

지중 송전케이블의 되메움재 효과에 관한 연구

정성환*, 김대경, 최상봉, 이동일, 강지윤
한국전기연구원, 한전전력연구원

A Study on the Effect of Low Thermal Resistivity Backfill for the Permissible Current-Carrying Capability of Underground Power Cables

S. H. Jeong*, D. K. Kim, S. B. Chol, D. I. Lee, J. W. Kang
KERI KEPRI

Abstract - This paper analyzes the sensitivity of the permissible current-carrying capability of underground power cables according to the thermal property of backfill materials and construction size of backfill materials. It is helpful for operators to determine the operating current and to design the construction of underground power cables.

1. 서 론

일반적으로 전력케이블의 허용전류는 케이블 자체보다는 주변 매질의 열적 파라메타와 부설조건에 더 큰 영향을 받는다. 주변 매질의 열적 파라메타는 토양의 온도, 토양과 되메움재의 열저항률 등이 있으며, 부설조건으로는 케이블의 매설 깊이, 관로간 간격과 되메움재의 크기 등이 있다. 뿐만 아니라 송전케이블의 부하 손실률도 허용전류에 큰 영향을 준다.

본 논문은 이와 같은 열적 파라메타중 되메움재의 열저항률과 되메움재의 크기가 전력케이블의 허용전류에 주는 영향을 분석하고 민감도를 계산하였다. 이와 같은 민감도 분석은 원토보다 열 저항률이 더 좋은 양질의 되메움재 개발 및 되메움재를 적용했을 때 예상되는 허용전류의 증분을 예측할 수 있으며, 이것을 활용하여 지중 송전선로의 운용에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

2. 본 론

2.1 허용전류 계산식

지중 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 $[K \cdot m / W]$
- T_2 : 시스와 아모아사이의 열저항 $[K \cdot m / W]$
- T_3 : 방식층의 열저항 $[K \cdot m / W]$
- T_4 : 케이블 표면에서 주변온도까지 외부 열저항 $[K \cdot m / W]$
- λ_1 : 시스 손실률
- λ_2 : 아모아 손실률
- W_d : 유전체 손실 $[W / m]$

관로 부설의 경우 케이블 표면에서 주변온도까지의 외부 열저항 T_4 은 케이블 표면에서 관로 내부까지의 열저항 T_{41} , 관로 자체의 열저항 T_{42} 와 관 외벽에서 주변온도까지의 토양 열저항 T_{43} 으로 구성된다. 특히, 되메움재가 있는 경우 관 외벽에서 주변온도까지의 토양 열저항 T_{43} 는 다음과 같이 계산된다.

2.1.1 토양의 열저항 T_{43}

우리나라의 경우 지중 송전 선로를 위한 경과지 확보가 어렵기 때문에 그림(2.1)과 같이 동일 구간내 지중 전력 케이블을 여러 개 부설하여 다회선으로 운전하는 경우가 많다. 이와 같은 다회선 부설은 케이블간 상호 가열 효과에 의해 케이블의 표면 온도를 상승시켜 허용전류를 감소시키는 요인으로 작용한다. 이때, 허용전류는 열적으로 가장 불안정한 케이블에 의해 결정되며 토양 열저항은 식(2.2)와 같이 계산된다.

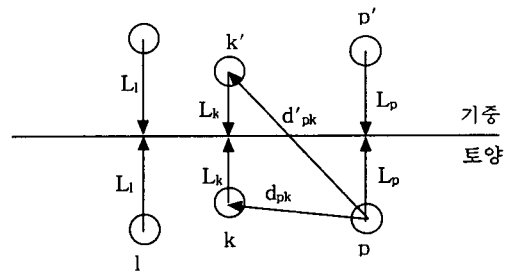
$$T_{43} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \left(\frac{d_{p1}'}{d_{p1}} \right) \cdot \left(\frac{d_{pk}'}{d_{pk}} \right) \cdot \left(\frac{d_{p2}'}{d_{p2}} \right) \right\} \quad (2.2)$$

여기서, ρ_s : 토양의 열 저항률 $[K \cdot m / W]$

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

D_e : 관의 외경 $[mm]$

여기서, 지표면과 케이블중심 축까지의 거리 L , p번째 케이블 중심에서 k번째 케이블의 영상분 중심까지의 거리 d_{kp}' 및 p번째 케이블 중심에서 k번째 케이블의 영상분 중심까지의 거리 d_{pk} 는 그림(2.1)과 같이 구해진다.



