論 文
53A-4-7

직격뢰 침입시 배전계통 절연설계

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

鄭 彩 均* · 金 相 國** · 李 鍾 範*** · 徐 在 鎬***
(Chae-Kyun Jung · Sang-Kuk Kim · Jong-Beom Lee · Je-Ho Seo)

Abstract - This paper describes the insulation coordination scheme of line in distribution system when the direct lightning surge strikes. The BIL that is applied to 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 analyses 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.

Key Words : Distribution systems, Lightning surge, Arresters, Shielding effect, BIL, Insulation design

1. 서 론

국내 배전계통은 주로 도심지 부근에 밀집되어 있으며 가공지선의 높이를 포함해 구조물의 높이가 높지 않기 때문에 뇌격이 침입하면 대부분의 써지는 대지로 흡인되어 실제로 계통에 미치는 영향은 약화되는 특성을 가지고 있다. 그러나 도심지 외각이나 산간, 해안지역에서 운전 중인 배전계통은 도심지와는 달리 선로 주변에 써지를 약화 시킬 수 있는 구조물이 적으므로 가공지선에 직격뢰가 침입할 가능성이 많다. 뿐만 아니라 직격뢰는 선로 주변, 수목, 대지 등에 침입한 뇌격에 간접적인 영향으로 정전유도나 전자유도에 의해 유도되는 유도뢰와는 달리 선로 및 지지물에 직격하는 써지로서 계통의 선로 및 기기의 절연파괴 위험이 매우 높은 특성이 있다[1].

그러나 국내 배전계통에서는 종합적인 관점 보다는 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 않은 경우도 나타나고 있다[2-4]. 이에 따라 국내 배전계통의 선로 및 기자재는 고장 예방 위주로 절연 기준이 설정되어 과잉설계의 우려가 있으며, 선로 공급용량 및 운전 여건이 변화함에 따라 합리적이고 경제적인 계통 운영을 위한 적정 절연 여부와 절연협조의 경제성에 대한 재검토가 요구되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 국내·외 낙뢰 특성과 국내 배전계통 구성 및 국내 특성에 맞은 뇌격 조건, 배전선 설계기준 등을 자세히 분석하였고[5-7], 이를 바탕으로 EMTP 해석모델을 수립하여 직격뢰에 대한 다양한 분석을 하였다. 또한 2단선로와 1단선로의 배전계통을 대상으로 피뢰기 접지간격, 접지저항의 변화에 따른 직격뢰 침입시 과전압을 상세히 해석하였으며 이러한 해석결과를 통하여 피뢰기 적용방안 뿐만 아니라 국내 배전계통의 선로에 적용하고 있는 절연강도를 재검토 하여 국내 배전계통 실정에 맞는 새로운 절연협조 기준방안을 제시하고자 한다.

* 正 會 員 : 圓光大 電氣工學科 博士課程
** 準 會 員 : 圓光大 電氣工學科 碩士課程
*** 正 會 員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 敎授 · 工博
接受日字 : 2003年 10月 21日
最終完了 : 2004年 2月 13日

2. 직격뢰 해석을 위한 배전계통 모델링

2.1 배전선로 모델

본 논문에서 검토한 선로 모델은 현장성을 고려하여 총 선로 긍장이 2km이며 전주사이의 표준 경간은 50m이고, 선로 양단은 정합되었으며 뇌격은 선로 중앙의 가공지선에 침입하는 것으로 하였다. 또한 가공지선과 중성선 및 중성선과 대지사이의 접속선과 접지선에 200Ω의 써지임피던스와 300m/μs의 전파속도를 고려하였다. 그림 1은 국내에서 운전중인 배전계통의 EMTP 해석을 위한 1단선로와 2단선로의 배치도이다.

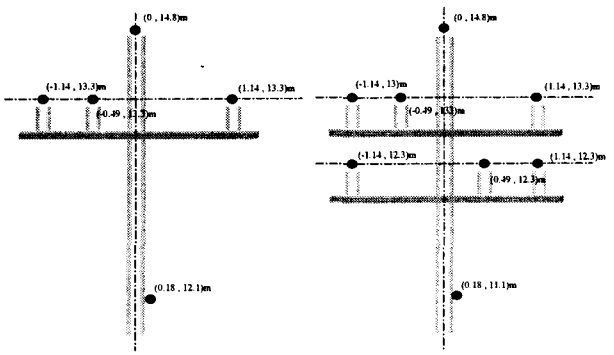


그림 1 배전선로 배치도
Fig. 1. Line configuration in distribution systems

설계기준-3500(접지공사)[2]와 설계기준-3800(배전선내뢰기준)[3]에 의해 가공지선과 중성선은 매 전주 접속하였으며, 가공지선의 접지저항은 식 (1)의 5Ω/km의 합성저항치를 적용하였다. 또한 피뢰기 접지저항은 25Ω을 적용하였으며, 피뢰기는 2단선로에서 동일전주 상단과 하단에서 동시에 피뢰기를 설치하지 않았고, 피뢰기가 설치된 전주의 가공지선 접지는 서로 공동 접지하였다. 또한, 본 논문에서는 다양한 선로조건에 대한 해석을 위해 가공지선은 100m-300m, 피뢰기 설치간격은 각각 100m-500m까지 변화시켰다.

$$1.2\left(\frac{1}{\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots\frac{1}{R_n}\right)}\right)=5[\Omega/km] \quad (1)$$

2.2 뇌격 모델

배전선로의 뇌격은 구조물의 높이가 낮기 때문에 뇌격 침입시 대부분의 써지는 대지로 흡인되므로 송전선에 비해 약화되는 특성을 보인다. 따라서, 배전선 직격뢰 해석에 필요한 뇌격전류의 파형은 그림 2와 같은 램프파로 국내·외 연구를 근거로 해서 파두장과 파미장은 2/70μs를 선정하였으며[5-9], 과도 임피던스는 400Ω, 뇌격전류 파고치(Ip)는 각각 10kA, 15kA, 20kA, 30kA를 적용하여 다양하게 분석하였다.

