

개선된 지중전력케이블의 허용전류 계산에 관한 연구

정성환, 최상봉, 남기영, 류희석, 이재덕  
한국전기연구원

An Examination to Improve the Permissible Current-Carrying Capability of Underground Power Cables

S.H. Jeong, S.B. Choi, K.Y. Nam, H.S. Ryoo, J.D. Lee  
Kore Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper proposes a method of increasing the permissible current carrying capability of underground power cables. A clue of this method is driven from the temperature distribution analysis processes according to the currents calculated from unequally mode algorithm in ampacity program.

산알고리즘을 개선하기 위한 알고리즘 개발의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 불평형 모드의 허용전류 계산식

불평형 모드의 허용전류는 식(1)과 같이 계산된다.

$$I_p = \sqrt{\frac{\theta_{c,p} - \Delta\theta_d - \Delta\theta_p - \theta_s}{R_{c,p}[T_1 + (1 + \lambda_{1,p})T_2 + (1 + \lambda_{1,p} + \lambda_{2,p})(T_3 + T_4)]}} \quad (1)$$

여기서,  $R_{c,p}$  : 최고허용온도에서의 교류도체저항

$\Delta\theta_d$  : 유전체손실에 의한 온도상승분

$\Delta\theta_p$  : 도체손실에 의한 온도 상승분

$T_1$  : 절연체의 열저항

$T_2$  : 시스와 외장사이의 열저항

$T_3$  : 외장의 열저항

$T_4$  : 케이블 밖의 열저항

$\lambda_{1,p}$  : p번째 케이블의 시스 손실률

$\lambda_{2,p}$  : p번째 케이블의 아모아 손실률

여기서, p번째 케이블과 타 케이블의 유전체에 의한 온도상승분  $\Delta\theta_d$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\theta_d = W_{d,p}(0.5T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + \frac{\rho_s}{2\pi} \sum_{k=1}^n \left( W_{d,k} \cdot \ln \left( \frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \right) \quad (2)$$

여기서,  $W_{d,p}$  : p번째 케이블의 유전체 손실

$W_{d,k}$  : k번째 케이블의 유전체 손실

$d_{pk}$  : p번째 케이블과 k번째 케이블간의 거리

$d'_{pk}$  : p번째 케이블과 k번째의 영상분 케이블간의 거리

$\rho_s$  : 토양의 열저항률

한편, 타 케이블의 도체 손실에 의한 온도 상승분  $\Delta\theta_p$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\theta_p = \frac{\rho_s}{2\pi} \sum_{k=1}^n W_{c,k} (1 + \lambda_{1,k} + \lambda_{2,k}) \ln \left( \frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \quad (3)$$

여기서,  $\lambda_{1,k}$  : k번째 케이블의 시스 손실률

$\lambda_{2,k}$  : k번째 케이블의 아모아 손실률

2.2 불평형 모드의 온도분포 해석 계산식

불평형 모드의 허용전류를 계산하는 식(1)으로부터 온도분포를 계산하는 식을 유도하면 식(4)와 같이 된다.

1. 서 론

한국전력공사는 IEC 287 규격을 기반으로 하여 JCS 168E 규격의 일부를 채용한 지중송전케이블의 허용전류 계산하는 기준을 정립하고, 지중 송전 선로의 건설과 선로 운영을 위하여 GUI기법을 적용한 지중 송전케이블의 허용전류를 계산하는 프로그램을 개발한 바 있다.

