

OF 케이블 계통에서 과도상태시 에너지 특성 검토

論 文

55A-11-4

A Study on Energy Characteristics in Transient States of OF Cable Systems

鄭彩均* · 李鍾範** · 徐在鎬† · 姜地原*** · 李東一§

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

Abstract - This paper reviews the energy characteristics of oil filled cables in transient state such as grounding fault and lightning surge. Artificial grounding fault test was firstly performed in 2003 for the analysis of arc voltage and breakdown energy according to the fault current. In this paper, energy of OF cable is variously analysed at joint box based on the actual test. Then more various conditions such as installation types, section lengths and CCPU(Cable Covering Protection Unit) connection types are applied for the simulation using EMTP when the single line to ground fault and direct lightning stroke are occurred on actual underground power cable systems and combined power cable systems, respectively. Finally, the energy by the length of crossbonded lead and grounding lead as well as fault lasting time is also calculated using EMTP simulation.

Key Words : CCPU, Energy characteristic, OF cable, Transient State, Underground power cable systems

1. 서 론

최근 도심지의 인구집중현상과 함께 전력수요의 밀도가 급격히 높아짐에 따라 송전선로 건설의 필요성이 증대되고 있으나 도심지 통과 및 환경적 요인 등 인구 밀집지역 내의 가공송전선로가 갖고 있는 한계 때문에 지중송전선로의 건설이 증대되고 있으며, 특히 서울의 경우 지중화율이 2003년 9월 말 82.4%로 높게 나타나는 등 이러한 추세는 앞으로도 서울 등 대도시를 중심으로 계속 확산될 전망이다[1].

그러나 현재 운전 중인 국내 전력 케이블 및 접속함은 사용연수가 늘어남에 따라 그 고장 빈도는 해마다 증가하고 있으며 특히, OF 케이블은 내부에 유통로가 설치되어 있는 구조를 가지고 있어 과도현상 등 여러 가지 원인에 의한 케이블 절연과피 발생시 누유된 절연유를 통해 2차사고로의 발전 가능성이 높게 될 수 있다. 실제로 1994년부터 2003년까지 10년간 지중송전계통에서 발생한 고장을 분석한 결과 XLPE 케이블에 비해 OF 케이블에서 발생하는 횟수가 3배 이상 많았으며, 최근 지하 공동구 및 전력구내의 OF 케이블 고장으로 인해 발생한 화재에서도 알 수 있듯이 지중송전계통에 화

재가 발생하면 자체 손실뿐만 아니라 동일 경과지 내에 인접한 송전케이블과 배전케이블에 피해를 확산시켜 전력공급에 차질을 초래하며 공동구내의 통신 케이블을 비롯한 다른 지하 시설물로의 피해 확산으로 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 대규모 정전사태를 초래할 수도 있다. 그러나 이러한 손실의 예방과 케이블 계통에서 과도현상 발생시 2차 사고로의 발전 가능성에 대한 연구 및 케이블의 각종 설비에 발생하는 에너지 측면에서의 분석 등 고장 이후의 케이블 특성에 대한 연구는 부족한 실정에 있다[2-4].

따라서 2003년 8월과 10월 국내 최초로 지중송전케이블에 대한 인공지락 시험을 실시하였으며 고장전류에 따른 접속함 아크전압과 파괴에너지 및 파괴 시점에 도달하는 시간 등을 다양하게 분석하였다. 또한 본 논문에서는 과도현상 발생시 2차사고로 진전될 가능성이 매우 높은 OF 케이블을 대상으로 EMTP를 이용하여 여러 가지 실제 모델링을 포함한 다양한 조건의 지중송전계통을 모델링한 후[5] 케이블 절연과피에 의한 지락 고장 및 뇌 서지 침입시에 접속함 및 절연통 보호장치(CCPU)에 발생하는 에너지를 분석하였으며, 크로스본드 리드선과 접지선의 길이 및 고장지속시간에 따른 에너지 또한 다양하게 계산하였다.

† 교신저자, 正會員 : 圓光大 工大 電氣電子및情報工學部 教授 · 工博

E-mail : ehoseo@wonkwang.ac.kr

* 正會員 : 圓光大 工業技術開發研究所 研究員 · 工博

** 正會員 : 圓光大 工大 電氣電子및情報工學部 教授 · 工博

*** 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博

§ 正會員 : 韓電 電力研究院 責任研究員 · 工博

接受日字 : 2006年 1月 10日

最終完了 : 2006年 9月 21日

2. 과도현상에 의한 에너지 분석

2.1 에너지 계산

본 논문에서는 OF 케이블에 지락고장 발생시 접속함에서 발생하는 에너지를 실증시험 결과와 비교하여 분석하였으며, 지락고장 뿐 아니라 뇌 서지 침입시에 크로스본드 리드선과 각 절연접속함의 절연통보호장치(CCPU)에 발생하는 에너지를 다양하게 계산하였다. 본 논문에서 사용된 에너지 계산

방법은 식 (1)과 같으며 이는 EMTF를 이용해 계산된다.

$$W = \int_{t_0}^{t_1} V(t)I(t)dt \quad (1)$$

여기서, t_0 : 고장 발생시간
 t_1 : 고장 제거시간

식 (1)을 이용해 계산한 예를 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 그림 1은 Power[W]에 대한 계산 그래프이며 이를 고장 발생시간(t_0)과 차단기 동작에 의한 고장제거시간(t_1) 사이에서 적분을 통해 얻을 수 있는 에너지를 그림 2에 나타내었다. 계산된 에너지의 예는 GM-1 모델에서 J/B #4 접속함에서 지락 고장 발생시에 계산한 것이며, 이 때 고장전류는 40[kA]이다.

