

EMTP/MODELS를 이용한 지중 배전선로의 뇌유도 과전압 및 전류 분석

Analysis of Lightning-Induced Overvoltage and Current in Buried Underground Distribution Cable using EMTP/MODELS

서 훈 철* · 한 준** · 김 철 환† · 최 선 규*** · 이 병 성§
(Hun-Chul Seo · Jun Han · Chul-Hwan Kim · Sun-Kyu Choi · Byung-Sung Lee)

Abstract - This paper analyzes the lightning-induced overvoltage and current in buried underground distribution cable. Based on analytical expressions, the lightning-induced overvoltage and current in buried underground distribution cable is calculated by EMTP/MODELS. The modeling is verified by comparing with the results in reference. Also, the type and buried arrangement of cables used in domestic distribution line are modeled by EMTP/ATPDraw. The various simulations according to the type and buried arrangement of cable are performed and the simulation results are analyzed.

Key Words : Lightning-induced voltage, Underground distribution cable, EMTP/MODELS, Cable type, Buried arrangement

1. 서 론

최근에, 케이블을 이용한 민감한 전자 장비들이 전력계통 및 통신 시스템에서 증가하고 있다. 과거의 전자기계적 장비들과 비교하여, 이 장비들은 유도된 전자기적 간섭 때문에 명백하게 손상을 입을 수 있고, 로직의 혼동을 야기할 수도 있다. 결과적으로, 최근에 매입 지중 케이블에서 뇌유도 과전압 및 전류의 평가에 대한 관심이 급증하고 있다. 전형적인 예로서, 전력 공급용 케이블을 포함하여 해양 광 케이블 및 매입 통신 케이블을 들 수 있다. 특히 해양 광 케이블의 경우는 장거리의 매입 부분이 공급지까지 운용되고 있으며, 이것은 낙뢰의 위험에 많이 노출되어 있다[1-2].

참고문헌 [1]에서는 매입 케이블에서의 뇌유도 과전압 및 전류에 대한 이론적인 계산 방법을 나타내었으며, 참고문헌 [2]에서 이러한 계산 방법을 기반으로 미국 캘리포니아의 International Center for Lightning Research and Testing에서 수행된 실제 실험 결과를 나타내었다. 그 외, 매입 케이블에 대한 연구는 많이 이루어지지 않고 있으며, 국내에서도 많이 이루어지지 않고 있다.

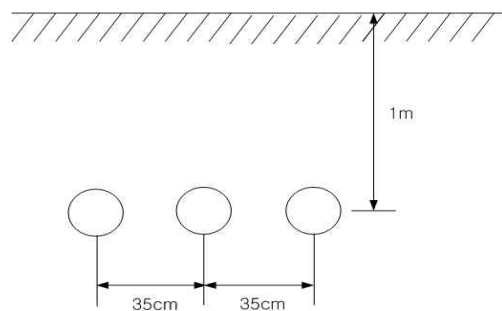
본 논문에서는 국내 지중선로에 사용되는 케이블에 대한 뇌유도 과전압 및 전류 분석을 수행하였다. 이를 위하여 [1]에 제시된 매입 케이블에서의 뇌유도 과전압 및 전류 계산 방법을 EMTP/MODELS를 이용하여 구현하였으며, 국내 지중선로에 사용되는 케이블의 종류 및 매설방식에 대하여 뇌

유도 과전압 및 전류를 분석하였다.

