

허용전류 관점에서의 전력케이블 최적 도체 크기 선정에 관한 연구

정성환 최상봉 남기영 류희석 이재덕  
한국전기연구원

A Study on the optimal conductor size selection of power cables considering the ampacity (I)

S. H. Jeong S. B. Choi K. Y. Nam H. S. Ryoo J. D. Lee  
K.E.R.I.

**Abstract** - IEC 60287-3-2 standards suggests the selection method of economic conductor size for power cables. This method deals solely with the economic choice of conductor size based on joule losses. This paper introduces the method and example study which is proposed by IEC standards.

1. 서 론

지금까지 케이블의 도체 크기는 케이블의 예상 수명동안 발생하는 손실로서 지불하는 비용을 고려하지 않은 채 단순히 케이블의 초기 투자비가 최소화되는 최소 단면적으로 선택하거나 경제적 관점과는 무관하게 예상되는 부하량에 대한 열적 용량의 관점에서 전력회사의 내부규정으로 제시된 케이블의 도체 크기로 하고 있다. 부하의 증가는 전력케이블의 운전온도를 높이고 이로 인한 도체 손실의 증가와 에너지 원가의 상승은 단순히 케이블과 포설 비용인 초기 투자비를 최소화하는 것에서 케이블을 경제적 수명동안 운용할 때 발생하는 손실을 고려한 도체 크기를 경제적으로 선정할 것을 요구하고 있다.

본 논문은 종전에 IEC 1059에 규정되어졌다가 1995년 이후로 IEC 60287-3-2 규격으로 통합된 전력케이블의 경제적 도체크기 선정 방법에 대하여 살펴보고 이 규격에서 제시한 전력케이블의 도체 크기를 경제적으로 선정하는 예제를 풀어 봄으로서 전력케이블의 도체 크기를 경제적으로 선정하는 기법을 정립하고자 한 것이다.

2. 본 론

2.1 IEC 60287-3-2 규격의 적용범위

IEC 60287-3-2 규격은 <표 2.1>과 같은 전압이하에서 도체손실을 기초로 하여 전력케이블의 경제적 도체 크기를 선정하는 방법을 제시하고 있다. 절연체 손실에 대해서는 후후 규격에 보완할 예정이다.

<표 2.1> IEC 60287-3-2 규격의 적용 전압

케이블 형태	계통전압 U <sub>0</sub> [kV]
함침 절연지(impregnated paper)	
단심형	38
절연유 및 가스 압	63.5
다른 절연체	
Butyl rubber	18
EPR	63.5
PVC	6
PE(HD와 LD)	127
XLPE(unfilled)	127
XLPE(filled)	63.5

2.2 총 원가의 계산

케이블을 설치하고 경제적 케이블 수명동안 운전하는 비용을 현재적 가치로 나타내는 총 원가는 식 (1)과 같이 계산된다. 이 때의 화폐단위는 임의 화폐단위인 CU로 한다.

$$CT = CI + CJ \quad (\text{cu}) \quad (1)$$

여기서, CI는 전력 케이블을 구매하고 포설하는 경비로서 초기 투자비를 말하며, CJ는 경제적 수명기간인 N년 동안 도체 손실로 인해 지불해야 하는 모든 비용을 전력 케이블을 운전하기 시작한 날을 기준으로 환산된 비용을 말한다.

도체 손실에 의한 비용 CJ는 도체 손실에 의한 비용과 도체 손실에 의한 전력손실을 보존하기 위하여 추가적인 공급 용량(capacity)을 늘리는 비용으로 구성된다.

2.2.1 도체 손실에 의한 비용

도체 손실에 의한 당해연도의 에너지 손실은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{당해년도 에너지 손실} = \left( I_{\max}^2 R l N_p N_c \right) T \quad (\text{Wh}) \quad (2)$$

여기서, I<sub>max</sub>는 당해연도의 케이블에 흐르는 최대전류(A)를 말하며, l은 케이블의 길이(m), R은 표피효과, 근접효과 및 금속차폐층과 아모아에서 발생하는 손실률인 λ<sub>1</sub>과 λ<sub>2</sub>의 각 영향이 포함된 단위 길이당 도체 교류저항(Ω/m)을 말한다.