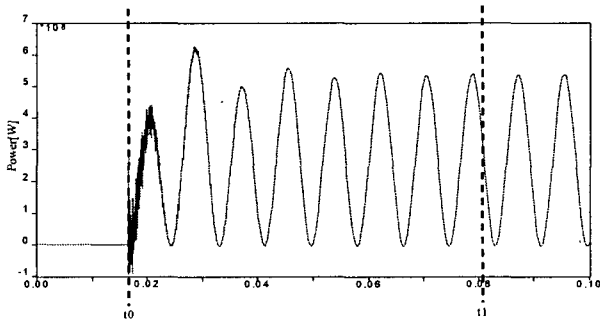


그림 1 Power 계산에 대한 예
 Fig. 1 Example of power calculation

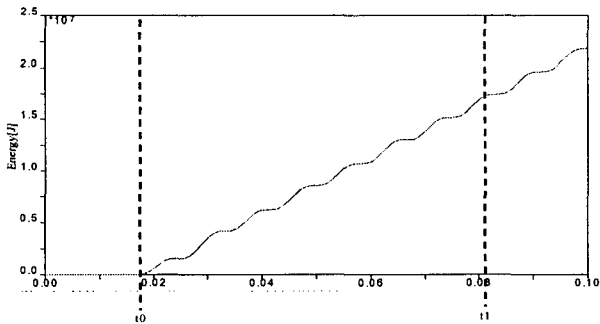


그림 2 에너지 계산에 대한 예
 Fig. 2 Example of energy calculation

2.2 실증시험에 의한 에너지 분석

2.2.1 실증시험 결과

2003년 8월과 10월 국내에서는 최초로 지중송전케이블에 대한 인공지락시험을 3차례 실시하였다[6]. 본 논문에서는 인공지락시험에서 측정된 절연통 파괴시 에너지를 바탕으로 시뮬레이션 값과 비교하여 분석하였다. 실증시험에서 측정된 파괴 에너지는 시험전압과 전류를 통해 산출된 Power[W]를 식 (1)에 적용하여 환산한 것으로 본 논문에서 적용한 이론적 해석방법과 동일하다.

각각 25[kA](12cycle)과 25[kA](4cycle), 10[kA](4cycle) 등

의 아크를 발생시킨 3차례의 실증시험 결과 지락이 발생한 접속부는 심하게 파손되었으며 이때 발생된 에너지는 그림 3의 도표처럼 300~900[kJ]이 발생하였다[6].

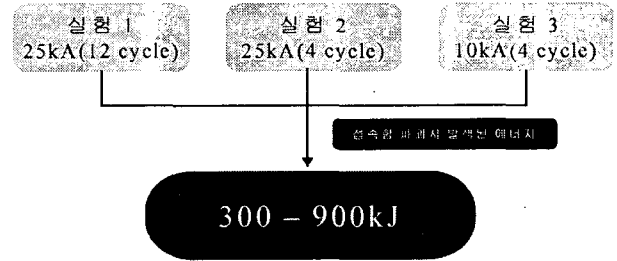


그림 3 실증시험 결과 접속함 파괴시 발생된 에너지
 Fig. 3 Breakdown energy at the joint of actual test

표 1에서는 실증시험에 대한 결과 분석 내용을 좀 더 자세히 기술하였다. 표 1에서처럼 아크 방호길이가 길수록 파괴시 에너지가 높아지며 파괴 시점도 빨라진다. 실험 1의 경우 파괴시점은 고장 발생 후 6.505[ms](0.39[cycle])이며, 실험 2는 8.375[ms](0.5[cycle]), 실험 3은 26.73[ms](1.6 [cycle])로 예측되고 있다.

표 1 실증시험 결과분석

Table 1 Result of actual test

	아크 방호길이 [cm]	시험전류 kA(cycle)	Cover 파괴시점 [ms]	파괴 에너지 [kJ]	파괴전압 [V]	파괴후 아크전압 [V]
실험1	40	25(12)	6.505	908	3,674	1,528
실험2	4	25(4)	8.375	364	582	1,104
실험3	8	10(4)	26.73	257	949	1,021

2.2.2 고장전류에 따른 에너지 비교

본 논문에서는 실증시험에서 검토된 에너지 분석결과를 바탕으로 그림 4의 GM-1 모델의 시뮬레이션을 통해 고장 전류 변화에 따른 에너지를 다양하게 분석하였다. 고장전류는 식 (2)를 이용해 표 2에서처럼 전원 임피던스를 조정하여 10[kA]~40[kA]까지 변화하였다.

$$I_g = \frac{3 \frac{E_a}{\sqrt{3}}}{Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0} + Z_{C1} + Z_{C2} + Z_{C0}} \quad (2)$$

여기서,

I_g : 지락전류[kA]

E_a : 고장상 전압[kV]

Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S0} : 대칭성분 전원 임피던스[Ω]

Z_{C1}, Z_{C2}, Z_{C0} : 대칭성분 케이블 선로 임피던스[Ω/km]

표 2 고장전류에 따른 전원임피던스

Table 2 Source impedance according to fault current

고장전류	정(역)상분[Ω]	영상분[Ω]
10[kA]	1.6002 + j16.0038	3.6576 + j36.5814
20[kA]	0.889 + j8.891	2.032 + j20.323
30[kA]	0.5334 + j5.3346	1.2192 + j12.1938
40[kA]	0.3947 + j3.9476	0.9022 + j9.0234

표 3에서처럼 실증시험 결과 절연통 파괴가 가능한 최소 에너지로 분석된 300[kJ]에 도달하는 시간은 고장전류 10[kA]에서는 1.3[cycle]이고, 40[kA]에서는 무려 0.18[cycle]로 분석되었다.

