

혼합 배전선로에 직격낙뢰시 전주와 케이블직선접속재가 케이블 동심중성선 전위상승에 미치는 영향

A Study of Concentric-Neutral Line Voltage Increase Related by Pole and Cable Joint When Lightning Overvoltage Injected in Combined Distribution Line

전 용 주[†] · 전 명 수^{**}
(Yong-Joo Jeon · Myung-Su Jeon)

Abstract - In case of Lightning occurs in Domestic combined distribution line, normally the voltage for the neutral line increase dramatically. General connection for underground cable is bundled common earth type so the lightning over voltage increase at the concentric-neutral line is not big enough to give impact on cable sheath. But in case of Non bundled common earth type it is necessary to analyze the phenomena on cable sheath caused by lightning overvoltage. Especially pole and cable joint are the core factor to consider.

In this paper concrete pole and cable joint were evaluated in case of Non bundled common earth type combined distribution Line. EMTP simulation model has been designed and several case study were made. Also several experimental test were made to verify the simulation result.

Key Words : EMTP, Concentric-neutral line, Combined distribution line, Lighting over voltage, Concrete pole

1. 서 론

국내 배전계통은 22.9kV 다중접지로 전주 상부 가공지선이 직격낙뢰를 감당하는 것으로 절연협조 설계되며 접지효과를 높이기 위해 매 전주마다 가공지선 중성선 콘크리트전주를 통합 접지한다[1].

이와 같은 구성은 낙뢰전류를 가공지선 중성선 접지선과 콘크리트전주로 분산 유도하여 전위상승 완화 및 설비 파손 예방 효과가 있다. 낙뢰전류는 상용주파수 전류와는 다른 진행파 전류로 서지임피던스(특성임피던스)와 관계되며 물체의 재질보다는 형상의 영향을 매우 크게 받는다[2][3].

특히 다중접지 구성으로 전주를 통한 분류효과는 단독 접지선 대비 2배에 이르러 특성임피던스 측면에서는 1/2 정도로 작음을 의미한다[4]. 따라서 뇌서지 해석 시 접지선을 포함하여 콘크리트 전주의 모델링이 필요한 절대적 이유가 된다.

한편 가공선로와 연결되는 지중케이블의 경우 CNCV케이블 동심중성선의 접지방식에 따라 중성선의 서지임피던스에 영향을 발생시킨다. 특히 편단접지 또는 비일괄공동 접지방식의 경우는 접속개소에서 동심중성선이 개방되어 직선접속재의 외부 반도전층을 통하여 접지회로가 형성되므로 서지임피던스 특성은 일괄공동

접지와 다르게 된다[5].

본 논문에서는 국내의 배전계통 시스템을 기본으로 콘크리트 전주와 직선접속재의 외부 반도전층을 고려한 실계통을 EMTP를 이용하여 모델링하고 직격뢰가 가공선로에 유입 시 지중선로의 접속점에 미치는 영향에 대해 구성요소별 이론수식과 현장실험데이터를 적용하여 시뮬레이션하였다. 또한 참고 비교를 위해 전력선에 낙뢰 유입 시 최인접 전주와 케이블 입상전주에 유기되는 전압의 크기에 대해서도 함께 시뮬레이션 하였다.

2. 국내 배전선로 내리기준 및 장애현황

전력계통의 이상전압은 상용주파 과전압과 서지성 과전압으로 나뉘며 전력설비의 절연강도 설계는 상용주파 내전압과 충격내전압이 적용된다. 상용주파의 경우 건전상 과전압이 수배에 이르는 반면 서지성의 경우는 수십배에 달할 수 있다.

그러므로 상용주파내전압은 설비의 절연강도로 감당 하게하고 충격내전압은 가공지선 또는 피뢰기를 병행 설치하여 서지성 이상전압의 크기를 억제하여 운용하고 있다[1].

국내에 적용되는 피뢰기와 가공지선의 접지저항 기준은 표 1과 같으며 가공지선 중성선, 콘크리트전주, 강관전주, 피뢰기, 변압기의 접지선은 일괄하여 접지 한다. 표 2에는 22.9kV 난연동심중성선 절연케이블 전압의 정격과 절연강도를 나타내었다.

