

OF 케이블 계통 과도상태 열특성 해석 및 평가

論 文
54A-10-4

Analysis and Estimation of the Transient Thermal Characteristics of OF Cable systems

姜地原^{*} · 李東一^{*} · 鄭彩均^{**} · 李鍾範^{***}

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

Abstract - This paper reviews the characteristic of thermal and temperature of oil field cable in transient state such as grounding fault and 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 single line to ground fault by the breakdown of insulation part and 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.

Key Words : OF Cable, Transient State, Thermal Model, Temperature Characteristic, Underground Power Cable System

1. 서 론

국내 지중송전계통은 1971년 154kV OF 케이블이 최초로 운전된 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 커다란 경제적, 사회적 손실을 미친 사례도 나타나고 있다. 그러나 이러한 손실의 예방과 케이블 계통에서 과도현상 발생시 2차 사고로의 발전 가능성에 대한 연구 및 케이블 내부의 열 특성 및 온도 특성에 대한 분석 등의 고장 이후의 케이블 특성에 대한 연구는 부족한 실정에 있다.

따라서 본 논문에서는 과도현상 발생시 화재 발생에 매우 취약한 OF 케이블을 대상으로 열 특성 및 온도 특성에 대해 검토 하고자 한다. OF 케이블의 내부온도는 과도상태 열 모델을 이용해 OF 케이블 종류별로 비교 분석 하였으며,

IEC 60949[3]를 이용해 고장전류에 의한 시스 및 크로스본드 리드선의 온도를 계산하여 케이블 내부온도 상승에 따른 Overheating에 대해서도 검토하였다. 또한 여러 실제통 모델을 포함한 다양한 조건의 계통에서 케이블 절연과피에 의한 지락 고장 및 뇌 서지 침입 등의 과도현상 발생시 나타나는 케이블 내부온도 상승에 대해서도 자세히 분석하였다.

2. OF 케이블 특성 검토

본 절에서는 OF 케이블 열 특성 검토 및 과도상태 열 모델을 이용한 케이블 내부온도 및 IEC 60949[3]를 이용한 단락전류에 의한 시스 및 크로스본드 리드선의 온도를 계산하여 케이블 내부온도 상승에 따른 Overheating에 대해 검토 하였다.

2.1 케이블 발화온도

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. 표 1은 ANSI-K95.111[4]에서 정의한 재질에 따른 Flash-Ignition과 자발적 발화온도를 나타낸 것이다. 표 1에서처럼 자발적 발화온도는 Flash 발화온도에 비해 높으며, PVC는 PE에 비해 온도에 강함을 알 수 있다. 또한 표 2에서는 절연유와 케이블 부분별 인화점과 도체 부분의 용융점을 나타내었다.

2.2 OF 케이블 구조 및 특성

OF 전력케이블은 그림 1처럼 중심부의 유통로, 도체, 절연지, 알루미늄 시스 및 방식층으로 구성되어 있고, 알루미늄 시스는 파부형으로 나선형으로 형성되어 있다. 표 3에서는 국내에서 운전 중인 대표적인 OF 케이블의 전기정수를 나타내었다.

† 교신저자, 正 會 員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博

E-mail : jwkang@kepri.re.kr

* 正 會 員 : 韓電 電力研究院 責任研究員 · 工博

** 正 會 員 : 圓光大 電氣工學科 · 博士課程

*** 正 會 員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 5月 12日

最終完了 : 2005年 9月 12日

표 1. ANSI-K95.111에서 정의한 재질별 발화온도

Table 1. Ignition temperature according to materials defined in ANSI-K95.111

Material	Flash-Ignition [°C]	Self-Ignition [°C]
Cotton	230-266	254
Newspaper	229	229
Pine Shavings	207-263	260
Wool	205	-
Polyethylene	340	348
PVC	390	454
Polytetrafluoroethylene	-	530
PVC-acetate	320-351	435-557
Polystyrene	335-360	487-496
Nylon 66	398-421	420-430

표 2. 케이블 부분별 인화점 및 용융점

Table 2. The flash and fusing point of cable

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

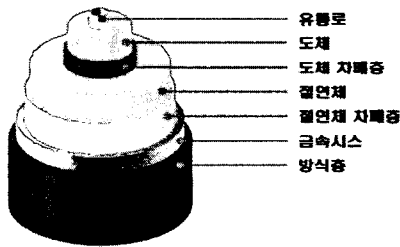


그림 1. OF 케이블의 구조

Fig. 1. Structure of OF cable

표 3. OF 케이블 종류에 따른 전기정수

Table 3. Electricity parameter according to the kinds of OF cable

케이블명	154kV-OFAZV	154kV-OFAZV	154kV-OFAZV
공칭단면적[mm ²]	600	1200	2000
도체내경[mm]	14	14	14
도체외경[mm]	35.6	45.6	56.8
절연체두께[mm]	10.5	12.0	11.5
시스두께[mm]	1.8	2.1	2.3
방식층두께[mm]	4.5	4.5	4.5
방식층외경[mm]	80.0	95.0	107.0
최대도체저항[Ω/km]	0.0299	0.0151	0.0090

또한 OF 케이블의 절연특성은 XLPE 케이블과 비교하여 절연체의 두께가 매우 다르다. 그 이유는 XLPE 케이블의 경우 OF 케이블에 비해 허용온도가 약간 높고, 실제 운용시 온도상승이 높아 상온에서의 시험전압에 온도 보정계수를 달리 고려하였기 때문이다. OF 케이블의 절연체는 탈이온 수세 절연지이며, 단위 두께당 상용주파 최저 파괴장도 및

뇌 임펄스 파괴장도는 각각 40[kV/mm]와 90[kV/mm]로 20[kV/mm]와 50[kV/mm]인 XLPE 케이블에 비해 절연장도가 우수한 특성이 있다.

