 철탍에서만 역섬락이 발생할 가능성은 희박하다.

철탍 B호(정 가운데)에 낙뢰가 떨어졌을 경우 제일 먼저 철탍 B호의 상단암에서 역섬락이 발생하고, 인근 철탍에서 역섬락이 발생하였다.

180 kA 정도의 높은 뇌격의 경우는 철탍 A호까지 인근 철탍에 순차적으로 역섬락이 발생하였으나 이 또한 특별한 조건이 추가되지 않는 한 인근철탍 순으로 역섬락이 발생하였으며, 어느 특정지점에서만은 역섬락이 발생하지 않는다.

## 3. 종합적인 결론

현상적으로는 차폐실패나 역섬락이 모두 가능하나, 뇌격전류의 크기와 시간조건등을 조합 한다면 서로 다른 2회선의 B상에서 동일한 시간에 동시에 섬락이 발생할 수 있는 조건은 아래와 같다.

(Case1: 역섬락의 경우) 각기 다른 뇌격(150kA 이상)이 철탍 A호와 B호의 탐정에 동시에 맞아서 역섬락이 동시에 발생한 경우

(Case2: 차폐실패의 경우) 각기 다른 뇌격(20~30kA 전후)이 철탍A호와 B호의 해당 상에 직격되었을 경우 기준에 검토되었던 뇌사고율을 감한하면 초고압 선로의 경우에는 나타날 수 있는 뇌사고율이다.

단 서로 다른 2회선에서의 사고이나, 재페로가 성공한 경우로 송전쪽에서는 별 문제가 되지 않으나, 보호측면이나 발전기의 안정도 측면에서보다 상세한 검토가 필요하리라 판단된다.

## [참고 문헌]

- [1] ATP, "EMTP Rule Book", Vol. 1, 2, 1987
- [2] IEC, "IEC 62271-100-2001",
- [3] J. Duncan Glover, "Power System Analysis and Design", Third edition, pp 356-360, 2001
- [4] 전력연구원, "송배전선로 재페로방식 최적화 연구", 최종 보고서, 1998
- [5] 일본 전력중앙연구소, "UIIV 송전 특별위원회계통부회 보고서 UIIV 교류 송전계통의 특성", pp 35, 1982