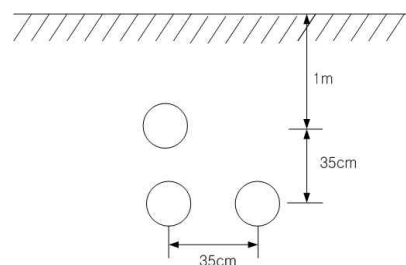
2. EMTP를 이용한 지중배전선로 모델링

2.1 지중 배전선로의 종류

본 논문에서 모델링을 수행하고자 하는 지중 배전선로는 다음 표 1과 같다. 배전선로에서 사용되는 CNCV 케이블 중 공칭단면적이 60mm², 200mm², 325mm² 케이블을 모델링하였다. 또한, 각 케이블에 대하여 매설 방식을 수평배열, 직각배열(관로구), 정삼각배열(전력구)로 다양하게 모델링하였다. 케이블에 대한 기하학적 배치는 다음 그림 1과 같다.



(a) 수평배열의 경우



(b) 직각배열(관로구)

* 정 회 원 : 성균관대학교 정보통신대학 박사과정

** 준 회 원 : 성균관대학교 정보통신대학 석사과정

† 교신저자, 펠로우회원 : 성균관대학교 정보통신대학 교수

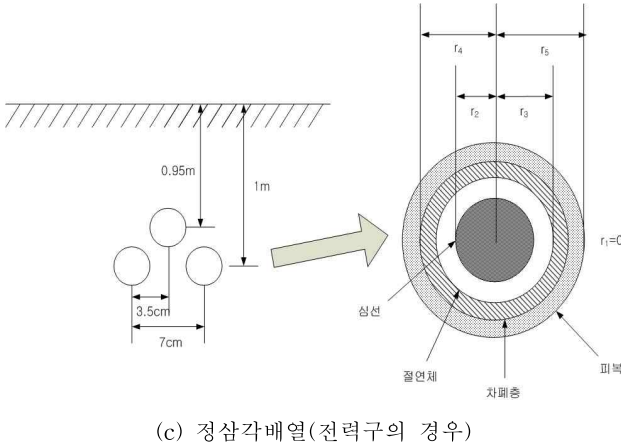
E-mail : hmwkim@hanmail.net

*** 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

§ 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

접수일자 : 2012년 4월 5일

최종완료 : 2012년 6월 22일



(c) 정삼각배열(전력구의 경우)

그림 1 CNCV 케이블의 기하학적 배치
Fig. 1 Geometric arrangement of CNCV cable

각 케이블의 제원은 다음 표 1과 같다. 표 1에서 단면치수의 r1, r2, r3, r4, r5의 의미는 그림 1에 제시되어 있다.

표 1 CNCV 케이블의 제원
Table 1 Parameter of CNCV cable

항 목	값			
단면치수 (단위 ; mm)	60mm ²	r1=0, r2=4.65, r3=13.45, r4=15.45, r5=18.4		
	200mm ²	r1=0, r2=8.5, r3=17.3, r4=20.3, r5=23.25		
	325mm ²	r1=0, r2=10.9, r3=19.6, r4=21.9, r5=26		
심선	저항율 = 1.724E-8 Ωm 비투자율 = 1.0			
절연체	비투자율 = 1.0 비유전율 = 2.5			
차폐층	저항율 = 1.724E-8 Ωm 비투자율 = 1.0			
피복	비투자율 = 1.0 비유전율 = 1.0			

2.2 EMTP를 이용한 지중배전선로 모델링

그림 1에 나타난 케이블의 구성 종류 각각을 모델링하였다. 그 중 CNCV325mm²의 모델링 화면은 다음 그림 2와 같다.

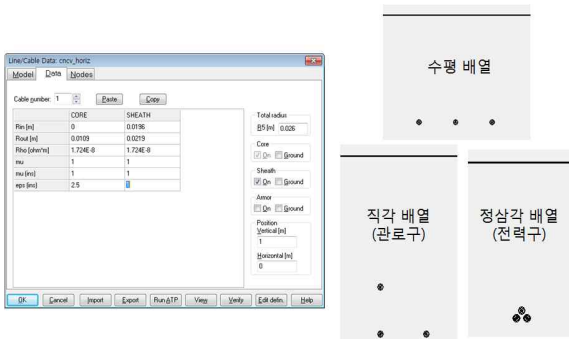


그림 2 CNCV325mm² 케이블의 모델링
Fig. 2 Modeling of CNCV325mm² cable

3. EMTP/MODELS를 이용한 지중 배전선로에서의 뇌유도 과전압 및 전류 계산

3.1 지중 배전선로에서의 뇌유도 과전압 및 전류 계산 원리[1]