한편 국내의 낙뢰특성은 산간 해안 지역에서 주로 발생하고 부극성 80% 정극성 15% 뇌운간 방전 5%의 비율로 나타난다.

[†] Corresponding Author : Technology Convergence Head Quarter KORAIL, Korea

E-mail : elecbank@korail.com

* Elec-consulting, Korea

Received : April 18, 2018; Accepted : May 23, 2018

표 1 국내배전선로의 접지저항 기준

Table 1 Domestic Distribution System Earth Resistance

구 분	피뢰기	가공지선
선로보호용	25[Ω]	50[Ω]
주상기기보호	25[Ω]	25[Ω]
입상케이블보호	10[Ω]	25[Ω]

* 가공지선은 매 200m마다 50Ω이하로 접지

표 2 22.9kV 난연 동심중성선 절연케이블 정격 및 절연강도
Table 2 22.9kV Concentric-Neutral Line Insulation Cable rating and insulation level

전압(kV)			충격 내전압(kV)		교류내전압(kV)			직류 내전압(kV)
공칭	정격	최고	절연체	시스	장시간	절연체	시스	절연체
22.9	13.2	25.8	150	40	80	52	4	100

뇌격전류의 크기는 60kA 이하가 98%이고 그 중에서 20~60kA가 대부분을 차지한다. 1995~1999년(5년간)의 낙뢰로 인한 고장발생은 배전선로 고장의 약 7~8% 수준이며 이중 가공전선은 33% 애자류 27%, 피뢰기 16%, 변압기 9%를 차지하고 있다[6].

3. 직격뢰 해석조건 및 주요소자 검토

3.1 배전선로 해석조건

혼합배전선로의 구성은 가공 3 km, 지중 1.5 km의 길이에 가공부분은 한전 배전선로설계기준(경간 50[m])을 준용하였으며, 지중은 CNCV 325 mm를 250[m] 간격으로 비일괄 공동접지 방식으로 구성하였다. 그림 1에 혼합배전선로 구성 개략도를 나타내었다.

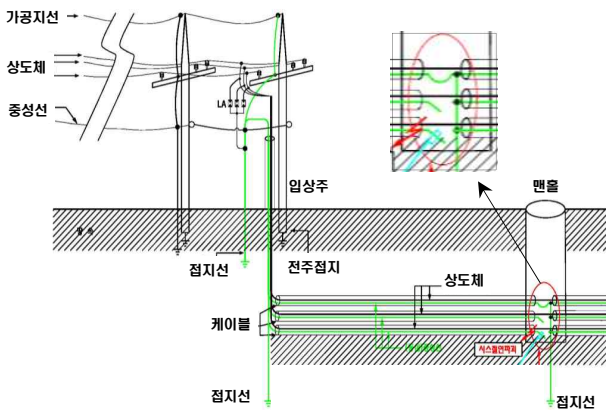


그림 1 혼합배전선로 구성 개략도
Fig. 1 Configuration of combined distribution system

3.2 시뮬레이션 주요 구성요소 검토

혼합배전선로의 낙뢰특성에 대한 EMTP 시뮬레이션은 전주와 지중케이블 접속재에 대한 모델 구성에 따른 특성임피던스의 반영 유무에 따라 지중선로 접속점의 전위상승에 큰 차이가 발생된다.

3.2.1. 콘크리트전주 특성임피던스 해석

콘크리트의 몸체 내부에는 조밀하게 같은 간격으로 철근이 매립되어 있고 전주길이의 1/6이 땅속에 묻혀 있어 접지체로 해석된다[3][7].