또한 고장전류 10[kA]에서 1000[kJ]까지의 도달 시간은 4.3[cycle]로 차단기 동작시간 이후였지만 20[kA]에서는 1.37[cycle], 30[kA]에서는 0.7[cycle], 40[kA]에서는 0.32[cycle]로 고장전류 크기에 비례하여 에너지량은 증가하고 있으며 대부분의 경우에서 차단기 동작 이전에 접속함이 모두 파괴됨을 알 수 있다.

표 3 고장점 절연접속함에 발생하는 에너지

Table 3 Energy occurring at the insulation joint box of fault point

고장전류 [kA]	발생되는 에너지 도달 시간[cycle]			
	100[kJ]	300[kJ]	500[kJ]	1000[kJ]
10	0.575	1.3	2.246	4.36
20	0.21	0.58	0.79	1.37
30	0.15	0.23	0.3	0.7
40	0.12	0.18	0.224	0.32

3. 지락고장 발생시 OF 케이블 에너지 특성 검토

3.1 지락고장 모델계통 1(GM-1) 및 에너지 특성 검토 결과

그림 4는 지락고장 모델계통 1(GM-1)에 대한 단면도를 나타낸 것으로 접속부가 총 9개이며, 접속함간 길이는 일정하게 300[m]로 설정하였다. 또한 케이블은 154kV OF 1200 [mm]이고 절연통보호장치(CCPU) 결선방식은 그림 5처럼 대지간접지방식과 교락비접지방식을 각각 적용하였으며, 1선 지락고장 발생위치도 J/B #1, J/B #4, J/B #7, J/B #8로 상정하여 다양하게 검토하였다. 본 계통에서 적용한 전원 임피던스는 아래와 같다.

- 정(역)상분 임피던스 : 0.3947 + j3.9476 [Ω]
- 영상분 임피던스 : 0.9022 + j9.0234 [Ω]

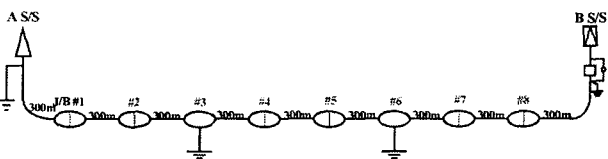


그림 4 지락고장 분석을 위한 해석모델(GM-1)

Fig. 4 Analysis model for ground fault(GM-1)

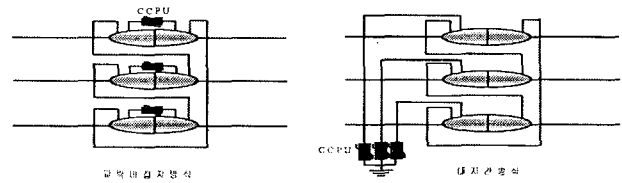


그림 5 절연통보호장치 결선도

Fig. 5 Connection diagram of CCPU

그림 6과 그림 7은 GM-1 모델의 J/B #1에서 고장이 발생했을 때 대지간접지방식으로 설치되어 있는 절연통보호장치에 흐르는 전류와 전압의 파형을 나타내었다. 절연통보호장치에 발생하는 에너지는 식 (1)을 이용하여 고장 발생시간 (t₀)과 고장 제거시간(t₁)사이에서 전압과 전류신호의 곱에 대한 적분을 통해 계산할 수 있다.

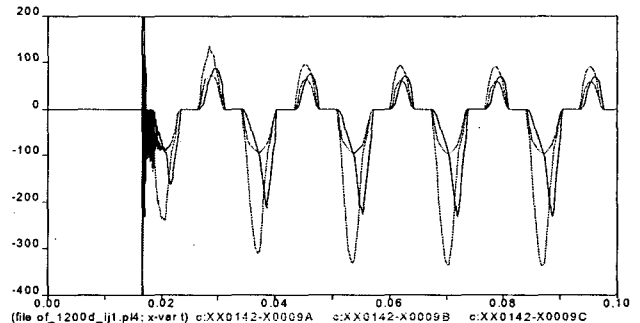


그림 6 GM-1모델의 대지간접지방식 절연통보호장치 전류

Fig. 6 CCPU current with direct grounding type of GM-1

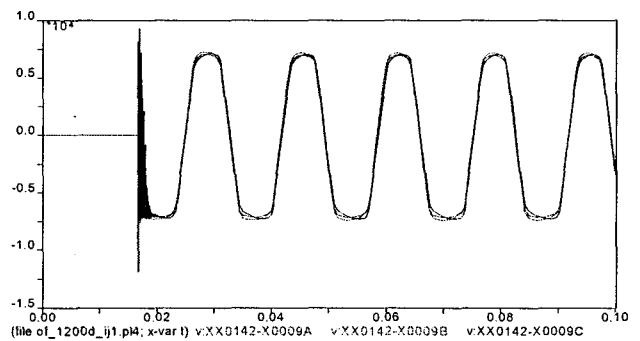


그림 7 GM-1모델의 대지간접지방식 절연통보호장치 전압

Fig. 7 CCPU voltage with direct grounding type of GM-1

그림 8에서는 GM-1 모델에서 지락고장 발생시 각 접속함에 설치되어 있는 절연통보호장치에 발생하는 에너지를 계산한 결과를 나타내었다. 그림 8에서처럼 교락비접지방식의 최대값인 3.44[kJ]에 비해 접지저항 등의 영향으로 대지간접지방식에서 발생하는 에너지는 최대 254[kJ]로 매우 높게 나타났다. 그러나 절연통보호장치가 파괴될 수 있는 에너지량에 대한 검토가 없었으며, 이에 대한 기준이 모호하여 측정된 에너지에 의한 절연통보호장치의 파괴여부를 판단하기는 어려운 실정이다.