뇌격 발생 시, 케이블의 임의의 지점 x에서의 케이블 전류 및 전압은 Green's function의 적분을 이용하여 다음 식 (1)~(4)와 같이 구할 수 있다. 식 (1)~(2)에서 V_s'는 뇌격 발생 시 케이블에 여기 되는 입사 전기장이다.

$$I(x) = \int_0^L G_I(x, x_s) V_s' dx_s \tag{1}$$

$$V(x) = \int_0^L G_V(x, x_s) V_s' dx_s \tag{2}$$

여기서, G_I, G_V는 각각 케이블 전류 및 전압에 대한 Green's function을 나타낸다.

$$G_I(x, x_s) = \frac{e^{-\gamma L}}{2Z_c(1-\rho_1\rho_2e^{-2\gamma L})} [e^{-\gamma(x_s-L)} - \rho_2e^{\gamma(x_s-L)}](e^{\gamma x} - \rho_1e^{-\gamma x}), \text{ for } x < x_s$$

$$= \frac{e^{-\gamma L}}{2Z_c(1-\rho_1\rho_2e^{2\gamma L})} [e^{-\gamma(x-L)} - \rho_2e^{\gamma(x-L)}](e^{\gamma x_s} - \rho_1e^{-\gamma x_s}), \text{ for } x > x_s \tag{3}$$

$$G_V(x, x_s) = \frac{e^{-\gamma L}}{2(1-\rho_1\rho_2e^{-2\gamma L})} [e^{-\gamma(x_s-L)} - \rho_2e^{\gamma(x_s-L)}](e^{\gamma x} + \rho_1e^{-\gamma x}), \text{ for } x < x_s$$

$$= \frac{e^{-\gamma L}}{2(1-\rho_1\rho_2e^{2\gamma L})} [e^{-\gamma(x-L)} + \rho_2e^{\gamma(x-L)}](e^{\gamma x_s} - \rho_1e^{-\gamma x_s}), \text{ for } x > x_s \tag{4}$$

여기서, $\gamma = \sqrt{Z'Y'}$ 이며 케이블의 전파상수이고, Z_c = $\sqrt{Z'/Y'}$ 로 나타내며 케이블의 특성 임피던스를 의미한다.

Z', Y'는 각각 케이블의 longitudinal impedance, transversal admittance로써 식 (5)~(6)과 같다.

$$Z' = j\omega L' + Z_w' + Z_g' \tag{5}$$

$$Y' = \frac{(G' + j\omega C')Y_g'}{(G' + j\omega C') + Y_g'} \tag{6}$$

L', C'는 각각 케이블의 단위길이당 longitudinal inductance와 transverse capacitance이며 다음 식 (7)~(8)과 같다.

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \tag{7}$$

$$C' = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_{ri}}{\ln(b/a)} \tag{8}$$

G'는 케이블의 단위길이당 transverse conductance이며 다음 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$G' = \frac{\sigma_i}{\epsilon_0 \epsilon_{ri}} C' \quad (9)$$

Z'_ω 는 도체의 단위길이당 내부 임피던스로서 다음 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$Z'_\omega = \frac{\gamma_\omega I_0(\gamma_\omega a)}{2\pi a \sigma_\omega I_1(\gamma_\omega a)} \quad (10)$$

여기서, $\gamma_\omega = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_\omega + j\omega\epsilon_0\epsilon_{\gamma\omega})}$ 이며 도체 내에서의 전파상수이고, $\epsilon_{\gamma\omega}$ 는 도체의 비유전율이다.

