

관로부설 지중 전력 케이블 도체 온도 해석에 관한 연구

정성환\*, 김대경, 최상봉, 이동일, 강지원, 김형수, 박준호  
한국전기연구원, 한전 전력연구원, 부산대학교

A Study on the Analysis of Conductor Temperature Distribution of Underground Power Cables Buried in Ducts

Seong Hwan Jeong\*, D.K. Kim, S.B. Choi, D. I. Lee, J.W. Kang, H.S. Kim, J.H. Park  
KERI KEPRI Pusan National University

**Abstract** - This paper proposes an algorithm of analyzing the conductor temperature distribution of underground power cables buried in ducts. This algorithm used an equation of the permissible current-carrying capability of power cables. The algorithm will be given to an operator an ability to operate the underground power system in comfort.

$\lambda_1$  :시스 손실률  
 $\lambda_2$  :아모아 손실률  
 $W_d$  :유전체 손실 [ W/m ]

일반적으로 송전 케이블은 아모아층이 없기 때문에 금속 시스와 아모아 사이의 열 저항  $T_2$ 와 아모아 손실률  $\lambda_2$ 는 고려하지 않는다.

1. 서 론

전력케이블에 흘릴 수 있는 전류는 열적인 제약조건 때문에 케이블이 매설되는 깊이에 따라 다 다르다. 우리나라와 같이 지중 송전 선로를 위한 경과지 확보가 어려운 상황에서는 동일 구간에 여러 개의 케이블을 부설하여 다 회선으로 송전함으로써 늘어나는 도심지 전력 수요에 능동적으로 대처할 필요가 있는데 이 경우 지중 전력케이블에 대한 허용전류 해석은 필수적이다.

허용전류 해석은 부설된 케이블이 여러 개일 때 그중 열적으로 가장 불안정한 케이블의 도체온도가 상시최고 허용온도를 넘지 않을 때의 전류를 계산하는 것으로서 지중 송전 선로를 건설할 계획단계에서는 반드시 거쳐야 하는 과정이지만, 허용전류는 실제 부하전류와 많은 차이가 있기 때문에 지중 송전 선로 운용상 케이블에 대한 안전성 확보에는 어려움이 있다.

본 논문에서는 허용전류를 계산하는 식을 이용하여 관로에 부설된 지중 전력 케이블의 도체온도를 계산할 수 있는 계산 알고리즘을 제안하였으며, 실 선로의 운전상태를 상정한 부하전류에 대하여 송전케이블의 도체온도를 계산하여 보았다.

2. 본 론

2.1 관로 부설에 대한 허용전류 계산식

전력케이블의 허용전류를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \left[ \frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R \left[ T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4) \right]}} \quad (2.1)$$

여기서,  $\Delta\theta$ :도체 온도 상승분 (=  $\theta_c - \theta_a$ )  
 $n$ :한 케이블내 심선(도체) 수  
 $R$ :교류도체저항 [ $\Omega/m$ ]  
 $T_1$ :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]

2.1.1 케이블의 열저항

송전 케이블의 열 저항은 절연체와 방식층으로 구성된다. 일반적으로 차폐층이 존재하면 금속성 테이프는 도체 혹은 시스의 일부분으로 취급하지만 반도체층(금속화된 카본지태이프)은 절연체로 취급한다.

(1) 절연체의 열저항  $T_1$

단심 케이블에 대한 절연체의 열 저항은 다음과 같이 계산된다.

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2t_1}{d_c} \right] \quad (2.2)$$

여기서,  $\rho_T$ : 절연체의 열저항률 [K·m/W]

$d_c$ : 도체 외경 [mm]

$t_1$ : 도체와 금속시스사이의 절연체 두께 [mm]

(2) 방식층의 열저항  $T_3$

파부형 금속 시스를 가진 케이블에 대한 방식층의 열 저항은 다음과 같이 계산된다.