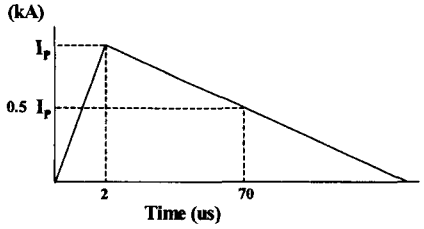


그림 2 뇌격전류 파형
Fig. 2 Waveform of lightning current

3. 국내 IKL도 분석

그림 3은 2002년 국내에서 발생한 연간 뇌격일수(IKL: Iso Keraunic Level)를 조사한 통계를 분석하여 나타내었다. 그림에서처럼 국내의 경우 경상도 일부 지역을 제외한 거의 모든 지역에서 IKL 11일을 초과하고 있다.

현재 적용되고 있는 설계기준 3800(배전선 내뢰기준)[3]의 내뢰대책 구분에 의하면 IKL 11일 이상을 다뢰지역, 11일 이하를 기타지역으로 나누어서 내뢰대책을 구분 시행한다는 내용이 명시되어 있다. 그러나 그림 3에서도 알 수 있듯이 산업화가 광범위하게 이루어지면서 여러 가지 환경적 요인과 기후변화 등으로 인해 연간 뇌격일수는 점차 증가하고 있으며 대부분의 지역에서 11일을 초과하고 있다. 따라서 효율적인 절연설계를 위해 다뢰지역을 규정하는 연간 뇌격일수에 대한 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

4. 가공지선과 피뢰기의 차폐 원리

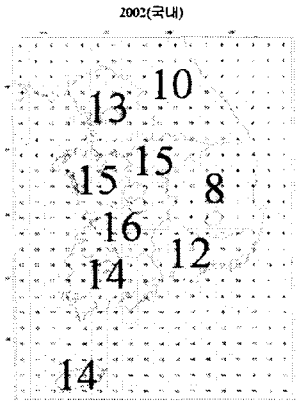


그림 3 국내 연간 뇌격일수(IKL)
Fig. 3 IKL of domestic

4.1 가공지선의 뇌격 차폐 원리

배전선로에 직격뢰가 침입하였을 때 가공지선의 뇌격 보호 원리는 유도뢰의 경우와 유사한 상도체와의 전자 결합에 의한 것이다. 가공지선은 뇌격전류를 분류하여 접지에 흐르는 전류를 감소시켜 대지전위의 상승을 억제한다[5-6].

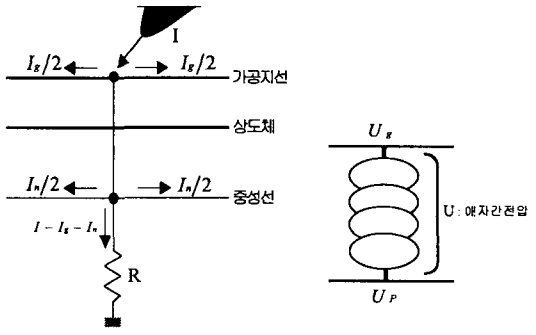


그림 4 가공지선이 접지된 전주에 뇌격 침입시 뇌격 특성
Fig. 4 Lightning characteristic at the grounded pole when the lightning strikes

$$U_p = \frac{1}{2} I_g Z_{pg} \quad (2)$$

$$U_g = (I - I_g - I_n)\cdot R \quad (3)$$

$$U = U_p - U_g = \frac{1}{2} I_g Z_{pg} - (I - I_g - I_n)R$$
$$= -IR + I_g\left(R + \frac{1}{2} Z_{pg}\right) + RI_n \quad (4)$$

여기서, Up : 상도체의 대지전위[kV]
Us : 가공지선의 대지 전위[kV]
U : 애자간 전압[kV]
Ig : 가공지선에 흐르는 뇌격전류[kA]
In : 중성선에 흐르는 뇌격전류[kA]
Zpg : 가공지선과 상도체간 상호 써지 임피던스[Ω]
R : 접지저항[Ω]

그림 4는 가공지선이 접지된 전주에 뇌격이 침입한 경우 직격뢰 보호원리를 나타내었다. 배전선에 뇌격이 침입할 때, 가공지선이 없는 경우 뇌격은 전주 접지로 흐르기 때문에 대지전위 상승은 (I×R)이 된다. 또한, 배전선을 지지하고 있는 애자간에는 -(I×R)이 유기되게 된다. 이 때, 이 전압이 절연내력을 초과하면 섬락이 발생하게 된다. 그러나, 가공지선이 설치된 경우 뇌격전류는 가공지선과 중성선의 양측으로 분류되며, 접지에는 (I-Ig-In)의 전류가 흐른다. 따라서, 가공지선을 설치함에 따라 대지간 전위는 R×(Ig+In)만큼의 전압이 적게 걸리게 되어 식 (4)처럼 애자간 전압도 억제되게 된다. 만약, 뇌격이 가공지선이 접지되어 있지 않은 전주에 침입할 경우에는, 콘크리트 전주 접지에 의해 접지저항 R이 커지게 되므로 대지전위 억제 효과는 떨어지고 그 결과, 애자간 전압의 억제 효과도 접지가 있는 경우에 비해 떨어지게 된다.

4.2 피뢰기의 뇌격 차폐 원리

피뢰기에 의한 직격뢰 보호는 보호 기기의 애자간 전압을 피뢰기 제한전압 이하로 억제하고, 섬락을 방지하기 위해서이다. 또한, 피뢰기가 설치된 전주에 뇌격이 침입할 경우 뇌격주의 접지점에 흐르는 전류로 인해 대지 전위가 상승하지만 대지간 전압은 피뢰기 제한전압으로 억제되어 섬락이 발생하지 않는다[5-6].

그림 5는 피뢰기가 설치된 전주에 뇌격이 침입하였을 때 뇌격의 특성을 나타내었다. 그림과 같이 배전계통에는 피뢰기가 여러 전주에 설치된다. 따라서, 피뢰기 설치점 사이에서 반사파의 영향이 나타나게 된다. 그림 5의 1호주에서 가공지선에는 Ig×Zg/2의 대지전압이 발생하고, 상도체에는 Ip×Zp/2의 전압이 발생한다. 배전선을 지지하고 있는 애자의 두 단자간에는 이 두 전압의 전압차가 유기된다. 여기서, Zg는 가공지선 자기 써지 임피던스이며, Ip는 피뢰기를 통해 배전선으로 유입되는 전류, Zp는 배전선 자기 써지 임피던스이다. 또한, 2호주에도 전진파와 반사파의 시간 지연으로 인해 대지전압이 저감되며, 애자간 전압도 억제되는 효과가 있다. 그리고 피뢰기 설치간격을 좁히고, 피뢰기 접지저항을 낮추게 되면 애자간 섬락발생율도 저감됨을 알 수 있다.