Z'_g, Y'_g 는 각각 단위길이당 대지 임피던스 및 대지 어드미턴스이다. 이 파라미터들은 다음 식 (11)과 같이 관련된다.

$$Y'_g \cong \frac{\gamma_g^2}{Z'_g} \quad (11)$$

여기서, $\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\epsilon_0\epsilon_{\gamma g})}$ 이며 대지에서의 전파상수이고, Z'_g 는 다음 식 (12)와 같다.

$$Z'_g = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1+\gamma_g b}{\gamma_g b}\right) \quad (12)$$

3.2 EMTP/MODELS를 이용한 지중 배전선로에서의 뇌유도 과전압 및 전류 모델링

지중 배전선로에서 뇌유도 과전압 및 전류를 구하기 위하여 EMTP/MODELS[3]를 이용하여 상기의 방법을 모델링하였다. 다음 그림 3은 이것의 모델링 화면이다. 그림 3은 MODELS 부분 코드의 일부이다.

```

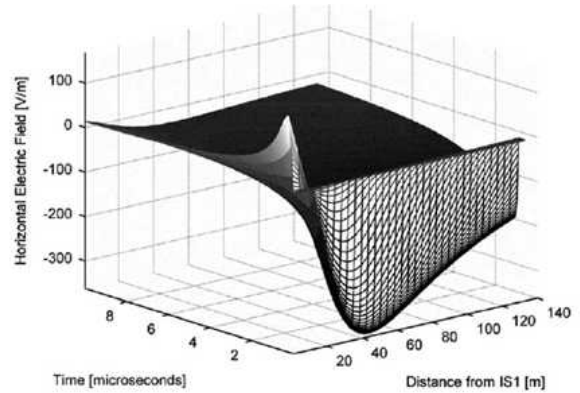
MODEL CableInduce
VAR z11,z12,L,b,a,mu0,ldash,sigmav,v,rw,zv,epsil0
    sigmag,rg,zg,epsilri,Cdash,yg,Z,Y,gamma,zc,p1,p2,
    x,xs,G1[0..2000],GV[0..2000],i,IX,VX,vs
OUTPUT IX
INIT
vs:=0
z11:=16
z12:=16
L:=2000
a:=1.09
b:=2.6
mu0:=4*PI*(10**-7)
ldash:=(mu0/(2*PI))*ln(b/a)
sigmav:=5.8*(10**7)
v:=2*PI*3000
rw:=sqrt(v*mu0*sigmav)
zv:=zv*2/(2*PI*a*sigmav)
sigmag:=0.01
rg:=sqrt(v*mu0*sigmag)
zg:=(v*mu0/(2*PI))*ln((1+rg*b)/(rg*b))
epsil0:=8.854*(10**-12)
epsilri:=3
Cdash:=(2*PI*epsil0*epsilri)/ln(b/a)
yg:=(rg*rg)/zg
Z:=v*ldash+zv+zg
Y:=v*Cdash*yg/(v*Cdash+yg)
    
```

그림 3 뇌유도 과전압 및 전류 계산을 위한 EMTP/MODELS 코드의 일부

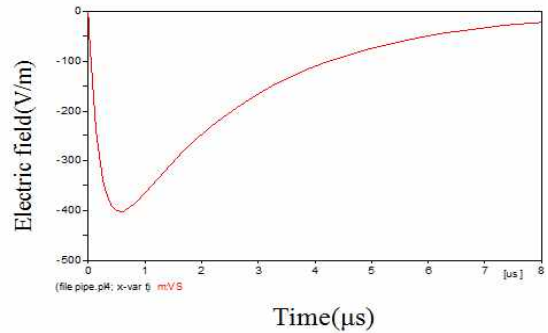
Fig. 3 Part of EMTP/MODELS code to calculate the lightning-induced overvoltage and current