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ \frac{D_{oc} + 2t_3}{\left( \frac{D_{oc} + D_{it}}{2} \right) + t_s} \right] \quad (2.3)$$

여기서,  $\rho_T$ : 방식층의 열저항률 [K·m/W]

$t_3$ : 방식층의 두께 [mm]

$t_s$ : 금속 시스의 두께 [mm]

$D_{it}$ : 파부형 금속시스의 내곡경 [mm]

$D_{oc}$ : 파부형 금속시스의 외산경 [mm]

2.1.2 외부 열저항

관로 부설의 경우 케이블 표면에서 주변 온도까지의 외부 열저항  $T_4$ 는 식(2.4)와 같이 세 개의 열 저항으로 구성된다.

$$T_4 = T_{41} + T_{42} + T_{43} \quad (2.4)$$

- ① 케이블 표면에서 관 내벽까지의 열 저항  $T_{41}$
- ② 관 내벽에서 관 외벽사이의 열 저항

(관 자체의 열 저항)

$$T_{42}$$

③ 관 외벽에서 주변온도까지의 토양 열 저항  $T_{43}$

(1) 케이블 표면에서 관 내벽까지의 열저항  $T_{41}$

관로 부설의 경우 케이블 표면에서 관 내벽까지의 열 저항은 케이블 표면에서의 대류와 복사에 의한 열 전달을 감안한 IEC 287 규격에서 추천하는 식 (2.5)를 이용하여 계산한다.

$$T_{41} = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e} \quad (2.5)$$

여기서,  $U, V, Y$ : 관의 재질과 내부 환경을 고려한 열 교환 상수

$\theta_m$ : 관의 내부온도 [°C]

$D_e$ : 케이블의 등가 외경 [mm]

케이블의 등가 외경  $D_e$ 는 관 내부의 케이블 수에 따라 결정되는데, 송전케이블의 경우 관 내부에 한 개의 케이블이 부설되기 때문에 케이블의 등가 외경은 케이블의 외경이 된다.

(2) 관 자체의 열 저항  $T_{42}$

관 내벽에서 관 외벽사이 즉, 관 자체의 열 저항  $T_{42}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$T_{42} = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ \frac{D_o}{D_i} \right] \quad (2.6)$$

여기서,  $\rho_T$ : 관 자체의 열저항률 [K·m/W]

$D_i$ : 관의 내경 [mm]

$D_o$ : 관의 외경 [mm]

(3) 토양의 열 저항  $T_{43}$

우리 나라의 경우 지중 송전 선로를 위한 경과 지 확보가 매우 어렵기 때문에 한 곳에 여러 개의 케이블을 부설하여 다회선으로 운전하는 경우가 많다. 이 경우 케이블간 상호 가열 효과가 있어서 케이블의 표면 온도를 상승시켜 허용전류를 감소시키는 요인으로 작용한다. 그리고, 케이블은 매설 깊이가 서로 다르기 때문에 허용전류도 깊이에 따라 각각 다르다. 이와 같은 다회선 부설과 매설깊이를 고려한 토양의 열 저항은 다음과 같이 서로 다른 모드로 구할 수 있다.

① 평형부하 조건

평형부하란 한 곳에 부설된 케이블의 종류가 같을 때 매설 깊이와 관계없이 모든 케이블의 허용전류가 동일한 것을 말한다. 이때, 허용전류는 열적으로 가장 불안정한 케이블에 의해 결정되며 이때의 토양 열 저항은 다음과 같이 계산된다.

$$T_{43} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \left[ \left( \frac{d_{p1}'}{d_{p1}} \right) \left( \frac{d_{p2}'}{d_{p2}} \right) \dots \left( \frac{d_{pk}'}{d_{pk}} \right) \dots \left( \frac{d_{pq}'}{d_{pq}} \right) \right] \right\} \quad (2.7)$$

여기서,  $\rho_s$ : 토양의 열 저항률 [K·m/W]

$$u = \frac{2L}{D_e}$$

$L$ : 지표면에서 케이블 축까지의 거리 [mm]

$D_e$ : 관의 외경 [mm]

