

OF 케이블의 온도 및 에너지 특성 해석

강지원*, 장태인, 홍동석, 이동일
한국전력 전력연구원

정채균, 이종범
원광대

Analysis of temperature and energy characteristic of OF Cable

J.W.Kang*, T.I.Jang, D.S.Hong, D.I.Lee
KEPRI

C.K.Jung, J.B.Lee
Wonkwang University

Abstract - This paper analyses the characteristic of temperature and energy of oil field cable in transient state such as lightning surge. For analysis in various conditions, many actual underground power cable systems are modeled using ATP. These results are applied for the examination of temperature increase when the hitting of lightning surge are occurred. The inner part temperature of OF cable is analysed according to the various kinds of cable using the thermal model of transient state. The temperature increase of sheath and crossbonded lead by fault current is also analysed using IEC 60949.

Flash 발화온도에 비해 높으며, PVC는 PE에 비해 온도에 강함을 알 수 있었다. 또한 표 1에서는 절연유와 케이블 부분별 인화점과 도체 부분의 용융점을 나타내었다.

한편, OF 케이블에 대한 도체 허용온도와 운전조건 측면에서는 일본과 미국에서는 단시간 도체 허용온도를 규정하고 있고 고장순시 허용온도는 일본에서만 규정하고 있으며, 일본의 단시간 도체 허용온도는 220kV 및 275kV용 전력케이블에 대하여 95[°C]를 사용하고 있으나, 그 외의 전압의 경우 특별한 규정은 없으며 66kV와 77kV에서는 90[°C], 154kV에서는 95[°C]를 각각 적용하여 운용하고 있는 것으로 검토되었다.

1. 서 론

국내 지중송전계통은 1971년 154kV OF 케이블이 최초로 운전을 시작한 이후 90년대에 이르러 345kV OF 케이블이 운전되면서 점차 전력수요가 증가하고 있는 전력계통의 전력수송에 큰 역할을 수행해오고 있으며 지중송전선로의 점유율은 대도시 지역을 중심으로 매년 증가하고 있는 추세이다[1-2].

그러나 케이블이 점차 노후되면서 열화로 인한 고장 현상도 점차 증가하고 있어 이에 대한 실질적인 분석 및 대책 마련도 시급한 과제로 거론되고 있다. 실제로 1994년부터 2003년까지 10년간 지중송전계통에서 발생한 고장을 분석한 결과 고장 빈도는 해마다 증가하고 있고 특히, XLPE 케이블에 비해 OF 케이블에서 발생하는 횡수가 3배 이상 많았다. 그 원인으로는 절연과피 및 누유에 의한 고장이 대부분이었다. 실제로 최근 지하 공동구 및 전력구내의 OF 케이블 고장으로 인해 발생한 화재로 인한 손실의 예방과 케이블 계통에서 과도현상 발생시 2차 사고로의 발전 가능성에 대한 연구 및 케이블 내부의 열 특성, 온도 및 에너지특성에 대한 분석 등 고장 이후의 케이블 특성에 대한 연구는 부족한 실정에 있다.

따라서 본 논문에서는 혼합송전선로에서 뇌 썬지 침입시 과도상태 열 모델 및 IEC-60949를 이용해 OF 케이블의 온도 및 에너지특성을 검토하였으며 나아가 케이블 내부 온도상승에 의한 발화가능성 검토결과를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 OF 케이블의 열 특성 검토

일반적으로 케이블 화재시험은 ANSI A2.1-1972[4]에 명시된 표준 시간-온도 곡선에 의해 수행된다. 만약 케이블 절연체의 온도가 자발적 발화온도까지 상승한다면 화재가 발생할 수 있으며, 아크가 발생하여 Flash가 발생하면 발화온도는 급격히 저하된다. ANSI-K95.111[4]에서 정의한 재질에 따른 Flash-Ignition과 자발적 발화온도를 비교 검토한 결과 자발적 발화온도는