케이블 선로에서 뇌유도 과전압 및 전류 모델링 결과를 증명하기 위하여 참고문헌과 비교하여 시뮬레이션을 진행하였다. 다음 그림 4는 뇌격 발생 시 전기장을 나타낸다. 그림 4(a)는 참고문헌 [2]에 나타난 전기장 파형이며, 그림 4(b)는 본 논문의 모델링 결과이다. 전기장의 최대 절대값은 400V/m이다. 그림 4(a)의 전기장 파형을 보면 일반적인 뇌격전류 파형에서 부호만 바뀐 형태와 동일하다. 따라서, 본 논문에서는 전기장 파형을 생성하기 위하여, 뇌 전류 파형 생성 방법 중 다음 식 (13)과 같이 이중지수 파형을 적용하였다. 식 (13)에서 $a=4 \times 10^5$, $b=4.76 \times 10^6$ 을 적용하였다. 전기장의 크기는 참고문헌과 비교하기 위하여 -400으로 설정하였다.

$$v = V(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (13)$$



(a) 참고문헌 [2]의 전기장 파형



(b) 모델링 결과

그림 4 뇌격 발생 시 전기장
Fig. 4 Electric field by lightning

참고문헌 [2]에서는 파이프가 있는 케이블을 모델링하였다. 따라서, 본 논문에서도 그림 5와 같이 파이프가 있는 케이블을 모델링 하였다.

다음 그림 6은 차폐전류에 대하여 참고문헌의 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 파형의 최대치는 130A로 매우 유사하며, 그 형태 또한 매우 유사한 것을 알 수 있다. 따라서, 정확한 모델링이 수행되었다고 할 수 있다.

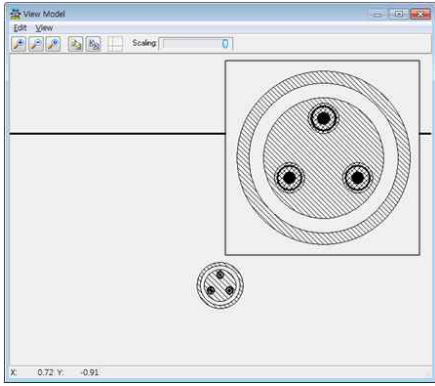
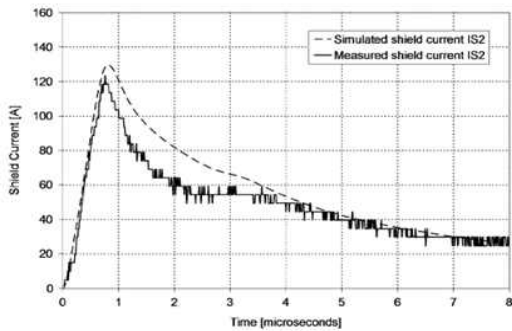
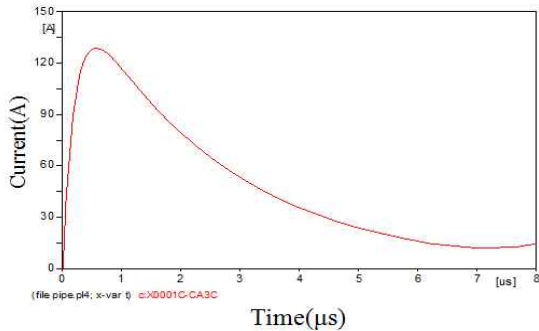


그림 5 뇌유도 과전압 및 전류 모델링 증명을 위한 케이블 모델링

Fig. 5 Cable modeling to verify the modeling of lightning induced overvoltage and current in underground distribution line



(a) 참고문헌에 나타난 차폐전류



(b) 시뮬레이션 결과

그림 6 차폐전류에 대하여 참고문헌의 결과와 시뮬레이션 결과의 비교

Fig. 6 Comparison of the reference and simulation results for shielding current

4. 지중 배전선로 구성의 종류 및 매설방식에 따른 뇌유도 과전압 및 전류 해석

그림 1에 나타난 지중 배전선로의 종류 및 구성에 대하여 뇌서지 해석을 수행하였다. 뇌격 발생으로 인한 전기장의

최대 절대값은 그림 4와 같이 400V/m로 설정하였다.