그림(2.1) 기준 관로에 대한 토양 열저항 계산

식(2.2)에 의해 계산된 케이블의 허용전류는 부설된 케이블의 중심깊이와는 관계없이 모두 같은데 이와 같이 계산된 허용전류를 평형조건 상태의 허용전류라 한다.

2.1.2 되메움재에 의한 토양 열저항 T_{43}'

윈토보다 열저항률이 더 좋은 양질의 되메움재를 판로 주변에 성토하면 식(2.2)의 토양 열저항은 식(2.3)와 같이 되메움재 효과를 나타내는 열회식 T_{43}' 을 더해야 한다.

$$T_{43}' = \frac{N}{2\pi} \{ \rho_s - \rho_c \} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (2.3)$$

여기서, N : 되메움재내의 전체 케이블의 수

ρ_s : 윈토의 열저항률

ρ_c : 판로(케이블)주변의 되메움재 열저항률

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

여기서, 되메움재의 중심 깊이 L_G 는 판로 주변을 에워싸는 되메움재의 중심 깊이를 나타낸다. 되메움재의 등가 반경 r_b 는 다음 식과 같이 구해진다.

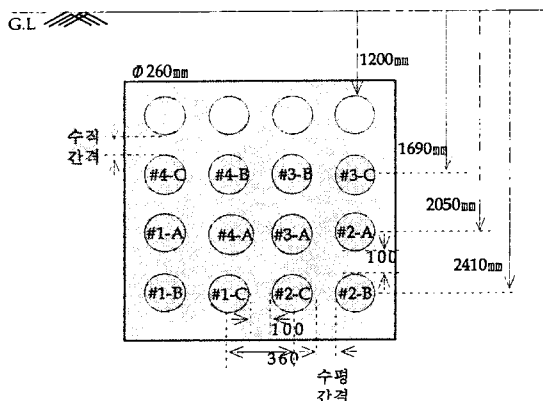
$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \quad (2.4)$$

여기서, x 는 되메움재의 단축의 길이를 말하며, y 는 되메움재의 장축의 길이를 말한다.

식(2.3)을 보면 되메움재의 효과는 윈토와 되메움재 간의 열저항률의 차, 되메움재의 중심 깊이 및 되메움재 크기 즉, 등가반경에 의존함을 알 수 있다. 본 논문에서는 위와 같은 되메움재의 열저항률과 되메움재의 크기 즉, 되메움재의 등가 반경을 결정하는 판로간격과 되메움재의 폭이 허용전류에 주는 영향을 분석하였다.

2.2 되메움재의 영향 분석

되메움재 효과를 알아보기 위하여 그림(2.2)와 같이 최하단 판로의 중심깊이가 2410mm이고, 각 판로에 154kV 2000mm XLPE 케이블이 부설되어 있고, 선로 번호 1, 2, 3, 4의 순서로 4회선이 부설된 것을 상정하였다. 이때, 허용전류의 영향을 분석하기 위하여 주변온도가 25°C, 토양 열저항률이 0.9 및 (부하)손실률을 0.8인 조건에서 계산한 <표 2.1>의 허용전류 값을 기준 값으로 사용하였다..



그림(2.2) 되메움재에 의한 판로 부설

한편, 되메움재의 열적 특성이 허용전류에 주는 영향의 정도를 분석하기 위하여 식(2.5)와 같이 정규화된

식을 사용하였는데 본 논문에서는 이것을 민감도라 정의한다.

<표 2.1> 허용전류의 기준 값

허용전류		기준 허용전류 계산조건
회선수	허용전류 (%/1회선)	1) 주변온도 : 25°C 2) 부하손실률 : 0.8
1	1584.26 (100)	3) 판로 수직 및 수평간격 : 각각 100mm 4) 토양 열저항률 : 0.9 [K·m/W] 5) 되메움재 열저항률 : 0.9 [K·m/W]
2	1349.16 (85.16)	6) 되메움재의 단축의 길이 x : 1.540mm
3	1183.10 (74.68)	7) 되메움재의 장축의 길이 y : 1.540mm
4	1063.60 (67.14)	8) 되메움재의 중심 깊이 L_G : 1.870mm 9) 되메움재의 등가 반경 r_b : 846.48mm

$$\text{민감도} = \frac{\text{기준 허용전류} - \text{비교 허용전류}}{\left| \frac{\text{기준 허용전류}}{\text{기준 파라메타} - \text{비교 파라메타}} \right|} \times 100 \quad (2.5)$$

2.2.1 되메움재의 열저항률에 대한 허용전류의 영향

그림(2.2)와 같이 부설된 판로 주변을 윈토보다 열저항률이 좋은 되메움재를 성토하였을 때 허용전류와 민감도는 <표 2.2>와 <표 2.3>과 같으며 이와 같은 영향을 그림으로 표시하면 그림(2.3)과 같다.