3. OF 케이블 내부온도 계산

3.1 과도상태 열 모델 및 온도계산

케이블 정상상태에서는 100[%]의 부하율을 가정하여 열 용량에 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 2는 전력 케이블의 절연체와 방식층을 각각 2개의 층으로 나누는 π형 분포 등가회로로 근사화하여 등가모델로 근사화시킨 모델을 나타낸 것이다.

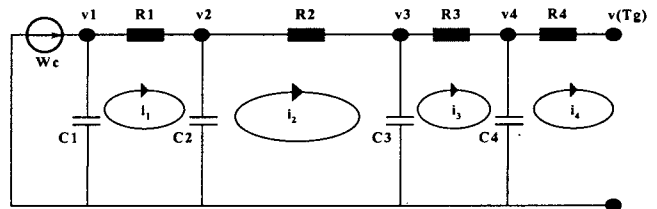


그림 2. 케이블 과도상태 등가 회로

Fig. 2. Cable equivalent circuit of transient state

그림 2에 나타난 케이블 각 부분 등가 열저항 및 열용량은 다음의 계산식에 의해 얻어진다.

$$C_1 = C_{con} + (P_{ins} + C_{I1}) \tag{1}$$

$$C_2 = (1 - P_{ins}) \times C_{I1} + (P_{ins} + C_{I2}) \tag{2}$$

$$C_3 = (1 - P_{ins}) \times C_{I2} + C_{she} + (P_{jac} + C_{jac}) \tag{3}$$

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

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

여기서,

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

C_{con} : 도체의 열용량[J/K · m], c : 도체의 체적 비율 [J/m³ · K], d_c : 도체의 외경[m]

$$C_{I1} = c_i \times \frac{\pi}{4} \times d_c (D_i - d_c) \tag{7}$$

$$C_{I2} = c_i \times \frac{\pi}{4} \times D_i (D_i - d_c) \tag{8}$$

c_i : 절연체의 체적 비율[J/m³ · K], D_i : 절연체의 외경[m], C_{I1}, C_{I2} : 절연체 각부의 열용량[J/K · m]

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

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 : 방식층의 열저항[K·m/W]

R_{air} : 대기층 열저항[K·m/W]

그림 2에 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.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_1 R_1} & \frac{1}{C_1 R_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2 R_1} & -\frac{1}{C_2 R_1} - \frac{1}{C_2 R_2} & \frac{1}{C_2 R_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_1 R_2} & -\frac{1}{C_1 R_2} - \frac{1}{C_1 R_3} & \frac{1}{C_1 R_3} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_3} & -\frac{1}{C_1 R_3} - \frac{1}{C_1 R_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_c \\ v_5(T_g) \end{bmatrix} \quad (11)$$

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]

그림 3 ~ 그림 5는 OF 600[mm²], 1200[mm²], 2000[mm²]에서 케이블 각 부분의 내부온도를 계산한 결과이다. 도체전류 통전조건은 16시간 동안 1,500[A]의 전류를 통전한 후 정지한 경우를 가정하여 계산하였으며, 초기조건은 주변온도인 25[°C]로 하였다. 표 4에서는 케이블 종류별 내부온도 계산 결과를 나타내었으며, 그림 6에서는 각 케이블의 도체 온도만을 비교하였다. 그림에서처럼 케이블 도체의 굵기가 작을수록 온도분포가 약간 많음을 알 수 있다.

