

# 지중송전계통에서 불평형 구성요소에 따른 과도현상 해석 및 평가

論 文

54A-8-5

## Transient Phenomena Analysis and Estimation According to Unbalance Factors on Underground Power Cable Systems

鄭彩均<sup>†</sup> · 李鍾範<sup>\*</sup> · 姜地原<sup>\*\*</sup> · 李東一<sup>\*\*\*</sup>

(Chae-Kyun Jung · Jong-Beom Lee · Ji-Won Kang · Dong-Il Lee)

**Abstract** - This paper analyses the transient phenomena against single line to ground fault and lightning surge on underground power cable systems. For analysis in various fault conditions, several actual underground power cable systems are modeled using ATP. In ground fault, the transient characteristic of the conductor and the sheath according to the fault current and the installation types of CCPU are analysed. In lightning surge strokes, the various unbalanced conditions including the length of crossbonded lead, the breakdown of CCPU and distance unbalance are considered. This paper is expected to contribute the establishment of proper protection methods against transients on underground power cable systems.

**Key Words** : CCPU, Grounding fault, Lightning surge, Transient state, Underground power cable system.

### 1. 서 론

최근 도시의 인구집중현상의 심화에 따른 전력수요의 밀도가 대도시를 중심으로 급격히 높아짐에 따라 도시의 지중송전 필요성이 나날이 증대되고 있으며, 인구밀집지역내의 가공송전이 가지고 있는 한계 때문에 지중송전계통의 도입이 점차 증대되고 있는데, 이러한 추세는 앞으로도 계속 확산될 전망이다[1-2]. 지중송전케이블은 여러 가지 장점을 갖고 있는 반면 초기 투자비용이 크고, 설치 및 유지보수가 어려우며, 특히 회선당 송전용량이 가공선로에 비해 현저히 저하되는 단점을 가지고 있다. 또한 지중선로는 지하 전력구 및 관로 등을 이용해 포설되므로 사고발생빈도는 가공선로에 비해 일반적으로 낮으나 과도현상이 발생하면 영구사고로 진행될 가능성이 높고 사고 복구에도 장시간이 소요되어 그 과급효과는 가공선로에 비해 크게 나타나고 있다[1-4]. 따라서 지중송전계통에서 발생하는 각종 과도현상을 고려한 합리적인 절연설계 및 신뢰도가 높은 케이블 운전을 위해서는 과도현상에 대한 적절한 보호대책을 세우는 것이 매우 중요하다 하겠다. 그러나 케이블의 여러 특성 및 각종 불평형 요소 등에 따른 체계적이고 다양한 기술적 분석은 아직 미약한 실정에 있다.

본 논문에서는 지중송전케이블에서 발생할 수 있는 1선지락 고장 및 가공선로와 혼합된 계통에서의 뇌 썩지 유입

로 인한 과도현상 등에 대한 해석을 하였다. 1선지락 고장 해석은 1회선 및 2회선 모델을 대상으로 하였고, 고장전류에 의한 영향 및 절연통보호장치(CCPU) 설치 방식에 따른 시스의 과도 특성도 자세히 분석하였다. 또한 뇌썩지 영향 분석에서는 크로스본드 리드선의 길이에 의한 영향, 절연통보호장치 설치방식 및 부동작용으로 인해 계통에 미치는 영향 및 혼합포설, 거리불평형, 크로스본드 리드선과 접지선의 오결선 및 단선 등과 같은 계통 불평형 구성에 따른 영향 등도 다양하게 분석하고 평가하였다.

### 2. 1선지락 고장 발생시 과도 해석

#### 2.1 모델계통

그림 1은 지락고장 모델계통 1(GM-1)에 대한 단면도를 나타낸 것으로 접속부가 총 9개이며, 접속간 길이는 일정하게 300[m]로 설정하였다. 또한 케이블은 154kV OF 1200 mm<sup>2</sup>이고 절연통보호장치(CCPU) 결선방식은 그림 2처럼 대지 간접지방식과 교락비접지방식을 각각 적용하였으며, 1선 지락고장 발생 위치도 J/B #1, J/B #4, J/B #7, J/B #8로 상정하여 다양하게 검토하였다. 본 계통에서 적용한 전원 임피던스는 아래와 같다.

- 정상분 임피던스 :  $0.3947 + j3.9476$  [ $\Omega$ ]
- 영상분 임피던스 :  $0.9022 + j9.0234$  [ $\Omega$ ]

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 圓光大 電氣工學科 博士課程  
E-mail : chekyun@wonkwang.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 教授 · 工博

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博

<sup>\*\*\*</sup> 正會員 : 韓電 電力研究院 責任研究員 · 工博

接受日字 : 2005年 5月 19日

最終完了 : 2005年 7月 4日

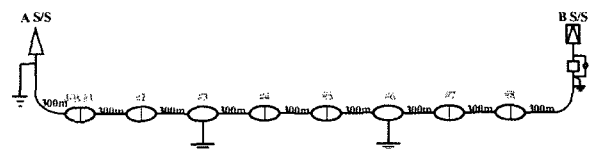


그림 1. 지락고장 분석을 위한 해석모델(GM-1)

Fig. 1. Analysis model for ground fault(GM-1)