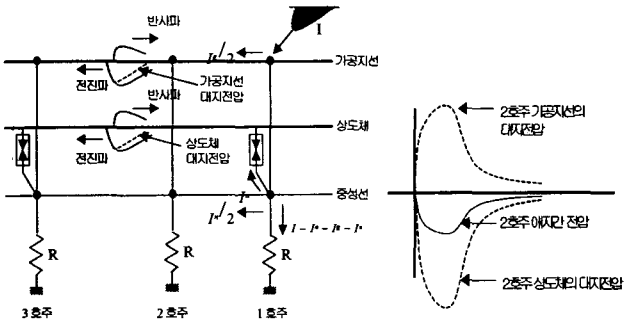


그림 5 피뢰기가 설치된 지점에서 뇌격침입시 뇌격 특성

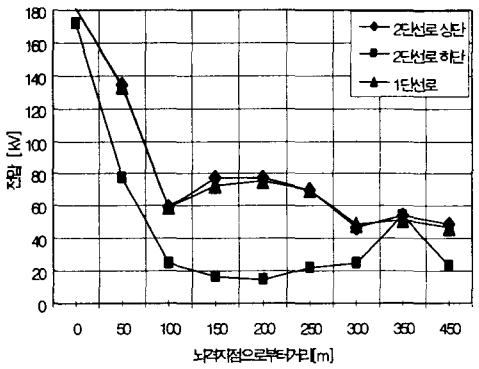
Fig. 5 Lightning characteristic at the position installed in arresters

5. 직격뢰에 의한 뇌과전압 분석

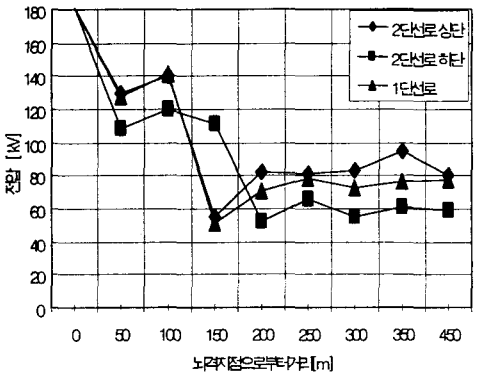
배전선 가공지선에 직격뢰가 침입한 경우 상도체의 대지전압 보다는 주로 애자간 섬락과 개폐기와 변압기 등과 같은 설비의 절연성능을 검토 대상으로 하였으며 애자간 전압의 섬락 기준은 폴리머 애자의 임계 섬락전압인 230kV 보다 낮은 LP애자의 180kV로 설정하였다[4].

5.1 검토모델 선정

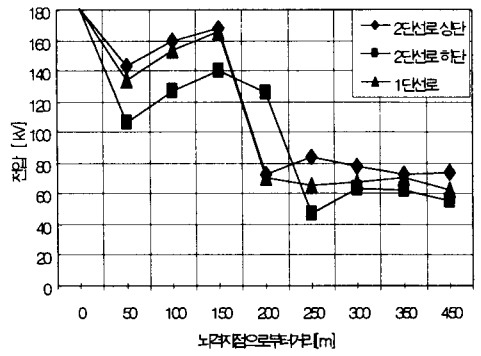
1단선로 또는 2단선로로 구성되어 있는 국내 배전계통은 매 전주 가공지선과 중성선이 접속되어 있으며, 일정 간격마다 5(Ω/km)의 접지저항으로 접지되어 있고, 기기 및 선로 보호를 위해 피뢰기가 설치되어 운용되고 있다. 본 논문에서는 배전계통에 직격뢰 침입시 기기 및 선로의 절연성능 평가를 위해 동일조건에서 2단선로의 상단과 하단 그리고 1단선로의 모델 중에서 가장 가혹한 경우를 검토 모델로 선정하였다. 이의 선정을 위해 뇌격전류 파고치는 20kA를 적용하였으며, 가공지선은 매 100m마다 접지되어 있고 피뢰기는 매 200m-500m마다 설치된 계통을 해석하여 비교하였다.



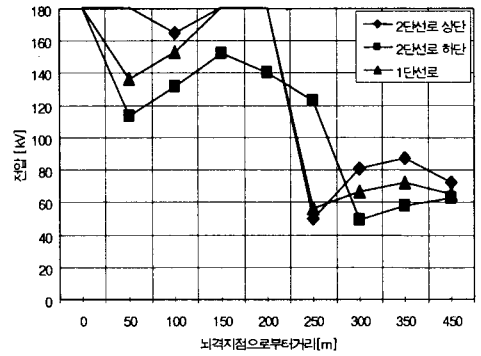
(a) 피뢰기 설치간격-200m



(b) 피뢰기 설치간격-300m



(c) 피뢰기 설치간격-400m



(d) 피뢰기 설치간격-500m

그림 6 검토모델 선정을 위한 2단선로와 1단선로 뇌과전압 비교

Fig. 6 Lightning overvoltage comparison of the double circuits and single circuit in distribution system

또한 배전선로 가공지선에 직격뢰가 침입한 경우 상도체에 대지전압 보다는 주로 애자간 섬락을 검토 대상으로 하였다. 배전계통에서 대부분의 기자재는 상과 중성선 사이에 설치되므로 본 논문에서도 애자간과 기자재가 설치되는 상-완철(중성선)간의 전압 위주로 검토하였으며, 해석은 전력계통 과도해석에 주로 사용되는 EMTP를 사용하였다.

동일 조건에서, 1단선로의 경우와 2단선로의 상단과 하단 선로에 유기되는 뇌과전압을 비교한 결과, 그림 6의 결과처럼 피뢰기 위치에 관계없이 2단선로의 상단과 1단선로에서 높은 전압이 유기 되었다. 따라서 본 논문에서는 가장 가혹한 경우인 2단선로의 상단선로와 1단선로를 검토 모델로 설정하였다.