IEC 287규격과 개발된 프로그램에서는 지중 전력케이블의 정상상태 허용전류를 평형 모드와 불평형 모드로 각각 계산하고 있다. 평형 모드로 계산된 허용전류는 지중에 매설된 케이블의 깊이와는 상관없이 열적으로 가장 위험한 위치에 있는 케이블의 도체 온도가 최고허용온도(XLPE : 90°C, OF : 85°C)에 도달할 때까지의 전류로 하고 있다. 그 결과 허용전류는 포설된 전력케이블의 위치와 상관없이 모두 동일한 값이 되며, 도체 온도는 열적으로 가장 위험한 케이블의 도체온도만 최고허용온도가 되고 나머지 케이블의 도체온도는 위치에 따라 다르며 모두 최고허용온도 이하가 된다. 반면, 불평형 모드로 계산된 허용전류는 매설된 각 케이블의 도체온도가 최고허용온도에 도달할 때까지의 전류로 하고 있다. 이 경우 허용전류는 포설된 케이블의 위치에 따라 모두 다르며 열적으로 가장 위험한 케이블의 허용전류가 최저가 된다. 또, 도체온도는 모두 최고허용온도가 된다.

한편, 지중송전계통을 운영하고 있는 입장에서 동일 구간에 포설된 지중전력케이블의 경우 개별 선로별 송전 용량보다 전체적으로 관리하는 것이 편리하기 때문에 평형 모드의 허용전류를 선호하고 있는 입장이다.

그러나, 동일 포설 구간에서 동종케이블이 아닌 이종케이블이 포설되거나 도체크기와 도체 최고허용온도가 서로 다른 케이블이 포설될 경우 예를 들면, 송전케이블과 배전케이블이 동일 장소에 포설될 경우, 송전케이블이라 하더라도 OF케이블과 XLPE케이블이 포설될 경우 또는 XLPE케이블이라도 도체 크기가 다른 경우 송전용량이 서로 다르기 때문에 허용전류는 각각의 케이블에 대하여 계산되어야 하며 이 경우 불평형 모드로 계산하여야 한다. 그런데 불평형 모드로 허용전류를 계산하면 1개 회선의 상별 허용전류가 서로 다르기 때문에 그 회선의 허용전류는 각 상중 가장 작은 값을 제시하고 있다. 이렇게 되면 실제 허용전류는 너무 많이 떨어지게 된다.

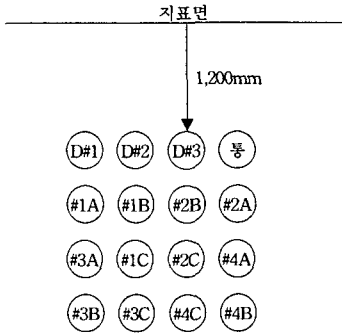
본 논문에서는 이종케이블이 포설될 경우 불평형 모드로 계산된 허용전류에 대하여 온도분포해석을 하여 허용전류를 더 많이 흘릴 수 있음을 보여준다. 이와 같은 온도분포해석 결과는 불평형 모드로 계산되는 허용전류 계

$$\theta_{c,p} = [T_1 + (1 + \lambda_{1,p})T_2 + (1 + \lambda_{1,p} + \lambda_{2,p})(T_3 + T_4)] + \Delta\theta_a + \Delta\theta_p + \theta_a \quad (4)$$

### 2.3 해석모델 및 온도분포해석

(그림 1)과 같은 해석 모델을 가정하며 해석조건은 아래와 같다.

- 토양열저항률 : 0.9 °C·m/W
- 배전케이블 : 325mm<sup>2</sup> CNCV 케이블 3회선
- 송전케이블 : 2000 mm<sup>2</sup> XLPE PE케이블 4회선
- 부하손실률 : 1.0



(그림 1) 송배전선로의 포설조건

위의 해석조건과 (그림 1)과 같은 포설조건에 대하여 배전케이블 또는 송전케이블이 각각 단독으로 포설된다고 가정하여 평형 모드로 계산한 허용전류는 <표 1>과 같다. 표에서 보는 바와 같이 배전케이블만 포설되었을 때 허용전류는 397.62[A]이고 송전케이블만 포설되어 있을 때 허용전류는 963.41[A]이다.

그런데 지금까지 송배전케이블이 동일구간에 같이 포설될 때 편의상 배전케이블의 허용전류는 무시하고 송전케이블에 대해서만 허용전류를 계산해 왔는데, 만일 배전케이블의 허용전류를 함께 고려하면 <표 1>에서 보는 바와 같이 배전케이블 및 송전케이블의 도체온도는 모두 최고허용온도(90[°C])를 초과할 수 있다.