표에서 보는 바와 같이 윈토에 대한 되메움재의 열저항률이 개선됨에 따라 민감도는 점점 증가함을 알 수 있으며, 이와 같이 열저항률의 차가 증가함으로써 허용전류의 개선효과가 더 커짐을 알 수 있다.

<표 2.2> 토양/되메움재 열저항률의 허용전류 영향

열저항 율비	0.9/1.0 (1.11)		0.9/0.9 (1.0)		0.9/0.8 (0.89)	
	허용전류 (%/1회선)	민감도	허용전류 (%/1회선)	민감도	허용전류 (%/1회선)	민감도
회선수	1510.45	41.93	1584.26 (100)	1612.15	1612.15	-15.84
1	1269.27	53.29	1349.16 (85.16)	1372.60	1372.60	-15.64
2	1104.62	59.70	1183.10 (74.68)	1203.63	1203.63	-15.62
3	988.07	63.91	1063.60 (67.14)	1082.10	1082.10	-15.65
4						

<표 2.3> 토양/되메움재 열저항률의 허용전류 영향

열저항 율비	0.9/0.7 (0.78)		0.9/0.6 (0.67)		0.9/0.5 (0.56)	
	허용전류 (%/1회선)	민감도	허용전류 (%/1회선)	민감도	허용전류 (%/1회선)	민감도
회선수	1641.46	-16.25	1672.29	-16.67	1704.79	-17.12
1	1397.23	-16.03	1423.16	-16.45	1450.51	-16.90
2	1225.20	-16.01	1247.90	-16.43	1271.84	-16.88
3	1101.59	-16.07	1122.06	-16.49	1143.65	-16.93
4						

2.2.2 판로 간격에 대한 허용전류의 영향

판로간 표준 간격은 수직 및 수평 모두 100mm이다. 이때 판로간 간격을 변화시켰을 때 허용전류에 주는

영향을 분석하기 위하여 수직 간격과 수평 간격을 변화시켜가면서 허용전류를 각각 계산하였다.

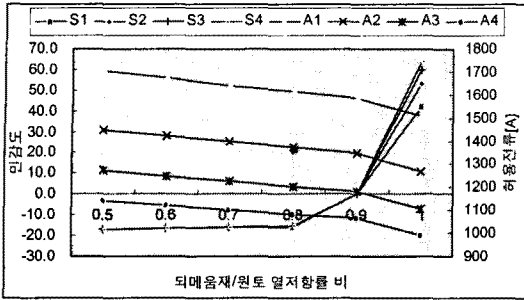


그림 (2.3) 되메움재 열저항률에 대한 민감도 분석

2.2.2.1 수평 간격에 대한 허용전류의 영향

수평간격을 100mm에서 150mm와 200mm로 변경하였을 때의 허용전류와 민감도는 <표 2.4>와 같다. 표에서 보는 바와 같이 수평간격을 크게 하면 할수록 허용전류는 증가하며, 특히 2회선 부설과 4회선 부설일 때 더 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

<표 2.4> 관로간 수평 간격에 대한 허용전류의 영향

수평 간격	100mm	150mm	200mm		
공통	단축의 길이 x=1540mm, 중심길이 Lg=2640mm				
y	1540mm	1640mm	1740mm		
r _s	846.48mm	867.26mm	886.88mm		
회선 수	허용전류 (%/1회선)	허용전류 (%/1회선)	민감도	허용전류 (%/1회선)	민감도
1	1584.26 (100)	1598.67 (100)	-1.82	1610.82 (100)	2.28
2	1349.16 (85.16)	1375.37 (86.03)	-3.89	1398.82 (86.84)	-3.68
3	1183.10 (74.68)	1199.02 (75.00)	-2.69	1214.08 (75.37)	-2.62
4	1063.60 (67.14)	1081.14 (67.63)	-3.30	1097.84 (68.15)	-3.22

2.2.2.2 수직 간격에 대한 허용전류의 영향

수직 간격을 100mm에서 150mm와 200mm로 각각 변경하였을 때 허용전류는 <표 2.5>와 같다. 표에서 보는 바와 같이 수직 간격을 크게 하면 할수록 허용전류는 증가하나 증가폭은 그리 크지 않음을 알 수 있다.