4.1 케이블의 종류에 따른 해석

다음 그림 7~8은 수평배열의 경우 케이블의 종류에 따른 차폐전류 및 과전압을 나타낸 것이다. CNCV 325mm², CNCV 200mm², CNCV 60mm²의 순서대로 차폐전류 및 과전압이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 직각 배열 및 정삼각 배열에서도 동일하게 나타난다. 즉, 케이블의 매설 방식에 상관없이 공칭단면적이 클수록 차폐전류 및 과전압이 커진다고 할 수 있다. 저항과 공칭단면적이 반비례하므로 공칭단면적이 커질수록 저항이 작아지고, 차폐전류가 커지게 된다. 따라서, 과전압 또한 커진다고 할 수 있다. 과전압의 크기는 최대 약 32kV 정도로 케이블의 BIL(Basic insulation level)인 120kV 보다 작은 값을 알 수 있다.

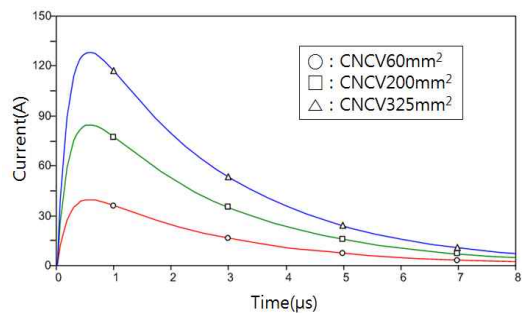


그림 7 수평배열의 경우 케이블의 종류에 따른 차폐전류 비교
Fig. 7 Comparison of shield current according to the type of cable in case of horizon arrangement

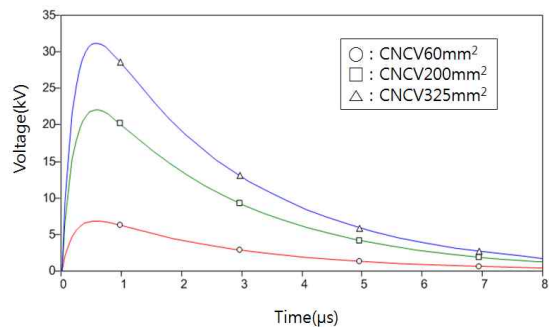
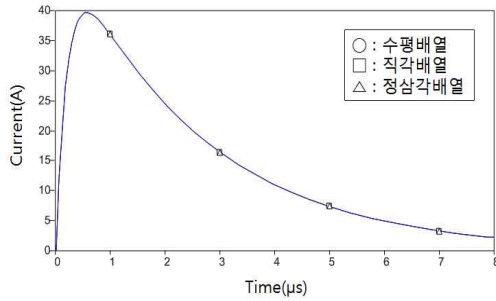


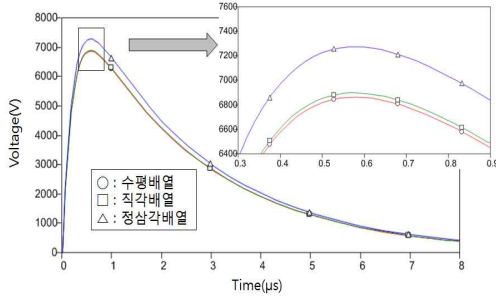
그림 8 수평배열의 경우 케이블의 종류에 따른 과전압 비교
Fig. 8 Comparison of lightning induced overvoltage according to the type of cable in case of horizon arrangement