$d_{kp}$ : p번째 케이블 중심에서 k번째 케이블의 영상분 중심까지의 거리 [mm]

$d_{kp}$ : p번째 케이블 중심에서 k번째 케이블 중심까지의 거리 [mm]

② 불평형부하 조건

불평형부하란 한 곳에 부설된 케이블의 종류가 같거나 서로 다를 때 매설 깊이에 따라 허용전류가 다른 경우를 말한다. 이때, 케이블의 도체 온도는 상시 최고허용온도가 된다. 불평형부하 조건에 대한 토양 열 저항은 식(2.8)과 같이 계산되며, 식(2.1)의 허용전류 계산식의 분자항 즉, 도체온도 상승 분은 식(2.9)만큼 더 감소되어야 한다.

$$T_{43} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (2.8)$$

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{kp} + \dots + \Delta\theta_{qp} \quad (2.9)$$

여기서,  $\Delta\theta_{kp} = W_k \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left( \frac{d_{pk}'}{d_{pk}} \right)$

$W_k$ : k번째 케이블에서 발생하는 총손실[W/mm]

## 2.2 온도분포해석 알고리즘

온도분포해석 알고리즘은 그림 (2.1)과 같다.

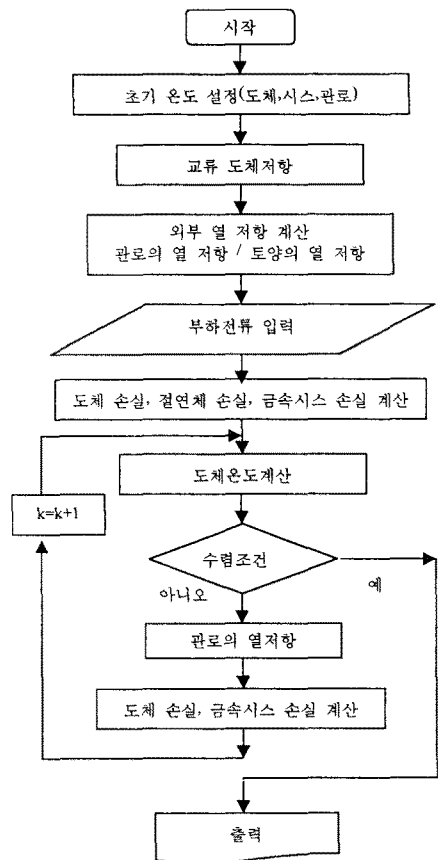


그림 (2.1) 온도분포해석 알고리즘

### 2.2.1 도체온도 계산식의 유도

허용전류 계산식 (2.1)을 이용하여 도체 온도를 계산하는 식을 유도하면 식(2.10)과 같다.

$$\theta_c = I^2 R [T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)] + W_d \left[ \frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right] + \theta_a \quad (2.10)$$

### 2.2.2 수렴조건

그림 (2.1)의 수렴조건은 식(2.11)과 같다.

$$|\theta_c^{k+1} - \theta_c^k| \leq 0.01 \quad (2.11)$$

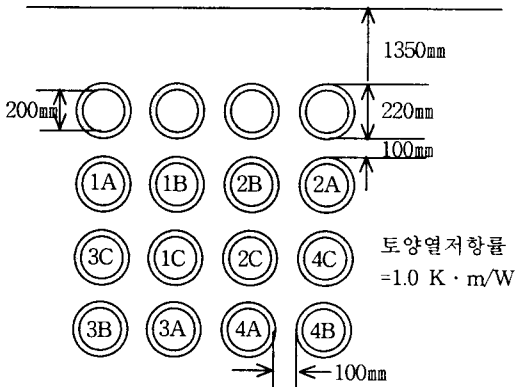
## 2.3 온도 분포 해석

### 2.3.1 케이블 및 부설 조건

① 케이블 : 154kV 2000mm<sup>2</sup> XLPE (17mm)

케이블에 대한 전기적 및 열적 파라메타는 한전 구매시방서와 IEC 287규격의 것을 적용한다.