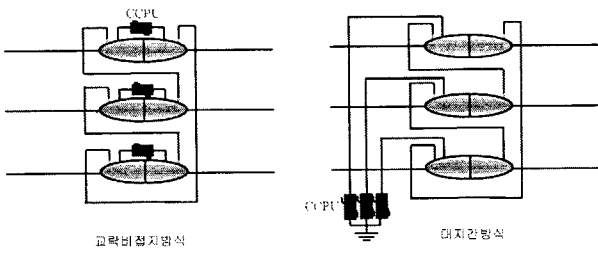


그림 2. 절연통보호장치 결선도  
Fig. 2. Connection diagram of CCPU

지락고장 모델계통 2(GM-2)는 실제계통으로서 154kV OF 2000[mm], 2회선 선로이다. 총 선로길이 6.264[km]이며, 포설 방식은 전력구식과 관로식이 혼합된 형태이다. 절연통보호 장치의 결선방식은 대지간접지방식으로 되어 있으나, 본 논문에서는 교락비접지방식인 경우도 동시에 검토하였으며, 1선 지락고장은 각각 #2 T/L의 J/B #2, J/B #10, J/B #14 지점에서 발생하는 것으로 하였다. 그림 3은 GM-2의 케이블 접속형태 및 구간길이를 표현한 모델 계통도를 나타낸 것이다.

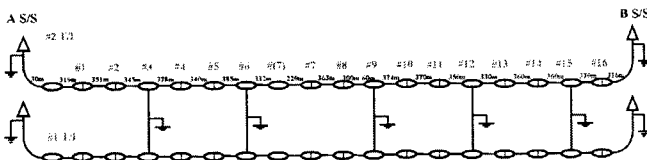


그림 3. GM-2 계통도  
Fig. 3. Model system of GM-2

GM-2 모델의 양단 전원부의 전원 임피던스는 표 1과 같다.

표 1. GM-2의 전원 임피던스  
Table 1. Source impedance of GM-2

변전소	정상분 임피던스[Ω]	영상분 임피던스[Ω]
A S/S	0.33202 + j2.687	1.19765 + j5.9124
B S/S	0.34625 + j2.86726	1.25694 + j5.97406

2.2 1선 지락고장 발생시 과도해석

표 2. GM-1모델 절연통보호장치 결선방식에 따른 도체 전류

Table 2. Conductor current of GM-1 according to CCPU connection type

측정점 지락전류[kA]	대지간접지방식		교락비접지방식	
	A S/S 방향	B S/S 방향	A S/S 방향	B S/S 방향
J/B #1	25.4	45.7	24.1	45.9
J/B #4	24.7	48.9	24.4	49
J/B #7	24	49	24	49
J/B #8	24	48	25	49.4

표 2에서는 GM-1 모델의 각각 J/B #1, J/B #4, J/B #7, J/B #8에서 1선 지락고장 발생시 절연통보호장치의 결선방식에 따라 양단 및 고장점 도체에서 발생하는 고장전류를

나타내었다. 표 2에서처럼 고장전류의 크기는 양단 변전소의 전원 임피던스에 영향을 받으므로 고장발생 구간에 따른 차이는 크지 않았으며, 고장점에서 발생한 고장전류는 양단으로 진행함을 알 수 있다.

표 3은 접속함에서 발생하는 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압이다. 표 3에서처럼 대지간접지방식에서는 절연통보호장치 동작에 의해 시스-대지간 전압은 크지 않았으나 상대적으로 절연통간 전압은 높게 측정되었고, 교락비접지방식에서는 시스-대지간의 전압이 높게 나타났다. 또한 고장이 발생한 접속함에서의 과전압이 인접 접속함에서보다 높음을 알 수 있다. 분석 결과 모든 구간에서 절연통보호장치 동작에 의해 절연통 보호레벨인 50[kV]를 넘지 않아 과전압에 의한 절연통 소손 위험은 적게 나타났으나, 고장점에서 고장전류 상승과 아크저항에 의한 에너지 상승으로 절연통 소손의 위험 가능성은 있을 것으로 판단된다.

표 3. GM-1 모델 절연통보호장치 결선방식에 따른 시스 과도특성

Table 3. Sheath transient characteristic of GM-1 according to the CCPU connection types

절연통 보호장치	고장 위치	전압[kV]	J/B#1	J/B#2	J/B#4	J/B#5	J/B#7	J/B#8
대지간 접지방식	J/B #1	절연통간	18.2	18.6	17.1	17.1	16.2	16.9
		시스-대지	13.2	11.7	10.9	10.9	11.1	12.0
	J/B #4	절연통간	17.8	17.2	18.2	16.5	12.9	13.8
		시스-대지	12.1	11.2	11.1	10.9	11.1	12.1
	J/B #7	절연통간	25.0	16.0	16.4	20.9	17.0	17.0
		시스-대지	12.0	11.0	11.0	9.0	11.0	12.0
J/B #8	절연통간	20.8	16.0	17.5	16.0	21.0	20.0	
	시스-대지	10.9	10.0	9.8	9.8	10.3	12.8	
교락 비접지 방식	J/B #1	절연통간	10.1	8.8	9.0	10.2	10.6	9.2
		시스-대지	13.2	12.7	11.5	11.8	11.6	12.6
	J/B #4	절연통간	9.4	9.5	9.2	8.9	10.7	10.4
		시스-대지	13.1	12.2	12.1	11.7	12.2	12.9
	J/B #7	절연통간	10.0	9.31	8.65	8.68	8.23	9.93
		시스-대지	13.0	11.0	11.9	12.0	12.0	13.0
	J/B #8	절연통간	10.1	8.3	11.5	9.27	8.6	13.0
		시스-대지	12.7	12.5	12.0	12.4	13.9	15.3

다음은 2회선 계통인 GM-2 모델에서 1선 지락고장시 도체 및 시스의 과도특성을 분석하였다. 표 4는 절연통보호장치 결선방식에 따라 #2 T/L의 각 고장지점에서 1선지락고장 발생시 전원단 및 고장점에서 발생하는 고장전류의 크기이다. 고장이 발생한 #2 T/L의 고장점에서 약 60[kA] 정도의 고장전류가 발생하며 전원단으로 23 ~ 45[kA]의 전류가 흐름을 알 수 있다. 고장이 발생하지 않은 #1 T/L의 전원단에서도 최대 11.5[kA]의 전류가 발생하고 있다.

