

부하전류를 고려한 지중 전력케이블의 도체온도 추정에 관한 연구

정성환\*, 김대경, 최상봉, 남기영, 류희석, 강지원, 장태인  
한국전기연구원, 한전전력연구원

A Study on The Conductor Temperature Estimation of Underground Power Cables  
Considering the Load Current Change

S.H. Jeong\*, D.K. Kim, S.B. Choi, K.Y. Nam, H.S. Ryoo, J. W. Kang, T. I. Jang  
KERI KEPRI

Abstract - This paper presents the analysis of the transient temperature rise at the surface of underground power cables and an estimation of conductor temperature considering the power load change of underground power cables.

attainment factor  $\alpha(t)$ 를 주변 매질의 과도 온도 상승분에 곱하여 케이블의 과도 온도상승분과 대수적으로 합하여 계산된다. 즉 도체 손실에 의한 도체 온도의 과도 응답은 식(1)과 같이 계산된다.

$$\theta(t) = \theta_c(t) + \alpha_c(t)\theta_e(t) \tag{1}$$

여기서,  $\theta(t)$  = 지중 전력케이블의 도체 온도  
 $\theta_c(t)$  = 전력케이블의 과도온도 상승분  
 $\theta_e(t)$  = 주변매질의 과도온도 상승분  
 $\alpha_c(t)$  = attainment factor

1. 서 론

지중 전력케이블의 허용전류는 전력케이블과 그 주변 매질의 열적 파라메타에 의해 결정된다. 전력케이블과 그 주변 매질의 열 회로는 열 저항과 열용량으로 구성되는데, 정상상태 허용전류의 경우 열 저항만으로 구성되는 열 회로로 계산하지만, 지중 전력케이블에 흐르는 전류가 부하에 따라 변동하고 있고 비상운전과 같이 갑자기 전력케이블에서 발생하는 열에너지가 변할 경우 열 저항과 열용량으로 구성되는 열 회로로부터 과도상태 허용전류를 계산한다. 과도상태 허용전류는 열 저항과 열용량으로 구성되는 열 회로로부터 도체에 흐르는 전류에 의해 변동하는 도체온도를 계산하는 것이 필수적이다.

본 논문은 지중 전력케이블을 모의한 발열원의 주변에 온도센서를 설치하여 부하변동을 모의한 발열량의 변화에 대한 온도를 측정하고, 측정된 온도로부터 지중전력케이블의 표면온도를 계산하는 식을 이용하여 계산한 온도와 비교함으로써 부하변동이 있을 경우 도체온도 추정에 대한 방법을 비교 검토하였다.

2. 본 론

부하전류 변동에 의한 도체 온도의 변화는 케이블 자체와 그 주변 매질에 의해 구성되는 열 회로 즉, 열 저항과 열용량에 의존한다. 일반적으로 주변 매질에 의해 구성되는 열 회로의 열 시정수는 케이블의 열 시정수보다 크기 때문에 부하전류 변동에 의한 케이블의 온도 변동 특성은 케이블의 열 회로에 의해 지배를 받는다. 즉, 과도지속시간이 짧은 경우 열 시정수가 큰 주변 매질에 의한 온도 상승분은 큰 변동이 없으나 열 시정수가 작은 케이블에서의 온도 상승분은 큰 변동이 있다.

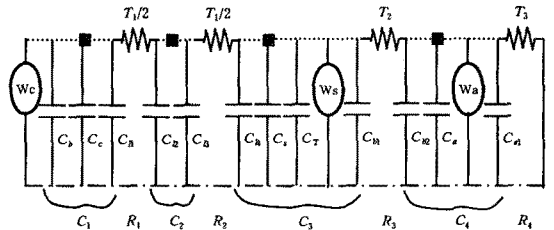
따라서, 도체 손실에 의한 도체 온도의 과도응답은 열 회로를 케이블 자체와 케이블 주변매질로 각각 나누어서 각각의 열 회로에 대하여 과도 온도 상승분을 계산하고, 케이블에서 주변 매질로 흐르는 열류의 흐름을 고려하는