표 1. 케이블 부분별 인화점 및 용융점

Material	온도[°C]
도체	1,083
절연체	327
금속시스(Al)	660
방식층(PVC)	530
절연유	132

2.2 OF 케이블의 내부온도 계산

케이블 정상상태에서는 100[%]의 부하율을 가정하여 열용량에 의한 온도 특성을 고려하지 않고, 열저항만으로 이루어진 열 모델을 사용한다. 그러나 과도상태에서는 송전케이블 및 주변 매질의 열저항과 더불어 전기적 등가회로의 정전용량에 해당하는 열용량을 고려하여 열 모델을 표현한다. 그림 1은 전력 케이블의 절연체와 방식층을 각각 2개의 층으로 나누는 π형 분포 등가회로로 근사화하여 등가모델로 근사화시킨 모델을 나타낸 것이다.

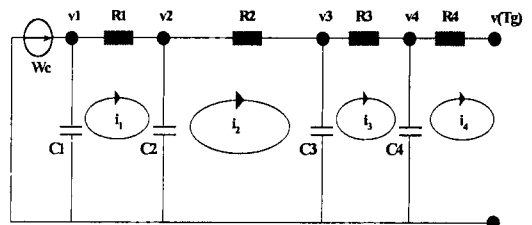


그림 1. 케이블 과도상태 등가 회로

그림 1에 나타난 케이블 각 부분 등가 열저항 및 열용량은 다음의 계산식에 의해 얻어진다.

$$C_i = C_{con} + (P_{in} \times C_n) \tag{1}$$

$$C_2 = (1 - P_{ins}) \times C_n + (P_{ins} \times C_n) \quad (2)$$

$$C_3 = (1 - P_{ins}) \times C_n + C_{she} + (P_{jac} \times C_{jac}) \quad (3)$$

$$C_4 = (1 - P_{jac}) \times C_{jac} \quad (4)$$

$$R_1 = R_i/2, R_2 = R_i/2, R_3 = R_j, R_4 = R_{air} \quad (5)$$

여기서,

$$C_{con} = c \times \pi \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \quad (6)$$

C_{con} : 도체의 열용량[J/K·m]

c : 도체의 체적 비율[J/m³·K]

d_c : 도체의 외경[m]

$$C_n = c_i \times \frac{\pi}{4} \times d_c (D_i - d_c) \quad (7)$$

$$C_n = c_i \times \frac{\pi}{4} \times D_i (D_i - d_c) \quad (8)$$

c_i : 절연체의 체적 비율[J/m³·K]

D_i : 절연체의 외경[m]

C_n, C_n : 절연체 각부의 열용량[J/K·m]

$$C_{she} = c_s \times \frac{\pi}{4} \times (D_{so}^2 - D_{si}^2) \quad (9)$$

C_{she} : 시스의 열용량[J/K·m]

c_s : 시스의 체적 비율[J/m³·K]

D_{so} : 시스의 외경[m], D_{si} : 시스의 내경[m]

$$C_{jac} = c_j \times \frac{\pi}{4} \times (D_{jo}^2 - D_{ji}^2) \quad (10)$$

C_{jac} : 방식층의 열용량[J/K·m]

c_j : 방식층의 체적 비율[J/m³·K]

D_{jo} : 방식층의 외경[m], D_{ji} : 방식층의 내경[m]

P_{ins}, P_{jac} : 열용량 분배계수

R_i : 절연체 열저항[K·m/W]

R_j : 자켓의 열저항[K·m/W]

R_{air} : 대기층 열저항[K·m/W]

