

**EMTP를 이용한
765kV 송전선로 다상 섬락에 관한 연구**

가복현 · 민석원
순천향 대학교 전기·전자 공학부

**A Study on Multi-Phase Flashover
in 765kV Transmission Line using EMTP**

B.H.KA. S.W.MIN.
Soonchunhyang University

Abstract - To use the EMTP, in this paper, a arcing horn is simulated by non-linear resistor and inductor element using TACS, a tower by distributed parameter model, and lines as K. C. Lee model. Changing lightning current characteristics, lightning position, and tower footing resistor value, we analysis multi-phase flashover characteristics in 765 kV transmission line.

1. 서 론

초고압 2회선 송전선에서 발생할 수 있는 사고중 가장 큰 것은 첩탑낙뢰에 의한 사고이다. 이의 전력계통 파급 영향이 크고 사고범위가 매우 광범위하기 때문에 송변전 설비의 절연 비용과 절연성의 양면을 고려한 절연 설계가 각 방면으로 검토되고 있다. 이 절연 설계의 절연 레벨을 결정하기 위해서는 정도가 높은 뇌 썩지 해석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 이에 대한 모델을 제시하고, 이 모델 등이 현재 우리 나라에서 건설 중에 있는 765kV 송전계통에 적용 가능한 가를 검토한 후 첩탑 낙뢰시의 다상 섬락 해석을 하였다.

이를 토대로 섬락상과 낙격전류의 파고치 및 파두장과의 관계를 검토를 하여 송전선 내뇌설계에 관한 기초 데이터를 축적하였다.

2. 첩탑 다상섬락 해석 모델

최근 첩탑의 대형화에 따라, 비교적 짧은 시간 영역의 첩탑 썩지 특성을 알 필요가 있고 복잡한 진행파 회로의 계산도 실용적인 레벨까지 할 수 있게 되어 보다 정밀한 첩탑 4단 모델이 제안되고 있다.(1,2) 따라서 본 논문에서는 첩탑 암부까지 포함하여 그의 기하학적 형상과 공간적 배치에 의한 첩탑 모델을 제시하여 정밀한 다상해석이 가능하도록 제안한 일본의 하라씨 모델을 사용하였다.(3,4)

2.1 첩탑 단단 전송 선로 모델

2.1.1 단주 및 복주첩탑 썩지 임피던스

첩탑의 각주 높이, 도체반경 및 도체 간격의 단주와 복주도체에 대한 썩지 임피던스 특성 실험식을 참고 문헌(5)로 부터 인용하였다.

$$Z_T = 60(\ln \frac{2\sqrt{2}h}{r_e} - 2)$$

여기서 h는 원주도체의 높이이고 r_e 는 등가도체반경이며, 사본주 도체의 경우 다음의 식과 같이 계산 가능하다.

$$r_e = 2^{1/8} (r_T^{1/3} r_B^{2/3})^{1/4} (R_T^{1/3} R_B^{2/3})^{3/4}$$

여기서 r_T , r_B 는 각각 단주의 탐정 및 탐각에 있어서

의 도체반경 R_T , R_B 은 각각 복주의 탐정 및 탐각의 도체간격이다.

2.1.2 주재부 4분할 모델

각 암부 위치에서 분할하여, 각각의 썩지 임피던스는 상부부터 순서대로 $Z_{T1}, Z_{T2}, Z_{T3}, Z_{T4}$ 로서 다음 식을 만족한다.

$$Z_{TK} = 60(\ln \frac{2\sqrt{2}h_k}{r_{ek}} - 2) \quad (k=1,2,3,4) \quad (3.6)$$

2.1.3 사재부 모델

실험적 데이터로 사재가 존재함에 따라 주재부의 썩지 임피던스가 약 10%정도 저감되는 것을 알았으며 이에 따라 다음 식과 같은 썩지 임피던스를 갖는 선로가 주재에 병렬로 삽입된다고 보았다.

$$Z_{LK} = 9Z_{TK} \quad (k=1,2,3,4) \quad (3.8)$$

2.1.4 암부 모델

암은 통상 수평도체의 썩지 임피던스와 동일한 식으로 이끌어 낼 수 있다.

$$Z_{AK} = 60 \ln \frac{2h_k}{r_{AK}} \quad (k=1,2,3,4) \quad (3.9)$$

이상을, 종합하여 본 논문의 해석에 이용하였으며 첩탑 접지저항은 일반적으로 10Ω 을 사용한다.