5.2 2단 선로

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

5.2.1 가공지선 매 100m마다 접지

100m마다 접지된 가공지선의 각 접지개소에 적용되는 저항은 설계기준의 합성저항치 계산식에 의해 41.7Ω을 적용하였으며, 피뢰기는 각각 100m-500m간격으로 다양하게 변화하였다. 또한 피뢰기는 상단과 하단 간에 1경간차, 2경간차, 등간격으로 구분하여 피뢰기 설치환경에 따른 뇌과전압을 해석하였다. 그림 7은 피뢰기가 100m마다 설치된 경우의 모델계통이며, 표 1에서는 이 경우 뇌격거리와 뇌격전류 파고치에 따른 뇌과전압을 나타내었다.

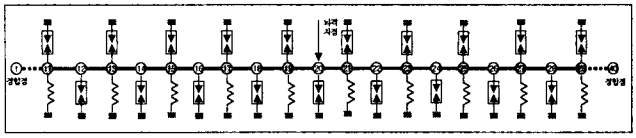


그림 7 피뢰기 100m 간격 설치시 모델계통(g-100m)

Fig. 7 Model system in case of arrester installation distance of 100m

표 1. 피뢰기 100m 간격 설치시 뇌격전류 크기에 따른 해석결과

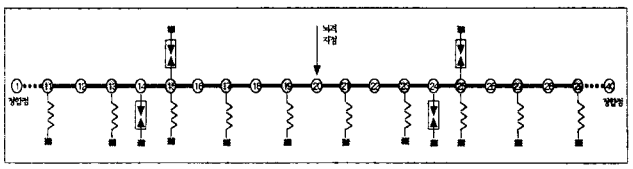
Table 1. Results according to lightning current in case of arrester installation distance of 100m

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

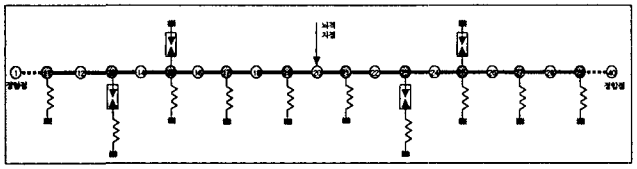
표 1에서처럼, 가공지선을 100m마다 접지하고 피뢰기를 100m마다 설치한 경우 뇌격전류 30kA이하에서는 애자 및 기기의 절연에 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

피뢰기 설치환경은 상단선로와 하단선로 간에 각각 1경간차와 2경간차, 등간격으로 구분하여 분석하였으며 그림 8에서는 매 500m마다 설치하였을 때의 모델 계통을 예로 나타내었다.

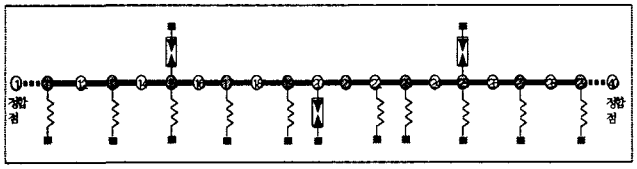
그림 9는 각각 피뢰기가 200m-500m간격으로 설치되어 있을 때 뇌격 침입점에서 피뢰기 설치환경에 따른 뇌과전압을 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 모든 경우에서 1경간과 2경간차이에 비해 등간격 설치시 뇌과전압 차폐효과가 좋은 것으로 나타났으며, 15kA 등간격 설치시 까지는 섬락이 발생하지 않았으나, 피뢰기 설치간격 300m 이상에서는 165kV 이상으로 섬락발생 가능성을 보였다. 20kA 이상에서는 뇌격 침입점과 인접전주에서 섬락이 발생하였다.



(a) 1경간차 설치시 모델계통



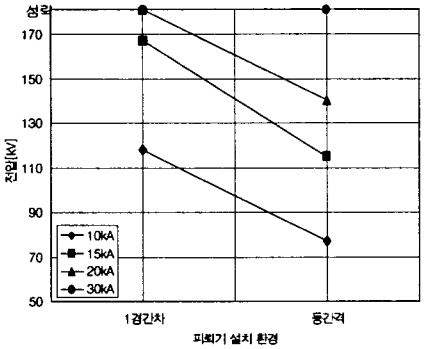
(b) 2경간차 설치시 모델계통



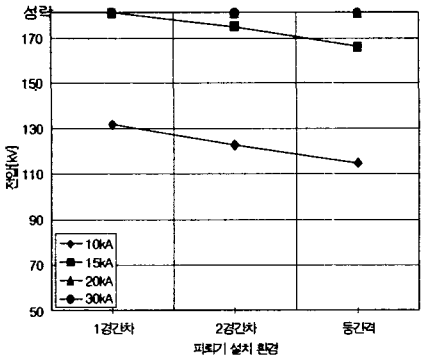
(c) 등간격차 설치시 모델계통

그림 8 해석 모델(피뢰기 설치간격-500m)

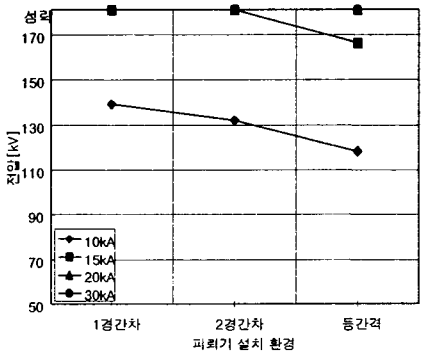
Fig. 8 Analysis model(arrester installation distance-500m)



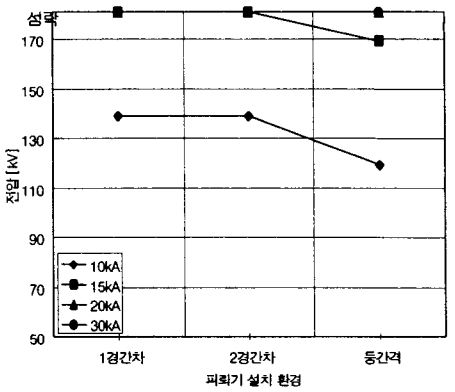
(a) 피뢰기 설치간격-200m



(b) 피뢰기 설치간격-300m



(c) 피뢰기 설치간격-400m



(d) 피뢰기 설치간격-500m

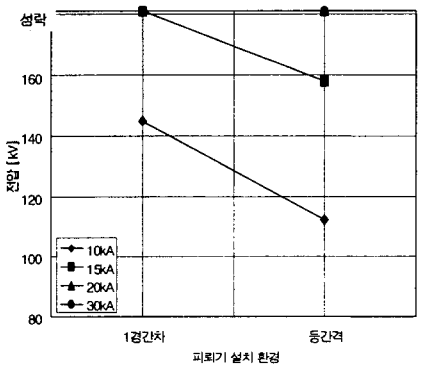
그림 9 피뢰기 설치간격 및 환경에 따른 뇌과전압

Fig. 9 Lightning overvoltage according to configuration and installation distance of arresters

