

직격뢰 침입시 배전계통에서 선로 및 기기의 절연설계

정채균\* 김상국 이중범  
원광대

하동혁  
한국전력

Insulation Design of Line and Equipment in Distribution Systems  
in Case of the Stroke of Direct Lightning Surge

Chae-Kyun Jung\* Sang-Kuk Kim Jong-Beom Lee  
Wonkwang University

Dong-Hyuk Ha  
KEPCO

**Abstract** - This paper examines the insulation coordination scheme of line and equipment in distribution system when the direct lightning surge strikes. The BIL that is applied in distribution system is not properly considered the performance and operation of arresters. Because of that, the high BIL is being used at partial system. This paper variously analyse the lightning overvoltage of line and equipment with earth of overhead grounding wire and installation types of arrester. From these result, authors examine the rationality of BIL.

설계기준-3500(접지공사)[2]와 설계기준-3800(배전선내뢰기준)[3]에 의해 가공지선과 중성선은 매진주 접속하였으며, 가공지선의 접지저항은 5Ω/km의 합성저항치를 적용하였다. 피뢰기 접지저항은 25Ω을 적용하였으며, 피뢰기는 2단선로에서 동일전주 상단과 하단에서 동시에 피뢰기를 설치하지 않았으며, 피뢰기가 설치된 전주의 가공지선 접지는 생략하였다. 또한, 본 논문에서는 다양한 선로조건에 대한 해석을 위해 가공지선은 100m-300m, 피뢰기 설치간격은 각각 100m-500m까지 변화하였다.

1. 서론

2.2 뇌격 모델

국내 배전계통에 설치되어 운용중인 선로 및 기기 등은 국내뿐만 아니라, 필요에 따라 수입에 의해 공급되기도 하며 국가간에 다양한 기술교류가 이루어지기도 하므로, 가능한 국제적 교류를 충분히 고려하여 규격이나 기준이 정립되어야 하며, 규격 및 기준 등은 설계 관점 및 환경의 변화와 기기 및 기술 향상 등에 따라 지속적인 개정과 보완이 필요하다[1]. 또한 국내 배전계통의 선로 및 기기는 고장 예방 위주로 절연 기준이 설정되어 과잉설계의 우려가 있으며, 선로 공급용량 및 운전 여건의 변화함에 따라 합리적인 고 경제적인 계통 운영을 위한 적정 절연 여부와 절연협조 경제성에 대한 재검토가 요구되고 있다. 또한 국내 배전계통에서는 종합적인 관점보다는 필요에 따라 단편적인 검토에 의해 절연강도를 선정한 예가 많아 절연강도가 불합리하게 적용된 사례가 있으며, 절연협조에 매우 중요한 역할을 하는 피뢰기의 특성 및 성능의 향상이 적절히 반영되지 않아 전체적으로 높은 기준절연강도가 설정된 것으로 추정된다.

배전선로의 뇌격은 구조물의 높이가 낮기 때문에 뇌격 침입시 대부분의 썬지는 대지로 흡입되므로 송전선에 비해 약화되는 특성을 보인다. 따라서, 배전선 직격뢰 해석에 필요한 뇌격전류의 파형은 그림 2와 같은 램프파로 파두상과 파미장은 2/70μs를 선정하였으며, 뇌도 임피던스는 400Ω, 뇌격전류 파고치(Ip)는 각각 10kA, 15kA, 20kA, 30kA를 적용하여 다양하게 분석하였다.

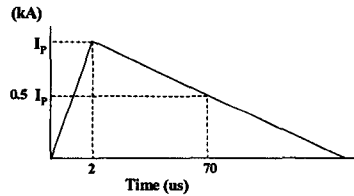


그림 2. 뇌격전류 파형

따라서, 본 논문에서는 국내 배전계통 구성 및 나뉜 특성과 국내 특성에 맞는 뇌격 조건, 배전선 설계기준 등을 반영한 EMTP 해석모델을 이용하여 직격뢰에 대한 다양한 분석을 하였다. 또한, 피뢰기 적용방안 뿐만 아니라 배전계통의 선로 및 기기에 적용하고 있는 절연강도를 재검토 하여 국내 배전계통 설계에 맞는 새로운 절연협조 기준을 정립하고자 한다.