그림 1에 나타난 등가회로에서, 각 노드의 온도는 키르히호프 법칙을 사용하여 식 (11)과 같이 상태방정식으로 구할 수 있다. 본 논문에서는 아래의 상태방정식을 4차 Runge-Kutta법을 이용하여 해를 구하였다.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_1 R_1} & \frac{1}{C_1 R_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1 R_1} & -\frac{1}{C_1 R_1} & \frac{1}{C_1 R_2} & 0 \\ \frac{1}{C_1 R_2} & \frac{1}{C_1 R_2} & -\frac{1}{C_1 R_2} & \frac{1}{C_1 R_3} \\ 0 & \frac{1}{C_1 R_2} & \frac{1}{C_1 R_2} & -\frac{1}{C_1 R_3} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_3} & -\frac{1}{C_1 R_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{W_c}{C_1 R_1} \quad (11)$$

여기서,

v_1 : 케이블 도체 온도[°C], v_2 : 케이블 절연체 온도[°C]

v_3 : 케이블 시스 온도[°C], v_4 : 케이블 방식층 온도[°C]

v_5 : 케이블 외부 온도[°C]

한편, 단락시 시스, 접지선 및 크로스본드 리드선에 발생하는 온도 상승은 식 (12)와 같이 IEC-60949[3]에 의해 구할 수 있다. 표 2에서는 수식 적용을 위한 도체의 물리적상수를 나타내었다.

$$\theta_f = (\theta_i + \beta) e^{\frac{I^2 A D}{K^2 S^2}} - \beta \quad (12)$$

여기서,

$$k = \sqrt{\frac{\sigma_c (\beta + 20)}{\rho_{20}}} \quad (13)$$

σ_c : 접지선 재료의 체적비열[J/°C]

β : 0[°C]에서 도체 열저항의 역수

ρ_{20} : 20도에서 도체의 전기저항[Ωmm]

θ_f : 도체의 최종온도[°C]

θ_i : 도체의 초기온도[°C]

표 2. IEC-60949 규격에 사용된 도체의 물리적 정수

재료	k	β	σ_c	ρ_{20}
동	148	228	2.5×10^6	2.84×10^{-8}
알루미늄	226	234.5	3.45×10^6	1.241×10^{-8}

2.3 뇌 썬지 발생시 OF 케이블 온도 특성

본 절에서는 가공 송전계통과 지중 송전계통이 혼합된 계통에 침입한 뇌 썬지로 인하여 케이블 도체 및 시스에 발생하는 내부온도를 분석하였다. 뇌 썬지 분석을 위해 실제 모델 1개를 포함 총 2개의 모델계통을 대상으로 해석하였다. 본 논문에서 적용한 뇌격전류는 램프파를 사용하여 선형적으로 상승, 감쇄하는 것으로 근사화 하였으며 뇌격전류 피크값(I_0)을 60[kA]뿐만 아니라 가혹한 조건 모의를 위하여 100[kA]도 설정하여 검토하였으며, 뇌격전류의 파두장과 파미장의 시간은 2/70[μs]이고, 뇌 썬지 임피던스는 400[Ω]로 하였다.

한편, 그림 2의 뇌 썬지 모델계통 1(LM-1)은 총 9개의 접속함간의 길이가 일정하게 300[m]인 OF 1200[mm] 지중송전계통에 10[km]의 가공선로 ACSR 410[mm]×2B가 혼합된 혼합송전계통에서 종단접속부로부터 1[km] 떨어진 지점에서 100[kA]의 뇌격이 침입하였을 때 지중송전계통의 도체 및 시스, 접속함에 미치는 썬지 영향을 검토하였다. 또한 절연통보호장치 결선방식은 대지간접지 방식과 교락비접지방식을 각각 적용하였다.