표 4. GM-2 모델의 도체 고장전류  
Table 4. Fault current of GM-2 [kA]

절연통 보호장치 결선	위치	#2 T/L 지락고장 위치			#1 T/L		
		J/B #2	J/B #10	J/B #14	J/B #2	J/B #10	J/B #14
대지간 접지방식	전원단	44.9	30.4	31	5.8	5.8	7.1
	고장점	61.9	61	61.1	-	-	-
교락비 접지방식	전원단	45.3	30	23	11.5	6.1	7
	고장점	63.2	60	61	-	-	-

그림 4와 5에서는 시스에서 발생하는 대지전압 및 절연통간 전압의 분석결과를 나타내었다. 그림에서처럼 절연통간 전압은 절연통보호장치 동작에 의해 차폐가 가능한 교락비 접지방식에 비해 대지간접지방식에서 높게 나타났으나 절연통 보호레벨 50[kV]에 많은 여유를 보여 1선 지락고장 발생 시 절연통간 전압 상승에 의한 접속함 소손 가능성은 희박할 것으로 판단된다.

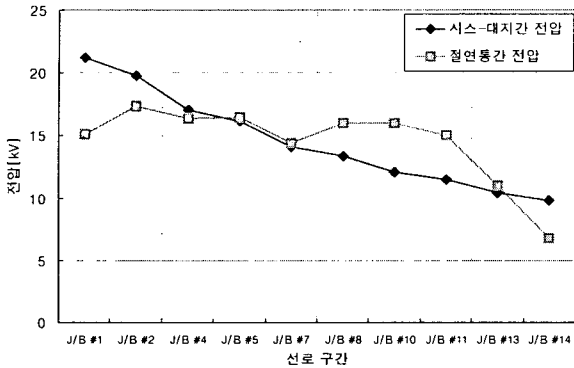


그림 4. J/B #2에서 지락고장 발생시 시스템 과전압(대지간)  
Fig. 4. Sheath overvoltage when the ground fault occurs on J/B #2

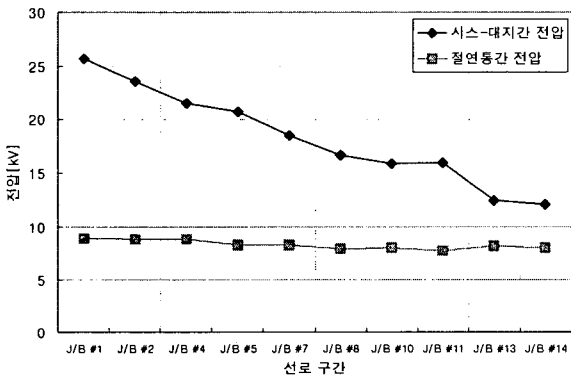


그림 5. J/B #2에서 지락고장 발생시 시스템 과전압(교락비)  
Fig. 5. Sheath overvoltage when the ground fault occurs on J/B #2

### 3. 뇌 썩지 침입시 과도해석

본 논문에서는 표 5의 크로스본드 리드선과 접지선, 절연통보호장치 리드선의 단위길이당 임피던스를 고려하여 1[m]~5[m]까지의 임피던스 성분을 고려하여 리드선, 접지선 길이 변화에 따른 뇌 썩지 영향을 다양하게 분석하였다.

표 5. 크로스본드 리드선과 접지선의 임피던스  
Table 5. Impedance of crossbond and earth lead

종류	선종	R[Ω/km]	L[mH/km]
크로스본드선	IV 절연전선 250[mm]	0.0959	0.471
접지선, 보호장치 리드선	IV 절연전선 38[mm]	0.251	0.502

### 3.1 모델계통

뇌 썩지 모델계통 1(LM-1)은 총 9개의 접속함간의 길이가 일정하게 300[m]인 지중 송전계통에 10[km]의 가공선로가 혼합된 혼합송전계통에서 중단접속부로부터 1[km] 떨어진 지점에서 100[kA]의 뇌격이 침입하였을 때 지중송전계통의 도체 및 시스템, 접속함에 미치는 썩지 영향을 검토하였다. 그림 6에서는 뇌 썩지 해석을 위한 LM-1 혼합송전계통 해석모델 계통도를 나타내었으며, 가공선로 구간은 ACSR 410[mm]×2B이고, 지중선로 구간은 OF 1200[mm] 케이블이 전력구 방식으로 포설되어 있다. 또한 피뢰기는 양단 인입구 및 가공선로와 지중선로가 접속되는 지점에 설치하였으며, 절연통보호장치 결선방식은 대지간접지방식과 교락비접지방식을 각각 적용하였다.