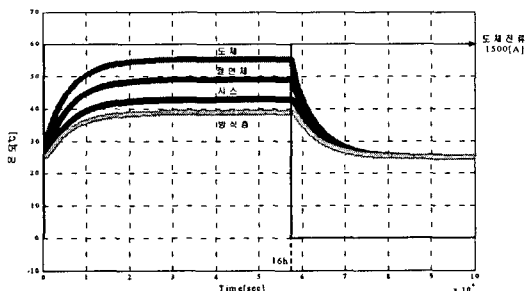


그림 3. OF 600[mm²] 내부온도 계산 결과
Fig. 3. Inner part temperature of OF 600mm² cable

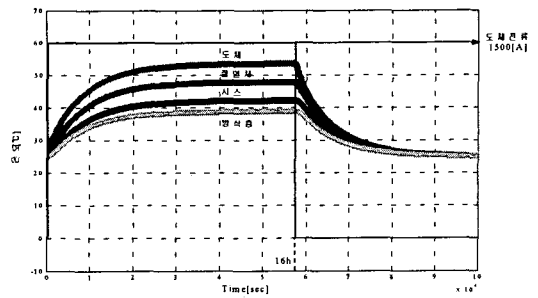


그림 4. OF 1200[mm²] 내부온도 계산 결과
Fig. 4. Inner part temperature of OF 1200mm² cable

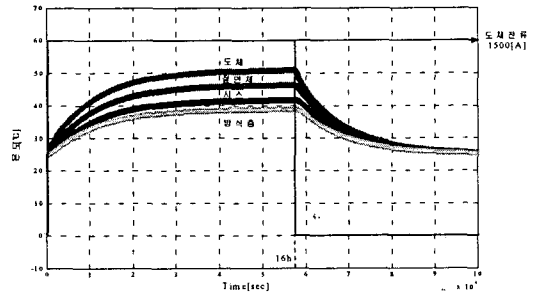


그림 5. OF 2000[mm²] 내부온도 계산 결과
Fig. 5. Inner part temperature of OF 2000mm² cable

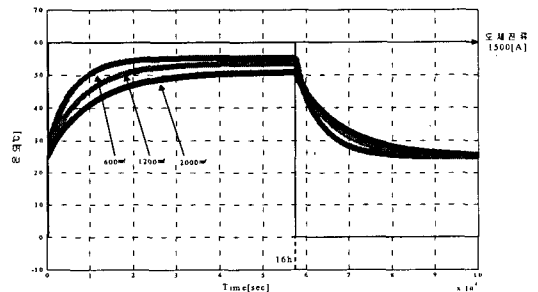


그림 6. 케이블별 도체온도 비교
Fig. 6. Comparison of conductor temperature according to cable kinds

표 4. 케이블 종류별 내부온도 계산 결과
Table 4. Calculation results of inner part temperature according to cable kinds

케이블 종류		OF 600mm ²	OF 1200mm ²	OF 2000mm ²
내부 온도	도체	55.3	53.5	50.8
	절연체	49.1	47.8	46.2
	시스	42.8	42.1	41.6
	방식층	38.8	38.8	38.7

3.2 단락시 접지선, 크로스본드 리드선, 시스 온도계산
단락시 시스, 접지선 및 크로스본드 리드선에 발생하는 온도 상승은 식 (12)와 같이 IEC-60949[3]에 의해 구할 수 있다. 표 5에서는 수식 적용을 위한 도체의 물리적상수를 나타내었다.

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

여기서,

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

- σ_c : 접지선 재료의 체적비열[J/°Cmm³]
- β : 0[°C]에서 도체 열저항의 역수
- ρ_{20} : 20도에서 도체의 전기저항을[Ωmm]
- θ_j : 도체의 최종온도[°C]
- θ_i : 도체의 초기온도[°C]
- I_f : 고장전류[A]
- t : 고장지속 시간[sec]
- S : 케이블 시스의 단면적[mm²]

표 5. IEC-60949 규격에 사용된 도체의 물리적 정수
Table 5. Constants of conductor defined in IEC-60949

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

그림 7은 식 (12)를 이용하여 시스전류 변화에 따른 시스 온도를 계산한 결과이다. 여기서 초기조건은 표 4의 OF 600[mm]의 계산결과인 42.8[°C]로 설정하였다. 그림에서처럼 차단기 동작시간으로 볼 수 있는 4[cycle]을 기준으로 분석하면 시스 단락전류가 50[kA]까지 상승해도 시스 온도상승은 100[°C] 미만이나, 고장 지속시간이 0.5[sec]일 경우 온도 상승은 고장전류 크기가 증가함에 따라 상승하며 고장전류 45[kA] 이상에서는 시스 용융점 온도인 660[°C]를 초과하고 있음을 알 수 있다.

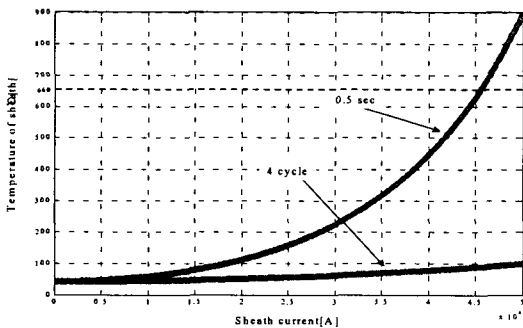


그림 7. 시스전류 변화에 따른 시스온도
Fig. 7. Sheath temperature according to the change of sheath current

그림 8에서는 고장 지속시간은 0.5[sec]까지 연속적으로 변화하였을 때 고장전류 크기에 따른 시스온도 분포를 나타내었다. 그림에서처럼 고장전류 10[kA]의 경우에는 고장지속시간이 증가해도 온도상승은 100[°C] 이하였으며, 30[kA]의 경우 상승폭은 완만하게 증가함을 알 수 있다. 그러나 고장전류가 50[kA]인 경우에는 고장지속 시간 0.4[sec] 이상에서 시스 용융점 온도인 660[°C]를 초과하고 있음을 알

수 있다.

4. 지락고장 발생시 OF 케이블의 온도특성

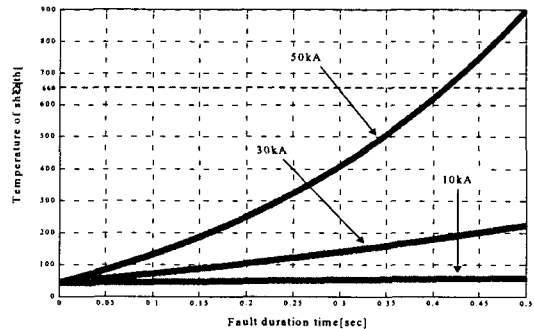


그림 8. 고장지속시간 변화에 따른 시스온도
Fig. 8. Sheath temperature according to the duration of fault

본 절에서는 케이블 접속부에서 절연층 파파로 인한 지락고장시 케이블 내부 온도 상승에 대해 검토하였으며, 실계통 모델을 포함 총 4개의 모델 계통을 선정하여 분석하였다.

4.1 지락고장 모델계통1(GM-1) 및 온도특성 검토 결과

그림 9는 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 mm²이고 절연통보호장치(CCPU) 결선방식은 그림 10처럼 대지간접지방식과 교락비접지방식을 각각 적용하였으며, 1선 지락고장 발생 위치도 J/B #1, J/B #4, J/B #7, J/B #8로 상정하여 다양하게 검토하였으나 본 논문에서는 그 중 J/B #1에서의 지락고장 결과에 대해서만 다루었다. 본 계통에서 적용한 전원 임피던스는 아래와 같다.

