

온도의존성 항목을 고려한 지중배전케이블의 허용전류 계산에 관한 연구

정성환*, 김대경**, 최상봉**, 배정호**, 하태현**, 이현구**, 장완성***, 김숙철***, 김태현*

A Study on the Current-Carrying Capacity Calculation Considering the Temperature-Dependent Factors in Underground Distribution Cables

S. H. Jeong*, D. K Kim**, S. B. Choi**, J. H. Bae**, T. H. Ha**, H. G. Lee,**
Y. S. Jang***, S. C. Kang***, T. H. Kim*

Abstract - This paper has studied on a calculating method of a current carrying capacity considering the temperature-dependent factors in underground distribution cables and proved its efficiency of the temperature equation.

1. 서 론

지중전력케이블에 대한 허용전류는 케이블 각 부의 온도와 이 온도에 의존하는 항, 즉 도체저항, 시스템저항에 대하여 정확한 값을 상정해야 계산상의 정확성이 높아진다.

본 논문에서는 의도의존항 및 지중배전케이블이 포설되는 관로내의 온도를 계산하는 수식을 개발하여 지중배전 케이블의 허용전류를 산정하였으며, 이 유용성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 허용전류 계산식

IEC 287규격에서 규정하고 있는 관로포설에 대한 허용전류는 식(2.1)과 같이 계산된다.

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

- 여기서, n : 한 케이블내 심선(도체) 수
- θ_c : 도체 허용온도
- θ_a : 주변온도
- R : 허용온도에서의 교류도체저항 [Ω/m]
- λ_1 : 시스템손실률 (= W_s/W_c)
- λ_2 : 아모아손실률 (= W_a/W_c)
- W_d : 유전체 손실
- T_1 : 도체와 시스템간의 열저항(절연체 열저항)
- T_2 : 시스템과 아모아간 열저항
- T_3 : 케이블 외장의 열저항
- T_4 : 케이블이외의 외부열저항

2.2 온도 의존성 인자

지중 배전 케이블의 허용전류를 계산할 때 고려되어져야 할 온도의존성 항목은 다음과 같다.

2.2.1 교류 도체 저항

상시 허용 온도에서의 교류 도체 저항은 식(2.2)와 같이 계산된다.

$$R = r_0 k_1 k_2 \quad (2.2)$$

- 여기서, r_0 : 20℃에서의 직류도체저항
- k_1 : 20℃에서의 직류도체저항과 상시허용온도에서의 직류도체저항의 비
- k_2 : 직류도체저항과 교류도체저항의 비

여기서, 20℃직류도체저항과 상시허용온도에서의 직류도체저항 비 k_1 은 식(2.3)에서 보는 바와 같이 온도항이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이때 T_1 은 허용전류를 계산할 때마다 허용전류계산식으로부터 계산된 온도를 대입하여야 한다.

$$k_1 = \{1 + \alpha_{20}(T_1 - 20)\} \quad (2.3)$$

여기서, α_{20} : 20℃에서의 저항온도계수

2.2.2 시스템 저항

시스템손실률 λ_1 은 식(2.4)와 계산되는 순환전류에 의한 손실률(λ_1')과 과 식(2.5)와 같이 계산되는 와전류에 의한 손실률(λ_1'')의 합이다. 식(2.4)와 식(2.5)에서 보는 바와 같이 시스템의 저항 R_s 및 시스템전기저항 ρ_s 는 시스템의 온도에 의존한다. JCS 168E 규격에서는 동심중성선 시스템에 대하여 시스템의 온도를 75℃로 가정한다.

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (2.4)$$

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_o (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right] \quad (2.5)$$

여기서, $X = 2\omega l_0^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right)$

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s}\right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}}$$

R_s : 시스템의 저항 [Ω/m]

ρ_s : 운전온도에서의 시스템 전기저항 [$\Omega \cdot m$]

2.2.3 관로내부의 열저항 계산식

IEC 287규격을 이용하여 지중배전케이블의 허용전류 계산할 때 식(2.1)에서 보는 바와 같이 케이블이외의 열저항 계산식 T_4 는 다음과 같은 열저항으로 구성된다.

- (1) 케이블 표면과 관로 내벽사이의 열저항 T_{41}
- (2) 관로 자체의 열저항 T_{42}
- (3) 관로외부 토양열저항 T_{43}

케이블 표면과 관로 내벽사이의 열저항 T_{41} 은 식(2.6)과 같이 계산된다. 식에서 보는 바와 같이 관로내부의 온도 T_m 은 IEC의 경우 55℃로 가정하지만 허용

전류를 계산할 때마다 매 번 새로운 값을 대입해야 정확한 허용전류 계산을 할 수 있다.