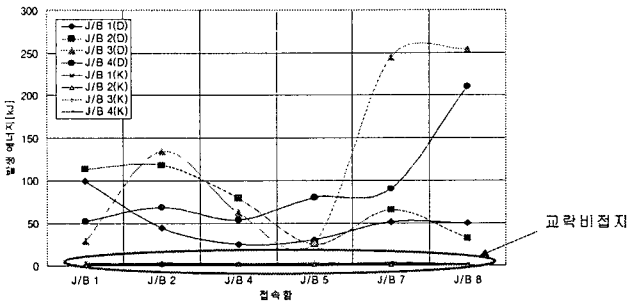


그림 8 GM-1모델에서 절연통보호장치에서의 발생 에너지 (D : 대지간접지방식, K : 교락비접지방식)

Fig. 8 Generation energy of CCPU in GM-1

3.2 지락고장 모델계통 2(GM-2) 및 에너지 특성 검토 결과

지락고장 모델계통 2(GM-2)는 실제 운전중인 선로로, 총 선로길이 3.571[km]이고 전력구 방식에 삼각배열로 배치되어 있는 154kV OF 1200[mm]의 계통이다. 그림 9는 지락고장 분석에 사용된 실제계의 접속함간의 길이 및 CCPU 결선방식 등을 표현한 모델 계통도를 나타낸 것이다. 그림 9에서처럼 양단 전원단을 기준으로 첫 번째 크로스본드 대구간에서는 교락비접지방식과 대지간접지방식이 서로 혼용되어 사용되고 있음을 알 수 있다. 한편, 지락고장은 J/B #4에서 발생하는 것으로 하였다. GM-2 모델의 양단 전원부의 전원 임피던스는 표 4와 같다. 여기서 전원임피던스는 전력계통 설비정수표에서 해당선로의 모선 등가임피던스를 활용하였으며 이후에도 동일한 방법으로 적용하였다[7].

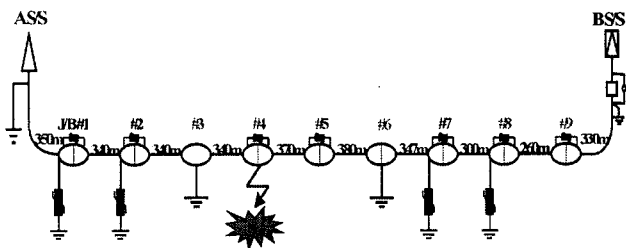


그림 9 GM-2 계통도

Fig. 9 Model system of GM-2

표 4 GM-2의 전원 임피던스

Table 4 Source impedance of GM-2

변전소	정(역)상분 임피던스[Ω]	영상분 임피던스[Ω]
A S/S	0.36987 + j3.22225	0.79686 + j4.33291
B S/S	0.40554 + j3.32187	1.05299 + j4.48232

그림 9와 같은 GM-2 모델에서 J/B #4의 접속함에서 고장이 발생하였을 때 절연통보호장치에 발생하는 에너지를 분석하였다. 그림 10에서처럼 절연통보호장치에 발생하는 에너지

는 교락비접지방식으로 접속되어 있는 절연통보호장치에서는 최대 2.84[kJ]로 작게 나타났으나, 양단 전원단 첫 번째 크로스본드 대구간 내에 대지간접지방식과 교락비접지방식이 혼용된 구간에서 대지간접지방식으로 설치되어 있는 절연통보호장치에서 발생하는 에너지는 최대 170[kJ]로 상대적으로 높게 나타났다. 현재 국내에서는 급준파 임펄스 전압에 대한 CCPU의 에너지 흡수 능력만 규정하고 있으며 상용주파 고장에 대해서는 연구가 이루어지지 못한 실정이다. 따라서 높은 에너지 발생으로 인한 열화발생과 그 이후의 2차적 사고와의 연관성에 대한 체계적인 연구는 필요할 것으로 사료된다.

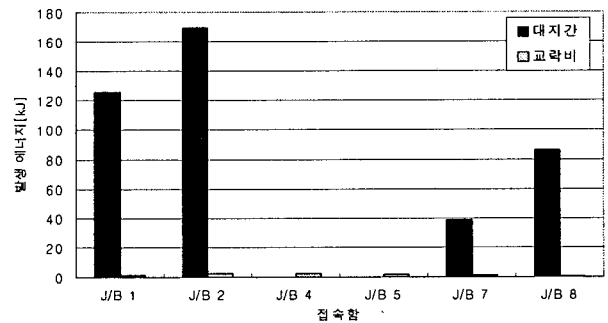


그림 10 GM-2의 절연통보호장치에서의 에너지

Fig. 10 Energy of CCPU in GM-2

3.3 지락고장 모델계통 3(GM-3) 및 에너지 특성 검토 결과

지락고장 모델계통 3(GM-3)은 실제계통으로서 154kV OF 2000[mm], 2회선 선로이다. 총 선로길이 6.264[km]이며, 포설 방식은 전력구식과 관로식이 혼합된 형태이다. 절연통보호장치의 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 11은 GM-3의 케이블 접속형태 및 구간길이를 표현한 모델 계통도를 나타낸 것이다. GM-3 모델의 양단 전원부의 전원 임피던스는 표 5와 같다.