이론적 계산은 최초 Jordan 방정식을 기본으로 Jordan 수정방정식, CRIEPI 방식, IEC 60071-4에 의한 해석방식 등이 다양하게 특성에 따라 소개되어 적용되고 있다. 다만 각 수식에 의해 계산된 특성임피던스는 상호 유사하게 나타나 어떤 수식을 적용하여도 해석상에 큰 차이를 유발하지 않으며, 철탑이나 전주는 물론 구조체의 재질에 차이를 두지 않는다. 각 수식별 계산결과를 표 3에 비교 나타내었다[8].(조건 : 전주 r=0.138[m], h=16[m]/접지선 OW25mm, r=3.2mm)

표 3 각 방식으로 계산된 특성임피던스
Table 3 Characteristic Impedance estimated from each method

특성임피던스	Jordan	Jordan수정	CRIEPI
전 주	266[Ω]	308[Ω]	200[Ω]
가공지선 ↔ 중성선	344[Ω]	427[Ω]	200[Ω]
중성선 ↔ 대지	343[Ω]	517[Ω]	300[Ω]

* IEC60071-4에 의한 전주 특성임피던스 : 306[Ω]

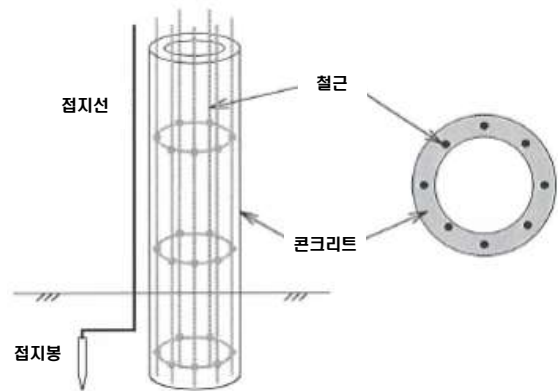


그림 2 콘크리트전주의 전기적 회로 구성
Fig. 2 Electric Configuration of Concrete Pole

표 3에 나타난 바와 같이 전주는 접지선(가공지선 ↔ 대지)과 비교 시 특성임피던스 측면에서 대략 32% 수준으로 시뮬레이션 모델 구성시 상호 병렬 회로를 구성하여 반영이 필요하다. 이와 같은 이론수식을 뒷받침하기 위해 콘크리트전주에 13~15kV의 ICG

전압을 인가하여 임펄스응답시험을 시행하고 특성임피던스 확인하였다[4]. 그 결과 모든 경우에서 전주에 섬락이 발생함을 확인할 수 있었으며 이는 접지선과 전주에 전류가 분배되어 흐르는 것을 의미하며 이론적 계산식과 일치하는 결과이다.

그림 2에 콘크리트전주의 전기적 회로 구성도를 나타내었다.

3.2.2. 직선접속재의 특성임피던스 해석

22.9kV 배전용 CNCV케이블 직선접속재의 외부반도전층은 정상시에는 양단저항이 5,000 Ω 이하(2,000~3,000Ω)이나 케이블접속 개소에서 절연이 파괴되면 고장전류 통전(10,000[A], 10 Cycle)이 가능토록 규정되어 있다[9]. 이는 절연 파괴 시 외부반도전층의 저항이 급격하게 감소(1Ω 이하)되는 것을 의미한다. 그럼에도 현재까지 국내 배전계통은 낙뢰 등의 서지전압에 대해 일괄공동접지방식이 적용되는 관계로 직선접속재를 고려할 필요가 없어 시뮬레이션 모델에서는 반영된 사례가 없었다. 따라서 이에 대한 이론상 계산을 검증하기 위해 일본의 Noiseken 연구소에 의뢰하여 국내 22.9 kV 배전용 CNCV케이블 직선접속재 외부반도전층 특성임피던스를 실측하였다.

실측 조건은 뇌서지 파형 조건을 준용하여 개방전압파형 1.2/50μs, 단락전류파형 8/20μs를 사용하였다. 실험결과 직선접속재의 외부반도전층의 특성임피던스값은 365~380Ω의 결과값을 얻었다 표 4에 시험단계별 측정전압과 전류 및 특성임피던스값을 나타 내었으며 그림 3에 시험장비, 시료를 포함한 시험전경을 나타내었다[5].