3. 직격뢰에 의한 뇌과전압 분석

2. 직격뢰 해석을 위한 배전계통 모델링

배전선 가공지선에 직격뢰가 침입한 경우 상도체에 대지전압 보다는 주로 애자간 섬락과 개폐기와 변압기 등과 같은 설비의 절연 성능을 검토 대상으로 한다[4]. 또한 배전계통에서 대부분의 기자재는 상과 중성선 사이에 설치되므로 본 논문에서도 애자간과 기자재가 설치되는 상-중성선간 전압 위주로 검토하였다. 애자간 전압의 섬락 기준은 풀리머 애자의 임계 섬락전압인 230kV 보다 낮은 LP애자의 180kV로 설정하였다.

2.1 배전선로 모델

3.1 2단 선로

본 논문에서 검토한 선로 모델은 총 선로 공장이 2km이며 전주 사이의 표준 경간은 50m이다. 또한 선로 양단은 정합되었으며 뇌격은 선로 중앙의 가공지선에 침입하는 것으로 하였다. 가공지선과 중성선 및 중성선과 대지사이의 접속선과 접지선에 200Ω의 썬지 임피던스와 300m/μs의 전파속도를 고려하였다. 그림 1은 국내에서 운전중인 배전계통의 EMTP 해석을 위한 1단선로와 2단선로의 배치도이다.

본 절에서는 2단선로로 운전중인 배전선로의 가공지선에 직격뢰가 침입했을 때 가공지선 및 피뢰기 설치 간격과 설치환경에 따른 뇌과전압을 해석하였다.

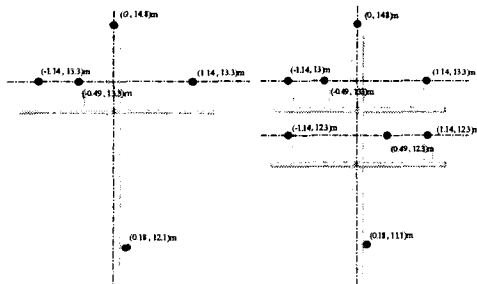


그림 1. 배전선로 배치도

3.1.1 가공지선 매 100m 마다 접지

100m마다 접지된 가공지선의 각 접지개소에 적용되는 저항은 설계기준의 합성저항치 계산식에 의해 41.7Ω을 적용하였으며, 피뢰기는 각각 100m-500m 간격으로 다양하게 변화하였다. 또한 피뢰기는 상단과 하단 간에 1경간차, 2경간차, 등간격으로 구분하여 피뢰기 설치환경에 따른 뇌과전압을 해석하였다.

그림 3은 피뢰기가 100m마다 설치된 경우의 모델계통이며, 표 1에서는 이 경우 뇌격거리와 뇌격전류 파고치에 따른 뇌과전압을 나타내었다.

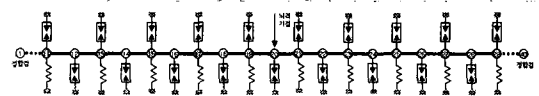


그림 3. 피뢰기 100m 간격 설치시 모델계통(g=100m)

표 1. 피뢰기 100m 간격 설치시 뇌격전류 크기에 따른 해석결과

뇌격전류	10kA	15kA	20kA	30kA
뇌격거리 [m]	2단선로 상단 전압[kV]	2단선로 상단 전압[kV]	2단선로 상단 전압[kV]	2단선로 상단 전압[kV]
0	52	67	84	115
50	22	27	34	40
100	10	22	30	35
150	7	17	21	31
200	7	18	21	27
250	9	21	21	25

표 1에서처럼, 가공지선을 100m마다 접지하고 피뢰기를 100m마다 설치한 경우 뇌격전류 30kA이하에서는 애자 및 기기의 절연에 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