2.2 가공송전선로 모델

가공송전선로 모델은 가공지선과 전력선을 8상 상호 결합분포정수 선로로서 취급해야한다. 이에 대해 본 논문에서 사용한 모델은 K. C. Lee 모델이다. 뇌 썩지 계산의 경우 과도현상 주파수가 1,000kHz 정도에 이르도록 하고 노드의 변형행렬인 주파수 의존성은 무시하였다.

2.3 리더 진전 모델

리더 모델은 리더 진전속도와 갭간 전압, 갭간 전류, 리더 거리의 함수로서 시시각각으로 변하는 리더 진전을 모델화한 것이다. 봉대봉 갭에 대한 리더 진전의 경우에 대한 리더 진전속도 ν 에 대하여 다음 식으로 표현한다.

$$\nu = K_1 \frac{V^2}{D-2x} + K_2 \frac{VI}{D-2x} \frac{x}{d} \quad (3.10)$$

이때

$$K_1 = 0.5 \times 10^{-7} [m^2/V^2S]$$

$$K_2 = 5 \times 10^{-3} [m^2/VAs] \quad \text{이다.}$$

여기서, 방전전구전류 I는 다음의 식이 성립한다.

$$I = C_0 \cdot \nu \cdot V \quad (3.11)$$

단, 비례정수 C_0 는 $5 \times 10^{-10} [F/m]$ 이다.

이식들을 이용하여 다음과 같이 점진적인 리더진전 상태를 시뮬레이션 한다.

1. $t = t + \Delta t$
 2. (1)식에서 리더 진전속도 v 을 구한다.
 3. (2)식에서 방전전구전류 I 를 구한다.
 4. 3.에서 구한 I 에 의해 갭을 포함한 회로의 방전식에서 갭간 전압 V 를 변경한다.
 5. $x = x + v\Delta t$ 에서 리더의 길이를 변경한다.
- 상기의 순서를 반복하여 시시각각으로 변하는 리더 진전 상태, 방전전구전류, 갭간 전압의 변화를 계산한다.

2.4 아킹흔의 등가회로모델

본 논문에서는 일본의 穂田씨가 제안한 비선형 소자조합 모델을 사용하였다(6). 이것은 그림 3.7과 같이 혼간 전압을 비선형 인덕턴스 L_n 와 비선형저항 R_n 으로 분담시킨 모델이다. 이 모델은 혼간 전류와 혼간 등가 임피던스의 관계가 혼간 전류 즉 시간에 따라 변화하고, 더욱 파미의 방전특성도 개선되고, 봉대봉 갭의 V-t특성과 거의 일치하기 때문에 신뢰성이 높다고 생각된다. 또 SW_1 , SW_2 스위치는 EMTP의 TACS제어에 따라 제어되기 때문에 스위치 투입시간을 미리 줄일 필요가 없다.

3 각종 파라미터와 섬락상의 관계

본 장에서는 앞장에서 서술한 철탑 다단 전송선로 모델, 송전선로 K.C.Lee 모델 및 비선형 인덕턴스와 비선형 저항을 이용한 아킹흔 섬락 모델을 조합하여 파고치 및 파두장, 접지저항치 뇌격점에 변화에 따라, 섬락상이 어느 정도 영향을 받는가를 검토하였다. 해석에 이용된 송전선 모델을 그림 3.1에 보였다.