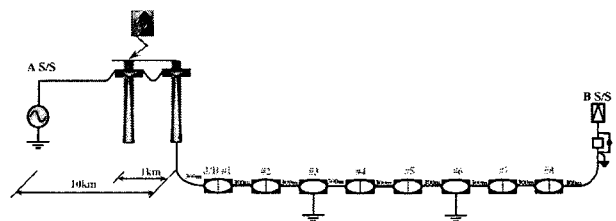


그림 6. LM-1의 계통도  
Fig. 6. Model system of LM-1

또한 뇌 썩지 해석 모델계통 2인 LM-2는 345kV 혼합송전계통이며 가공선로 구간은 ACSR 480[mm]×2B로 구성되어 있고 선로경간은 7.193[km]이다. 또한 지중선로 구간은 OF 2000[mm]로 구성되어 있고 선로경간은 8.981[km]로 비교적 긴 선로이다. 피뢰기는 각각 양단 인입구 및 가공선로와 지중선로가 접속하는 지점에 설치하였다. CCPU 결선은 교락비접지방식이며, 그림 7은 LM-2의 혼합송전계통 해석모델 계통도를 나타낸 것이다. 뇌격전류의 크기는 60[kA]와 100[kA], 파두장과 파미장의 시간은 2/70[μs]이며 뇌 썩지 임피던스는 400[Ω]으로 하였고 뇌격은 케이블 헤드로부터 1[km] 지점에서 침입하였다.

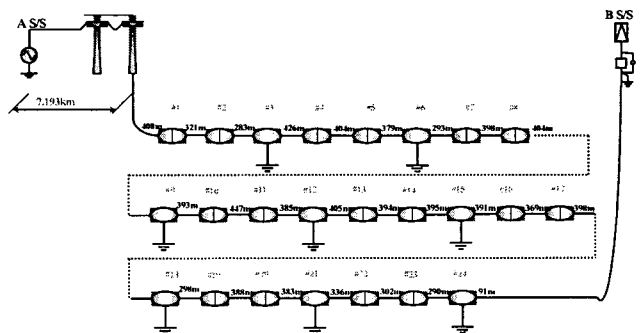


그림 7. LM-2의 계통도  
Fig. 7. Model system of LM-2

### 3.2 뇌 썩지 침입시 과도해석

LM-2 모델에서 뇌격전류를 100[kA]와 60[kA]로 분리하여 해석하였다. 그림 8은 60[kA]의 뇌 썩지 침입시 실제 지중선로 구간의 절연통간 전압을 계산한 결과이다. 60[kA]

의 경우에는 절연통의 보호레벨 50[kV]를 기준으로 많은 여유가 있었으나, 크로스본드 및 접지선이 5[m]인 경우에는 절연통간 전압이 보호레벨을 초과하는 경우도 발생함을 알 수 있다.

그러나 그림 9에 나타난 100[kA]의 뇌격전류의 경우에는 뇌격 침입점에 가까울수록 크로스본드 리드선의 길이가 3[m] 이상일 경우에는 보호레벨 이상의 전압을 보이는 구간이 증가하였다. 따라서 크로스본드 리드선의 길이가 길 경우 크로스본드 리드선 임피던스 증가에 의한 영향으로 교락 비접지방식에서도 절연통 소손 가능성이 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 교락비접지방식에서도 가급적 크로스본드 리드선의 길이를 짧게 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

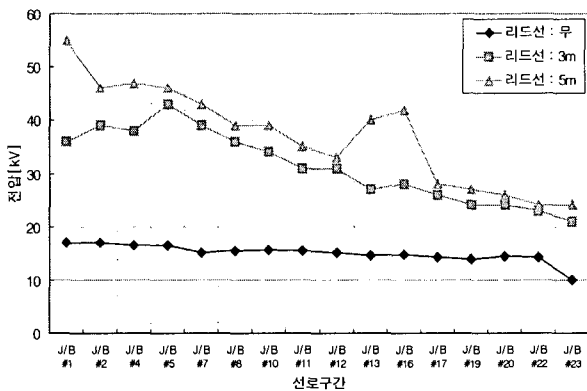


그림 8. LM-2의 절연통간 전압(뇌격전류 : 60kA)  
Fig. 8. Voltage between joint boxes of LM-2(lightning current : 60kA)

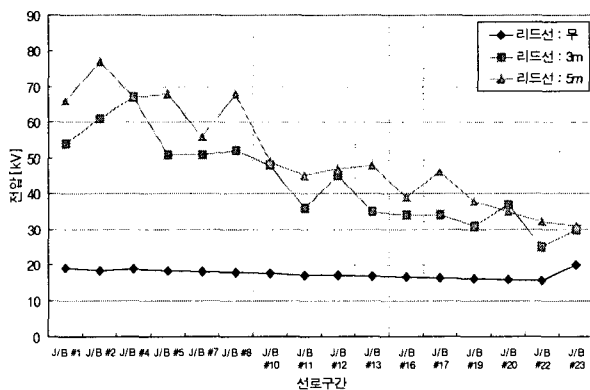


그림 9. LM-2의 절연통간 전압(뇌격전류 : 100kA)  
Fig. 9. Voltage between joint boxes of LM-2(lightning current : 100kA)

#### 4. 계통 불평형시 뇌 썬지 분석

##### 4.1 계통 불평형시 뇌과전압 분석

본 절에서는 먼저 LM-1 모델을 이용하여 아래와 같은 계통에 불평형이 발생 하였을 때 불평형상태와 정상상태의 시스의 과전압을 비교하였다.

- 정상상태(LM-1 모델)
- 크로스본드 대구간 내에 포설방식의 혼합

- 접속함간 거리불평형 존재
- 크로스본드 오결선(J/B #1, J/B #4)

여기서, 크로스본드 대구간내 포설방식의 혼합은 총 9개의 접속함에서 “전력구-전력구-관로/관로-관로-전력구/전력구-관로-전력구”의 포설형태를 고려하였으며, 접속함간의 거리 불평형은 “650[m]-300[m]-300[m] / 300[m]-650[m] -300[m] / 300[m]-300[m]-650[m]”로 하였으며, 크로스본드 오결선은 J/B #1과 J/B #4에서 발생한 것으로 하였다.