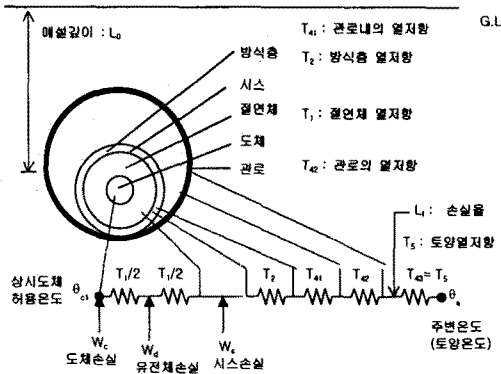
$$T_{41} = \frac{U}{1 + 0.1(V + YT_m)D_e} \quad (2.6)$$

여기서, U, V, W : 케이블이 포설되는 관로의 형태에 의해 결정되는 상수

T_m : 관로내의 온도

2.3 온도 계산식의 유도

단심 단상 케이블이 그림(2.1)과 같이 포설되어 있을 경우 도체온도는 식(2.7)과 같이 계산된다.



그림(2.1) 단심케이블의 관로포설

$$\theta_c = W_c \frac{T_1}{2} + (W_c + W_d) \frac{T_2}{2} + (W_c + W_d + W_s) T_2 + (W_c + W_d + W_s)(T_{41} + T_{42}) + (L_f \cdot W_c + W_d + L_f \cdot W_s) T_{43} + \theta_a \quad (2.7)$$

그러나, 지중배전 케이블은 다회선 포설인 경우가 대부분이기 때문에 케이블 상호간의 가열효과를 고려해야 한다. 따라서, 허용전류를 계산할 때 케이블의 도체온도는 식(2.7)에 상호가열에 의한 온도상승분인 식(2.8)을 더해야 한다.

$$\sum_{k=1}^n \left\{ I_k^2 R_k (1 + \lambda_{1,k}) + W_{d,k} N_k \left(\frac{\rho_c}{2\pi} \ln \left(\frac{d_{\mu k}'}{d_{\mu k}} \right) + Corr \right) \right\} \quad (2.8)$$

여기서, I_k : k 번째 케이블의 허용전류

R_k : p 번째 및 k 번째 케이블의 교류 도체 저항

$W_{d,k}$: k 번째 케이블의 유전체 손실

$\lambda_{1,k}$: k 번째 케이블의 시스 손실률

N_k : k 번째 관로내 케이블 수

$Corr$: 되메움재 효과를 고려하는 인자

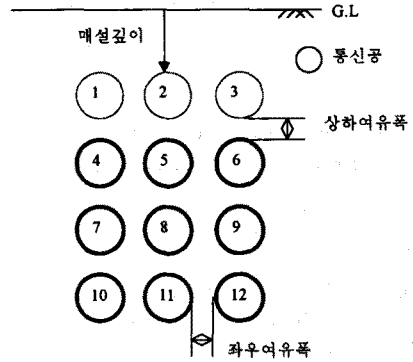
2.4 상시 허용 전류 계산 및 온도 해석

그림(5.1)과 같이 9공관로에 포설되는 지중배전케이블에 대하여 상시허용전류를 계산하였으며, 매설 깊이 0.6m에 대하여 부하손실률 0.7일 때 케이블의 도체온도, 시스의 온도 및 관로의 온도를 해석하였다.

2.4.1 해석 조건

지중배전케이블에 대한 상시허용전류 계산 및 온도해석에 사용된 케이블 및 케이블 주변매질에 대한 해석조

건은 다음과 같다.



(그림 5.1) 9공 관로

2.4.1.1 케이블

상시허용전류 계산에 사용될 22.9kV 지중배전 325mm² CN-CV 케이블의 재원 및 열적 전기적 상수는 각각 표(2.1)과 표(2.2)와 같다. 여기서 내부외반도전층은 절연체에 포함되는 것으로 한다. 그외 케이블의 접지 방식 및 케이블 배열은 다음과 같다.

표 (2.1) 케이블 재원

케이블의 구성	직경 [mm]	재질	특 징
도체	외경: 21.7	동	연선
절연체	내경: 21.7 외경: 39.1	CV	-
시스 (동심 중성선)	내경: 41.4 외경: 46	동	· 소선직경=2.3mm · 소선수 :26개 · 피치=368mm
방식층	내경: 46 외경: 52	PVC	-

표 (2.2) 재질별 전기 및 열적 상수

케이블의 구성	재질	전기적 상수	열적 상수
도체	동	- 전기저항률 = 1.724 x10 ⁻⁸	
절연체	CV	- 유전율=2.5 - 유전정접=0.001	- 열저항률=3.5
시스 (동심 중성선)	동	- 전기저항률 = 1.724 x10 ⁻⁸	
방식층	PVC	-	- 열 저항률=5.0

- ① 상시 도체 최고허용온도 : 90℃
- ② 시스 접지 방식 : 양단접지방식
- ③ 관로내 케이블 배열 : 삼각배열

2.4.1.2 주변매질

- ① 관로 재원
 - 내경 : 175 mm
 - 외경 : 230 mm
 - 재질 : PVC (열 저항률=3.5 [K·m/W])
- ② 관로 내부 : 대기