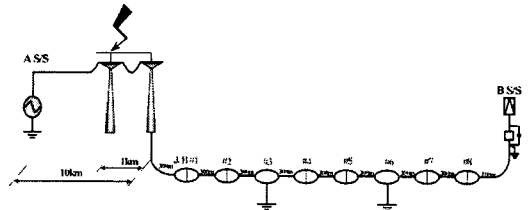


그림 2. LM-1 계통도

그림 3, 4는 LM-1 모델에서 각각 대지간접지방식과 교락비접지방식에서 각 접속함의 시스전류에 따른 시스 온도 상승을 계산한 결과이다. 온도계산을 위해 고장지속시간은 뇌격이 소멸하는 140[μs]를 기준으로 하였으며, 초기온도는 40[°C]로 설정하였다. 그림에서처럼 시스온도의 변화에 따라 온도변화는 두 경우에서 모두 크게 나타나지 않았다.

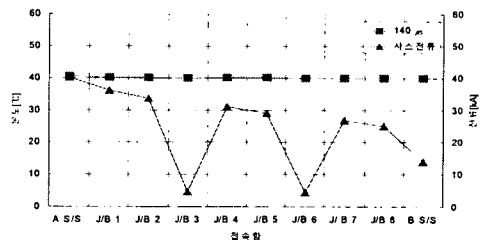


그림 3. LM-1의 시스온도 계산(대지간접지방식)

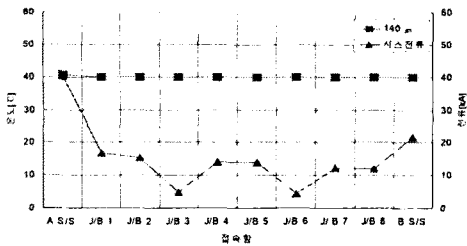


그림 4. LM-1의 시스템온도 계산(교락비접지방식)

또한, 뇌 썩지 해석 모델계통 2(LM-2)는 그림 5와 같이 345kV 혼합송전계통의 실제통 모델이며, 뇌격전류의 크기는 60[kA]와 100[kA], 파두장과 파미장의 시간은 2/70[μs]이며 뇌 썩지 임피던스는 400[Ω]으로 하였다. 또한 뇌격은 케이블 헤드로부터 1[km] 지점에서 침입하는 것으로 하였다.

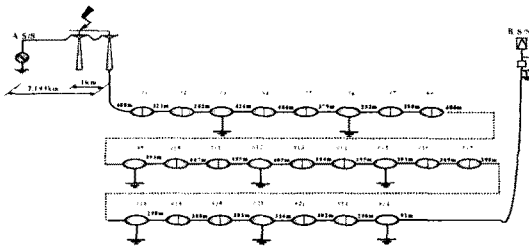


그림 5. 실제통 해석모델 계통도(LM-2)

그림 6은 LM-2 모델에서의 뇌격전류에 따른 시스템전류이다. 이 경우에서도 온도상승 분석결과 시스템전류에 따른 온도상승이 초기온도가 40[°C]일 때 최대 41[°C] 온도상승이 거의 나타나지 않았다. 따라서 뇌 썩지와 같은 급준파는 고장지속시간이 매우 짧기 때문에 뇌 썩지 침입시 썩지 전류 유입에 따른 케이블 내부온도 상승은 매우 희박할 것으로 사료된다.

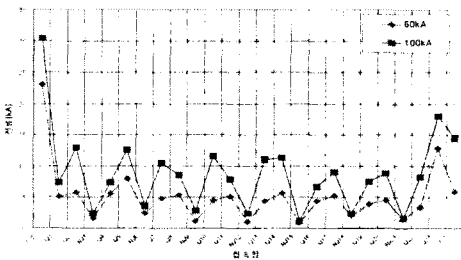


그림 6. LM-2 계통의 뇌격전류에 따른 시스템전류

2.4 뇌 썩지 발생시 OF 케이블 에너지 특성

본 절에서는 OF 케이블에 뇌 썩지 발생시 접속함에서 발생하는 에너지를 분석하였으며, 에너지 계산 방법은 식 (14)와 같으며 이는 EMTP를 이용해 계산된다.