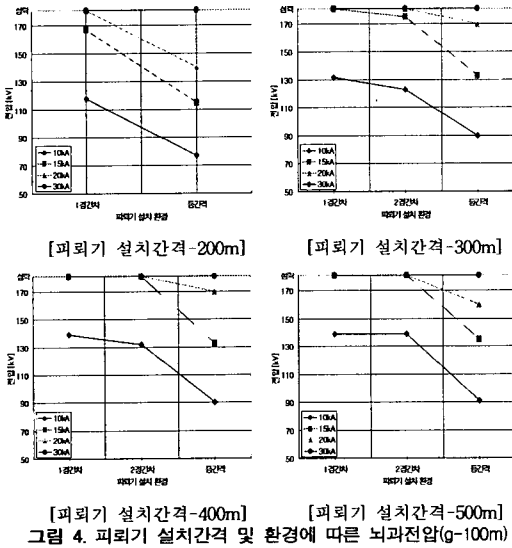


그림 4. 피뢰기 설치간격 및 환경에 따른 뇌과전압(g-100m)

그림 4는 각각 피뢰기가 200m-500m간격으로 설치되어 있을 때 뇌격 침입점에서 피뢰기 설치환경에 따른 뇌과전압을 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 모든 경우에서 1경간과 2경간차이에 비해 등간격 설치시 뇌과전압 차폐효과가 좋은 것으로 나타났으며, 20kA 등간격 설치시까지는 섬락이 발생하지 않았으나, 피뢰기 설치간격 300m 이상에서는 165kV 이상으로 섬락발생 가능성을 보였다. 30kA에서는 피뢰기 설치환경에 관계없이 뇌격 침입점에서 섬락이 발생하였다.

### 3.1.2 가공지선 매 200m 마다 접지

100m마다 접지된 가공지선의 각 접지개소에 적용되는 저항은 설계기준의 합성저항치 계산식에 의해 20.8Ω을 적용하였으며, 피뢰기는 각각 100m-500m 간격으로 다양하게 변화하였다. 100m간격으로 피뢰기 설치시, 피뢰기 설치간격이 가공지선 접지간격보다 조밀하기 때문에 가공지선 접지간격에 의한 영향은 나타나지 않는다. 따라서, 가공지선 접지간격 200m에서 피뢰기 100m 간격 설치시 뇌격전류 크기에 따른 뇌과전압은 표 1의 경우와 큰 차이가 없다. 이는 가공지선 접지간격 300m에서도 동일하게 나타난다.

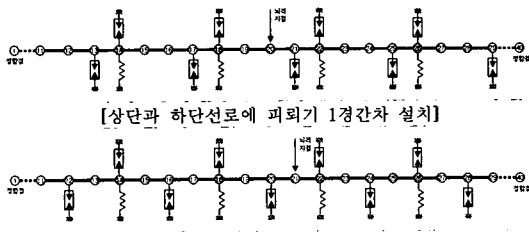


그림 5. 피뢰기 200m 간격 설치시 모델계통(g-200m)

그림 5에서는 피뢰기가 200m 간격으로 설치된 경우 각각 상단과 하단선로간에 1경간차와 등간격 설치시의 모델계통을 나타내었다. 그림 6은 피뢰기가 200m-500m 간격으로 설치되었을 때 피뢰기

기 설치환경에 따른 뇌격 침입점에서의 뇌과전압이다. 그림에서처럼 200m 피뢰기 설치시에 1경간차에서는 15kA에서 섬락이 발생하였으나 등간격에서는 20kA 이상에서 섬락이 발생하고 있다. 또한 피뢰기 300m 설치시에 1경간차는 10kA, 2경간차는 15kA 등간격에서는 20kA 이상에서 섬락이 발생하고 있다. 400m와 500m 피뢰기 설치시에는 1경간과 2경간차의 모든 뇌격전류에서 섬락이 발생하였으나, 등간격 설치시에는 20kA 이상에서 섬락이 나타나고 있다.