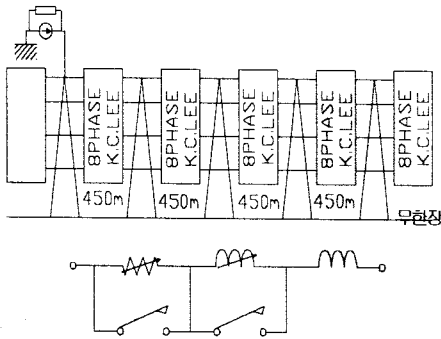


그림 3.1 송전선 및 아킹흔 모델

3.1 뇌격전류와 섬락상의 관계

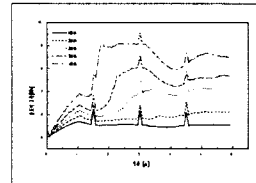
3.1.1 뇌격전류 파고치

뇌격전류는 파두장이 $1\mu s$, $2\mu s$ 및 $4\mu s$ 인 $n/70\mu s$ 의 램프파이고 A상의 교류위상을 0° 부터 270° 까지 90° 씩 변화 시킨 경우의 섬락을 해석하여 파고치의 변화에 대한 섬락상을 표3.1에 나타내었다. 뇌격점은 1호선측 암 끝 부분으로 하였다. 이 표에서 접지저항이 10Ω 인 경우는 뇌격전류 파고치가 $300kA$ 이하이면 어떤 파두장에 대해서도 섬락이 발생하지 않음을 알았다. 그리고 파고치가 $400kA$ 에서는 파두장이 $1\mu s$ 의 경우는 1상 섬락이 발생하였다. 그러나 이 경우에도 파두장이 $2\mu s$ 이상 이 되면 섬락이 발생하지 않았다. 또 접지저항이 30Ω 인 경우 파고치가 $200kA$ 이상이 되면 섬락이 발생하였다. 그리고 파두장이 $1\mu s$ 인 경우에는 $200kA$ 에서 1상 또는 2상 섬락이, $300kA$ 이상에서는 전체 섬락이 발생하였다. 이 사항을 파형으로 고찰하기 위해 접지저항을 10Ω , 파두장이 $1\mu s$ 인 경우 파고치를 변화 시킨 경우의 영향을 그림 3.2에 보였다. 다만 가공지선 전류에 관해

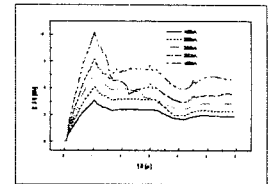
서는 1호선측, 암 전위 및 상도체 전위에 관해서는 1호선 상(上)상을 선택하여, 대지전압이 최대가 되는 A상의 교류위상이 90° 인 경우의 파형을 그림 3.2에 보였다.

표 3.1 파고치, 파두장, 접지저항의 변화에 따른 영향

		$T_r = 1\mu s$			$T_r = 2\mu s$			$T_r = 4\mu s$					
		0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270
150 kA	10Ω	A상											
		B상											
		C상											
200 kA	10Ω	A상											
		B상											
		C상											
300 kA	10Ω	A상											
		B상	x	x									
		C상	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
400 kA	10Ω	A상	x	x	x								
		B상											
		C상											
30Ω	A상	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		B상	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		C상	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x



(a) 암 전위

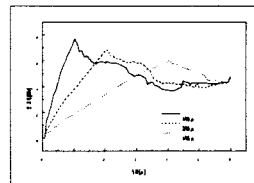


(b) 상도체 전위

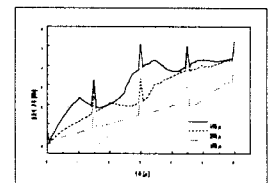
그림 3.2 파고치에 의한 영향

3.2.2 뇌격전류 파두장

접지저항이 10Ω , 파고치가 $250kA$ 에서 파두장을 $1\mu s$, $2\mu s$, $4\mu s$ 인 때의 영향을 그림 3.3에 보였다. 단 그림에서 파형의 조건은 앞절에서와 같다.



(a) 암 전위



(b) 상도체 전위

그림 3.3 파두장에 의한 영향

3.3 철탑 뇌격점과 섬락상의 관계

종래의 송전선로의 내뇌설계 계산에서는 철탑 모델이 1본의 수직도체로 표현되어 있기 때문에 뇌격점은 그 탑정이 된다. 그러나 실제의 사고 기록을 보면 1회선의 중(中)상에서만 섬락이 일어나는 것을 볼 수 있다. 또 철탑의 규모가 큰 765kV의 철탑에서는 철탑탑정의 중앙보다도 암의 끝 부분에 뇌격을 맞는 수가 많을 것으로 생각된다.