그림 10에서는 계통 불평형시 절연통간 전압을 비교하여 나타내었다. 그림 10에서처럼 계통의 불평형으로 인한 절연통간 전압 상승요소가 발생하여도 절연통보호장치 동작에 의해 차폐되므로 모든 경우에서 차이가 발생하지 않았다.

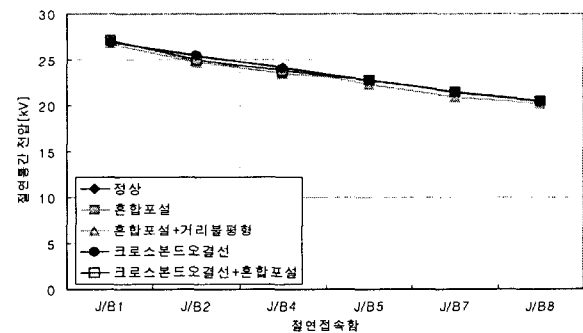


그림 10. 계통 불평형시 절연통간 전압 비교  
Fig. 10. Comparison of voltage between joint boxes at the unbalanced system

그림 11은 크로스본드 리드선 단선 모델을, 그림 12는 크로스본드 리드선에 의한 시스템 지락 모델을 나타낸 것으로 리드선 단선과 지락시의 뇌 썬지 영향을 분석하였으며, 분석 케이스는 아래와 같이 요약하였다.

- Case A : J/B #1에서 (시스 A상 - 시스 B상)의 크로스본드 리드선 단선
- Case B : J/B #1에서 (시스 A상 - 시스 B상, 시스 B상 - 시스 C상)의 크로스본드 리드선 단선
- Case C : J/B #4에서 (시스 A상 - 시스 B상)의 시스템 지락

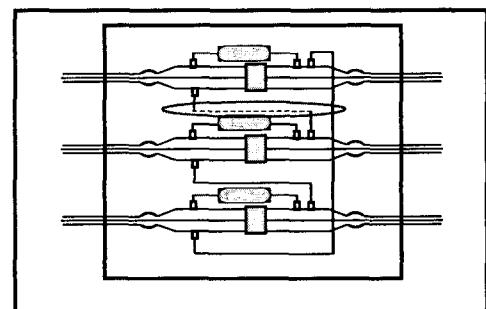


그림 11. 크로스본드 리드선의 단선모델  
Fig. 11. Disconnection model of crossbond lead

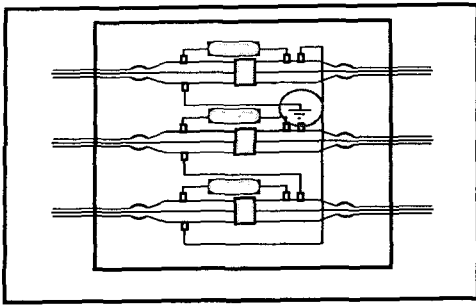


그림 12. 크로스본드 리드선에 의한 시스전류  
Fig. 12. Sheath grounding fault model of crossbond lead

그림 13은 LM-1 모델의 교락비접지방식에서 100[kA]의 뇌격전류가 상도체로 침입했을 때 위의 조건을 고려한 경우 시스에 발생하는 과전압을 나타낸 그래프이다. 그림 13에서 처럼 계통 이상이 발생한 J/B #1과 J/B #4에서 절연통간 전압이 상승함을 알 수 있다.

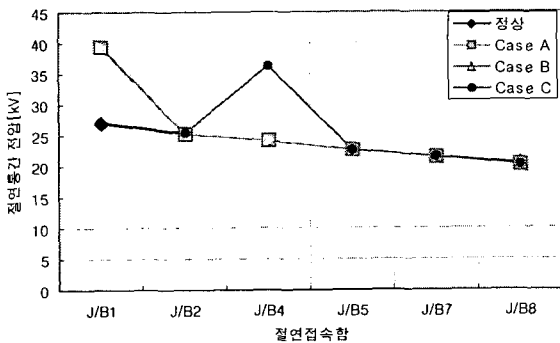


그림 13. 계통 이상시 절연통간 전압 비교(교락비접지)  
Fig. 13. Comparison of voltage between joint boxes at the unbalanced system

그림 14는 LM-1 모델의 대지간접지방식에서 100[kA]의 뇌격전류가 상도체로 침입했을 때 위의 조건을 고려한 경우 시스에 발생하는 과전압을 나타낸 그래프이다. 그림 14에서 처럼 계통 이상이 발생한 J/B #1과 J/B #4에서 매우 높은 값을 보이고 있으며 크로스본드 리드선이 단선될 경우가 지락시보다 높은 값이나 이는 모두 200[kV] 이상의 매우 높은 값을 보인다.

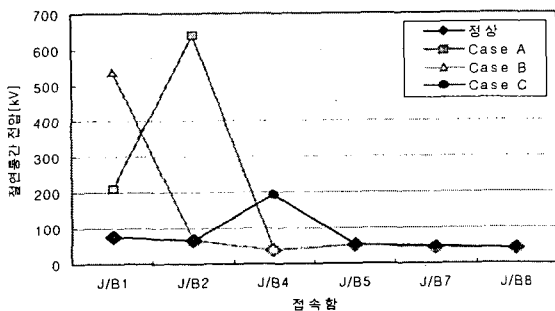


그림 14. 계통 이상시 절연통간 전압 비교(대지간접지)  
Fig. 14. Comparison of voltage between joint boxes at the unbalanced system

그림 15는 LM-1 모델의 대지간접지방식에서 100[kA]의 뇌격전류가 가공지선으로 침입했을 때 위의 조건을 고려한 경우 시스에 발생하는 과전압을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 계통 이상이 발생한 J/B #1과 J/B #4에서의 절연통 전압 값이 상도체 침입시보다 적은 값이나 보호레벨 이상의 전압을 보이는 곳도 있다.