표 4 직선접속재 특성임피던스 실험값

Table 4 Characteristic impedance test result for cable joint

시험레벨	무부하		시험설비 연결		
	측정전압	측정전류	측정전압	측정전류	임피던스
40[A] (0.1[kV])	0.09[kV]	34.4[A]	0.08[kV]	-	-
80[A] (0.2[kV])	0.19[kV]	79.2[A]	0.19[kV]	0.5[A]	380[Ω]
400[A] (1.0[kV])	1.05[kV]	426[A]	1.02[kV]	2.6[A]	392[Ω]
800[A] (2.0[kV])	2.08[kV]	820[A]	2.03[kV]	5.2[A]	390[Ω]
1,600[A] (4.0[kV])	4.16[kV]	1,710[A]	4.10[kV]	10.4[A]	394[Ω]
3,200[A] (8.0[kV])	8.36[kV]	3,420[A]	8.20[kV]	21.2[A]	387[Ω]
4,800[A] (12[kV])	12.5[kV]	5,140[A]	12.3[kV]	32.6[A]	377[Ω]
6,000[A] (15[kV])	15.4[kV]	6,280[A]	14.8[kV]	40.6[A]	365[Ω]

상기의 시험결과는 혼합배전선로에 낙뢰가 발생했을 경우 직선접속재의 특성임피던스는 접지선의 값과 유사한 수준(크기)으

로 시뮬레이션 모델 작성시 특성 반영은 반드시 필요한 사항임을 나타내는 값이 된다.



그림 3 직선접속재 특성임피던스 실측 실험 전경

Fig. 3 Test view of cable joint characteristic impedance measuring

4. 혼합 배전선로 시뮬레이션

4.1 EMTP 시뮬레이션 모델 및 기본조건

국내 배전계통의 사실적 투영을 위해 한전 배전설계기준에 준용하여 그림1의 조건으로 EMTP시뮬레이션 모델을 구성하였으며 이를 그림 4에 나타내었다. 시뮬레이션은 가공선로의 케이블 입상주 가공지선에 낙뢰 발생시 비일괄공동접지방식이 적용된 지중케이블의 접속점 동심중성선 개방단의 전위상승 크기에 대한 특성분석에 집중하였다.

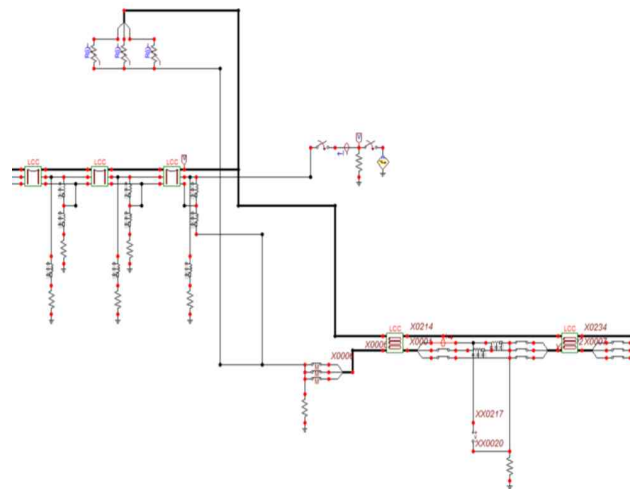


그림 4 EMTP 시뮬레이션 모델

Fig. 4 EMTP simulation model

가공선로 및 케이블 선로의 말단은 서지의 반사를 고려하여 정합처리하였다. 표 5에는 직격노 시험조건을 나타내었고, 표 6에

표 5 직격뢰 시험조건

Table 5 Characteristic impedance test result for cable joint

구분	전류파형	전류과고치	노도임피던스	뇌격속도
값	2/80 μ s	10[kA]	400[Ω]	30 \times 10 ⁶ [m/s]

표 6 전주, 직선접속재, 접지선의 입력데이터

Table 6 Input data for pole, cable joint, earth wire

구분	특성임피던스	진행파속도	접지저항
전주	226[Ω]	300,000,000[m/s]	20.9[Ω]
직선접속재	365[Ω]	300,000,000[m/s]	-

* 접지선 특성임피던스 : 344[Ω](가공지선-중성선), 434[Ω](중성선-접지선)

는 전주, 직선접속재, 접지선 관련 입력데이터를 나타내었다[8].