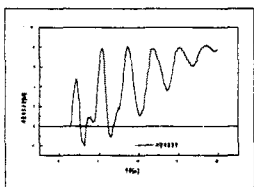
3.3.1 뇌격점과 가공지선 전류와의 관계

뇌격점에 의한 가공지선 전류에 영향을 파고치 $200kA$, 파두장/파미장이 $1/70\mu s$, A상 교류위상이 0°

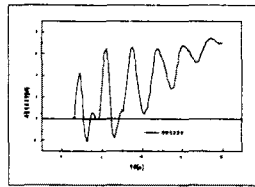
의 경우를 계산하여 그림 3.4에 보였다. 또 이때의 섬락상을 표 3.2에 나타내었다. 그림에서 뇌격이 탐정에 있는 경우에 가공지선 전류가 가장 많이 흐르고 그 이외의 경우는 전류가 큰 순서로 상(上)상뇌격, 중(中)상뇌격, 하(下)상뇌격 순이지만, 이와 관련하여 뇌격전류의 크기에 대한 차이는 없었다.

표 3.2 철탁 뇌격점의 영향

절지저항	10Ω				30Ω			
	탐정	상상	중상	하상	탐정	상상	중상	하상
A상	0	x				x		
	90		x				x	
	180			x				x
	270		x				x	
B상	0			x	x			x
	90				x		x	
	180					x		x
	270						x	
C상	0				x	x		x
	90					x		x
	180						x	
	270							x



(a) 탐정점 끝부분 뇌격

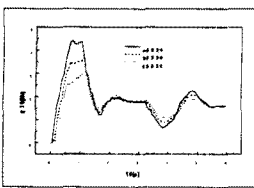


(b) 상상점 끝부분 뇌격

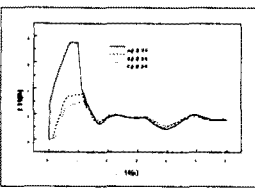
그림 3.4 뇌격점에 따른 가공지선전류의 영향

3.3.2 뇌격점과 암의 전위와의 관계

뇌격점에 의한 암 전위의 영향을 3.3.1절과 같은 조건에서 계산한 것을 그림 3.5에 표시하였다. 그림에서 뇌격점에 의한 암의 전위는 1호선측 탐정 암의 끝 부분 뇌격의 경우, 큰 것부터 거의 균등하게 1호선측 탐정 암, 2호선측 탐정암, 상(上)상 암, 중(中)상 암, 하(下)상 암의 순서로 되어있으며 암 전위의 차는 1MV정도이다. 1호선 상(上)상 암 끝 부분 뇌격의 경우, 큰 것부터 상(上)상의 암, 중(中)상의 암, 하(下)상의 암의 순서로 되고 그 차는 1~4MV 정도이다. 중(中)상 암 끝 부분 뇌격의 경우, 중(中)상 암의 전위가 가장 크고, 상(上)상 암, 하(下)상 암의 순이다. 이 차는 1~4MV 정도 된다. 하(下)상 암 끝 부분 뇌격의 경우 하(下)상 암 이외는 거의 같기 때문에 1호선 하상 암 이외의 섬락은 상도체 전위에 영향받을 것으로 생각된다.



(a) 탐정점 끝부분 뇌격



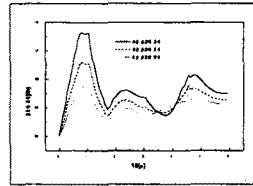
(b) 상상점 끝부분 뇌격

그림 3.5 뇌격점에 따른 가공지선전류의 영향

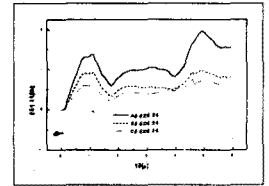
3.3.3 뇌격점과 상도체 전위와의 관계

뇌격점에 의한 상도체 전위와의 영향을 3.3.1절과 같은 조건에서 계산한 것을 그림 3.6에 나타내었다. 그림에서 뇌격점에 의한 상도체 전위의 영향은 기본적으로 가공지선으로부터 유도에 의한 것이고, 뇌격이 있던 호선측 이외에는 거의 영향이 없으며 큰 것부터 보면 상(上)암의 상, 중(中)암의 상, 하(下)암의 상순으로 되어 있다. 그 차는 0.5MV 정도 되기 때문에, 암 전위의 차이가 1MV 정도이라면 섬락이 일어나는 상은 위상의 영향