2.1. 전력케이블의 과도온도 상승분 계산 이론

전력케이블 계에 대한 도체손실에 의한 전력케이블의 과도온도 상승분을 계산하는 방법은 여러 가지가 있으며 그중에 CIGRE Electra No. 24에서 제시하고 현재 IEC 853-2 규격으로 정해진 2회로 등가화 모델과 케이블의 각 구성요소에 대하여 시간에 따라 변하는 온도를 계산하기 위하여 제시된 전달함수 모델이 가장 널리 사용되고 있다. 특히, 전달함수 모델은 도체온도를 컴퓨터를 이용하는 계산할 수 있는 가장 최신의 기술로서 현재 개념 정립단계에 있다.

2.1.1 2회로 등가화 모델

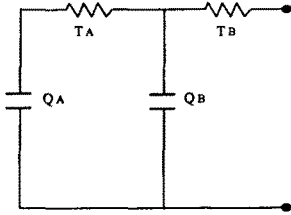
전력케이블은 전력케이블의 각 구성요소마다 열 저항과 열용량의 한 쌍으로 구성되는 개별 열 회로가 연속적으로 이어진 (그림 1)과 같은 사다리꼴 형태의 열 회로로 표현된다.



(그림 1) 전력케이블의 사다리꼴 열 회로

CIGRE Electra No. 24에서 제시된 2회로 등가화 모델은 (그림 1)의 사다리꼴 열 회로를 (그림 2)와 같이 몇 개의 loop를 어떤 등가화 과정을 거쳐서 2의 두 개의

loop로 증가화된 것이다. 이 방법은 계산을 수행하기 전에 기본적으로 여러 번의 수작업이 요구될 뿐만 아니라 도체를 제외하고는 전력케이블의 각 구성요소에 대하여 온도를 계산할 수 없는 단점이 있다.



(그림 2) 2회로 등가화

(그림 2)의 2회로 등가화로부터 도체손실에 의한 케이블의 과도온도 상승분은 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\theta_{c,p}(t) = W_{c,p} [T_a(1 - e^{-at}) + T_b(1 - e^{-bt})] \quad (2)$$

여기서,  $t$  = 과도지속시간 [초]

$\theta_{c,p}(t)$  =  $p$ 번째 케이블의 온도상승분 [°C]

$W_{c,p}$  =  $p$ 번째 케이블의 도체 손실 [W/m]

### 2.1.2 전달함수 모델

(그림 1)과 같은 전력케이블의 등가 선형 시불변 회로망의 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$H(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \quad (3)$$

여기서,  $P(s)$ ,  $Q(s)$ 는 Laplace 변환의 다항식이다. 회로의 입력은 도체 열 손실이고 출력은 임의의  $i$  절점에서의 온도이다. 절점  $i$ 는 케이블의 도체, 절연체와 같이 전력케이블의 각 구성요소가 된다. 식(3)을 시간 항으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\theta_i(t) = W_c \sum_{j=1}^n T_{ij}(1 - e^{-P_j t}) \quad (4)$$

여기서,  $\theta_i$  : 절점  $i$ 에서의 온도 [°C]

$W_c$  : 표면효과와 근접효과가 포함된 도체 손실 [W/m]

$T_{ij}$  : 계수, [°Cm/W]

$P_j$  : 시정수, [sec<sup>-1</sup>]

$t$  : 계단함수의 시작으로부터 시간, [sec]

$n$  : 절점 Index

$j$  : 1에서  $n$ 까지의 Index

계수  $T_{ij}$ 와 시정수  $P_j$ 는 전달함수의 Pole과 Zero로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$T_{ij} = -K \frac{\prod_{k=1}^n (Z_k - P_j)}{P_j \prod_{k=1, k \neq j}^n (P_k - P_j)} \quad (5)$$

여기서,  $k \neq j$ , 분모

$$K = \frac{a_{mi}}{b_n}$$

$a_{mi}$  :  $m=n-1$ 안에서 전달함수의 분자 방정식의 첫 번째 계수

$b_n$  : 전달함수의 분모 방정식의 첫 번째 계수

$Z_{ki}$  : 전달함수의 zeros

$P_j$  : 전달함수의 poles

도체의 전력손실은 온도에 따라 변화는 도체저항의 함수이다. 케이블에서 방산되는 전체 도체손실  $WT$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$WT = W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (6)$$

여기서,  $\lambda_1$ 와  $\lambda_2$ 는 IEC 287에서 정의된 시스와 아모아 손실 인자이다. 이들 인자는 시스 또는 아모아의 온도에 의존하기 때문에 온도변화를 고려해야 한다.