이 때 경제적 도체 크기는 대개 열적인 조건으로 계산된 도체 크기보다 더 크기기 때문에 도체 온도는 최고 도체 허용온도보다 낮게 될 것이다. 그래서 R을 결정하는 도체온도는  $\frac{\theta - \theta_a}{3} + \theta_a$ 으로 가정한다. 여기서 θ는 케이블의 정상상태 허용전류를 계산할 때 적용하는 도체 최고허용온도이고 θ<sub>a</sub>는 주변(평균)온도이다. 인자 3은 경험치에 의해 결정되는 값이다(IEC 60287-3-2의 부록 B참고). 또 N<sub>p</sub>와 N<sub>c</sub>는 각각 회선당 상 도체의 수 및 부하 형태가 같은 회선 수를 말하며, T는 최대 도체전류로 운전되는 시간(h/year)이다. 최대 전류 I<sub>max</sub>는 실제적으로 변동하는 부하전류로서 아래와 같이 계산된다.

$$T = \int_0^{8760} \frac{I(t)^2}{I_{\max}^2} dt = \mu \cdot 8760 \quad (3)$$

여기서, μ는 IEC 60853 규격으로부터 계산되는 부하손실률로서 경제적 수명동안 일정한 값으로 가정한다. 따라서 당해연도의 손실 원가는 다음과 같다.

$$\text{당해년도의 손실 원가} = \left( I_{\max}^2 R I N_p N_c \right) TP \text{ (cu)} \quad (4)$$

여기서,  $P$ 는 전압별 에너지의 1 watt-hour당 도체 손실의 단가(cu/W·h)이다.

### 2.2.2 추가적인 공급 용량에 대한 비용

도체 손실에 의한 에너지 손실을 공제하기 위하여 추가적인 공급 용량에 대한 비용은 다음과 같이 계산된다.

$$\left( I_{\max}^2 R I N_p N_c \right) D \text{ (cu/year)} \quad (5)$$

여기서,  $D$ 는 연간 손실공급 비용 (cu/W·year)

그러므로 당해년도 손실에 대한 총 원가는 다음과 같다.

$$\left( I_{\max}^2 R I N_p N_c \right) (TP + D) \text{ (cu)} \quad (6)$$

만일 당해 년도 말에 비용이 지불된다면 구매한 날을 기준으로 현재적 가치로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\left( I_{\max}^2 R I N_p N_c \right) (TP + D)}{1 + \frac{i}{100}} \text{ (cu)} \quad (7)$$

여기서,  $i$ 는 인플레이션 효과가 포함되지 않은 감가상각비율(%)이다.

마찬가지로 구매 날을 기준으로 운전하는  $N$ 년 동안 감가상각을 고려한 에너지 비용의 현재적 가치는 다음과 같다.

$$CJ = \left( I_{\max}^2 R I N_p N_c \right) (TP + D) \frac{Q}{1 + \frac{i}{100}} \text{ (cu)} \quad (8)$$

여기서,  $Q$ 는 아래와 같이 부하에서의 변동,  $N$ 년도에 걸친 에너지 원가의 증분과 감가상각 비율을 고려한 계수로서 다음과 같이 계산된다.

$$Q = \sum_{n=1}^N (r^{n-1}) = \frac{1-r^N}{1-r} \quad (9)$$

여기서,  $r$ 은 다음과 같다.

$$r = \frac{\left( 1 + \frac{a}{100} \right)^2 \left( 1 + \frac{b}{100} \right)}{\left( 1 + \frac{i}{100} \right)} \quad (10)$$

여기서,  $a$ 는 매년 증가하는 부하의 증분(%)이고  $b$ 는 인플레이션 효과를 포함하지 않은 매년 에너지 단가의 증분(%)이다.

만일, 케이블 경과지 전체에서 도체 크기가 서로 다른 케이블을 포설할 경우 각 도체의 전류와 저항을 제외한 모든 변수를 식 (11)과 같이 계수  $F$ 로 표현함으로써 계산을 간략화하는 장점이 있다.

$$F = N_p N_c (TP + D) \frac{Q}{\left( 1 + \frac{i}{100} \right)} \text{ (cu/W)} \quad (11)$$

따라서 전체 총원가는 다음과 같이 계산된다.

$$CT = CI + I_{\max}^2 R I F \text{ (cu)} \quad (12)$$

### 2.3 경제적 도체 크기의 선정 방법

도체 크기는 열용량을 바탕으로 한 허용전류를 계산 방법과 다음에 제시되는 방법에 의해 결정할 수 있다.