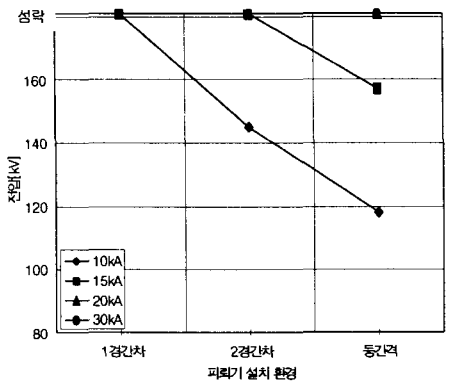
5.2.2 가공지선 매 200m마다 접지

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

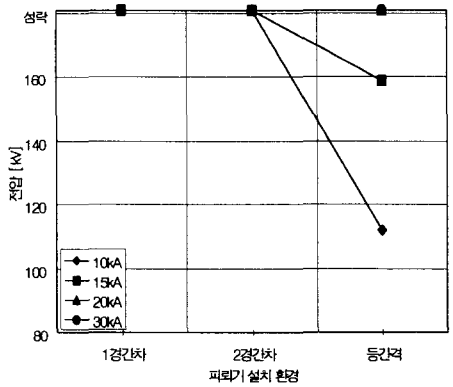
그림 10은 피뢰기가 200m-500m간격으로 설치되었을 때 피뢰기 설치환경에 따른 뇌격 침입점에서의 뇌과전압이다. 그림에서처럼 200m 피뢰기 설치시에 1경간차에서는 15kA에서 섬락이 발생하였으나 등간격에서는 20kA 이상에서 섬락이 발생하고 있다. 또한 피뢰기 300m 설치시에 1경간차는 10kA, 2경간차는 15kA 등간격에서는 20kA 이상에서 섬락이 발생하고 있다. 400m와 500m 피뢰기 설치시에는 1경간과 2경간차의 모든 뇌격전류에서 섬락이 발생 하였으나, 등간격 설치시에는 20kA 이상에서 섬락이 나타나고 있다.



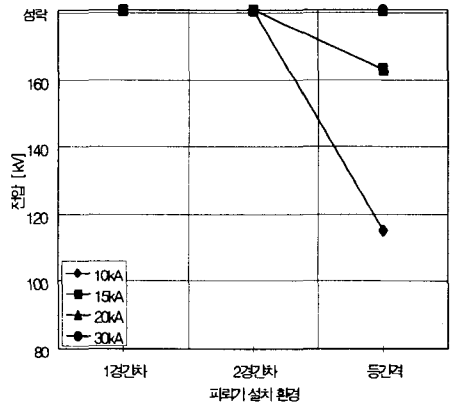
(a) 피뢰기 설치간격-200m



(b) 피뢰기 설치간격-300m



(c) 피뢰기 설치간격-400m



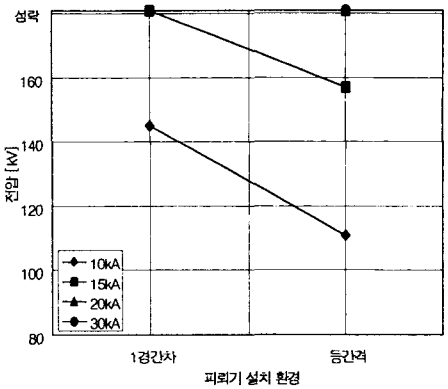
(d) 피뢰기 설치간격-500m

그림 10 피뢰기 설치간격 및 환경에 따른 뇌과전압

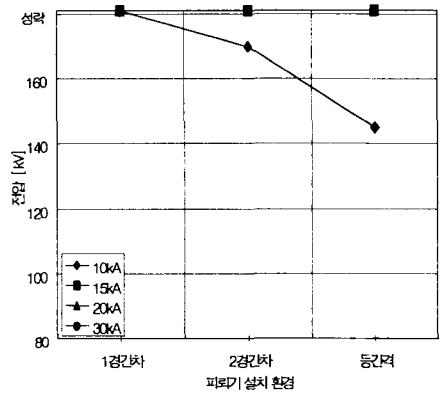
Fig. 10 Lightning overvoltage according to configuration and installation distance of arresters

5.2.3 가공지선 매 300m마다 접지

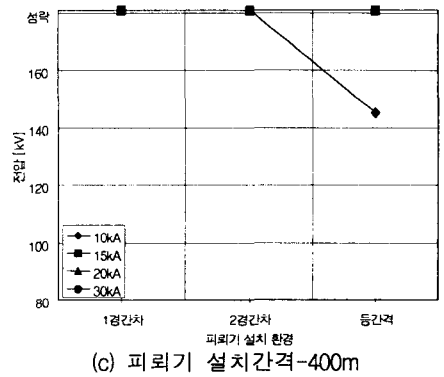
300m마다 접지된 가공지선의 각 접지개소에 적용되는 저항은 설계기준의 합성저항치 계산식에 의해 13.9Ω을 적용하였으며, 피뢰기 설치환경 및 설치간격은 위의 경우와 동일하다.



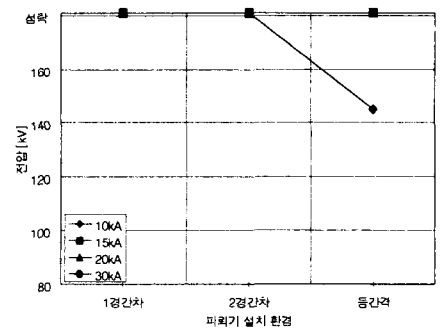
(a) 피뢰기 설치간격-200m



(b) 피뢰기 설치간격-300m



(c) 피뢰기 설치간격-400m



(d) 피뢰기 설치간격-500m

그림 11 피뢰기 설치간격 및 환경에 따른 뇌과전압

Fig. 11 Lightning overvoltage according to configuration and installation distance of arresters

그림 11은 가공지선이 300m마다 접지되어 있고, 피뢰기가 200m-500m간격으로 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, 300m간격으로 피뢰기 설치시에는 10kA, 2경간차와 등간격 설치, 그리고 400m와 500m 피뢰기 설치시에는 10kA 등간격 설치를 제외한 모든 경우에서 섬락이 발생하고 있다.