$$W = \int_{t_0}^{t_1} V(t)I(t)dt \quad (14)$$

여기서, t_0 : 고장 발생시간, t_1 : 고장 제거시간

그림 2의 LM-1 모델에 대한 100[kA]의 뇌격강도를 가진 뇌 썩지 침입시 지중송전계통의 절연통보호장치에 발생하는 에너지량을 계산한 결과 뇌 썩지는 급준파이므로 상대적으로 고장지속시간이 짧기 때문에 지락고장에 비해 발생하는 에너지량은 크지 않았고 리드선의 길이에 따른 변화도 심하지 않았으며, 침입점에서 멀어질수록 에너지량도 감소하는 특성을 보이는 것으로 검토되었다.

그림 7과 그림 8은 그림 5의 LM-2 모델에서 각각 뇌

격전류가 60[kA]와 100[kA]일 때 리드선 길이에 따라 절연통보호장치에서 발생하는 에너지를 계산한 결과이다. 그림에서처럼 100[kA]의 경우는 60[kA]에 비해 발생되는 에너지량이 크나 에너지 계산을 위한 고장지속시간이 140[μs]로 매우 짧기 때문에 전류에 대한 발생 에너지는 크지 않았다.

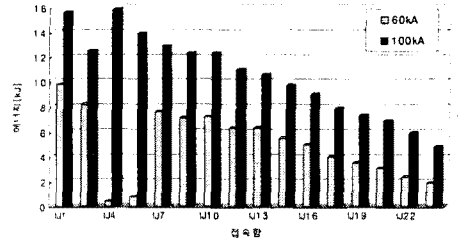


그림 7. LM-2 모델의 CCPU 에너지(리드선 : 3[m])

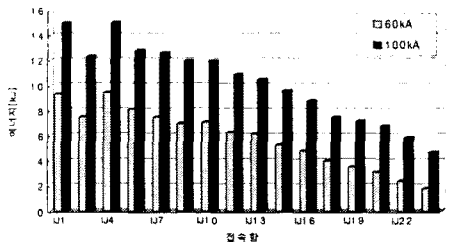


그림 8. LM-2 모델의 CCPU 에너지(리드선 : 5[m])

3. 결 론

본 논문에서는 혼합송전선로에서 뇌 썩지 침입시 과도 상태 열 모델 및 IEC-60949를 이용해 OF 케이블의 온도 및 에너지특성을 검토하였으며 나아가 케이블 내부 온도상승에 의한 발화가능성에 대해서 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 뇌 썩지에 의한 케이블 도체, 시스템 등의 온도상승은 낮았으며 온도상승에 의한 케이블 자체 발화가능성은 매우 희박한 것으로 검토되었다.
- 2) 뇌 썩지에 의한 에너지 검토결과 CCPU는 교락비접지가 대지간에 비해 유리한 것으로 검토되었으며, 에너지량 또한 낮았으나 CCPU의 소손가능성은 있으므로 면밀한 검토가 필요하다. 뇌 썩지에 의한 자체 발화가능성은 매우 희박한 것으로 검토되었다.
- 3) 리드선의 길이에 따라 에너지는 증가하는 경향이므로 리드선은 최대한 짧게 시공할 필요가 있는 것으로 검토되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전력연구원, "송전용량 증대를 위한 열방산회로 개선에 관한 연구(최종보고서)", 2003. 3
- [2] 전력연구원, "지중송전 케이블의 썩어지 보호 대책에 관한 연구, 1993. 6
- [3] IEC 60949, "Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effect", 1988.
- [4] IEEE Std. 634, "IEEE Standard Cable Penetration Fire Stop Qualification Test", 1978.
- [5] 전력연구원, "송전케이블의 허용전류 산정 프로그램 개발 연구(최종보고서)", 2001. 12
- [6] 일본전기학회 기술보고, "케이블계통에서의 썩지현상과 대책", 제 366호(II부), 1991. 4
- [7] 일본전기협회, "지중송전규정 JEAC 6021-2000", 2000