한편 송배전 케이블이 혼합되어 있는 (그림 1)과 같은 포설조건에 대하여 불평형 모드로 허용전류를 계산해 보면 <표 2>와 같다. 표에서 보는 바와 같이 배전케이블의 허용전류는 281.75[A]에서 328.86[A]로, 송전케이블의 허용전류는 매설깊이에 따라 최저 635.13[A]에서 최대 1062.64[A]까지 다양하게 계산되고 있다.

그런데 송전케이블의 경우 부하 불평형률이 거의 없기 때문에 매설되는 깊이에 따라 서로 다르게 계산되는 허용전류는 같은 선로에 대해서는 허용전류가 같아야 함으로 허용전류 계산 프로그램에서는 <표 3>과 같이 제시되고 있다. 표에서 보는 바와 같이 제시된 허용전류에 대하여 온도분포 해석을 해 보면 도체온도는 대부분 최고 허용온도 이하가 됨을 알 수 있으며, 따라서 제시된 허용전류보다 더 많은 전류를 흘릴 수 있음을 알 수 있다.

#### 2.3.1 계산된 허용전류의 평균을 적용할 경우

<표 2>와 같이 불평형 모드로 계산된 허용전류의 평균 값 즉, 852.81[A]를 적용하여 각 관로별 온도분포 해석 결과는 <표 4>와 같다. 이때, 배전케이블의 허용전류는 불평형 모드의 허용전류로 한다.

표에서 보는 바와 같이 송전 #1 T/L의 #1B 및 #1C의 도체온도는 각각 94.09 [°C] 및 94.04[°C]이고, 송전 #2 T/L의 #2A의 도체온도가 92.34[°C]로서 모두 도체 최고허용온도를 초과하고 있음을 알 수 있다.

#### 2.3.2 제시된 허용전류의 평균을 적용할 경우

<표 3>과 같이 불평형 모드로 제시된 허용전류의 평균

값 즉, 746.62[A]를 적용할 경우 각 관로별 온도분포는 <표 5>와 같다.

<표 1> 송전 및 배전케이블의

관로 번호	케이블 수	허용전류 및 도체온도			
		평형 모드		온도해석	
		배전 [A]	송전 [A]	허용전류 [A]	온도 [°C]
D#1	3	397.62	-	397.62	123.17
D#2	3	397.62	-	397.62	130.99
D#3	3	397.62	-	397.62	126.41
#1A	1	-	963.41	963.41	118.49
#1B	1	-	963.41	963.41	126.88
#2B	1	-	963.41	963.41	123.80
#2A	1	-	963.41	963.41	110.84
#3A	1	-	963.41	963.41	116.95
#1C	1	-	963.41	963.41	124.39
#2C	1	-	963.41	963.41	122.83
#4A	1	-	963.41	963.41	113.12
#3B	1	-	963.41	963.41	111.06
#3C	1	-	963.41	963.41	116.87
#4C	1	-	963.41	963.41	116.04
#4C	1	-	963.41	963.41	108.88

<표 2> 불평형 모드로 계산된 허용전류

관로 번호	케이블 수	허용전류 및 도체온도			
		평형 모드		불평형 모드	
		허용전류 [A]	온도 [°C]	허용전류 [A]	온도 [°C]
D#1	3	397.62	123.17	328.86	
D#2	3	397.62	130.99	281.75	
D#3	3	397.62	126.41	308.15	
#1A	1	963.41	118.49	917.95	
#1B	1	963.41	126.88	658.77	
#2B	1	963.41	123.80	635.13	
#2A	1	963.41	110.84	728.85	
#3A	1	963.41	116.95	1062.64	90
#1C	1	963.41	124.39	659.31	
#2C	1	963.41	122.83	888.11	
#4A	1	963.41	113.12	1015.69	
#3B	1	963.41	111.06	842.17	
#3C	1	963.41	116.87	938.75	
#4C	1	963.41	116.04	849.88	
#4C	1	963.41	108.88	1036.50	