② 부설조건



그림(2.2) 부설조건

### 2.3.2 허용전류 해석

정상상태 상시 허용전류 계산 모드별 허용전류 및 이 때의 도체 온도는 <표 2.1>과 같다.

<표 2.1> 정상상태 허용전류 계산 및 도체온도

관로 번호	평형부하 조건		불평형부하 조건	
	허용전류[A]	도체온도	허용전류[A]	도체온도
1A	910.13	79.11	1150.44	90℃
1B		84.30	959.80	
1C		90.04	716.30	
2A		79.11	1150.44	
2B		84.30	959.80	
2C		90.04	716.30	
3A		87.98	849.23	
3B		83.23	1029.00	
3C		84.37	958.61	
4A		87.98	849.23	
4B		83.23	1029.00	
4C		84.37	958.61	

<표 2.1>에서 보는 바와 같이 그림(2.2)와 같은 부설 조건하에서 154kV 2000mm<sup>2</sup> XLPE 케이블이 흘릴 수 있는 전류는 최대 910.13(A)임을 알 수 있다.

### 2.3.3 온도분포 해석

<표 2.1>에서 보는 바와 같이 매설깊이와 케이블만의 관점에서 보면 케이블에 흘릴 수 있는 최대 전류와 최소 전류는 각각 1150.44(A)와 716.30(A)이다. 그런데, 지중 송전 선로는 회선 용량을 감안하여 선로 운용을 하여야 하기 때문에 최대 전류를 흘릴 수 없으며, 1번 선로와 2번 선로는 716.3(A)를 3번 선로와 4번 선로는 849.23(A)로 선로를 각각 운영하는 것이 케이블의 안전을 확보하는데 도움이 될 것이다. 이렇게 운용할 경우 도체 온도에 대한 해석결과는 <표 2.2>와 같다.

또, 지중 송전 선로는 비상 운전을 감안하여 약간의 여유를 두고 운용할 필요가 있기 때문에 정격 용량으로 운전할 수 없다. 정격 용량을 평형부하조건으로 상정하여 평형부하조건 허용전류의 70%로 부하 운전할 경우 도체온도를 해석해 보았으며 그 결과도 <표 2.2>에 나타내었다.

<표 2.2> 온도 분포 해석

관로 번호	부하 운전 I		부하운전 II	
	허용전류[A]	도체온도	허용전류[A]	도체온도
1A	정격부하를 910.13(A)로 상정하여 70%로 부하 운전할 경우 (637.0A)	51.85	716.30	63.46
1B		54.39		66.89
1C		57.18		71.81
2A		51.85		63.46
2B		54.39	716.30	66.89
2C		57.18	71.81	71.81
3A		56.17	849.23	73.56
3B		53.89		70.15
3C		54.41		70.35
4A		56.17		73.56
4B		53.86	849.23	70.15
4C		54.41	70.35	70.35

## 3. 결 론

<표 2.2>에서 보는 바와 같이 부하조건 I의 경우는 실제적으로 운전하고 지중송전 선로의 운용 형태와 유사할 것으로 예상되며 이때의 도체온도는 57.2℃정도이며, 금속시스의 온도는 56℃로 예상된다. 또 부하조건 II의 경우 실제적으로 지중 송전 선로를 운용할 수 있는 최대 전류조건일 것으로 예상되는데 이때의 도체온도는 상시 최고허용온도 90℃보다 훨씬 낮아 선로 운용상 충분한 여유가 있을 것으로 예상된다.

따라서, 본 논문에서 제시하고 있는 케이블의 도체온도 분포해석 알고리즘을 이용하여 도체온도를 해석함으로써 지중 송전 선로 운용에 도움될 것으로 예상된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 정성환 외, "온도의존성 항목을 고려한 지중배전케이블의 허용전류 계산에 관한 연구", 1999년도 추계학술대회, 141-143, 1999
- [2] 정성환 외, "지중전력케이블의 허용전류 산정 규격의 최근 동향", 1999년도 추계학술대회, 328-330, 1999