4.2 사례 모의 및 시뮬레이션 결과

비일괄공동접지방식의 경우 중성선 양단전압이 케이블 시스템 격내전압이 되며, 입상주 가공지선에 낙뢰가 발생하는 경우 케이블 중성선 개방단 전압이 가장 크게 나타나게 될 것이다. 이에 뇌격전류를 5[kA], 10[kA], 20[kA]의 3가지 사례로 분리하고 전주와 접속재를 연결 및 분리한 경우의 6가지 사례로 분리하여 모의하였다.

또한 추가적으로 가공지선과 전력선의 낙뢰 유입 차이점 분석을 위해 동일한 조건으로 전력선에 낙뢰를 발생시켜 사례별 모의를 각각 수행하였다. 이때 낙뢰는 피뢰기 간격을 고려 최악의 조건으로 입상주에서 250[m] 이격된 지점을 기준으로 모의하였다.

첫 번째는 직격뢰가 가공지선에 낙뢰하는 경우로 총 5개의 케이블 접속개소 중 제1접속점의 전압이 가장 크고 두 번째 이후 급격히 감소하였으며, 네 번째 접속점 이후부터는 역으로 전압이 상승하는 것으로 나타났다. 이는 뇌격전류가 큰 경우 부분적인 반사파가 작용하는 것으로 사료된다.

표 7에 전주와 접속재를 포함한 경우 접속개소별 중성선 양단 전압을, 표 8에는 분리한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

전주와 접속재가 포함된 경우 최대 20[kA]의 낙뢰 유입시에도 동심중성선 양단 전압은 3.31[kV] 수준으로 시스템격내전압 기준 40[kV] 대비 약 8.3% 수준임을 알 수 있었다. 한편 전주와

표 7 접속개소별 중성선 양단 전압(전주, 접속재 포함)

Table 7 Test result for neutral line voltage(include pole and cable joint)

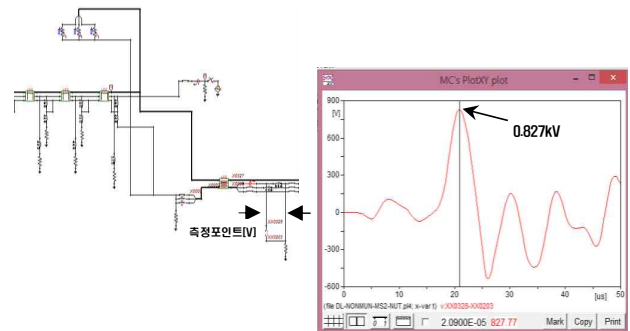
뇌격 전류	중성선 개방양단 전압[kV]				
	1접속점	2접속점	3접속점	4접속점	5접속점
5[kA]	0.827	0.457	0.384	-0.215	-0.242
10[kA]	1.655	0.814	0.768	-0.431	-0.484
20[kA]	3.311	1.686	1.548	-0.774	0.997

접속재를 제거하여 계통 임피던스를 비정상적으로 크게 한 경우에도 최대 29.23[kV]의 전압이 발생되며 이 값 역시 기준값 이하 약 73[%]에 해당되어 하는 것으로 나타났다.

표 8 접속개소별 중성선 양단 전압(전주, 접속재 분리)

Table 8 Test Result for Neutral line Voltage(exclude Pole and Cable Joint)

뇌격 전류	중성선 개방양단 전압[kV]				
	1접속점	2접속점	3접속점	4접속점	5접속점
5[kA]	7.279	3.501	2.594	-1.248	1.342
10[kA]	14.559	7.003	5.149	-2.495	2.682
20[kA]	29.232	13.723	10.339	-5.386	5.175



(a) Simulation model

(b) Instantaneous voltage profile

그림 5 5[kA] 뇌격 주입시 제 1점의 중성선 양단의 전압(전주와 케이블 접속재 연결시)

Fig. 5 Neutral Line First Joint Point Instantaneous voltage for 5kA Lightning surge Injected(Include Pole and Cable Joint)



(a) Simulation Model

(b) Instantaneous Voltage Profile

그림 6 5[kA] 뇌격 주입시 제 1점의 중성선 양단의 전압 (전주와 케이블 접속재 분리시)

Fig. 6 Neutral line first joint point instantaneous voltage for 5kA lightning surge injected(exclude pole and cable joint)

그림 5에는 전주 및 접속재를 포함한 경우에 대해 제1접속점에 5[kV] 뇌격전류 인가시 중성선 양단에 발생된 전압 파형의

순시값 나타내었으며 그림 6에는 동일한 조건에서 전주와 접속재를 분리한 경우를 나타내었다.