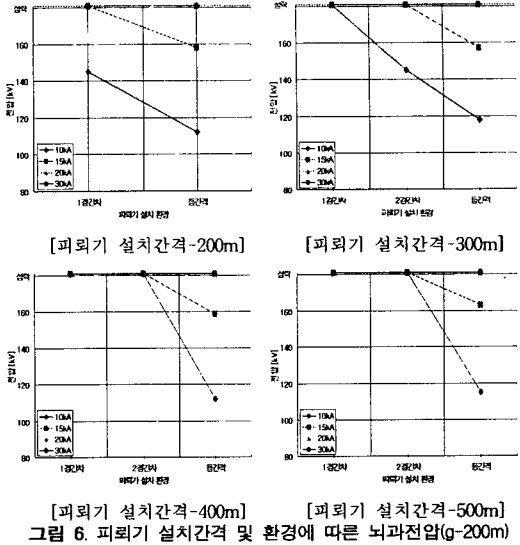


그림 6. 피뢰기 설치간격 및 환경에 따른 뇌과전압(g-200m)

### 3.1.3 가공지선 매 300m 마다 접지

300m마다 접지된 가공지선의 각 접지개소에 적용되는 저항은 설계기준의 합성저항치 계산식에 의해 13.9Ω을 적용하였으며, 피뢰기 설치환경 및 설치간격은 위의 경우와 동일하다.

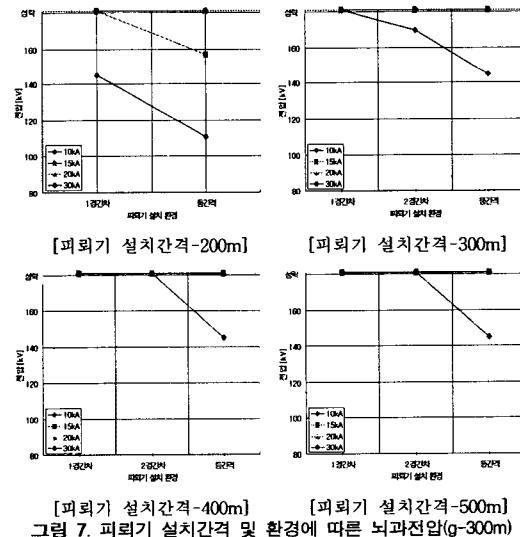


그림 7. 피뢰기 설치간격 및 환경에 따른 뇌과전압(g-300m)

그림 7은 가공지선이 300m마다 접지되어 있고, 피뢰기가 200m - 500m 간격으로 설치되었을 때 피뢰기 설치환경에 따른 뇌격 침입점에서의 뇌과전압이다. 그림에서처럼, 200m 피뢰기 설치시에 15kA에서 1경간차에서는 섬락이 발생하였으나 등간격에서는 157kV로 섬락이 발생하지 않았으며, 등간격 설치시 20kA에서 섬락이 발생하였다. 또한, 300m 간격으로 피뢰기 설치시에는 10kA 2경간차와 등간격 설치, 그리고 400m와 500m 피뢰기 설치시에는 10kA 등간격 설치를 제외한 모든 경우에서 섬락이 발생하고 있다.

표 2에서는 가공지선이 100m-300m 간격으로 접지되어 있고, 피뢰기가 100m-500m간격으로 설치되어 있는 2단선로에서 검토한 뇌과전압 총괄표이다. 표에서 x는 섬락을 의미한다. 표에서처럼 애자 절락을 기준으로 분석할 때 피뢰기 등간격 설치시가 1경간과 2경간차 설치시보다 차폐 효과가 우수함을 알 수 있고, 100m 간격

표 2. 직격뢰에 의한 2단선로 뇌과전압 검토 총괄표

검지간격	피뢰기 설치간격	100m		200m		300m		400m		500m	
		등간격	1경간	등간격	1경간	2경간	등간격	1경간	2경간	등간격	1경간
100m	10kA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15kA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	20kA	○	×	○	×	×	○	×	×	○	×
	30kA	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
200m	10kA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15kA	○	×	○	×	×	○	×	×	○	×
	20kA	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	30kA	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
300m	10kA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	15kA	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×
	20kA	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	30kA	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×

으로 피뢰기를 설치할 경우에는 모든 경우에서 선풍보호 효과가 나타나고 있다. 또한, 등간격 설치시를 기준으로 분석하면 가공지선을 100m마다 접지할 때 뇌격전류 20kA의 피뢰기 설치간격 500m까지 선풍 보호효과가 나타나며, 200m마다 접지시에는 15kA의 피뢰기 설치간격 500m, 300m마다 접지시에는 15kA의 피뢰기 설치간격 200m까지 선풍보호 효과가 나타나고 있다.