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

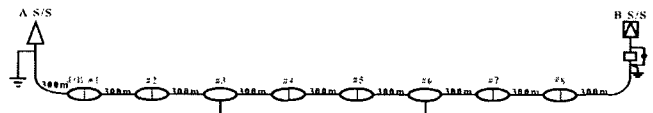


그림 9. 지락고장 분석을 위한 해석모델(GM-1)
Fig. 9. Analysis model for ground fault(GM-1)

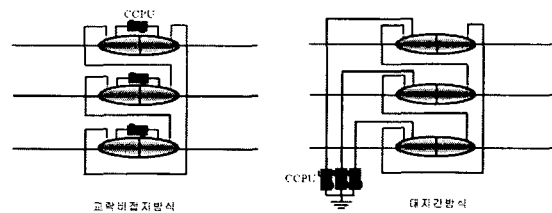


그림 10. 절연통보호장치 결선도
Fig. 10. Connection diagram of CCPU

그림 11과 그림 12는 GM-1 모델에서 각각 대지간접지방식과 교락비접지방식의 경우 J/B #1에서 지락고장이 발생하

였을 때 시스템류에 따라 크로스본드 리드선에 발생하는 온도를 계산한 결과이다. 온도계산을 위한 고장지속시간은 4[cycle]과 0.5[sec]로 하였으며 초기온도는 표 4의 OF 1200 mm² 시스템 온도 계산결과인 42.1[°C]로 하였다. 그림에서처럼 고장이 발생한 J/B #1에서 고장전류가 가장 높게 나타났으나 온도의 차이는 4[cycle]의 경우 거의 변화가 없었으며, 0.5[sec]에서는 A S/S에서 상승하였으나 최대 91.3[°C]로 상승폭은 높지 않았다.

그러나 그림 13에서처럼 알루미늄 시스에 발생하는 온도는 고장점 접속부에서 고장지속시간 0.5[sec]에서는 630[°C]였고, 4[cycle]에서도 약 86.8[°C]까지 온도가 상승하여 고장점 시스템에서 온도가 매우 상승하고 있음을 알 수 있다. 반면 고장점 외의 접속함에서의 시스템온도와 도체, 절연체, 방식층에서의 온도상승은 매우 미미함을 확인하였다.

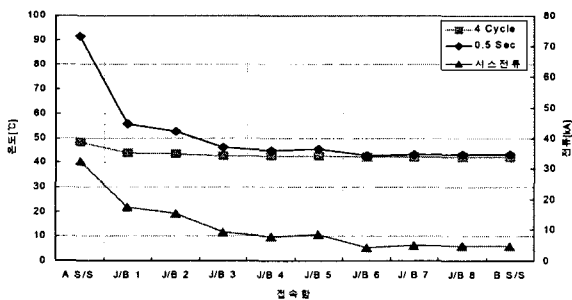


그림 11. 접지선/크로스본드 리드선 온도계산(대지간접지방식, 지락고장지점 : J/B #1)

Fig. 11. Temperature calculation of grounding lead and crossbonding lead(fault point : J/B #1)

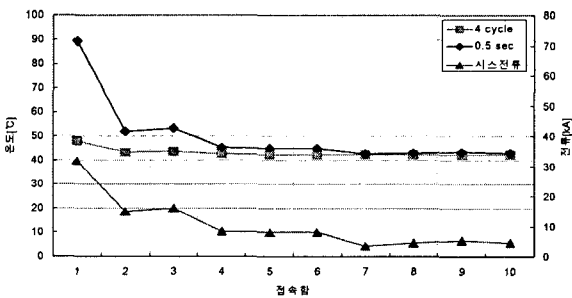


그림 12. 접지선/크로스본드 리드선 온도계산(교락비접지방식, 지락고장지점 : J/B #1)

Fig. 12. Temperature calculation of grounding lead and crossbonding lead(fault point : J/B #1)

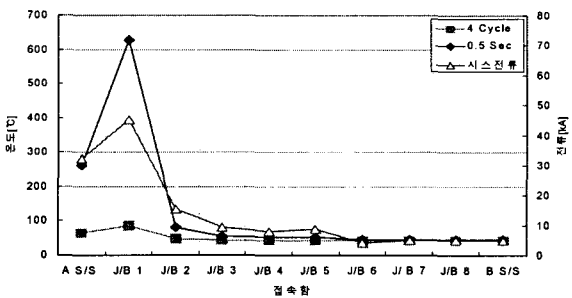


그림 13. 시스 발생온도(대지간 접지방식)

Fig. 13. Temperature of the sheath

4.2 지락고장 모델계통2(GM-2) 및 온도특성 검토 결과

지락고장 모델계통 2(GM-2)는 실제 운전 중인 선로로, 총 선로길이 3.571[km]이고 전력구 방식에 삼각배열로 배치되어 있는 154kV OF 1200[mm²]의 계통이다. 그림 14는 지락고장 분석에 사용된 실제계의 접속함간의 길이 및 CCPU 결선방식 등을 표현한 모델 계통도를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 양단 전원단을 기준으로 첫 번째 크로스본드 대구간에서는 교락비접지방식과 대지간접지방식이 서로 혼용되어 사용되고 있음을 알 수 있다. 또한 지락고장은 J/B #4에서 발생하는 것으로 하였다.