다음은 직격뢰가 전력선에 낙뢰하는 경우이다. 그림 7에 모델링도를 나타 내었으며, 낙뢰지점 최 인접 전주의 전력선에 유기되는 전압과, 케이블입상주의 전위상승에 대한 시뮬레이션 결과를 표 9에 나타내었다. 그림 8에는 직격뢰의 최인접 전주에서 모의된 전압파형의 순시값을 나타내었다.

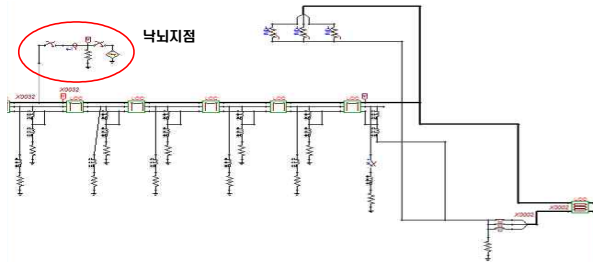
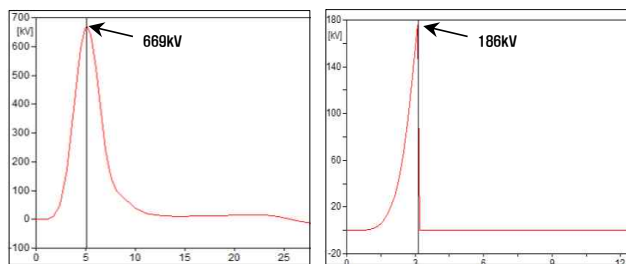


그림 7 전력선에 10[kA] 뇌격 주입 시뮬레이션 모델
 Fig. 7 Simulation model for 10ka lightning surge injected at power line

표 9 전력선에 직격뢰시 전위상승 결과

뇌격 전류	인접전주 전압	케이블입상주 전압	[참고] 뇌임펄스 내전압기준
5[kA]	347[kV]	105[kV]	- 주상변압기 : 125[kV] - 피뢰기 : 125[kV] - LP애자 : 정180/부205[kV] - 부하개폐기 : 150[kV]
10[kA]	669[kV]	186[kV]	
20[kA]	1,307[kV]	336[kV]	

그림 8의 (a)에는 직격뢰에 따른 인접전주의 전압상승 최대값을 표현하였으며, (b)는 LP애자의 충격내전압 180[kV] 이상이 발생되어 파손됨을 가정하여 지락사고가 발생하는 것으로 f_{sw} 를 셋팅하여 시뮬레이션 한 결과 파형을 나타내었다. LP애자가 파손되면 전압이 영전위로 되는 것을 알 수 있다.



(a) Maximum voltage increase (b) In case of outage for LP Insulator
 그림 8 10[kA] 뇌격 주입시 최인접 전주 전력선 순시전압 프로파일

Fig. 8 Power Line Instantaneous voltage profile for nearest pole in case of 10ka lightning surge injected

최소 뇌격전류 입력값인 5[kA] 유입시에도 인접전주에는 347[kV], 케이블 입상주에는 105[kV]까지 전압이 상승되어 발생됨을 확인할 수 있었다. 이는 배전선로 충격내전압의 기준값이 제일 높은 LP애자의 180[kV] 보다도 약 2배 가까이 큰 값으로 LP애자를 포함한 피뢰기, 개폐기 등 배전선로의 모든 전력소자가 파손되게 됨을 의미한다.



