

이종매질에서의 지중 전력케이블 길이방향 온도해석 알고리즘

정성환*, 최상봉, 남기영, 이재덕, 김대경, 김형수
한국전기연구원

An Algorithm for Analyzing the Longitudinal Conductor Temperature of Power Cables Installed in Thermally Dissimilar Soil Materials

S.H. Jeong*, S.B. Choi, K.Y. Nam, J.D. Lee, D.K. Kim, H.S. Kim
KERI

Abstract - When power cables cross regions with unfavorable thermal conditions, conductor temperatures higher than the design value can occur. This paper studies the algorithm which is calculate the conductor temperature distribution of power cables installed in thermally dissimilar soil materials and simulate the longitudinal temperature of power cables.

역인 구간 1을 지나는 것으로 가정한다. 이때 짧은 교차 영역의 폭은 b_0 [m]로 가정하며 주변온도도 정상영역과 교차영역이 서로 다른 것으로 가정한다.

1. 서 론

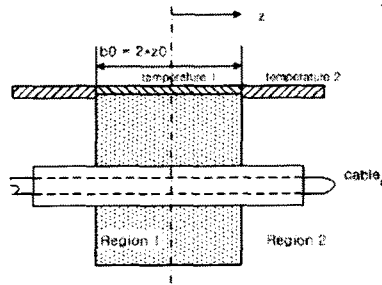
도심지에 주로 포설되는 지중 전력케이블은 경과지 전체에 대하여 열적 특성이 항상 일정한 토양 및 되메움재에 포설되어야 하는 것이 원칙이지만, 도로를 따라 포설되거나 도로를 횡단하는 경우 또는 도로와 보도를 교차하는 경우 또는 지하수나 전력케이블이외의 고온 발열체가 존재함으로써 전력케이블이 포설되는 주변 매질의 열적 특성이 현저하게 차이 나는 경우가 종종 발생하고 있다.

전력케이블에 대한 정상상태 허용전류 혹은 온도분포 해석은 전력케이블이 포설되는 토양과 그 주변의 매질의 열 특성 특히, 열 저항이 경과지 전 구간에서 걸쳐서 항상 일정하다는 것을 전제로 하여 전력케이블의 직경방향으로만 열전달이 이루어진다는 가정에 의해 계산되고 있다. 그러나 전력케이블의 경과지 중 열 특성이 좋지 않은 영역이 존재할 수 있으며, 이 경우 열적 특성이 서로 다른 이종매질에 의해 전력케이블에서 발생한 열은 직경방향 뿐만 아니라 전력케이블의 길이 방향으로 열 전달이 일어나며 서로 교차하는 이종 매질사이에 온도구배가 발생한다.

본 논문에서는 서로 교차하는 이종 매질사이에 온도분포를 계산하는 알고리즘에 대하여 살펴보고 이종 매질내에 포설된 전력케이블의 길이방향의 온도를 계산하여 보았다.

2. 본 론

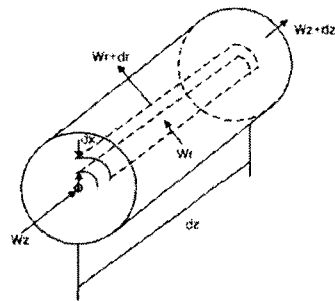
서로 교차하는 이종 매질사이에 온도분포를 계산하는 수학적인 모델을 개발하기 위하여 (그림 1)과 같은 케이블 포설형태를 가정한다. 그림에서 보는 바와 같이 일반적으로 전력케이블의 허용전류는 기준 정상영역인 구간 2에서 결정되고 있으며, 열 저항률이 매우 높은 교차영역



(그림 1) 이종 매질사이에 온도분포 해석 모델

2.1 전력케이블의 길이 방향 온도 분포

지중전력케이블의 길이방향의 온도를 해석하기 위하여 (그림 2)와 같은 열전달 모형을 가정한다. 이때 열전달은 전도에 의해서만 발생한다.