- ③ 되매움재 : 모래(열 저항률=0.9 [K·m/W])
- ④ 토양
 - 열 저항률 : 0.9 [K·m/W]
 - 주변온도 : 25℃

2.4.1.3 포설조건

- ① 매설깊이 : 0.6m 혹은 1.2m
- ② 상하여육폭 : 10Cm
- ③ 좌우여육폭 : 10Cm

2.4.2 상시 허용전류 계산

표(5.3)은 그림(5.1)과 같이 9공 관로가 각각 0.6m와 1.2m에 매설되어 있을 때 (부하)손실률별 케이블의 평형부하 상시 허용전류를 계산한 것이다. 또, <표 5.4>와 <표 5.5>는 매설 깊이가 각각 0.6m와 1.2m일 때 불평형 부하 상시 허용전류를 계산한 것이다. 이때, 손실률은 선로의 부하율로부터 다음과 같이 계산된다.

$$(부하)손실률 = 0.3 \times (부하율) + 0.7 \times (부하율)^2 \quad (2.9)$$

<표 5.3> 평형부하일 경우 케이블의 상시허용전류

손실률(부하율) 매설깊이	0.5 (0.65)	0.6 (0.74)	0.7 (0.81)	0.8 (0.88)	0.9 (0.94)	1.0 (1.0)
0.6 m	342.1	319.5	300.8	285.1	271.6	259.8
1.2 m	322.1	300.0	281.7	266.7	253.7	242.4

<표 5.4> 매설깊이=0.6m일 때 불평형 상시허용전류

손실률(부하율) 관로번호	0.5 (0.65)	0.6 (0.74)	0.7 (0.81)	0.8 (0.88)	0.9 (0.94)	1.0 (1.0)
4 / 6	396.1	376.3	359.6	345.4	333.1	322.3
5	368.0	345.5	326.7	310.6	296.7	284.5
7 / 9	346.5	322.7	302.8	286.0	271.5	258.8
8	310.0	282.2	258.9	239.0	221.2	206.5
10 / 12	359.6	337.6	319.5	304.2	291.2	279.8
11	329.8	305.0	284.5	267.2	252.4	239.5

<표 5.5> 매설깊이=1.2m일 때 불평형 상시허용전류

손실률(부하율) 관로번호	0.5 (0.65)	0.6 (0.74)	0.7 (0.81)	0.8 (0.88)	0.9 (0.94)	1.0 (1.0)
4 / 6	365.8	345.7	329.2	315.1	303.0	292.5
5	338.3	315.8	297.2	281.4	267.9	256.0
7 / 9	324.9	301.6	282.5	266.3	252.4	240.3
8	290.0	263.0	240.6	221.6	205.4	190.8
10 / 12	342.0	320.7	303.2	288.6	276.1	265.3
11	313.7	289.8	270.2	253.7	239.7	227.5

2.4.3 온도 해석

매설 깊이 0.6m에 대하여 부하손실률 0.7일 때 평

형부하 상시허용전류 및 불평형부하 상시허용전류에 대한 케이블의 도체온도, 시스의 온도 및 관로의 온도는 각각 표(5.6) 및 표(5.7)과 같다.

표(5.6) 평형부하 상시허용전류에 대한 온도해석

케이블 구성 관로번호	도체	시스	관로내부	주변온도
4 / 6	78.74	76.59	75.55	25.0
5	82.22	80.05	79.00	
7 / 9	85.49	83.30	82.25	
8	90.00	87.42	86.36	
10 / 12	84.47	82.31	81.26	
11	88.07	85.87	84.81	

표(5.7) 불평형부하 상시허용전류에 대한 온도해석

케이블 구성 관로번호	도체	시스	관로내부	주변온도
4 / 6	90.00	86.85	85.34	25
5	90.00	87.38	86.13	
7 / 9	90.00	87.75	86.67	
8	90.00	88.34	87.54	
10 / 12	90.00	87.51	86.32	
11	90.00	88.01	87.06	

3. 결 론

위에서 살펴본 바와 같이 케이블의 허용전류를 계산할 때 각 규격에서 초기 값으로 정하고 있는 온도는 실제 허용전류를 계산해서 구해진 각 부분의 온도와 비교해 볼 때 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 허용전류 계산시 각 부분의 온도를 고려한 도체저항, 시스의 저항을 계산해야 함을 알 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] IEC 287-1-1 "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] IEC 287-1-2 "Section 2 : Sheath eddy Current Loss Factors for Two Circuits in Flat Formation", 1993,12
- [3] IEC 287-2-1, "Part 2 : Thermal Resistance, Section 1 : Calculation of Thermal Resistance", 1994, 12
- [4] IEC 287-2-2, " Section 2 : A Method for Calculating Reduction Factors for Groups of Cables in Free Air, Protected from Solar Radiation", 1995, 5
- [5] IEC 287-3-1, "Part 3 : Sections on Operating Conditions, Section 1 : Reference Operating Conditions and Selection of Cable Type", 1995, 8
- [6] IEC 287-3-2, "Section 2 : Economic Optimization of Power Cable Size", 1996, 10