### 2.2 주변매질의 과도 온도 상승분 계산 이론

2차원 열전달방정식의 해로부터 지중 전력케이블의 표면온도 즉, 전력케이블(관로)의 표면 온도는 식(7)과 같이 계산된다.

$$\theta_{e,p}(t) = W_i \frac{\rho_s}{4\pi} \left[ -E_i \left( -\frac{D_e}{16\delta t} \right) + E_i \left( -\frac{L_p^2}{\delta t} \right) \right] \quad (7)$$

여기서,  $\theta_{e,p}(t)$  :  $p$ 번째 케이블에 대한 케이블 표면에서 과도온도상승분 [°C]

$\rho_s$  : 주변 매질의 열 저항률 [K·m/W]

$\delta$  : 주변 매질의 열 확산율 [m<sup>2</sup>/s]

$D_e$  :  $p$  번째 케이블(관로)의 외경 [m]

$L_p$  :  $p$  번째 케이블(관로)의 매설 깊이 [m]

$W_i$  :  $p$  번째 케이블의 주열 손실 [W/m]

$-E_i(-x)$  = Exponential Integral Function

위 식(7)은 한 개의 케이블 혹은 관로가 원토에 직접 매설되어 있을 경우의 지중 전력케이블 표면 혹은 관로의 표면 온도이며, 만일 원토보다 열 저항률이 낮은 개량토로 전력케이블 혹은 관로를 덮으면 다음과 같은 보정 계수를 식(7)에 더해야 한다.

$$Corr(t) = W_{i,b} \frac{\rho_s - \rho_b}{4\pi} \left[ -E_i \left( -\frac{r_b^2}{4\delta t} \right) + E_i \left( -\frac{L_b^2}{\delta t} \right) \right] \quad (8)$$

여기서,  $\rho_s$  : 토양의 열 저항률 [K·m/W]

$\rho_b$  : 개량토의 열 저항률 [K·m/W]

$r_b$  : 개량토로 되메운 면적의 등가반경 [m]

$L_b$  : 개량토로 되메운 면적의 중심깊이 [m]

일반적으로 지중송전선로는 한 곳에 여러 개의 케이블을 다중 포설하는 것이 대부분이기 때문에 한 케이블에

서 발생하는 손실은 다른 케이블의 도체 온도를 상승시키는 상호 가열 효과가 있다. 따라서 케이블이 다중 포설되어 있을 경우 상호 가열에 의한 온도 상승분은 식(9)와 같이 계산된다.

$$\theta_{pk}(t) = W_{l,k} \frac{\rho_s}{4\pi} \left[ -E_i \left( -\frac{d_{pk}^2}{4\delta t} \right) + E_i \left( -\frac{d'_{pk}{}^2}{4\delta t} \right) \right] \quad (9)$$

여기서,  $W_{l,k}$ :  $k$ 번째 케이블에서 발생하는 총 손실 [W/m]

$d_{pk}$ :  $p$ 번째와  $k$ 번째 케이블의 중심 간격 [m]

$d'_{pk}$ :  $p$ 번째와  $k$ 번째의 영상케이블간의 중심 간격 [m]