(a) 전선단선 사례1 (b) 전선 단선 사례2
 (c) LP애자파손 사례1 (d) LP애자파손 사례2
 그림 9 직격낙뢰에 의한 전력설비 파손사진
 Fig. 9 Distribution facility breakage case caused by lighting surge

따라서 직격 낙뢰는 가공지선으로 차폐하지 못할 경우에는 배전 기지재의 파손으로 정전사고를 유발하며 이때 낙뢰는 대지로 방전되어 에너지가 상실되고 낙뢰에너지는 해소되게 된다. 이와 같은 이론적 해석은 국내배전선로의 낙뢰발생 및 고장현황을 통해 입증된다[10]. 그림 9에 직격뢰에 의해 파손된 배전선로 전력설비 사진을 나타내었다.

5. 결 론

국내 배전 계통은 22.9kV다중접지로 가공과 지중케이블 선로가 혼합되어 운용되고 있다. 이와 같은 혼합배전선로의 지중케이블은 접속방식에 따라 직격낙뢰 유입 시 해석방법을 달리해야 한다. 특히 전주와 접지회로의 모의와 케이블 접속재는 더더욱 주의가 필요하다.

첫 번째로 전주와 접지회로는 병렬회로를 구성하여 특성임피던스를 해석해야 하며 전주는 접지선 대비 32% 수준의 저장값을 가짐을 알 수 있었다.

두 번째로 비일괄공동접지방식의 경우 직선접속재의 외부반도전층의 특성임피던스는 365~380[Ω] 수준으로 나타남을 계산식과 실험을 통해 확인할 수 있었고, 낙뢰 유입 시 케이블 접속개소 양단은 최대 3.3[kV]의 안정적인 상태임을 알 수 있었다. 심지어 전주와 접속개소를 제거한 비 정상적인 경우에도 최대 29.2[kV]로 시스충격내전압 기준의 73[%] 수준임을 알 수 있었다.

아울러 직격낙뢰는 가공지선으로 보호되어야 하나 차폐 실패로 전력선에 낙뢰 시에는 배전설비의 충격내전압의 기준값 보다 매우 큰 뇌서지전압이 발생하게 되어 배전계통의 각 종 전력 소자가 파손되고 사고에 이른 후 그 에너지가 소멸됨을 알 수 있다.

References

- [1] KEPCO, "Distribution Line Lighting Surge Criteria", DS-3800 (Distribution Design Criteria), 2012.6.
- [2] IEC Technical Report., "Insulation Coordination-part 4" IEC TR 60074-4, 2004.
- [3] Kenji Yamato, Zen-ichiro Kawasaki et. al., "Surge Impedances of Concrete pole and Grounding Lead Wire in Distribution Line by a Scale Model Technique" The Japanese Electric society Book B, Vol.119, No.7, pp. 861-866, 1999.
- [4] Ryu. H. S., "Building Distribution Test Equipment and Research the Effect of Lighting Surge Facility", KERI report, 2003.
- [5] Hideki Kimura., "Test Report on Impedance Characteristic of 23kV Cable Joints", Noiseken Test Report, 2017.
- [6] Lee. J. B., "A Study on the Establishment of Insulation Coordination Scheme in Distribution System", KEPCO Report, 2003.
- [7] Japanese Electric Power Central Research Institute, "Distribution Line Lightning Overvoltage Guide", Report, 2002.
- [8] Kim. C.H., "Analyzing Lightning Surge Transmission Characteristic and Protection Performance Qualification Method", KEPCO Report, 2012.
- [9] IEEE Standard, "Exposed Semiconducting Shields on High-Voltage Cable Joints and Separable Connectors", IEEE Std 592, 2007.
- [10] KEPCO, "Shutdown Example Caused by Lightning etc Statistical Data", KEPCO Distribution Operation Department, 2017.

저 자 소 개



전 용 주 (Yong-Joo Jeon)

The B.S. degrees from Seoul National Univ of Science & Technology, Seoul, Korea in 1995. The M.S. and Ph. D. degrees in the electrical engineering from Soong-Sil Univ, Korea in 2001 and 2018 respectively. Currently Deputy General manager for KORAIL from 2005.



전 명 수 (Myung-Su Jeon)

The B.S. and M.S degrees from Seoul National Univ of Science & Technology, Seoul, Korea in 1978, and 2007 respectively. Currently CEO of Elec-consulting.