을 받게된다. 단 뇌격이 있던 암의 호선의 상하 상에 영향이 있고, 그것의 상도체 전위는 커지게 된다. 이것은 뇌격이 일어난 상의 상도체 전위 상승이 암 전위상승에 의한 정전유도에 의한 것으로 생각되어 그 상하의 상의 상도체 전위의 상승은 뇌격이 일어난 상의 상도체 전위 상승에 의한 유도의 영향이라고 생각된다. 이것에 의한 상도체 전위의 상승은 1.5MV 근처까지 되고 있으며, 섬락이 일어난 상에 큰 영향이 있는 것으로 분석된다. 이것으로부터 뇌격이 일어난 호선측의 뇌격암의 상하에 위치한 상은 섬락이 일어나기 어려울 것으로 생각된다.



(a) 탐정점 끝부분 뇌격



(b) 상상점 끝부분 뇌격

그림 3.5 뇌격점에 따른 상도체 전위의 영향

4. 결 론

본연구 결과 섬락의 진행 양상은 철탁에 흐르는 전류에 의해 암의 전위가 상승하고 가공지선 전류의 유도에 의해 상도체 전위의 상승하며 또 절지 저항치가 밀접한 관계를 가지고 있음을 알았다. 다음은 본 연구에서 적용 검토한 765kV 송전 시스템에서 다상 섬락 해석결과로 밝혀진 사항에 관하여 기술한 것이다.

- (1) 2LG 이상의 사고가 일어날 가능성은 뇌격점이 탐정 암 끝부분과 상(上)상 암 끝부분인 경우가 많고, 절지저항이 30Ω 인 경우 뇌격전류의 파두장이 1μs에서 파고치가 200kA 이상, 파두장이 2μs에서 파고치가 250kA 이상, 파두장이 4μs에서 파고치가 300kA 이상에서 2LG 이상의 사고가 일어났다.
- (2) 탐정 암 끝부분에 뇌격이 가한 경우, 상(上)상에서 섬락이 일어날 가능성이 가장 높으며, 상(上), 중(中), 하(下)암 끝부분에 뇌격이 가해진 경우 뇌격을 맞은 암의 상에서 섬락이 일어났다.
- (3) 뇌격점에 따른 가공지선 전류 크기의 차이는 없었고, 뇌격점과 섬락이 일어난 상과 관련하여 가공지선으로부터 상도체로의 유도에 의한 영향은 없었다.
- (4) 뇌격시 암 전위상승이 매우 크게 되기 때문에, 뇌격점에 의한 섬락 양상은 암 전위의 영향이 컸다. 상기의 결과를 적용하면 차후의 송전선로의 내뢰설계시 지침으로 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

(참 고 문 헌)

- [1] "電力系統における雷サージ解析の新技术", 일본 전기학회 기술보고(2부), No.244, 1988
- [2] M.Ishii, T.Kawamura, T.Kouno, E.ohsaki, K.Murotani, T.Higuchi, "Multistory Transmission Tower Model For Lightning Surge Analysis", IEEE Trans. Power Delivery, 1991.6(3):P.1327-1335
- [3] 原, 山本, 北井, 平松, 林, 永井, 松村, "鐵塔アム部の傳送線路モデル", 일본 전기학회 고전압 연구회 자료, 1990.HV-90-70
- [4] 原, "サージ解析における鐵塔インピーダンスの表現", 平成 3년 전기정보관련 학회연합 대회, 1991.1(S7-3): P.157-159
- [5] 原, 山本, 林, 永井, 園井, "ポール型鐵塔のサージインピーダンスの實驗式", 일본 전기학회 논문지 B, 1991.111(1), P.17-23
- [6] 植田, 森田, 雨谷, 舟橋, "アークホンと避雷裝置のフラツションモデル", 일본 전기학회 논문지 B, 112권.12호, 1085-1092, 1992