위와 같은 결과를 바탕으로, 가공지선 접지저항 값은 적용 가능한 현실성을 고려할 때 41.7Ω의 접지저항을 갖는 100m마다 접지하는 경우가 가장 적절하다고 사료되며, 뇌격전류 20kA를 기준으로 하여 피뢰기 설치간격 및 환경은 500m마다 설치되되 상단과 하단의 피뢰기는 등간격으로 설치하는 방안이 배전계통의 절연성능에 개선에 가장 효과적이라고 판단된다.

3.2 1단 선로

2단선로로 운전하고 있는 배전선로는 피뢰기 설치환경에 따라 선풍보호 효과가 큰 차이를 보였으나, 1단선로의 경우는 2단선로 피뢰기 설치보다 설치방법이 획일적이고, 이에 따른 각 전주에서의 접지점이 줄어들게 되므로 2단선로에 비하여 선로 및 기기에 더욱 가혹한 전압이 유기될 수 있다.

표 3. 직격뢰에 의한 1단선로 뇌과전압 검토 총괄표

가공지선 검지간격	피뢰기 설치간격	100m	200m	300m	400m	500m
100m	10kA	○	○	○	○	○
	15kA	○	○	×	×	×
	20kA	×	×	×	×	×
	30kA	×	×	×	×	×
200m	10kA	○	×	×	×	×
	15kA	○	×	×	×	×
	20kA	×	×	×	×	×
	30kA	×	×	×	×	×
300m	10kA	○	×	×	×	×
	15kA	○	×	×	×	×
	20kA	×	×	×	×	×
	30kA	×	×	×	×	×

표 4. 접지저항 변화에 따른 뇌과전압 검토 총괄표(총괄표)

검지간격 뇌격전류	피뢰기 설치간격 검지저항	100m	200m	300m	400m	500m
		100m	10Ω	○	○	○
15kA	20Ω	○	○	○	○	○
	30Ω	○	○	×	×	×
	5Ω/km	○	×	×	×	×
100m	10Ω	×	×	×	×	×
	20Ω	×	×	×	×	×
	30Ω	×	×	×	×	×
	5Ω/km	×	×	×	×	×

1단선로에서의 해석은 2단선로와 마찬가지로 가공지선 검지간격을 100m-300m간격으로 변화하고, 피뢰기를 100m-500m간격으로 설치할 때 뇌과전압을 분석하였으며, 분석방법은 2단선로와 동일하게 적용하였다. 표 3에서는 1단선로에서 검토한 뇌과전압 총괄표를 나타내었다. 표에서처럼, 2단선로에 피뢰기 등간격 설치에 비해 선풍보호 효과가 저하됨을 알 수 있으며, 가공지선 검지간격 100m를 기준으로 할 때, 10kA에서는 피뢰기 500m 설치시 까지 선풍보호가 나타났으나, 15kA에서는 피뢰기 설치간격 100m 설치를 제외한 경우, 그리고 20kA 이상에서는 모든 경우에서 선풍이 발생하고

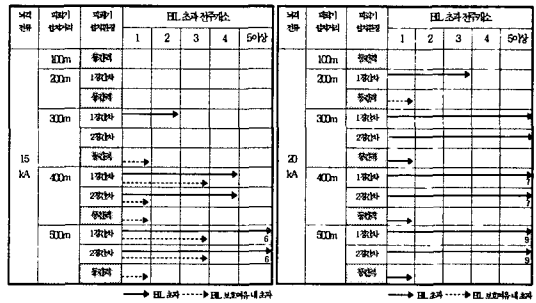
있다. 그러나 가공지선의 접지개소에서 저항을 변화할 때 표 4에서처럼 20kA에서는 효과가 나타나지 않았으나, 20Ω으로 검지저항을 낮출 경우 15kA의 뇌격전류에서 피뢰기 설치간격을 500m로 유지해도 선풍보호효과가 있는 것으로 나타났다.

위와 같은 결과를 바탕으로, 1단선로에서는 가공지선 검지간격으로 100m로 유지되되 각 개소의 접지저항을 낮추는 방안이 선풍보호에 유리하다고 판단된다.