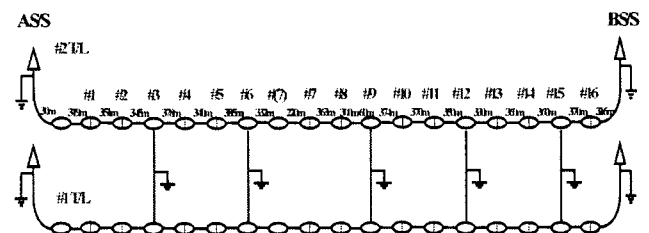


그림 11 GM-3 계통도

Fig. 11 Model system of GM-3

표 5 GM-3의 전원 임피던스

Table 5 Source impedance of GM-3

변전소	정(역)상분 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

표 6은 그림 11의 GM-3 모델, #2 T/L의 J/B #2, #10, #14에서 1선 지락고장이 발생했을 때 절연통보호장치 결선방식에 따라 절연통보호장치에서 발생하는 에너지 계산결과이다. 표 6에서처럼 대지간접지방식에서는 최대 고장발생지점 부근에서 259[kJ]로 높게 나타났으나 교락비접지방식에서의 에너지 상승은 비교적 적었으며 #1 T/L에서 발생한 절연통보호장치의 에너지 상승도 높지 않았다.

표 6 GM-3 모델의 절연통보호장치 에너지 계산결과
Table 6 Energy calculation results of CCPU in GM-3

고장위치		#2T/L J/B#2		#2T/L J/B#10		#2T/L J/B#14		
T/L명		#2T/L	#1T/L	#2T/L	#1T/L	#2T/L	#1T/L	
교락비접지방식 [kJ]	IJ1	5.39	0.65	0.44	0.38	0.22	0.19	
	IJ2	6.7	0.6	0.46	0.32	0.3	0.06	
	IJ4	0.67	0.48	0.44	0.28	0.3	0.08	
	IJ5	0.65	0.36	0.56	0.19	0.35	0.18	
	IJ7	0.9	0.51	0.96	0.07	0.4	0.45	
	IJ8	0.79	0.5	1.11	0.22	0.74	0.6	
	IJ10	1.56	0.87	2.6	0.34	1.16	0.93	
	IJ11	0.3	0.26	0.51	0.33	0.59	0.36	
	IJ13	0.31	0.19	0.48	0.31	1.7	0.31	
	IJ14	0.27	0.07	0.43	0.37	3.41	0.4	
	대지간접지방식 [kJ]	IJ1	259	2.1	151	5	220	8.4
		IJ2	230	1.7	141	44	140	70.3
		IJ4	187	4.6	152	7.6	76.8	57.2
		IJ5	7	80	116	50	111	54.7
IJ7		178	19.6	43.7	35.1	66.6	50	
IJ8		57.9	20.8	110	0.2	108.1	7.9	
IJ10		92.6	20.8	93.8	1.01	44	0.7	
IJ11		20.3	40.2	74.9	0.2	51	25.2	
IJ13		51.1	10.5	65.3	0.4	70	0.2	
IJ14		26.2	9.8	37.7	0.3	66	0.3	

표 7 GM-3 모델의 접지선 및 크로스본드 리드선에 발생하는 에너지(교락비접지방식)

Table 7 Energy that occurs on grounding and crossbonded lead of GM-3(bridging non-grounding type)

리드선길이	1m [kJ]	3m [kJ]	5m [kJ]
고장지속시간	4[cycle]	4[cycle]	4[cycle]
J/B #1	0.44	1.33	2.22
J/B #2	3.42	10.2	17
J/B #3	3.19	9.57	15.9
J/B #4	0.1	0.52	0.87
J/B #5	0.1	0.52	0.87
J/B #6	1.63	4.89	8.16
J/B #7	0.18	0.55	1
J/B #8	0.17	0.54	0.9
J/B #9	0.008	0.02	0.04
J/B #10	0.3	0.9	2.5
J/B #11	0.3	0.9	1.5
J/B #12	0.02	0.06	0.1
J/B #13	0.14	0.42	0.69
J/B #14	0.13	0.4	0.67
J/B #15	0.13	0.08	0.13

표 8 GM-3 모델의 접지선 및 크로스본드 리드선에 발생하는 에너지(대지간접지방식)

Table 8 Energy that occurs on grounding and cross-bonded lead of GM-3(direct grounding type)

리드선길이	1m [kJ]	3m [kJ]	5m [kJ]
고장지속시간	4[cycle]	4[cycle]	4[cycle]
J/B #1	3.29	9.88	16.4
J/B #2	3.56	10.7	17.8
J/B #3	0.25	0.76	1.3
J/B #4	0.26	0.77	1.29
J/B #5	0.25	0.76	1.3
J/B #6	0.05	0.15	0.24
J/B #7	0.19	0.57	0.95
J/B #8	0.2	0.6	1
J/B #9	0.02	0.06	0.1
J/B #10	0.26	0.79	1.32
J/B #11	0.26	0.79	1.32
J/B #12	0.03	0.1	0.17
J/B #13	0.11	0.34	0.57
J/B #14	0.11	0.34	0.57
J/B #15	0.01	0.04	0.06

표 7과 표 8은 GM-3 모델, #2 T/L의 J/B #2 지점에서 1선 지락고장이 발생했을 때 각각 교락비접지방식과 대지간접지방식에서 고장이 발생한 선로의 크로스본드 리드선과 접지선의 길이 및 고장지속시간에 따른 에너지 발생량을 나타내었다. 표에서처럼 리드선의 길이가 길수록 발생하는 에너지의 양은 상승하며, 고장 지속시간의 증가와 비례하여 에너지 양도 증가하고 있다. 이는 시스템의 크기와의 직접적인 상관관계에 있으므로 고장발생 지점의 크로스본드 대구간 내에서 발생하는 에너지는 그 외의 지점에서보다 높게 나타나고 있다.

3.4 지락고장 모델계통 4(GM-4) 및 에너지 특성 검토 결과

GM-4는 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. CCPU 결선은 교락비접지방식이며, 그림 12는 GM-4의 혼합송전계통 해석모델 계통도를 나타낸 것이다. 1선 지락고장은 각각 J/B #2, J/B #7, J/B #14, J/B #19 지점에서 발생하는 것으로 하였다. GM-4의 양단 전원부의 전원 임피던스는 표 9와 같다.