4.2 케이블의 매설방식에 따른 해석

다음 그림 9는 CNCV60mm²의 경우 케이블의 매설방식에 따른 차폐전류 및 과전압을 나타낸 것이다. 또한, 그림 10은 CNCV200mm²의 경우 케이블의 매설방식에 따른 차폐전류 및 과전압을 나타낸 것이며, 그림 11은 CNCV325mm²의 경우 케이블의 매설방식에 따른 차폐전류 및 과전압을 나타낸 것이다. 케이블의 종류에 상관없이 차폐전류의 경우 모두 같으며, 과전압의 경우 정삼각배열, 직각배열, 수평배열의 순으로 과전압의 크기가 큰 것으로 나타났다. 그렇지만 그 차이는 0.4kV~1.5kV로 매우 작게 나타났다.



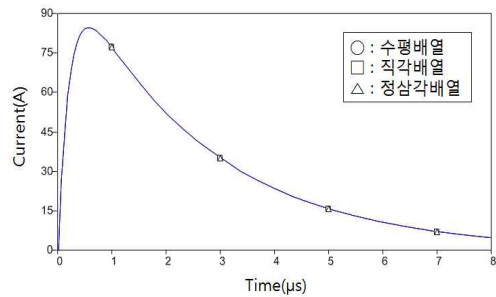
(a) 차폐전류



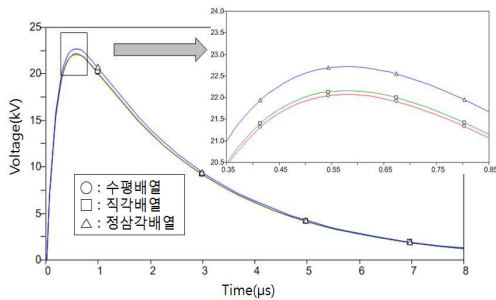
(b) 과전압

그림 9 CNCV 60mm²의 경우 케이블의 매설 방식에 따른 차폐전류와 과전압

Fig. 9 Shield current and overvoltage according to the buried arrangement of cable in case of CNCV 60mm² cable



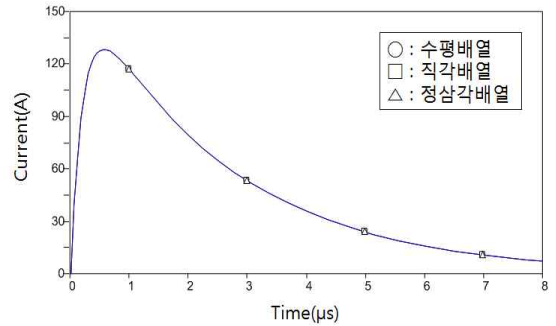
(a) 차폐전류



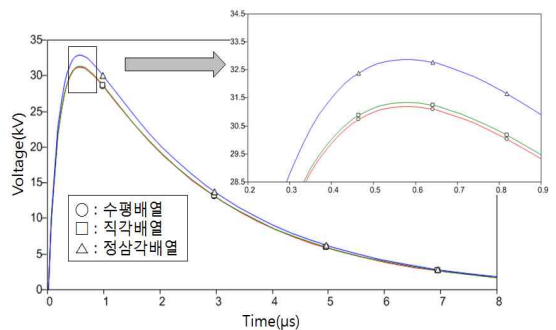
(b) 과전압

그림 10 CNCV 200mm²의 경우 케이블의 매설 방식에 따른 차폐전류와 과전압

Fig. 10 Shield current and overvoltage according to the buried arrangement of cable in case of CNCV 200mm² cable



(a) 차폐전류



(b) 과전압

그림 11 CNCV 325mm²의 경우 케이블의 매설 방식에 따른 차폐전류와 과전압

Fig. 11 Shield current and overvoltage according to the buried arrangement of cable in case of CNCV 325mm² cable