3.3 변압기 및 개폐기 절연강도 검토

현재 적용하고 있는 변압기의 BIL은 125kV 이며 이에 보호여유 20%를 적용하면 안정적으로 보호할 수 있는 기준은 100kV이다. 또한, 설계기준-3800(배전선 내뢰기준)[3]에 의하면 IKL 11일 이상 지역에 설치된 주상변압기는 200m 이내에 피뢰기가 설치되어 있을 때 생략할 수 있다는 규정이 있다. 따라서 본 논문에서는 설계 기준을 근거로 3.1.1절에서 해석한 모델을 이용하여 변압기의 기준 절연 강도를 재검토 하였다. 그림 8에서처럼 2단선로에서 피뢰기 등간격 설치시 15kA에서는 피뢰기 300m 이상 설치시 부터 뇌격 침입점에서 변압기 BIL을 초과하지는 않으나 보호여유 내에 존재하는 것으로 나타났으며, 피뢰기 1경간차 설치는 300m, 2경간차 설치는 400m의 피뢰기 설치간격에서 변압기 BIL을 초과하고 있다. 20kA의 뇌격전류에서는 등간격은 피뢰기 설치간격 300m부터, 1경간차 설치는 200m부터 BIL을 초과하며, 15kA에 비해 BIL이 초과하는 개소도 증가하고 있다.

한편, 개폐기는 규정에 의해 양단에 피뢰기를 설치한다. 이러한 이유로 개폐기 설치지점에서 상-중성선간 전압과 개폐기 양단전압의 측정결과 피뢰기 제한전압이하로 저감됨을 확인했다.



[뇌격전류 - 15kA] [뇌격전류 - 20kA]  
그림 8. 2단선로 배전계통 변압기 뇌과전압 해석 총괄표

4. 결론

본 논문에서는 2단선로와 1단선로로 운전 중인 배전계통에 직격뢰 침입시 선로 및 기기에 미치는 절연성능을 검토하였다. 본 논문에서 분석한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 100m간격으로 피뢰기 설치시 피뢰기 설치간격이 가공지선 접지간격보다 조밀하기 때문에 가공지선 검지간격에 의한 영향은 나타나지 않는다.
- 2) 2단선로의 모든 경우에서 상단과 하단선로 사이에 피뢰기 1경간과 2경간차 설치보다 등간격 설치시 뇌과전압 차폐효과가 좋게 나타났다.
- 3) 2단선로 검토결과 가공지선은 매 100m마다 접지하는 것이 적절하다고 판단되며 뇌격전류 20kA를 기준으로 피뢰기 설치간격 및 환경은 500m마다 설치되되 등간격으로 설치하는 방안이 배전계통 절연 성능 개선에 가장 효과적이다.
- 4) 1단선로 검토결과 2단선로에 비해 가혹한 전압이 나타났으며, 가공지선은 매 100m마다 접지되되 다뤄 지역을 중심으로 검지저항의 저항을 낮추는 방안이 선풍보호에 유리하다.
- 5) 변압기 BIL 검토결과 피뢰기를 등간격으로 설치하는 유리하며 뇌격전류 20kA에서 피뢰기를 300m 이상으로 설치할 경우에는 등간격으로 설치해도 뇌격 침입점에서 기준절연강도를 초과한다.

[참고 문헌]

[1] KEPRI, "배전선 절연설계에 관한 연구", 1992, 3  
 [2] KEPCO, "배전분야 설계기준-3500(검지공사)" 1999, 7  
 [3] KEPCO, "배전분야 설계기준-3800(배전선 내뢰기준)" 1995, 10  
 [4] 電力中央研究所, "配電線 耐雷 設計 가이드"  
 [5] 전기협동연구, "배전선 뇌해대책" 제40권, 6호  
 [6] KEPCO, "배전기자재 운영업무 편람", 2000, 5  
 [7] 임용혁, "公務國外旅行歸國報告書", 한국전력, 1987, 11  
 [8] IEC 60071-1, "Insulation co-ordination (Part 1 : Definitions, principles and rules)", 1993, 12  
 [9] IEEE Std. 1313.1, "Standard for Insulation Coordination- Definitions, Principles, and Rules", 1996