표 2에서는 가공지선이 100m-300m간격으로 접지되어 있고, 피뢰기가 100m-500m간격으로 설치되어 있는 2단선로에서 검토한 뇌과전압 총괄표이다. 표에서 ×는 섬락을 의미한다. 표에서처럼 애자간 섬락을 기준으로 분석할 때 피뢰기 등간격 설치시가 1경간과 2경간차 설치시보다 차폐 효과가 우수함을 알 수 있고, 100m간격으로 피뢰기를 설치할 경우에는 모든 경우에서 섬락보호 효과가 나타나고 있다. 또한, 등간격 설치시를 기준으로 분석하면 가공지선을 100m마다 접지할 때 뇌격전류 20kA의 피뢰기 설치간격 200m까지 섬락 보호효과가 나타나며, 200m마다 접지시에는 15kA의 피뢰기 설치간격 500m, 300m마다 접지시에는 15kA의 피뢰기 설치간격 200m까지 섬락보호 효과가 나타나고 있다. 표 3에서는 섬락이 발생하는 곳에서의 섬락 개소를 나타내었다.

표 2. 직격뢰에 의한 2단선로 뇌과전압 검토 총괄표
Table 2. Analysis result of lightning overvoltage of double circuits distributions systems by direct lightning surge

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

○ : 보호가능 × : 보호불가능

표 3. 직격뢰에 의한 2단선로 섬락 개수
Table 3. Flashover number of double circuits distributions systems by direct lightning surge

가공지선 접지간격	피뢰기 설치간격	100m	200m		300m			400m			500m		
	피뢰기 설치환경	등간격	1경간	등간격	1경간	2경간	등간격	1경간	2경간	등간격	1경간	2경간	등간격
100m	10kA												
	15kA				1			1	1		1	1	
	20kA		1		1	1	1	1	2	2	4	3	3
	30kA		2	1	2	2	2	3	3	2	3	4	5
200m	10kA				1			1	1		1	1	
	15kA		1		2	1		3	3		4	4	
	20kA		1	1	3	3	1	4	4	1	5	5	4
	30kA		1	2	4	2	3	5	4	3	5	5	5
300m	10kA				1			2	3		5	5	
	15kA		1		2	2	1	3	3	2	5	5	2
	20kA		1	1	2	2	1	3	3	3	4	4	3
	30kA		1	2	3	2	3	4	4	3	4	4	4

위와 같은 결과를 바탕으로, 가공지선 접지저항 값은 적용 가능한 현실성을 고려할 때 41.7Ω의 접지저항을 갖는 100m마다 접지하는 경우가 가장 적절하다고 사료되며, 뇌격전류 15kA를 기준으로 하여 피뢰기 설치간격 및 환경은 500m마다 설치하되 상단과 하단의 피뢰기는 등간격으로 설치하는 방안이 배전계통의 절연성능에 개선에 가장 효과적이라고 판단된다.

5.3 1단 선로

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

표 4. 직격뢰에 의한 1단선로 뇌과전압 검토 총괄표
Table 4. Analysis result of lightning overvoltage of single circuit distributions systems by direct lightning surge

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

○ : 보호가능 × : 보호불가능

1단선로에서의 해석은 2단선로와 마찬가지로 가공지선 접지간격을 100m-300m간격으로 변화하고, 피뢰기를 100m - 500m간격으로 설치할 때 뇌과전압을 분석하였으며, 분석 방

표 5. 직격뢰에 의한 1단선로 섬락개수
Table 5. Flashover number of single circuit distribution systems by direct lightning surge

가공지선 접지간격	피뢰기 설치간격	100m	200m	300m	400m	500m
100m	10kA					
	15kA		1	1	1	1
	20kA	1	1	1	1	1
	30kA	1	2	2	3	3
200m	10kA		1	1	1	1
	15kA		1	2	3	3
	20kA	1	1	3	4	5
	30kA	1	1	3	2	5
300m	10kA		1	1	2	5
	15kA		1	1	4	5
	20kA	1	1	2	3	4
	30kA	1	2	1	4	5

표 6. 접지저항 변화에 따른 뇌과전압 검토 총괄표
Table 6. Analysis result of lightning overvoltage according to earth resistance

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

○ : 보호가능 × : 보호불가능

법은 2단선로와 동일하게 적용하였다. 표 4는 1단선로에서 검토한 뇌과전압 총괄표이며 표 5에서는 섬락이 발생한 곳에서의 섬락개소를 나타내었다. 표에서처럼, 2단선로에 피뢰기 등간격 설치에 비해 섬락보호 효과가 저하됨을 알 수 있으며, 가공지선 접지간격 100m를 기준으로 할 때, 10kA에서는 피뢰기 500m 설치시 까지 섬락보호가 나타났으나, 15kA에서는 피뢰기 설치간격 100m 설치시를 제외한 경우, 그리고 20kA 이상에서는 모든 경우에서 섬락이 발생하고 있다. 그러나 가공지선의 접지개소에서 저항을 변화할 때 표 6에서처럼 20kA에서는 효과가 나타나지 않았으나, 20Ω으로 접지저항을 낮출 경우 15kA의 뇌격전류에서 피뢰기 설치간격을 500m로 유지해도 섬락보호효과가 있는 것으로 나타났다. 위와 같은 결과를 바탕으로, 1단선로에서는 가공지선 접지간격으로 100m로 유지하되 각 개소의 접지저항을 낮추는 방안이 섬락보호에 유리하다고 판단된다.

6. 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 검토

국내 설계기준-3800(배전선 내뢰기준)에 의하면 가공지선 접지는 "매 200m이내마다 중성선과 공용하여 접지저항을 50Ω 이하로 접지하고 매 전주마다 가공지선과 중성선과의 상호 접속한다. 단, 기기가 설치되어 있을 때는 기기 접지저항을 가공지선 접지저항치로 한다" 라는 규정이 있고, 피뢰기 접지는 "접지계통 선로에 시설하는 피뢰기의 접지선은 중성선에 연결하고 그 전주에 접지한다. 이때 접지저항치는 표 7과 같이 하며, 가공지선 접지극과 상호간격은 1m로 한다" 라는 규정에 의해 접지한다.