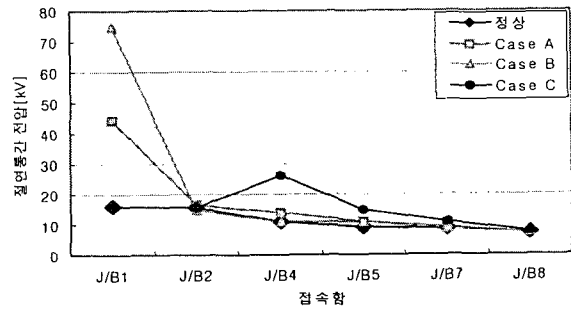


그림 15. 계통 이상시 절연통간 전압 비교(대지간접지)  
Fig. 15. Comparison of voltage between joint boxes at the unbalance

본 분석에서도 알 수 있듯이 대지간접지방식이 교락비접지방식에 비해 높은 절연통간의 전압값을 보이고 있으며 크로스본드 리드선 단선이나 크로스본드 리드선의 시스 지락시 뇌 썬지 침입으로 인해 절연통 소손의 가능성이 높음을 보였다. 따라서 상시에 크로스본드 리드선에 대한 철저한 감시 및 점검이 요구된다.

다음은 LM-1 모델을 이용하여 보통접속함(NJ)에서의 접지시스템에 문제가 발생한 계통에 100[kA]의 뇌 썬지가 상도체로 침입했을 때 과도해석을 실시하였다. 검토 케이스의 예는 아래와 같다.

- J/B #3(NJ) 접지저항 값 : 100[Ω]
- J/B #3(NJ) 공통 접지선 분리(그림 16 참조)
- J/B #3(NJ) C상의 접지선 분리

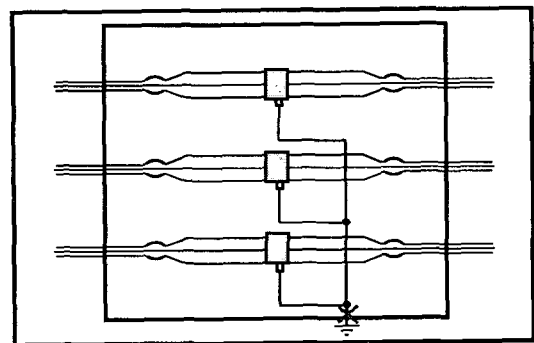


그림 16. J/B #3(NJ) 모든 상의 접지선 분리 모델  
Fig. 16. Grounding lead disconnection model of all phases at J/B #3(NJ)

그림 17에서처럼 J/B #3(NJ)의 접지시스템 이상시 J/B #3(NJ) 부분의 시스-대지간 전압은 모든 경우에서 상승하며

공통 접지선이 분리된 경우에서 제일 높은 과전압이 발생하였다. 또한, 이는 인접 접속부인 J/B #2와 J/B #4에도 영향을 미치고 있다. 따라서 상시 점검시 접지저항 및 접지선에 대한 감시 및 점검이 필요할 것으로 사료된다.

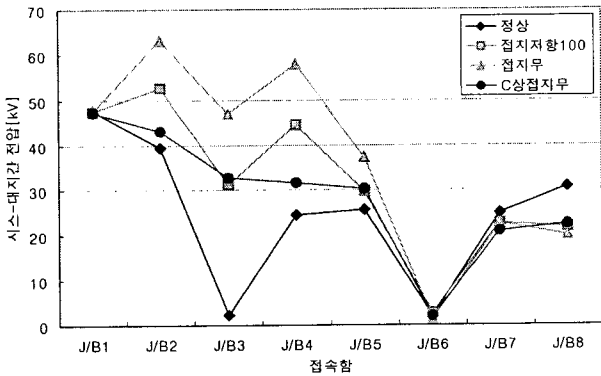


그림 17. J/B #3(NJ) 접지시스템 시스-대지간 전압  
Fig. 17. Voltage between sheath and earth according to grounding system at J/B #3(NJ)

4.2 CCPU 부동작시 뇌 과전압 해석

절연통보호장치(CCPU)는 지중송전 계통의 방식층 및 절연통을 각종 썬치로부터 보호하기 위한 일종의 피뢰기로서 겹이 없는 ZnO 금속산화물질로 되어 있다. 한 예로 절연통 보호장치는 썬치 이상전압 차폐를 위해 V-I 특성곡선에 의해 동작하며 이상전압 침입시 케이블 시스-대지간이나 절연통간에 발생하는 과도전압을 제한전압 이하로 차폐하게 된다. 만약 이와 같은 절연통보호장치가 없거나 열화로 인해 정상 기능을 하지 못하면 방식층이나 절연통의 보호레벨 이상의 높은 썬치성 과전압이 발생한다. 이와 같은 절연통 보호장치의 주요 열화 발생원인은 크게 상용주파 과전압에 의한 열화발생과 뇌 충격전류에 의한 열화 발생 등 크게 두 가지 원인으로 분석할 수 있다. 상용주파 교류 과전압에 의한 열화 발생은 절연통보호장치 내에 교류전압이 인가될 때 내부 소자에 흐르는 누설전류에 의해 발생하며 이 누설전류에 의해 절연통보호장치 내부소자에서는 열이 발생하게 된다. 특히, 저항분 누설전류 소자내에서는 분자운동을 촉진시키기 때문에 소자의 온도상승도 높아지게 된다. 또한 뇌 충격전류에 의한 열화 발생은 상용주파 교류전압과는 달리 내부소자 입계층에서의 전계강도가 매우 크게 발생하므로 소자의 보호동작시보다 큰 열이 발생하고 입계층에 변형이 쉽게 일어나게 된다. 즉, 내부소자에 불균일한 구조적 결함 예로써 편흔과 같은 현상이 있으면 그 부분에 열이 집중되어 열폭주가 발생한다. 이와 같은 과정에서 내부소자가 성장하고 입계층이 감소하면 정상상태 운전전압에서도 열폭주가 발생하여 소자의 파괴 가능성이 높아진다. 저전계 영역에서도 누설전류가 증가하면 일정시간 내에 열폭주에 도달하게 되며, 급준파의 뇌 충격전류가 인가될 때 국부적인 급가열로 인해 소자의 기능이 저하되고 국부적인 열팽창으로 인한 기계적 스트레스는 국부적 손상을 발생시킨다. 이 경우 소자 내부에서의 기계적 파괴이므로 파괴단면에는 절연파괴가 일어나지 않으므로 정상운전전압에서는 기능에 문제가 없지만,