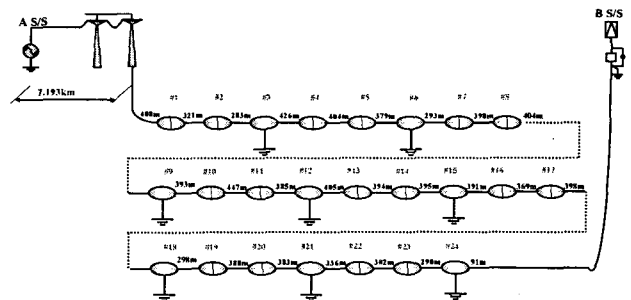


그림 12 GM-4 계통도
Fig. 12 Model system of GM-4

표 9 GM-4의 전원 임피던스

Table 9 Source impedance of GM-4

변전소	정(역)상분 임피던스[Ω]	영상분 임피던스[Ω]
A S/S	0.4403 + j6.2118	1.4994 + j10.3649
B S/S	0.5831 + j7.8302	1.9278 + j14.2381

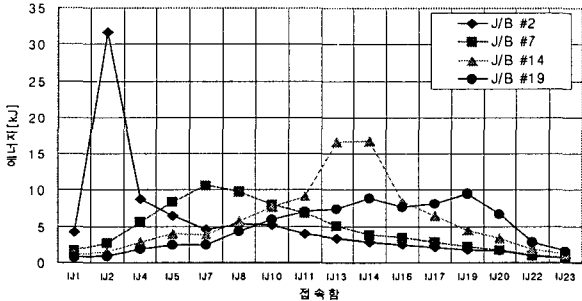


그림 13 GM-4 모델의 절연통보호장치 에너지 계산결과

Fig. 13 Energy calculation results of CCPU in GM-4

그림 13에서는 GM-4 모델의 각 고장위치에 따른 절연통 보호장치 에너지를 나타내었다. 그림에서처럼 고장지점에서 절연통보호장치의 에너지는 최대 31[kJ]까지 상승하였으나, 대지간접지방식과 비교하면 상대적으로 낮은 값이다. 또한 접지선 및 크로스본드 리드선에서 발생하는 에너지는 표 9에서처럼 고장이 발생한 J/B #14 지점의 크로스본드 대구간 내에서 상대적으로 높은 값을 보이며, 리드선의 길이와 고장지속시간이 증가할수록 높아지고 있다.

표 9 GM-4의 접지선 및 크로스본드 리드선 에너지 계산결과 (고장위치 - J/B #14)

Table 9 Energy calculation result of grounding and crossbonded lead at GM-4(fault point-J/B #14)

리드선길이	1[m]		3[m]		5[m]	
	4	0.5	4	0.5	4	0.5
J/B #1	0.17	1.3	0.52	3.90	0.87	6.56
J/B #2	0.18	1.38	0.55	4.10	0.97	6.92
J/B #3	0.01	0.08	0.03	0.26	0.06	0.43
J/B #4	0.16	1.24	0.50	3.70	0.83	6.21
J/B #5	0.16	1.24	0.50	3.70	0.83	6.21
J/B #6	0.02	0.15	0.06	0.45	0.10	0.75
J/B #7	0.21	1.57	0.63	4.70	1.0	7.86
J/B #8	0.22	1.58	0.64	4.80	1.0	8.06
J/B #9	0.02	0.14	0.05	0.40	0.10	0.69
J/B #10	0.22	1.69	0.67	5.0	1.12	8.46
J/B #11	0.22	1.69	0.67	5.0	1.12	8.46
J/B #12	0.93	7.0	2.80	21.0	4.60	35.0
J/B #13	1.90	14.2	5.70	42.8	9.50	71.4
J/B #14	2.80	21.3	8.50	64.0	14.2	106
J/B #15	1.28	9.60	3.80	28.7	6.40	48.0
J/B #16	0.30	2.26	0.90	6.70	1.50	11.2
J/B #17	0.30	2.26	0.90	6.70	1.50	11.2
J/B #18	0.01	0.11	0.04	0.35	0.07	0.60
J/B #19	0.30	2.20	0.88	6.63	1.50	11.0
J/B #20	0.30	2.20	0.88	6.63	1.50	11.0
J/B #21	0.007	0.05	0.02	0.16	0.04	0.30
J/B #22	0.24	1.77	0.70	5.30	1.18	8.90
J/B #23	0.22	1.65	0.66	4.90	1.10	8.30

4. 뇌 서지 침입시 에너지 특성 검토

국내의 낙뢰 발생별 뇌격전류 크기에 따른 분포는 60[kA] 이하가 98[%]이며, 1996년~2002년 평균 뇌격전류는 20[kA]이다. 그러나 2002년 경북 안동시에서는 최대 171.4kA의 뇌격이 발생하기도 하였다[8-10]. 본 논문에서는 그림 14에 나타난 것처럼 뇌 서지 해석을 위한 뇌격전류 피크값(I_0)을 60[kA] 뿐만 아니라 가혹한 조건 모의를 위하여 100[kA]도 설정하여 검토하였으며, 뇌 서지 임피던스는 400[Ω], 뇌격파형은 램프파를 사용하여 선형적으로 상승, 감쇄하는 것으로 근사화하였다[11]. 특히 뇌격파형은 실측결과에 기초하지만 파두장은 짧고 가혹한 것을 고려해 2[μs]로 하고, 파미장은 케이블내의 서지 왕복반사에 의한 전위상승에 주는 영향이 크므로 실측 데이터의 90[%] 이상을 점유하는 70[μs]로 하였다.