표 7. 접지저항치
Table 7. Earth resistance

구 분	피 뢰 기	가 공 지 선
선로 보호용	25Ω	50Ω
주상기기 보호용	25Ω	25Ω
입상케이블 보호용	10Ω	25Ω

6.1 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 검토(2단선로)

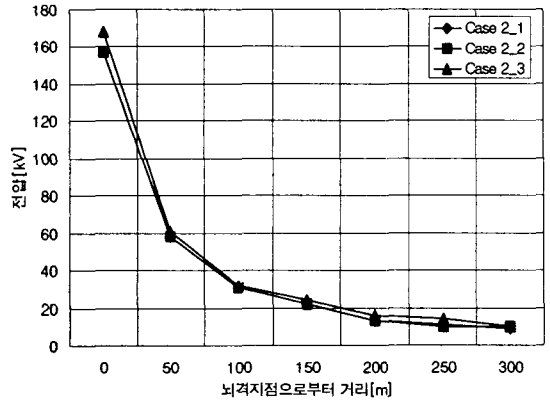
본 논문에서는 위와 같은 현행 기준에 대한 검토를 위해 아래와 같이 3개의 케이스를 설정하여 비교 분석하였다. 뇌격전류는 15kA와 20kA를 적용하였으며 가공지선 접지간격은 매 100m마다 접지, 그리고 피뢰기는 매 500m마다 설치하였다.

- Case 2-1 : 가공지선과 중성선은 매 전주 접속하며 중성선은 200m마다 5Ω/km(20.8Ω)으로 접지하고 가공지선도 200m마다 중성선과 공용하여 50Ω으로 접지한다. 또한 피뢰기 접지와 중복될 경우 낮은 접지저항을 적용 한다.
- Case 2-2 : 가공지선과 중성선은 매 전주 접속하며 중성선은 200m마다 5Ω/km(20.8Ω)으로 접지하고 가공지선도 200m마다 중성선과 공용하여 50Ω으로 접지한다. 또한 피뢰기 접지가 가공지선 접지와 공용될 경우 각각의 접지저항값으로 서로 분리하여 병렬로 접지한다. (현행기준)
- Case 2-3 : 가공지선과 중성선은 매전주 접속하며 가공지선의 접지는 매 100m마다 5Ω/km(41.7Ω)으로 접지하고 피뢰기 접지와 중복될 경우 낮은 접지저항을 적용 한다.

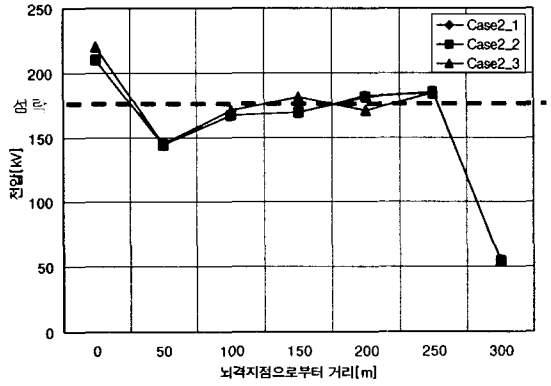
표 8에서는 2단선로에서 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 뇌과전압 검토 결과를 나타내었다. 여기에서 알 수 있듯이 중성선과 가공지선을 각각의 규정에 따라 접지하고 피뢰기 접지가 가공지선 접지와 공용될 경우 각각의 접지저항값으로 서로 분리하여 단독으로 접지하는 방안(Case 2-2)과 피뢰기 접지와 중복될 경우 낮은 접지 저항을 적용하는 방안(Case 2-1)을 서로 비교할 때 뇌격전류 15kA와 20kA 모두에서 거의 차이가 없으며, 이는 가공지선과 중성선을 일괄적으로 41.7Ω으로 접지하는 Case 2-3과 비교하여도 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 그림 12 에서도 확인할 수 있다. 따라서 시공상의 어려움 등을 감안할 때 Case 2-3의 방안이 유리할 것으로 사료된다.

표 8. 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 검토결과 (2단선로)
Table 8. Analysis result according to earth types of overhead grounding wire and arrester (double circuits distribution systems)

뇌격거리 [m]	발생전압 [kV]					
	Case 2-1		Case 2-2		Case 2-3	
	뇌격전류 크기					
	15kA	20kA	15kA	20kA	15kA	20kA
0	157	섬락 (210)	157	섬락 (210)	168	섬락 (220)
50	58	144	58	144	61	145
100	31	167	31	167	32	171
150	22	169	22	169	24	섬락 (181)
200	13	섬락 (182)	13	섬락 (181)	16	171
250	11	섬락 (184)	10	섬락 (185)	14	섬락 (184)
300	9	55	10	54	10	55



(a) 뇌격전류 15kA



(b) 뇌격전류 20kA

그림 12. 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 검토 결과(2단 선로)

Fig. 12. Analysis result according to earth types of overhead grounding wire and arrester(double circuits distribution systems)

6.2 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 검토(1단선로)

본 절에서는 6.1절과 동일 조건에서 1단선로의 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 검토결과를 나타내었다. 뇌격전류는 15kA를 적용하였으며 가공지선은 매 100m마다 접지하였고, 피뢰기는 매 500m마다 설치하였다.

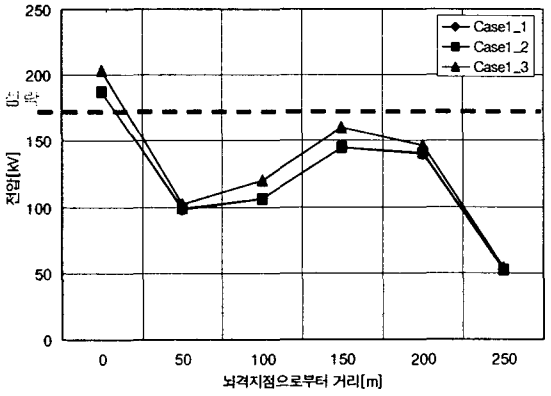
- Case 1-1 : Case 2-1과 내용 동일
- Case 1-2 : Case 2-2와 내용 동일
- Case 1-3 : Case 2-3과 내용 동일

표 9에서는 1단선로에서 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 뇌과전압 검토 결과를 나타내었다. 2단선로의 결과와 마찬가지로 Case 1-1과 이의 피뢰기 접지가 가공지선 접지와 공용될 경우 각각의 접지저항 값으로 서로 분리하여 접지하는 Case 1-2는 거의 차이가 없었으며, 가공지선과 중성선을 일괄적으로 41.7Ω으로 접지하는 Case 1-3과 비교하여도 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 2단선로의 경우와 마찬가지로 시공상의 어려움을 감안할 때 Case 1-3의 방안이 유리할 것으로 사료된다.