<표 3> 불평형 모드로 제시된 허용전류

선로명	관로 번호	허용전류 및 도체온도			
		계산 허용전류		제시 허용전류	
		온도 [°C]	허용전류 [A]	허용전류 [A]	온도 [°C]
배전 #1 D/L	D#1		328.86	328.86	83.25
배전 #2 D/L	D#2		281.75	281.75	82.76
배전 #3 D/L	D#3		308.15	308.15	82.48
송전 #1 T/L	#1A		917.95		76.58
	#1B		658.77	635.13	80.54
	#1C		635.13		80.40
송전 #2 T/L	#2A		728.85		79.29
	#2B	90°C	1062.64	659.31	72.61
	#2C		659.31		79.96
송전 #3 T/L	#3A		888.11		79.93
	#3B		1015.69	842.17	77.46
	#3C		842.17		80.71
송전 #4 T/L	#4A		938.75		78.04
	#4B		849.88	849.88	80.45
	#4C		1036.50		76.49

이때, 배전케이블의 허용전류는 불평형 모드의 허용전류로 한다. 표에서 보는 바와 같이 송배전 케이블 모두 도체온도는 최고허용온도이하임을 알 수 있다.

<표 4> 계산된 허용전류의 평균을 적용한 도체온도

선로명	관로 번호	허용전류 및 도체온도			
		계산된 허용전류		제시된 허용전류	
		온도 [°C]	허용전류 [A]	허용전류 [A]	온도 [°C]
배전 #1 D/L	D#1	90°C	328.86	328.86	90.04
배전 #2 D/L	D#2		281.75	281.75	90.34
배전 #3 D/L	D#3		308.15	308.15	89.93
송전 #1 T/L	#1A		917.95	852.81	88.79
	#1B		658.77		94.09
	#1C		635.13		94.04
송전 #2 T/L	#2A		728.85	852.81	92.34
	#2B		1062.64		84.17
	#2C		659.31		93.13
송전 #3 T/L	#3A		888.11	852.81	88.91
	#3B		1015.69		85.42
	#3C		842.17		89.55
송전 #4 T/L	#4A	938.75	852.81	86.60	
	#4B	849.88		89.04	
	#4C	1036.50		84.11	

<표 6> 최적 허용전류에 대한 온도해석

선로명	관로 번호	허용전류 및 도체온도			
		계산된 허용전류		제시된 허용전류	
		온도 [°C]	허용전류 [A]	허용전류 [A]	온도 [°C]
배전 #1 D/L	D#1	90°C	328.86	328.86	87.71
배전 #2 D/L	D#2		281.75	281.75	87.78
배전 #3 D/L	D#3		308.15	308.15	87.39
송전 #1 T/L	#1A		917.95	816.60	85.06
	#1B		658.77		90.02
	#1C		635.13		89.60
송전 #2 T/L	#2A		728.85	816.60	88.27
	#2B		1062.64		80.46
	#2C		659.31		88.68
송전 #3 T/L	#3A		888.11	816.60	84.83
	#3B		1015.69		81.42
	#3C		842.17		85.23
송전 #4 T/L	#4A	938.75	816.60	82.54	
	#4B	849.88		84.73	
	#4C	1036.50		80.11	

2.3.2 제시된 허용전류의 평균을 적용할 경우

<표 3>과 같이 불평형 모드로 제시된 허용전류의 평균 값 즉, 746.62[A]를 적용할 경우 각 관로별 온도분포는 <표 5>와 같다. 이때, 배전케이블의 허용전류는 불평형 모드의 허용전류로 한다. 표에서 보는 바와 같이 송배전 케이블 모두 도체온도는 최고허용온도이하임을 알 수 있다.