뇌 썬치 인가시 전계가 집중되어 절연파괴가 발생하게 된다.

따라서 본 논문에서는 절연통보호장치가 정상적인 동작을 못할 경우에 그림 6의 LM-1 모델을 이용하여 케이블 절연통에 미치는 뇌과전압의 크기를 분석하였다. 분석에 사용된 케이스는 그림 18과 같이 A상 절연통보호장치가 동작하지 않은 경우와 그림 19처럼 모든 상의 절연통보호장치가 동작하지 않은 경우로 구분하여 검토하였다. 검토 케이스는 아래와 같이 요약하였다.

- J/B #2, 절연통보호장치 A상이 동작하지 않음
- J/B #2, 절연통보호장치 A, B상이 동작하지 않음
- J/B #2, 절연통보호장치 A, B, C상이 동작하지 않음

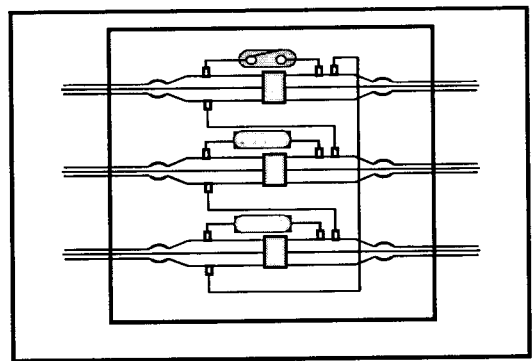


그림 18. A상 절연통보호장치가 동작하지 않은 경우 모델  
Fig. 18. Model in case that CCPU of phase A doesn't operate

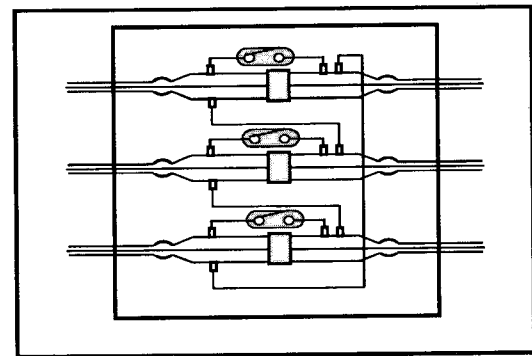


그림 19. 모든 상 절연통보호장치가 동작하지 않은 경우의 모델  
Fig. 19. Model in case that CCPUs of all phases don't operate

그림 20과 그림 21은 위의 경우에서 분석한 시스-대지간 전압과 절연통간 전압을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 절연통 보호장치 부동작으로 인한 절연통간전압 및 시스-대지간 전압의 상승폭이 매우 크며, 한 상의 절연통보호장치가 동작하지 않아도 절연통간 전압이 71[kV]로 절연통이 섬락될 수 있는 매우 높은 전압이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 절연통보호장치의 중요성 및 절연통보호장치의 부동작이 계통에 미치는 심각한 영향을 다시 한번 증명해 보였다. 따라서 차후 절연통보호장치에 대한 파괴시험 및

열화진단 주기 및 열화진단 시스템의 강화가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

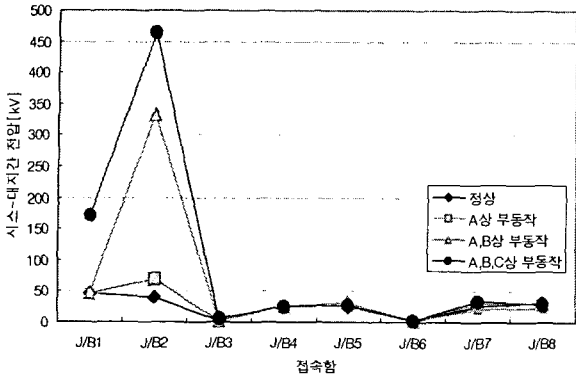


그림 20. 절연통보호장치 부동작에 의한 시스-대지간 전압  
Fig. 20. Voltage between sheath and earth according to the breakdown of CCPU

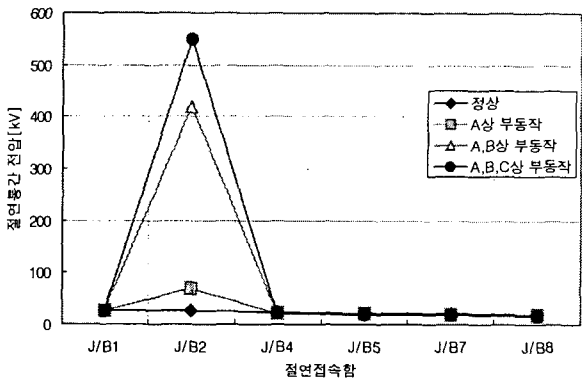


그림 21. 절연통보호장치 부동작에 의한 절연통간 전압  
Fig. 21. Voltage between joints according to the breakdown of CCPU

5. 결 론

본 논문에서는 지중송전케이블의 지락고장 및 뇌 썩지 등의 각종 과도현상에 대한 해석을 하였다. 특히, 뇌 썩지 침입시에는 계통 불평형시 및 크로스본드 리드선의 단선 및 지락, 접지선 이상, CCPU의 부동작 등 여러 변수를 고려하여 다양하게 분석하였다.