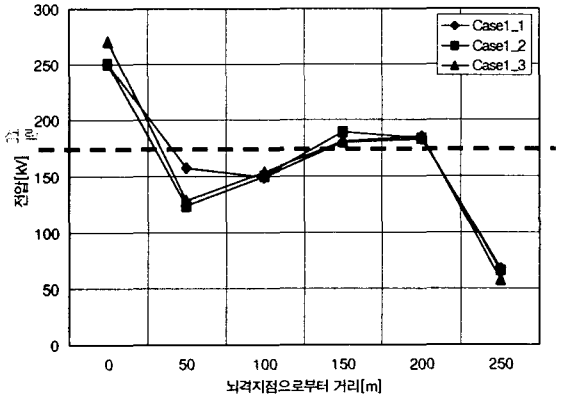
표 9. 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 검토결과 (1단선로)

Table 9. Analysis result according to earth types of overhead grounding wire and arrester (single circuit distribution systems)

뇌격거리 [m]	발생전압 [kV]					
	Case 1-1		Case 1-2		Case 1-3	
	뇌격전류 크기					
	15kA	20kA	15kA	20kA	15kA	20kA
0	섬락 (187)	섬락 (250)	섬락 (187)	섬락 (250)	섬락 (203)	섬락 (271)
50	98	157	99	123	102	128
100	106	149	106	150	120	153
150	145	섬락 (180)	145	섬락 (189)	160	섬락 (181)
200	140	섬락 (182)	140	섬락 (183)	146	섬락 (185)
250	52	68	52	66	54	57



(a) 뇌격전류 15kA



(b) 뇌격전류 20kA

그림 13 가공지선 및 피뢰기 접지방식에 따른 검토 결과(1단 선로)

Fig. 13 Analysis result according to earth types of overhead grounding wire and arrester (single circuit distribution systems)

7. 결 론

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

1) 효율적인 절연설계를 위해 다뢰지역을 규정하는 연간 뇌격일수에 대한 재검토가 필요할 것으로 사료된다.
2) 100m간격으로 피뢰기 설치시 피뢰기 설치간격이 가공지선 접지 간격보다 조밀하기 때문에 가공지선 접지간격에 의한 영향은 나타나지 않는다.
3) 2단선로의 모든 경우에서 상단과 하단선로 사이에 피뢰기 1경간과 2경간차 설치보다 등간격 설치시 뇌과전압 차폐효과가 좋게 나타났다.
4) 2단선로 검토결과 가공지선은 매 100m마다 접지하는 것이 적절하다고 판단되며 뇌격전류 20kA를 기준으로 피뢰기 설치간격 및 환경은 500m마다 설치하되 등간격으로 설치하는 방안이 배전계통 절연 성능 개선에 가장 효과적이다.
5) 1단선로 검토결과 2단선로에 비해 가혹한 전압이 나타났으며, 가공지선은 매 100m마다 접지하되 다뢰 지역을 중심으로 접지지점의 저항을 낮추는 방안이 섬락보호에 유리하다.
6) 가공지선 접지가 피뢰기 접지와 동일 전주에서 중복될 경우 각각의 접지저항치로 독립적으로 접지하는 방안(현행기준)과 일괄적으로 5Ω/km의 중성선 접지저항치로 적용하는 방안을 비교할 때 큰 차이가 없어 일괄적으로 접지하는 방안이 유리할 것으로 판단된다. 단, 접지가 중복될 경우 기기접지와 가공지선 접지 중 낮은 접지저항 값을 선정한다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 원광대학교의 교비지원에 의하여 연구됨

참 고 문 헌

[1] KEPRI, "배전선 절연설계에 관한 연구", 1992. 3
[2] KEPCO, "배전분야 설계기준-3500(접지공사)" 1999. 7
[3] KEPCO, "배전분야 설계기준-3800(배전선 내뢰기준)" 1995. 10
[4] KEPCO, "배전기자재 운영업무 편람", 2000. 5
[5] 電力中央研究所, "配電線 耐雷 設計 ガイド", 2002. 2
[6] 전기협동연구, "배전선 뇌해대책" 제40권, 6호
[7] 임용혁, "公務國外旅行歸國報告書", 한국전력, 1987. 11
[8] S. Yokoyama and A. Asakawa "Experimental Study of Response of Power Distribution Lines to Direct Lightning Hits" IEEE Transmission and Distribution Committee, september 1, 1988
[9] T. E. McDermott "Lightning Protection of Distribution Lines" IEEE/PES 1993 Winter Meeting, September 1, 1992
[10] IEC 60071-1, "Insulation co-ordination (Part 1 : Definitions, principles and rules)", 1993. 12
[11] IEC 60071-2, "Insulation co-ordination (Part 2 : Application guide)", 1996. 12
[12] IEEE Std. 1313, "IEEE Standard for Power Systems Insulation Coordination" Reaffirmation and Redesignation of ANSI C.92.1, 1982
[13] IEEE Std. 1313.1, "Standard for Insulation Coordination- Definitions, Principles, and Rules", 1996
[14] IEEE Std. 1313.2, "IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination", 1999

저 자 소 개

정 채 균 (鄭 彩 均)

1973년 7월 14일 생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2002년~현재 동 대학원 박사과정.
Tel : (063)850-6735
E-mail : chekyun@wonkwang.ac.kr

김 상 국 (金 相 國)

1977년 5월 28일 생. 2002년 원광대 공대 전기전자공학부 졸업. 2002년~현재 동 대학원 석사과정.
Tel : (063)850-6735
E-mail : santafe39@empal.com

이 종 범 (李 鍾 範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987~1990년 한국전기연구원 지중송전연구실 실장. 1997~1998년 미국 Texas A&M University 객원교수. 현재, 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수.
Tel : (063)850-6735
E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr

서 재 호(徐 在 鎬)

1948년 8월 6일 생. 1973년 명지대 공대 전기공학과 졸업, 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박), 1977년-1979년 대전공업전문대학 조교수, 1980~현재 원광대 공대 전기전자및정보공학부 교수
Tel : (063)850-6733
E-mail : jehoso@wonkwang.ac.kr