(그림 2) 전력케이블 길이방향(z축)의 열전달 모형

2.1.1 발열원의 상정

지중전력케이블에서 발생하는 손실은 유전체 손실과 도체 손실이 있으며, 유전체 손실은 전압과 관련이 있기 때문에 운전중인 전력케이블의 유전체손실에 의한 온도 상승분은 항상 일정한 것으로 한다. 그러나 도체 손실은

부하전류에 따라 달라지며 온도에 의존하기 때문에 식 (1)과 같이 계산된다.

$$W_g = W_{g0} [1 + \alpha_T (\theta - \theta_0)] = W_t + \Delta W \cdot \theta \quad (1)$$

여기서, α_T : 20℃의 도체 저항온도 계수 [1/K]

W_{g0} : $\theta_0 (=20^\circ\text{C})$ 에서 발생하는 전력케이블의
도체손실(주울 손실) [W/m]

$$W_t = W_{g0} (1 - \alpha_T \theta_0) \quad (2)$$

$$\Delta W = \alpha_T W_{g0} \quad (3)$$

W_g 를 W_t 와 ΔW 와 분리하여 도체온도 θ 에 의한 의존성을 구분함으로써 도체온도의 계산을 쉽게 할 수 있게 해 준다.

2.1.2 도체 온도의 계산

IEC 60287의 허용전류 계산은 다음과 식에 의해 계산된다.

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \left[\frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R \left[T_1 + n(1 + \lambda_1) T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4) \right]}} \quad (4)$$

여기서, $\Delta\theta$: 도체 온도 상승분 ($=\theta - \theta_{amb}$)

n : 한 케이블내 심선(도체) 수

R : 교류도체저항 [Ω/m]

T_1 : 절연체 열저항 [K · m/W]

T_2 : 시스와 아모아사이의 열저항 [K · m/W]

T_3 : 방식층의 열저항 [K · m/W]

T_4 : 케이블 표면에서 주변온도까지 외부 열저항 [K · m/W]

λ_1 : 시스 손실률

λ_2 : 아모아 손실률

W_d : 유전체 손실 [W/m]

식(4)를 이용하여 이종매질의 각 영역에 대하여 전력케이블의 도체온도 θ 를 계산하는 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\theta_{\infty}^{(v)} = \frac{nW_t T^{(v)} + \Delta\theta_{d'}^{(v)} + \theta_{amb}^{(v)}}{1 - n\Delta W \cdot T^{(v)}} \quad (5)$$

여기서, $\Delta\theta_{d'}^{(v)}$: 유전체손실에 의한 온도상승 [℃]

$\theta_{amb}^{(v)}$: 주변 온도 [℃]

$T^{(v)}$: 직경방향의 전 열 저항 [K.m/W]

v : 매질의 종류를 나타내는 첨자 ($v=1,2$)

이때, 직경방향의 전 열 저항은 다음과 같다.

$$T^{(v)} = \frac{T_1}{n} + (1 + \lambda_1) T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4^{(v)}) \quad (6)$$

만일, 전력케이블이 덕트나 파이프에 포설되어 있으면 공기 또는 파이프 내부의 공기 또는 오일의 길이방향의 열 저항은 무시한다. 케이블 직경 방향의 열 전달에 기인한 덕트 내부의 공기나 파이프 내부의 열 저항은 $T_4^{(v)}$ 에 포함된다. 두 구간사이의 유일한 차이점은 외부 열

저항 값과 주변온도의 값이 서로 다르다는 것이다. 구간 1에서의 직경 방향의 외부 열 저항 $T_4^{(v)}$ 은 다음 세가지로 구성된다.

(1) 케이블 표면과 덕트 내부 표면사이의 공기 혹은 유체의 열 저항 $T_{41}^{(v)}$

(2) 덕트 자체의 열저항 $T_{42}^{(v)}$

(3) 덕트 밖의 외부 열저항 $T_{43}^{(v)}$

따라서, 외부 열저항은 다음과 같이 된다.

$$T_4^{(v)} = T_{41}^{(v)} + T_{42}^{(v)} + T_{43}^{(v)} \quad (7)$$

2.1.3 전력케이블의 길이 방향의 열 해석

(그림 2)의 열 전달 모형으로부터 Fourier 법칙과 에너지 균형방정식을 적용하면 각각 다음과 같다.