<표 5> 제시된 허용전류의 평균을 적용한 도체온도

선로명	관로 번호	허용전류 및 도체온도			
		계산된 허용전류		제시된 허용전류	
		온도 [°C]	허용전류 [A]	허용전류 [A]	온도 [°C]
배전 #1 D/L	D#1	90°C	328.86	328.86	83.60
배전 #2 D/L	D#2		281.75	281.75	83.27
배전 #3 D/L	D#3		308.15	308.15	82.91
송전 #1 T/L	#1A		917.95	746.62	78.46
	#1B		658.77		82.80
	#1C		635.13		81.70
송전 #2 T/L	#2A		728.85	746.62	81.08
	#2B		1062.64		73.91
	#2C		659.31		80.79
송전 #3 T/L	#3A		888.11	746.62	77.61
	#3B		1015.69		74.34
	#3C		842.17		77.58
송전 #4 T/L	#4A	938.75	746.62	75.34	
	#4B	849.88		77.08	
	#4C	1036.50		73.05	

2.3.4 최적 허용전류에 대한 온도해석

<표 4>와 <표 5>의 값을 참고하여 허용전류를 변화시켜 가며 반복적으로 온도분포를 해석하여 최적 허용전류를 계산해 보면 <표 6>과 같다.

2.3.5 배전 용량을 기준으로 한 최적 허용전류

역률 0.9에 대한 배전 케이블의 상시 운전용량을 배전케이블의 허용전류로 설정하고 송전케이블에 대한 허용전류를 온도분포해석을 통하여 구해 보면 <표 7>과 같다.

3. 결 론

불평형 모드로 제시된 허용전류에 대하여 그 값을 증대시켜가며 온도분포해석을 한 결과 <표 8>과 같이 허용전류를 증대시킬 수 있음을 알았다. 따라서, 이종케이블에 대한 허용전류 계산에서 불평형모드로 계산된 허용전류를 다시 한번 더 평형모드로 계산하는 과정을 거치면 허용전류를 증대시킬 수 있음을 알 수 있다.

<표 7> 배전용량을 고려한 최적 허용전류

선로명	관로 번호	허용전류 및 도체온도			
		계산된 허용전류		제시된 허용전류	
		온도 [°C]	허용전류 [A]	허용전류 [A]	온도 [°C]
배전 #1 D/L	D#1	90°C	328.86	280.0	81.45
배전 #2 D/L	D#2		281.75	280.0	85.96
배전 #3 D/L	D#3		308.15	280.0	83.85
송전 #1 T/L	#1A		917.95	852.81	84.81
	#1B		658.77		90.19
	#1C		635.13		90.85
송전 #2 T/L	#2A		728.85	852.81	88.77
	#2B		1062.64		81.30
	#2C		659.31		90.14
송전 #3 T/L	#3A		888.11	852.81	85.76
	#3B		1015.69		82.79
	#3C		842.17		86.87
송전 #4 T/L	#4A	938.75	852.81	84.00	
	#4B	849.88		86.48	
	#4C	1036.50		81.78	

<표 8> 허용전류 증대 효과

선로명	제시된 허용전류 [A]	최적허용전류 [A]	
		제시된 배전	배전용량 기준 (10,000kVA)
배전	328.86	328.86	280.0
	281.75	281.75	
	308.15	308.15	
송전	635.13	816.60	852.81
	659.31		
	842.17		
	849.88		

[참 고 문 헌]

- 1) 정성환 외, "지중전력케이블의 허용전류 산정 규격의 최근 동향", 1999년도 추계학술대회, 328-330, 1999
- 2) 정성환 외, "온도의존성 항목을 고려한 지중배전케이블의 허용전류 계산에 관한 연구", 1999년도 추계학술대회, 141-143, 1999
- 3) 정성환, 김대경, 최상봉, 이동일, 강지원, 박방명, 탁의균, 윤형희 외, "관로 부설 송전 케이블의 허용전류 계산 프로그램 개발", 대한전기학회 2001년도 하계학술대회, 2001