(1) 1선 지락고장 발생시 고장점에서 45[kA] ~ 63[kA]의 전류가 양단으로 귀로하는 것으로 나타났으며 이는 고장점에서 고장전류에 의한 에너지 상승으로 접속함이 소손될 가능성을 내포하고 있다는 것을 의미한다. 또한 시스에서 발생하는 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압 분석 결과 절연통에 직접적인 영향을 미치는 절연통간 전압은 절연통보호장치에 의해 차폐가 가능한 교락비접지방식이 대지간접지방식에 비해 낮게 나타났으며 절연통 보호레벨인 50[kV]에도 많은 여유를 보였다.

(2) 뇌 썩지 침입시에는 가혹한 조건을 위해 썩지가 지중 계통에 근접한 곳의 상도체에 침입하는 것으로 하였으며 크로스본드 리드선의 단위길이당 임피던스를 고려하여 리드선 길이 변화에 따른 뇌 썩지의 영향을 분석하였다. 크로스본드 리드선이 길수록 발생하는 과전압의 크기는 더욱 증가하였으며 절연통보호장치 설치는 대지간접지 방식에 비해 교락비접지방식이 더욱 유리하며 크로스본드 리드선은 짧을수록 유리한 것으로 나타났다. 한편 혼합포설 및 거리불평형, 크로스본드 오결선 등의 계통 불평형이 있어도 절연통보호장치 동작에 의해 과전압이 동일하게 차폐되므로 큰 영향이 없었으나 크로스본드 리드선 단선이나 시스 지락시에는 단선 및 지락이 발생한 접속함의 전압이 매우 상승하여 절연통 파괴의 가능성을 보였으며, 특히 이 경우에서도 대지간접지방식이 교락 비접지방식에 비해 높은 과전압을 보였다. 그리고 보통접속함(NJ)에서의 높은 접지저항과 접지선 이상시에도 높은 전압이 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 상시에 크로스본드 리드선 및 접지저항, 접지선에 대한 철저한 감시 및 점검이 요구된다.

(3) 절연통보호장치는 주로 상용주파 과전압 또는 뇌충격 전류에 의해 열화가 발생하며 열화가 진행되면서 상용주파 동작개시전압 및 제한전압이 감소하고 누설전류는 증가하게 되며 절연저항은 감소하는 특성을 갖는다. 이에 대한 시뮬레이션 결과에서도 절연통보호장치가 동작하지 않을 경우 시스 과전압은 매우 상승하며 한 상의 절연통보호장치가 동작하지 않아도 절연통이 섬락될 수 있는 높은 전압이 발생되었다. 이러한 결과로 절연통보호장치가 계통에 미치는 영향을 증명할 수 있었다. 따라서 향후 절연통보호장치에 대한 절연성능 시험 및 열화진단 시스템의 강화가 요구되고 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-274) 주관으로 수행된 과제임

참고 문헌

- [1] 전력연구원, “지중송전 케이블의 썩어지 보호 대책에 관한 연구(최종보고서)”, 1993. 6
- [2] 전력연구원, “지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구(최종보고서)”, 1998. 1
- [3] 전력연구원, “송전용량 증대를 위한 열방산회로 개선에 관한 연구(최종보고서)”, 2003. 3
- [4] 전력연구원, “송전케이블의 허용전류 산정 프로그램 개발 연구(최종보고서)”, 2001. 12
- [5] IEEE Std. 634, “IEEE Standard Cable Penetration Fire Stop Qualification Test”, 1978.
- [6] IEEE, “IEEE Guide for the Application of Sheath Bonding Methods for Single-conductor Cables and Calculation of induced Voltage and Current in Cable

Sheaths, ANSI/IEEE Std. 575-199

- [7] W.Z.Black, Kent W.Brown, B.L.Harshe, "Ampacity of Cables in Trays Surrounded with Fire Barrier Material", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, Jan. 1999.
- [8] 일본전기학회 기술보고, "케이블계통에서의 썬지현상과 대책". 제 366호(Ⅱ부), 1991. 4
- [9] 일본전기협회, "지중송전규정 JEAC 6021 - 2000", 2000
- [10] 이종혁 외 4, "다중 뇌충격전류에 의한 피뢰기 소자의 전기적 특성 변화", 2000년 KIEE 하계학술대회 논문집, 2000. 7

## 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



### 강 지 원 (姜 地 原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 기전공학과 졸업(공학). 1993년 ~ 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

Tel : (042)865-5884

E-mail : jwkang@kepri.re.kr



### 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(공학). 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



### 이 등 일 (李 東 一)

1958년 3월 15일 생. 1979년 단국대 전기공학과 학부 졸업. 1983년 인하대 전기공학 재료분야 석사 졸업. 1996년 한양대 전기공학 고전압분야 박사 졸업. 현재 한전 전력연구원 책임연구원.

Tel : (042)865-5850

E-mail : dilee@kepri.re.kr