$$W_r = -\frac{1}{T_r} \frac{\partial\theta}{\partial r} \quad (8)$$

$$W_z = -\frac{1}{T_L} \frac{\partial\theta}{\partial z} \quad (9)$$

$$W_r + W_z + W_{mt} dr dz = W_{r+dr} + W_{z+dz} \quad (10)$$

이때 전력케이블의 직경방향의 열 저항과 길이 방향의 열 저항은 각각 다음과 같다.

$$T_r = \frac{T_1}{n} + T_2 + T_3 + T_4^{(v)} \quad (11)$$

$$T_L = \frac{\rho}{A} \quad (12)$$

여기서, A : 전력케이블의 길이방향의 단면적 [m²]

ρ : 매질(도체)의 열 저항률 [K.m/W]

식(8), 식(9) 및 식(10)으로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$-\frac{d^2\theta}{dr^2} = W_{mt} T_r + \frac{T_r}{T_L} \frac{d^2\theta}{dz^2} \quad (13)$$

식 (13)을 각 구간에 대하여 대입하면 다음과 같다.

$$\theta^{(v)} - \frac{1}{\alpha_v^2} \frac{d^2\theta}{dz^2} = \theta_{\infty}^{(v)} \quad (14)$$

$$\text{여기서, } \alpha_v^2 = \frac{T_r \cdot (1 - \Delta W \cdot T^{(v)})}{T_r^{(v)}} \quad (15)$$

$$T_r^{(v)} = \frac{T_1}{n} + T_2 + T_3 + T_4^{(v)} \quad (16)$$

일반적으로 식 (13)의 일반해는 다음과 같다.

$$\theta^{(v)} = \theta_{\infty}^{(v)} + A_v \cdot \sinh(\alpha_v \cdot z) + B_v \cdot \cosh(\alpha_v \cdot z) \quad (17)$$

여기서 계수 A_v 와 B_v 는 다음과 같은 경계조건을 고려하여 결정된다.

(1) 두 영역이 교차하는 경계에서의 온도함수는 연속이다.

(2) 두 영역이 교차하는 경계에서의 열 유속 함수는

연속이다.

(3) 길이방향의 열 유속은 영역 1의 중앙($z=0$)과 $z=\infty$ 에서 0이 된다.

위의 식을 이중매질의 각 구간에 대하여 풀면 다음과 같이 구간별 거리에 따른 온도분포를 구할 수 있다. 이때 구간 2는 기준 정상영역이며 구간 1은 교차하는 이중 영역을 나타낸다.

$$\theta^{(1)}(z) = \theta_{\infty}^{(1)} - (\theta_{\infty}^{(1)} - \theta_{\infty}^{(2)}) \cdot p \cdot \cosh(\alpha_1 \cdot z) \quad (18a)$$

$$\theta^{(2)}(z) = \theta_{\infty}^{(2)} - (\theta_{\infty}^{(1)} - \theta_{\infty}^{(2)}) \cdot p \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \sinh(\alpha_1 \cdot z) \cdot e^{-\alpha_2(z-z_0)} \quad (18b)$$

$$\text{여기서, } p = \frac{1}{\cosh(\alpha_1 \cdot z_0) + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \sinh(\alpha_1 \cdot z_0)} \quad (19)$$

2.2 허용전류 감소지수

(그림 1)과 같은 포설조건에서의 허용전류는 교차하는 이중매질의 중앙에서 결정된다. 즉 이중매질의 중앙의 온도는 식(18a)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\theta^{(1)}(0) = \theta_{\infty}^{(1)} - (\theta_{\infty}^{(1)} - \theta_{\infty}^{(2)}) \cdot p \quad (20)$$

이중매질 중앙의 온도 $\theta^{(1)}(0)$ 는 도체의 최고허용온도 θ_{\max} 를 초과할 수 없기 때문에 $\theta^{(1)}(0) = \theta_{\max}$ 가 되며, 식(20)의 $\theta_{\infty}^{(1)}$ 항과 $\theta_{\infty}^{(2)}$ 항은 식(5)로부터 구할 수 있다. 이때, 식(5)의 발열원은 식(2)와 식(3)과 같다. 식(5)와 식(2), 식(3)을 식(20)에 대입하여 이중매질의 손실 $W_{g0} = R_0(I^{(1)})^2$ 에 대하여 풀면 2차방정식이 되며 따라서 이중매질에서의 허용전류 $I^{(1)}$ 는 2차방정식의 근이 되며 다음과 같이 구해진다. 이때, R_0 는 $\theta = \theta_0$ 에서의 도체저항이다.