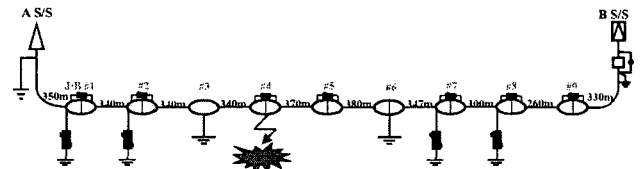


그림 14. GM-2 계통도

Fig. 14. Model system of GM-2

GM-2 모델의 양단 전원부의 전원 임피던스는 표 6과 같다.

표 6. GM-2의 전원 임피던스

Table 6. Source impedance of GM-2

변전소	정상분 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 15에서처럼 고장전류에 의해 시스에 상승하는 온도는 고장지속시간이 4[cycle]인 경우 모두 100[°C] 이하를 보였으나, 지속시간을 0.5[sec]를 고려한 경우에는 고장점에서 고장전류가 49[kA]일 때 알루미늄 시스온도는 용융점 이상인 800[°C]를 보였다. 온도계산을 위한 초기온도는 42.1[°C]이다.

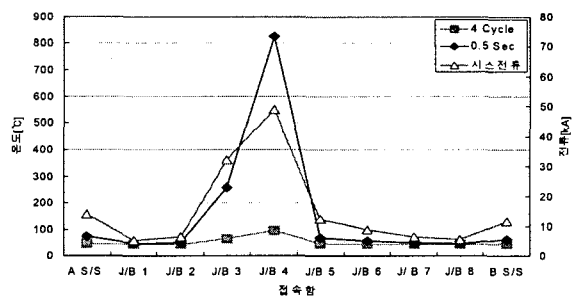


그림 15. 시스온도 변화(지락고장지점 : J/B #4)

Fig. 15. The change of sheath temperature(fault point : J/B #4)

4.3 지락고장 모델계통3(GM-3) 및 온도특성 검토 결과

지락고장 모델계통 3(GM-3)은 실제계통으로서 154kV OF 2000[mm²], 2회선 선로이다. 총 선로길이 6.264[km]이며, 포설방식은 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 16은 GM-3의 케이블 접

속형태 및 구간길이를 표현한 모델 계통도를 나타낸 것이다. GM-3 모델의 양단 전원부의 전원 임피던스는 표 7과 같다.

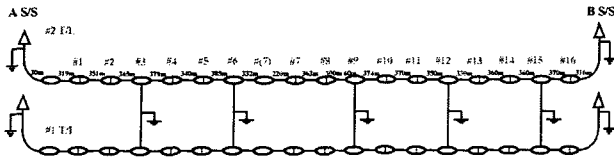


그림 16. GM-3 계통도
Fig. 16. Model system of GM-3

표 7. GM-3의 전원 임피던스

Table 7. Source impedance of GM-3

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

그림 17과 그림 18은 교락비접지방식으로 절연통을 보호하는 것으로 가정한 GM-3 모델의 J/B #2 접속함에서 1선 지락고장 발생시 IEC-60949의 기준식을 이용하여 시스전류 변화에 따른 각 접속부에서의 온도 상승을 계산한 결과이다. 이 때 시스 초기온도는 표 4의 OF 2000mm² 시스온도 계산결과인 41.6[°C]로 하였다. 그림 17에서처럼 고장이 발생한 #2 T/L의 J/B #2 지점에서의 시스온도는 고장 지속시간이 4[cycle]일 경우에는 136[°C]에 불과했으나 고장전류의 영향으로 고장지속시간이 0.5[sec]로 했을 때는 온도가 매우 상승하였다. 그러나 고장발생지점 이외의 접속부에서의 온도 상승은 크지 않았다. 또한, 그림 18에서와 같이 고장선로와 인접한 #1 T/L에서의 온도상승도 미미하였다.

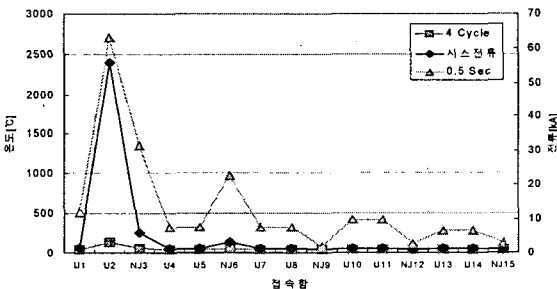


그림 17. #2 T/L의 시스온도 변화 분석(교락비접지방식, 지락고장지점 : #2 T/L, J/B #2)
Fig. 17. Analysis of Sheat temperature at the #2 T/L(Fault point : #2 T/L, J/B #2)

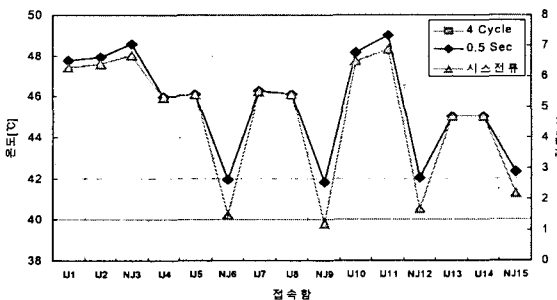


그림 18. #1 T/L의 시스온도 변화 분석(교락비접지방식, 지락고장지점 : #2 T/L, J/B #2)
Fig. 18. Analysis of Sheat temperature at the #1 T/L(Fault point : #2 T/L, J/B #2)

대지간접지방식으로 된 GM-3 실제통의 J/B #10 접속함에서 1선 지락고장 발생시 시스전류 변화에 따른 각 접속부에서의 온도 상승을 계산한 결과를 각각 그림 19와 그림 20에 나타내었다. 시스의 초기온도는 41.6[°C]로 설정하였다. 그림 19에서처럼 고장이 발생한 #2 T/L J/B #10 지점에서의 시스 온도는 고장지속시간을 0.5[sec]로 했을 때는 온도가 매우 상승하였으나 4[cycle]에서는 높지 않았으며, 고장발생지점 이외의 접속부에서의 온도상승과 고장선로와 인접한 #1 T/L에서의 온도상승 또한 높지 않았다.