4.3 해석결과 분석

케이블의 종류 및 매설방식에 따른 뇌서지 해석을 수행하였다. 해석결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 케이블 매설 방식이 동일한 경우, 차폐전류 및 과전압은 CNCV 325mm², CNCV 200mm², CNCV 60mm²의 순서대로 크게 나타났다. 즉, 공칭단면적이 클수록 차폐전류 및 과전압이 커진다고 할 수 있다.
- ② 케이블 종류가 동일한 경우, 차폐전류는 케이블의 매설방식에 상관없이 동일하다.
- ③ 케이블 종류가 동일한 경우, 과전압은 정삼각배열, 직각배열, 수평배열의 순으로 크게 나타난다.
- ④ 낙뢰 발생 시, 케이블에 유도되는 과전압은 CNCV 325mm²의 경우에 최대 32kV 정도로 발생하며, 이 값은 케이블의 BIL 값보다 매우 작은 값이다.
- ⑤ 케이블의 매설방식에 따른 과전압의 차이는 최대 1.5kV 정도로 매우 작다.

5. 결 론

본 논문에서는 EMTP/MODELS를 이용하여 지중 배전선로에서 뇌유도 과전압 및 전류 계산 방법을 구현한 후, 지중 배전선로의 종류 및 매설방식에 따른 뇌유도 과전압 및 전

류를 분석하였다. EMTP/MODELS를 이용한 뇌유도 과전압 및 전류 구현은 참고문헌과 비교함으로써 검증되었다. 분석 결과로써, 케이블 매설 방식이 동일한 경우, 공칭단면적이 클수록 차폐전류 및 과전압이 크게 나타났다. 반면, 케이블 종류가 동일한 경우, 차폐전류는 케이블의 매설방식에 상관없이 동일하며, 과전압은 정삼각배열, 직각배열, 수평배열의 순으로 크게 나타났다.

본 논문에서 EMTP/MODELS를 이용하여 모델링 한 뇌유도 과전압 및 전류 계산 방법을 사용하여 케이블의 내뢰 보호 대책 수립에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계처실에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] E. Petrache, F. Rachidi, M. Paolone, C. A. Nucci, V. A. Rakov, and M. A. Uman, "Lightning Induced Disturbances in Buried Cables-Part I: Theory", IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility, Vol. 47, No. 3, pp. 498-508, AUGUST 2005.
- [2] M. Paolone, E. Petrache, F. Rachidi, C. A. Nucci, V. A. Rakov, M. A. Uman, D. Jordan, K. Rambo, J. Jerauld, M. Nyffeler, and J. Schoene, "Lightning Induced Disturbances in Buried Cables-Part II: Experiment and Model Validation", IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility, Vol. 47, No. 3, pp. 509-520, AUGUST 2005.
- [3] Chul-Hwan Kim, Myung-Hee Lee, Raj K. Aggarwal, "Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 9-15, February 2000.

저 자 소 개



서 훈 철 (徐 熏 徹)

1982년 1월 19일생. 2004년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2006년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : hunchul12@skku.edu



한 준 (韓 準)

1986년 2월 7일생. 2011년 순천향대 전자정보공학부 졸업. 2011년~현재 성균관대 정보통신대학 석사과정
Tel : 031-299-4630
Fax : 031-299-4137
E-mail : j3angh@gmail.com



김 철 환 (金 喆 換)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 정보통신대학 교수, 전력IT 인력양성센터 센터장
Tel : 031-290-7124
Fax : 031-299-4137
E-mail : hmwkim@hanmail.net



최 선 규 (崔 璇 奎)

1973년 9월 26일생, 2000년 고려대 전기공학과 졸업, 2002년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5961
Fax : 042-865-5809
E-mail : skchoi@kepri.re.kr



이 병 성 (李 丙 成)

1968년 8월 17일생, 1993년 충남대 전기공학과 졸업, 1995년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 한전 전력연구원 책임연구원
Tel : 042-865-5960
Fax : 042-865-5809
E-mail : leebes@kepri.re.kr