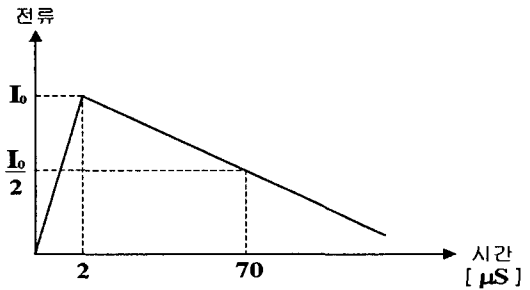


그림 14 뇌격전류 파형

Fig. 14 Waveform of lightning current

4.1 뇌 서지 모델계통 1(LM-1) 및 에너지 특성 검토 결과

뇌 서지 모델계통 1(LM-1)은 총 9개의 접속함간의 길이가 일정하게 300[m]인 지중송전계통에 10[km]의 가공선로가 혼합된 혼합송전계통에서 종단접속부로부터 1[km] 떨어진 지점에서 100[kA]의 뇌격이 침입하였을 때 지중송전계통의 도체 및 시스, 접속함에 미치는 서지 영향을 검토하였다

그림 15에서는 뇌 서지 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 절연통보호장치 결선방식은 대지간접지방식과 교락비접지방식, 이 두 방식이 혼합된 방식을 각각 적용하였다.

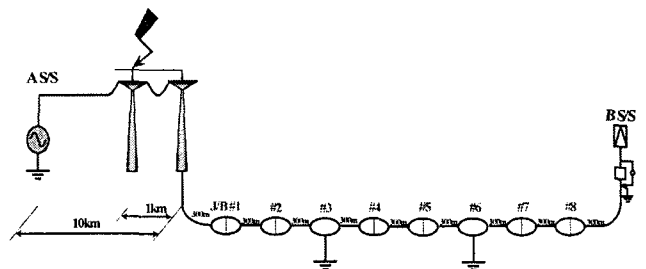


그림 15 LM-1 계통도

Fig. 15 Model system of LM-1

표 10은 그림 15의 LM-1 모델에 100[kA]의 뇌격강도를 가진 뇌 서지 침입시 지중송전계통의 절연통보호장치에 발생하는 에너지량을 계산한 결과이다. 에너지 계산을 위한 고장 지속시간은 140[μ s]이다. 표 8에서처럼 뇌 서지는 급준파이므로 상대적으로 고장지속시간이 짧기 때문에 지락고장에 비해 발생하는 에너지량은 크지 않았고 리드선의 길이에 따른 변화도 심하지 않았으나, 뇌격 침입점에서 최대 약 20[kJ]의 에너지가 발생하였으며 침입점에서 멀어질수록 에너지량도 감소하는 특성을 보이고 있다

표 10 LM-1 모델의 절연통보호장치 발생 에너지
Table 10 CCPU energy of LM-1

절연통 보호장치	리드선	J/B #1	J/B #2	J/B #4	J/B #5	J/B #7	J/B #8
대지간 접지방식	무	18.8	10.7	11.3	10.1	7.3	5.7
	1[m]	17.97	17.4	11	10.2	7.4	5.6
	3[m]	16.3	16.4	10.5	10.2	7.2	5.6
	5[m]	14.9	15.9	10	6.4	7	5.4
교락비 접지방식	무	17.8	15.6	13.6	12	10.1	10.2
	1[m]	17.58	15.7	13.7	12.2	10.3	10.4
	3[m]	16.58	15	13.5	12.2	10.3	9.97
	5[m]	16.1	14.8	13.6	12.2	10.1	9.7
혼합방식: 교락비(대지간)	무	14.27 (2.11)	13.3 (1.92)	11.89 (1.29)	11 (1.15)	9.78 (0.67)	9.9 (0.65)
	1[m]	14.5 (2.17)	13.6 (1.9)	12 (1.3)	11.2 (1.14)	9.8 (0.7)	9.9 (0.64)
	3[m]	13.8 (2.1)	12.9 (2.1)	11.9 (1.4)	11.1 (1.23)	9.8 (0.77)	9.6 (0.73)
	5[m]	13.3 (2.15)	13 (2.05)	12 (1.5)	11.2 (1.3)	9.6 (0.8)	9.35 (0.7)

4.2 뇌 서지 모델계통 2(LM-2) 및 에너지 특성 검토 결과

뇌 서지 해석 모델계통 2인 LM-2는 GM-4 모델과 동일한 345kV 혼합송전계통의 실제용 모델이며, 뇌격전류는 그림 14에서처럼 램프파를 사용하여 선형적으로 상승, 감쇄하는 것으로 근사화 하였다. 뇌격전류의 크기는 60[kA]와 100[kA], 파두장과 파미장의 시간은 2/70[μ s]이며 뇌 서지 임피던스는 400[Ω]으로 하였다. 또한 뇌격은 그림 16의 계통도에서처럼 케이블 헤드로부터 1[km] 지점에서 침입하는 것으로 하였다.