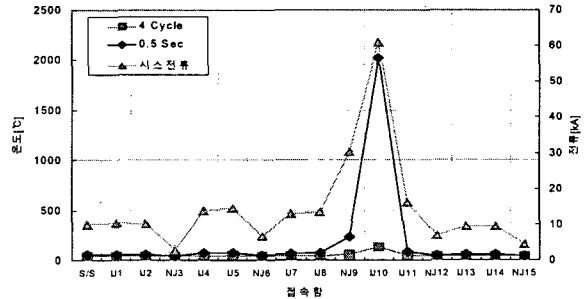


그림 19. #2 T/L의 시스온도 변화 분석(대지간방식, 지락고장지점 : #2 T/L, J/B #10)
Fig. 19. Analysis of Sheat temperature at the #2 T/L(Fault point : #2 T/L, J/B #10)

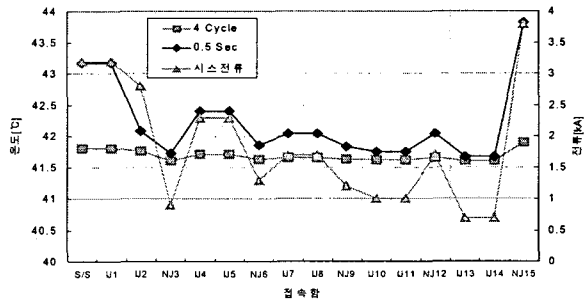


그림 20. #1 T/L의 시스온도 변화 분석(대지간방식, 지락고장지점 : #2 T/L, J/B #10)
Fig. 20. Analysis of Sheat temperature at the #1 T/L(Fault point : #2 T/L, J/B #10)

4.4 지락고장 모델계통4(GM-4) 및 온도특성 검토 결과 GM-4는 345kV 혼합송전계통이며 가공선로 구간은 ACSR 480[mm]²×2B로 구성되어 있고 선로경간은 7.193[km]이다. 또한 지중선로 구간은 OF 2000[mm]²로 구성되어 있고 선로경간은 8.981[km]로 비교적 긴 선로이다. CCPU 결선은 교락비접지방식이며, 그림 21은 GM-4의 혼합송전계통 해석 모델 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 8과 같다.

표 8. GM-4의 전원 임피던스

Table 8. Source impedance of GM-4

변전소	정상분 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

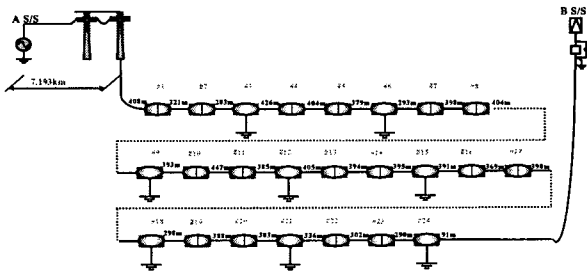


그림 21. GM-4 계통도
Fig. 21. Model system of GM-4

그림 22 ~ 그림 25는 GM-4 계통의 각각 J/B #2, J/B #7, J/B #14, J/B #19 지점에서 1선 지락고장 발생시 IEC-60949의 기준식을 이용하여 시스전류 변화에 따른 각 접속부에서의 온도 상승을 계산한 결과를 나타내었다. 여기서 시스의 초기온도는 표 4의 OF 2000mm² 시스온도 계산결과인 41.6 [°C]로 하였다. 그림에서처럼 고장이 발생한 지점의 고장전류는 49.7[kA] ~ 55[kA]이며, 이 때 시스온도는 고장 지속시간이 4[cycle]일 경우 97[°C] ~ 111[°C]로 상승폭이 적었으나, 고장지속시간을 0.5[sec]로 했을 때는 900[°C] ~ 1,283[°C]까지 온도가 매우 상승하였다. 그러나 고장발생지점 이외의 접속부에서의 온도상승은 크지 않았다.

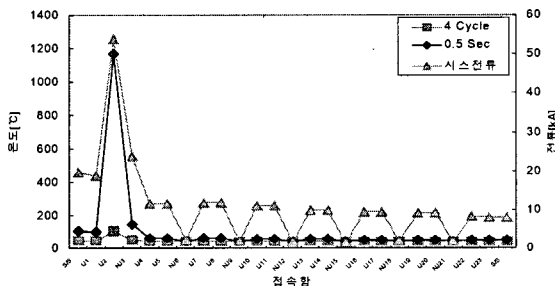


그림 22. 시스온도 분포 계산결과(고장지점 : J/B #2)
Fig. 22. Calculation result of sheath temperature(fault point : J/B #2)