$$[I^{(1)}]^2 = \frac{(b/a) - \sqrt{(b/a)^2 - (c/a)}}{nR_0} \quad (21)$$

여기서, $a = \alpha_T \cdot f_{\alpha} \cdot T^{(1)} \cdot T^{(2)}$

$$2b = \alpha_T(\theta_{\max} - \theta_A^{(1)}) \cdot T^{(1)} + f_{\alpha} \cdot T^{(1)} -$$

$$p \cdot [(g + \alpha_T \theta_A^{(2)}) \cdot T^{(1)} - (g + \alpha_T \theta_A^{(1)}) \cdot T^{(2)}]$$

$$c = \theta_{\max} - \theta_A^{(1)} + p \cdot (\theta_A^{(1)} - \theta_A^{(2)})$$

$$f_{\alpha} = 1 + \alpha_T(\theta_{\max} - \theta_0)$$

$$g = 1 - \alpha_T \theta_0$$

$$\theta_A^{(v)} = \Delta \theta_d^{(v)} + \theta_{amb}^{(v)}$$

위에서 구한 허용전류는 교차영역의 구간 1에서 전력케이블의 전 구간에서 흐릴 수 있는 전류이며, 영역 2에 흐릴 수 있는 전류와 다음과 같은 관계가 있다.

$$[I^{(1)}]^2 = d^2 \cdot [I^{(2)}]^2 \quad (22)$$

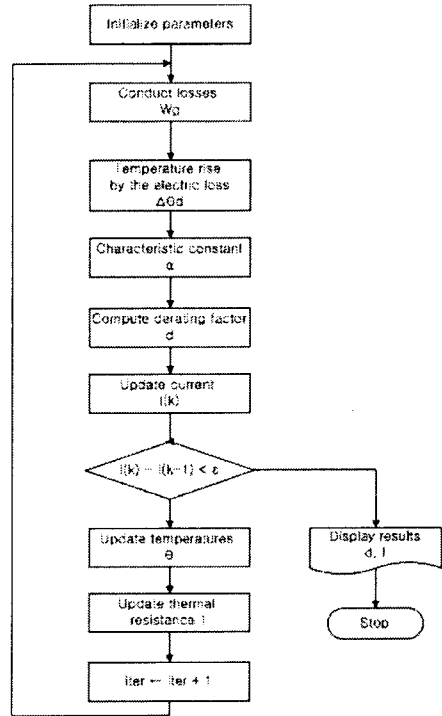
여기서, d : 허용전류 저감지수

$I^{(2)}$: 정상영역 2에서의 허용전류 [A]

정상영역 2에서의 허용전류 $I^{(2)}$ 는 식(4)에 의해 구해지면 이것을 식(22)에 대입하여 허용전류 저감지수를 구하면 다음과 같이 계산된다. 이때 정상영역 2에서의 허용전류는 정상 영역의 토양 열 저항률에 대한 외부 열 저항 $T_A^{(2)}$ 와 주변온도 $\theta_{amb}^{(2)}$ 에 의해 계산된다.

$$d^2 = \frac{b - \sqrt{b^2 - ac}}{\alpha_T \cdot T^{(1)}(\theta_{\max} - \theta_A^{(2)})} \quad (23)$$

(그림 3)은 허용전류 저감지수를 계산하는 알고리즘을 나타낸다.



(그림 3) 허용전류 저감지수 계산 알고리즘

3. 결 론

본 논문에서는 서로 교차하는 이중 매질사이에 온도분포를 계산하는 알고리즘에 대하여 살펴보고 이중 매질내에 포설된 전력케이블의 길이방향의 온도를 계산하여 보았다. 이중 매질사이에 온도분포를 계산하는 알고리즘을 이용하여 허용전류 저감지수를 계산하여 보았으며, 이중 매질에서의 허용전류 계산 기법을 정립하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] Heinrich Brakelmann, George J. Anders, "Ampacity Reduction Factors for Cables Crossing Thermally Unfavorable Regions", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 4, Oct. 2001