<표 2.5> 관로간 수직 간격에 대한 허용전류의 영향

수직 간격	100mm	150mm	200mm		
공통	단축의 길이 x=1540mm, 중심길이 Lg=2640mm				
y	1540mm	1640mm	1740mm		
r _s	846.48mm	867.26mm	886.88mm		
회선 수	허용전류 (%/1회선)	허용전류 (%/1회선)	민감도	허용전류 (%/1회선)	민감도
1	1584.26 (100)	1589.16 (100)	-0.62	1592.23 (100)	-0.50
2	1349.16 (85.16)	1343.69 (84.55)	0.81	1383.72 (84.08)	0.77
3	1183.10 (74.68)	1186.45 (74.66)	-0.57	1187.81 (74.60)	-0.40
4	1063.60 (67.14)	1070.04 (67.33)	-1.21	1075.05 (67.52)	-1.08

<표 2.4>와 <표 2.5>에서 보는 바와 같이 관로 간격중

수직 간격보다 수평 간격을 증가시킬 때 민감도가 더 크게 증가함을 알 수 있다. 그러나, 관로 간격을 더 크게 하여도 민감도는 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다.

2.2.3 되메움재 크기에 대한 허용전류의 영향

2.2.2절에서 알 수 있는 바와 같이 관로간의 간격중 수평간격을 크게 하는 것이 수직간격을 크게 하는 것 보다 허용전류의 증가가 더 큼을 알 수 있다. 그래서, 되메움재의 크기를 수평방향으로 크게 하면우 허용전류의 증가가 예상되기 때문에 원토와 되메움재간의 수평 표준 간격(100mm)에 대하여 수평 간격을 크게 하였을 때 허용전류와 민감도는 <표 2.6>과 같다.

표에서 보는 바와 같이 원토와 되메움재의 간격이 150mm이상일 때 민감도는 감소하고 있지만 허용전류의 증가는 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 되메움재의 크기만 증가될 뿐 전력케이블의 위치에는 아무런 영향을 주고 있지 않기 때문이다. 따라서, 원토와 되메움재간의 간격은 150mm이하가 적합할 것으로 예상된다.

<표 2.6> 되메움재 크기에 대한 허용전류의 영향

공통	50mm (0.9/0.8)		100mm (0.9/0.9)		150mm (0.9/0.8)		200mm (0.9/0.8)	
	단축의 길이 x=1540mm, 중심길이 Lg=2640mm							
y	1440mm		1540mm		1640mm		1740mm	
r _s	812.26mm		846.48mm		867.26mm		886.88mm	
회선 수	허용전류 (%/1회선)	민감도	허용전류 (%/1회선)	허용전류 (%/1회선)	민감도	허용전류 (%/1회선)	민감도	
1	1610.83	-3.35	1584.26 (100)	1612.15	-3.52	1612.15	-1.72	
2	1584.26 (85.11)	-3.23	1349.16 (85.16)	1372.60 (85.14)	-3.47	1372.60 (85.14)	-1.74	
3	1201.94 (74.62)	-3.18	1183.10 (74.68)	1203.63 (74.66)	-3.47	1203.63 (74.66)	-1.74	
4	1080.45 (67.07)	-3.17	1063.60 (67.14)	1082.12 (67.12)	-3.48	1082.12 (67.12)	-1.74	

3. 결론

되메움재에 대한 허용전류의 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 다회선으로 부설된 경우 1회선씩 회선수가 증가할수록 열적 파라메타와는 무관하게 1회선 허용전류에 대하여 대략 85%, 75% 및 67%씩 감소함을 알 수 있다.

(2) 회선수가 증가할수록 민감도는 증가하는데 이것은 회선수가 증가할수록 허용전류에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

(3) 관로간 간격은 수평 관로에 의한 영향보다 수직 관로에 의한 영향이 더 큼을 알 수 있다.

(4) 원토와 되메움재간의 간격은 150mm이하가 적합할 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정성환 외, "지중전력케이블의 허용전류 산정 규격의 최근 동향", 1999년도 추계학술대회, 328-330, 1999
- [2] 정성환 외, "관로부설 지중 전력 케이블의 도체 온도 해석에 관한 연구", 2001년 춘계학술대회, 2001
- [3] 정성환 외, "관로 부설 송전 케이블의 허용전류 계산 프로그램 개발", 2001년 하계학술대회, 2001
- [4] 정성환 외, "지중 전력케이블의 민감도 분석", 2002년 송배전설비연구회, 춘계학술대회, 2002