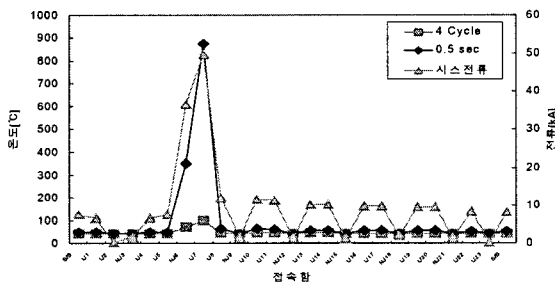


그림 23. 시스온도 분포 계산결과(고장지점 : J/B #7)
Fig. 23. Calculation result of sheath temperature(fault point : J/B #7)

5. 뇌서지 발생시 OF 케이블의 온도특성

본 절에서는 가공 송전계통과 지중 송전계통이 혼합된 계통에 침입한 뇌 서지로 인하여 케이블 도체 및 시스에 발생하는 내부온도를 분석하였다. 뇌 서지 분석을 위해 실제 모델 1개를 포함 총 2개의 모델계통을 대상으로 해석하였다. 본 논문에서 적용한 뇌격전류는 그림 26처럼 램프파를

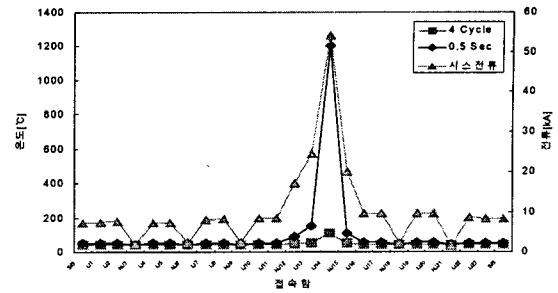


그림 24. 시스온도 분포 계산결과(고장지점 : J/B #14)
Fig. 24. Calculation result of sheath temperature(fault point : J/B #14)

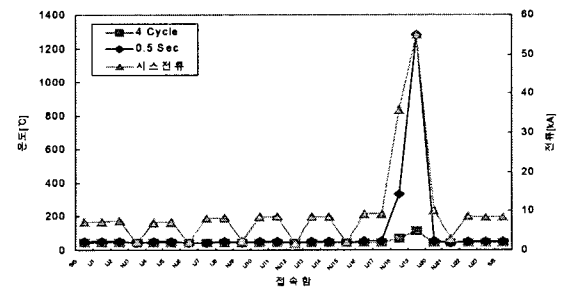


그림 25. 시스온도 분포 계산결과(고장지점 : J/B #19)
Fig. 25. Calculation result of sheath temperature(fault point : J/B #19)

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 서지 임피던스는 400[Ω]으로 하였다.

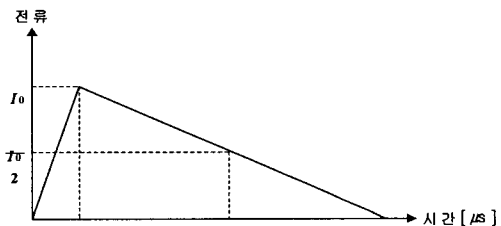


그림 26. 뇌격전류 파형
Fig. 26. Waveform of lightning current

5.1 뇌서지 모델계통1(LM-1) 및 온도특성 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 27에서는 뇌 서지 해석을 위한 LM-1 혼합송전계통 해석모델 계통도를 나타내었으며, 가공선로 구간은 ACSR 410[mm]²×2B이고, 지중선로 구간은 OF 1200[mm]² 케이블이 전력구 방식으로 포설되어 있다. 또한 절연통보호장치 결선방식은 대지간접지방식과 교락비접지방식을 각각 적용하였다.

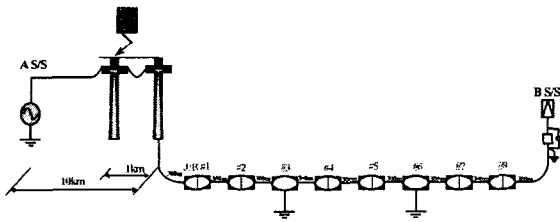


그림 27. LM-1 계통도
Fig. 27. Model system of LM-1

그림 28 ~ 그림 29는 LM-1 모델에서 각각 대지간접지방식과 교락비접지방식에서 각 접속함의 시스온도에 따른 시스온도 상승을 계산한 결과이다. 온도계산을 위해 고장지속 시간은 뇌격이 소멸하는 140[μs]를 기준으로 하였으며, 초기 온도는 표 4의 OF 1200mm² 시스온도 계산결과인 42.1[°C]로 하였다. 그림에서처럼 시스온도의 변화에 따라 온도변화는 두 경우에서 모두 크게 나타나지 않았다.