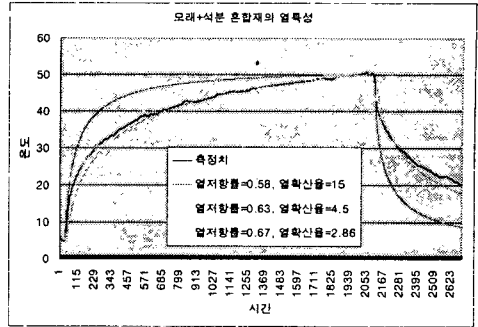
따라서 지중 전력케이블 혹은 관로 표면의 과도온도 상승분은 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_p(t) = \theta_e(t) + \sum_{k=1}^{N-1} [\theta_{pk}(t) + Corr(t)] \quad (10)$$

### 2.3 지중 전력케이블 표면 온도의 측정 및 추정

되메움재에 대하여 70W/m를 168시간동안 가열했을 때의 온도와 식(10)을 이용하여 계산한 온도를 비교해보면 (그림 3)과 같다. 이때 되메움재의 열특성은 <표 1>과 같이 추정할 수 있다.

그림에서 보는 바와 같이 발열을 중단한 때를 기준으로 도체온도를 추정해 보면 측정치와 일치함을 알 수 있다.



(c) 모래+석분 혼합재의 전력케이블 표면온도

(그림 3) 전력케이블의 표면온도 측정 및 추정

<표 1> 되메움재의 열 특성

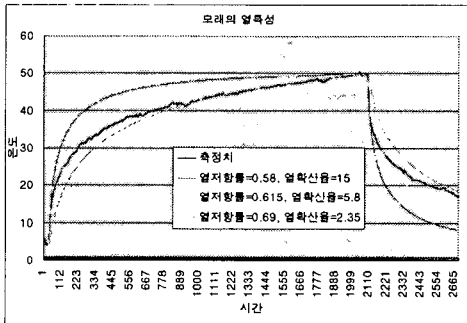
되메움재 종류	초기온도 상승부		중간 온도상승분		최종 온도상승분	
	열저항률 [Km/W]	열확산율 [m <sup>2</sup> /s]	열저항률 [Km/W]	열확산율 [m <sup>2</sup> /s]	열저항률 [Km/W]	열확산율 [m <sup>2</sup> /s]
모래	0.58	15×10 <sup>-6</sup>	0.615	5.8×10 <sup>-6</sup>	0.69	2.35×10 <sup>-6</sup>
석분	0.5	16×10 <sup>-6</sup>	0.54	4.9×10 <sup>-6</sup>	0.575	2.9×10 <sup>-6</sup>
모래+석분	0.58	15×10 <sup>-6</sup>	0.63	4.5×10 <sup>-6</sup>	0.67	2.86×10 <sup>-6</sup>

### 3. 결 론

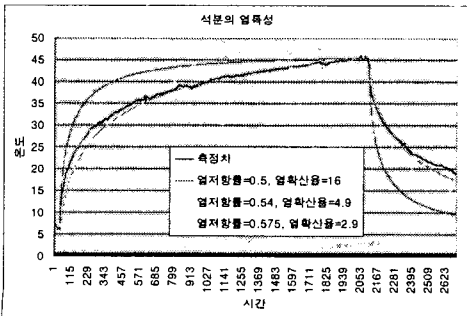
지중 전력케이블을 모의한 발열원 주변에 온도센서를 설치하여 부하변동을 모의한 발열량의 변화에 대하여 전력케이블의 표면온도를 측정하고, 지중전력 케이블의 표면온도를 계산하는 식을 이용하여 계산한 온도와 비교하였다. 그 결과 부하변동이 있을 경우 도체온도 추정할 수 있는 기법을 정립할 수 있었다

#### [참 고 문 헌]

- [1] 정성환 외, "지중전력케이블의 허용전류 산정 규격의 최근 동향", 1999년도 추계학술대회, 328-330, 1999
- [2] 정성환 외, "관로 부설 송전 케이블의 허용전류 계산 프로그램 개발", 2001년 하계학술대회, 2001
- [3] IEC 60287-1-1, "Electric Cables - Calculation of the Current Rating, Part 1 : Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculations of Losses, Section 1 : General", 1995, 8
- [4] IEC 60853-2



(a) 모래 되메움재의 전력케이블 표면온도



(b) 석분 되메움재의 전력케이블 표면온도