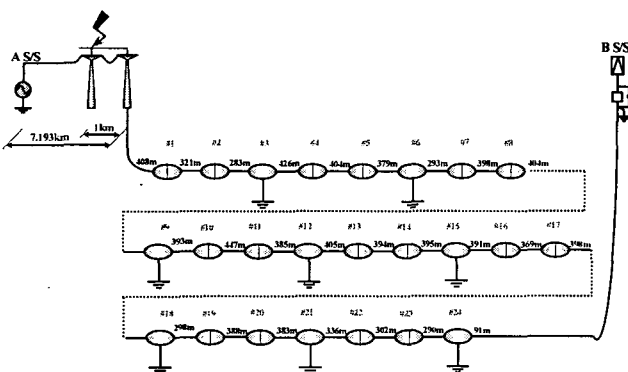


그림 16 LM-2 계통도
Fig. 16 Model system of LM-2

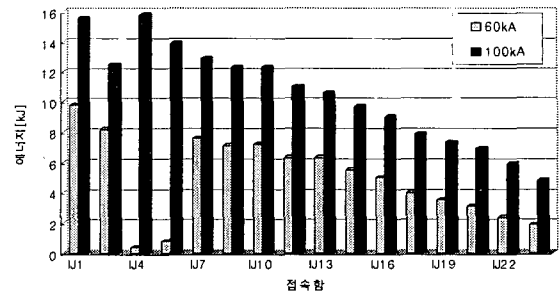


그림 17 LM-2 모델의 절연통보호장치 에너지(리드선 길이: 3[m])
Fig. 17 CCPU energy of LM-2(lead length : 3[m])

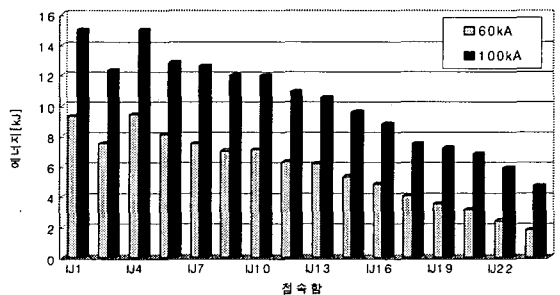


그림 18 LM-2 모델의 절연통보호장치 에너지(리드선 길이: 5[m])
Fig. 18 CCPU energy of LM-2(lead length : 5[m])

그림 17과 그림 18은 그림 16의 LM-2 모델에서 각각 뇌격전류가 60[kA]와 100[kA]일 때 리드선 길이에 따라 절연통보호장치에서 발생하는 에너지를 계산한 결과이다. 그림에서처럼 100[kA]의 경우는 60[kA]에 비해 발생하는 에너지량이 크나 에너지 계산을 위한 고장지속시간이 140[μ s]로 매우 짧기 때문에 전류에 대한 발생 에너지는 크지 않았다. 또한 접지선 및 크로스본드 리드선에서도 최대 0.02[J]로 발열량이 매우 작게 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 OF 케이블 계통에서 케이블 절연파괴에 의한 지락고장과 뇌 서지 침입시 접속함 및 절연통보호장치 등에서 발생하는 에너지를 다양하게 분석하였으며 본 논문의 결과를 요약해서 쓰면 다음과 같다.

- 1) 실증시험 결과 아크 방호길이가 길수록 파괴시 에너지가 높아지며 파괴 시점도 빨라진다.
- 2) 고장전류에 따른 에너지 분석결과 절연통 파괴가 가능한 에너지인 300[kJ]에 도달하는 시간은 고장전류 10kA에서 1.3[cycle]이었으며, 1000[kJ]까지의 도달 시간은 10kA에서 4.3[cycle]로 차단기 동작시간 이후였으나 20[kA]이상에서는 차단기 동작 이전에 접속함이 모두 파괴된다.
- 3) 절연통보호장치의 경우 1선 지락발생시 교락비접지방식에 비해 대지간접지방식에서 에너지량이 크게 나타나

대지간접지방식의 절연통보호장치 파괴 및 열화의 가능성이 높았다.

- 4) 뇌 서지의 경우에는 급준파로 고장지속시간이 짧아 실제 계통 모델에서 최대 16[kJ]로 비교적 낮게 나타났으나, 뇌 서지 침입시 서지 과전압에 의한 파손 및 열화축진의 가능성이 있다.
- 5) 크로스본드 리드선의 길이에 비례하여 에너지량이 증가한다. 따라서 크로스본드 리드선은 가급적 짧게 설치하는 것이 유리하다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 원광대학교의 교비지원에 의하여 연구됨

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, "지중송전 케이블시스템", 2002.12
- [2] 전력연구원, "지중송전 케이블의 써어지 보호 대책에 관한 연구, 1993. 6
- [3] 전력연구원, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구(최종보고서)", 1998. 1
- [4] 일본전기학회 기술보고, "케이블계통에서의 서지현상과 대책", 제 366호(II부), 1991. 4
- [5] ATP, "EMTP Rule Book", Vol. I, II, 1987
- [6] 전력연구원, "지중케이블 설비체계 분석 및 케이블 보호 대책 수립에 관한 연구(최종보고서)", 2004. 12
- [7] 한국전력거래소, "2002년 전력계통 설비정수 종합표", 2002. 6
- [8] 전력연구원, "LPATS를 이용한 뇌격누적 분포곡선 작성에 관한 연구(최종보고서)", 1993
- [9] 우정욱, 심음보, "LPATS에 의한 7년간의 한반도 뇌격 특성분포" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2003. 8.
- [10] 기상청, "낙뢰연보", 1999
- [11] M.A.Uman, "Lightning", Dover Pub. Inc, N.Y, 1984

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). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재, 원광대 공업기술개발연구소 연구원

Tel : (063)850-6735

E-mail : chekyun@wonkwang.ac.kr



이 중 범 (李鍾範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987~1990년 한국전기연구원 지중송전연구실 실장. 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(공학박), 1980~현재 원광대 공대 전기전자및정보공학부 교수

Tel : (063)850-6733

E-mail : jehoseo@wonkwang.ac.kr



강 지 원 (姜地原)

1965년 1월 6일 생. 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1993년~현재, 한전 전력연구원 전력계통연구소 선임연구원.

Tel : (042)865-5884

E-mail : jwkang@kepri.re.kr



이 동 일 (李東一)

1958년 3월 15일 생. 1979년 단국대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재, 한전 전력연구원 전력계통연구소 책임연구원.

Tel : (042)865-5850

E-mail : dilee@kepri.re.kr