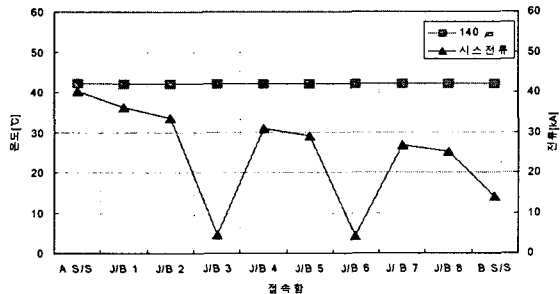


그림 28. LM-1의 시스온도 계산(대지간접지방식)
Fig. 28. Calculation of sheath temperature of LM-1

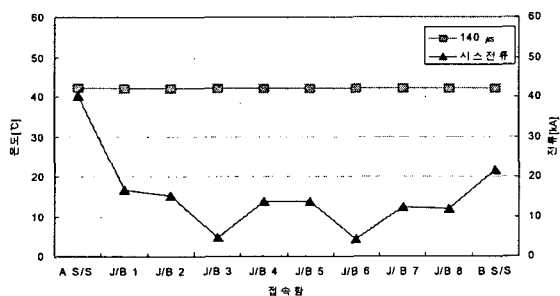


그림 29. LM-1의 시스온도 계산(교락비접지방식)
Fig. 29. Calculation of sheath temperature of LM-1

5.2 뇌서지 모델계통2(LM-2) 및 온도특성 검토 결과

뇌 서지 해석 모델계통 2인 LM-2는 그림 21의 GM-4 모델과 동일한 345kV 혼합송전계통의 실제 모델이며, 뇌격전류의 크기는 60[kA]와 100[kA], 파두장과 파미장의 시간은 2/70[μs]이며 뇌 서지 임피던스는 400[Ω]으로 하였다. 또한 뇌격은 케이블 헤드로부터 1[km] 지점에서 침입하는 것으로 하였다.

그림 30은 LM-2 모델에서의 뇌격전류에 따른 시스온도이다. 이 경우에서도 온도상승 분석결과 시스온도에 따른 온도상승이 초기온도에서 1~2[°C]로 거의 상승되지 않았다. 따라서 뇌 서지와 같은 급준파는 고장지속시간이 매우 짧기

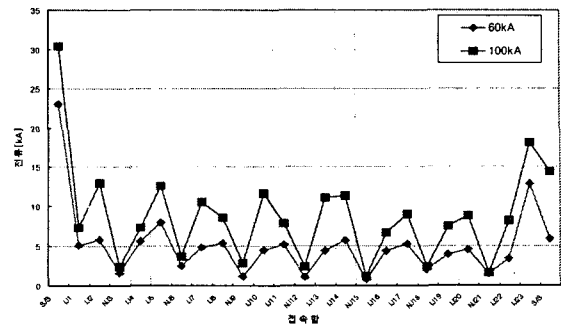


그림 30. LM-2 계통의 뇌격전류에 따른 시스전류
Fig. 30. Sheath current of LM-2 system according to lightning current

때문에 뇌 서지 침입시 서지 전류 유입에 따른 케이블 내부 온도 상승은 매우 희박할 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 논문에서는 OF 케이블에 대한 열 특성을 자세히 검토하였으며, OF 케이블의 온도특성 검토를 위해 과도상태 열 모델을 이용한 온도계산법과 IEC-60949에서 제시한 온도계산법을 각각 소개하였다. 이를 바탕으로 지락고장과 뇌 서지와 같은 과도현상 발생시 케이블 도체 및 시스 등의 케이블 내부에 발생하는 온도를 분석하였다.

그림 31은 지락고장시 온도특성 검토에서 사용한 모든 모델에서 분석된 고장점에서 고장전류에 따른 온도 분포를 종합적으로 나타낸 것이다. 그림에서처럼 고장지속시간이 4[cycle]인 경우에는 온도 분포는 63.6[°C] ~ 136.7[°C]의 분포를 보이며, 고장지속시간을 0.5[sec]까지 고려할 경우 케이블 시스의 온도는 알루미늄 시스의 용융점인 660[°C]를 초과하는 255[°C] ~ 2,397[°C]의 온도 분포를 보인다. 선로 고장시 차단기는 최대 4[cycle] 이내에 동작하여 선로를 차단하고 고장을 제거한다면 고장발생시 온도 상승은 높지 않을 것으로 사료되나 차단기의 오부동작 및 동작지연이 발생한다면 단시간 내에 케이블 내부의 온도는 매우 상승하여 위험 상태에 이르게 된다.

뇌 서지 침입시 케이블 내부 온도상승 정도를 검토한 결과 모든 계통에서 43[°C] 이하로 온도의 상승이 매우 낮은 것으로 분석되었다.

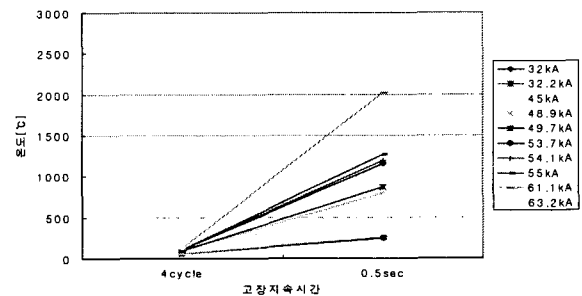


그림 31. 지락고장 발생시 시스온도 분포
Fig. 31. Temperature distribution when the ground fault occurs

참 고 문 헌

- [1] 전력연구원, "송전용량 증대를 위한 열방산회로 개선에 관한 연구(최종보고서)", 2003. 3
- [2] 전력연구원, "지중송전 케이블의 써어지 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] 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.
- [6] 전력연구원, "송전케이블의 허용전류 산정 프로그램 개발 연구(최종보고서)", 2001. 12
- [7] 일본전기학회 기술보고, "케이블계통에서의 서지현상과 대책". 제 366호(II부), 1991. 4
- [8] 일본전기협회, "지중송전규정 JEAC 6021 - 2000", 2000
- [9] 이종혁, "다중 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 전기적 특성 변화에 관한 연구", 한국해양대학교 석사학위 논문, 2001. 2
- [10] 이종혁 외 4, "다중 뇌충격전류에 의한 피뢰기 소자의 전기적 특성 변화", 2000년 KIEE 하계학술대회 논문집, 2000. 7

저 자 소 개



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(공학박사). 1993년 ~ 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.
 Tel : (042)865-5852
 E-mail : jwkang@kepri.re.kr



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



이 동 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



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(공학박사). 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