#### 2.3.1 연속적인 도체 크기에서 각 도체에 대한 경제적 전류 범위

모든 도체는 주어진 설치 조건에 대하여 흘릴 수 있는 경제적 전류 범위를 갖고 있다. 주어진 도체 크기에 대한 경제적 전류 범위의 상한치와 하한치는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{lower limit of } I_{\max} = \sqrt{\frac{CI - CI_1}{FI (R_1 - R)}} \quad (A) \quad (13)$$

$$\text{lower limit of } I_{\max} = \sqrt{\frac{CI_2 - CI}{FI (R - R_2)}} \quad (A) \quad (14)$$

여기서,  $CI$ 는 현재 고려중인 도체 크기에 대한 케이블의 초기 투자비(cu),  $R$ 은 고려되고 있는 도체 크기의 단위 길이당 교류도체저항( $\Omega/m$ ),  $CI_1$ 은 현재 고려되고 있는 도체 크기보다 그 다음 단계로 작은 도체의 케이블 초기 투자비(cu),  $R_1$ 은 고려되고 있는 도체 크기보다 작은 도체의 단위 길이당 교류도체저항 ( $\Omega/m$ ),  $CI_2$ 는 현재 도체 크기보다 그 다음 단계로 큰 도체의 케이블 초기 투자비(cu),  $R_2$ 는 현재 도체 크기보다 큰 도체의 단위 길이당 교류도체저항( $\Omega/m$ )을 말한다.

#### 2.3.2 주어진 부하에 대한 경제적 도체 크기

일반적으로 경제적 도체 크기  $S_c$ 는 전체 총 원가 함수를 최소화하는 단면적이 될 것이다.

$$CT(S) = CI(S) + I_{\max}^2 R(S) I F \text{ (cu)} \quad (15)$$

여기서,  $CI(S)$ 와  $R(S)$ 는 도체 단면적  $S$ 의 함수로 표현된다.  $CI(S)$ 와 도체 크기와의 관계를 나타내는 방정식은 케이블 크기별로 알려진 원가로부터 유도된다. 일반적으로 거의 선형적인 관계가 원가에 적용될 수 있다면 그것이 사용되어야 한다. 이것은 결과에 있어서 경제적 수명 기간 동안 가정된 재정적 변수 값에 대한 불확실성으로 인한 오차를 적게 할 것이다.

IEC 287-1-1에 따르면 적절한 도체 저항은 단면적의 함수로 아래와 같이 표현된다.

$$R(S) = \frac{\rho_{20} B [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{S} \times 10^6 \text{ (}\Omega/m\text{)} \quad (16)$$

$$\text{여기서, } B = (1 + y_p + y_s)(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (17)$$

한편, 케이블 투자비에 대한 선형원가 함수가 고려되고 있는 케이블의 형태와 설치에 대한 초기 투자비에 적용될 수 있다면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$CI(S) = l (AS + C) \text{ (cu)} \quad (18)$$

여기서,  $A$ 는 도체크기와 관련된 투자비의 변수 항목 (cu/mm),  $C$ 는 케이블 크기에 의해 영향을 받지 않는 투자비의 상수 항목(cu/m) 및  $l$ 는 케이블의 길이(m)를 나타낸다.

따라서 최적 크기  $S_c$ (mm)는 식 (15)를  $S$ 에 대하여 미분하

여 그 도함수를 영을 함으로서 얻을 수 있다.

$$S_{cc} = 1000 \left[ \frac{I_{\max}^2 F \rho_{20} B [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0.5} \quad (\text{■}) \quad (19)$$

$S_{cc}$ 는 표준 크기(IEC 228)와는 정확하게 일치하지 않을 수 있으며 이웃하는 케이블의 크기가 더 크거나 더 작은 표준 크기에 대한 원가는 계산되어야 하고 가장 경제적인 것으로 선택되어야 한다.

### 2.4 경제적 도체 크기 계산의 예

경제적으로 도체크기를 계산하는 예제는 경과지를 따라 등간격(500m)으로 설치된 10개의 구간에 대하여 부하를 공급하는 케이블 시스템으로 한다. 이와 같은 경과지에 대하여 아래와 같은 방법으로 구한 경제적 도체 크기에 대하여 서로 비교할 것이다.

- a) 각 표준도체 크기에 대한 전류범위를 계산하여 각 구간의 부하에 맞는 도체 크기를 구하는 방법(2.3.1절)
- b) 이웃하는 구간의 부하에 대하여 각 케이블의 크기를 결정하는 경제적 도체 크기 방법(2.3.2절)
- c) 전체 구간에 대하여 크기가 같은 한 종류의 케이블을 적용할 경우 가장 경제적 도체 크기를 선정하는 방법

#### ① 부하와 경과지 데이터

150kV/10kV 변전소로부터 10kV 계통으로 동일한 부하를 가지는 10kV/0.4kV 변압기의 10개 구간에 전원을 공급하기 위한 케이블의 크기를 경제적으로 결정한다. 이때  $N_c=1$  및  $N_p=3$ 이 되도록 3상 1회선만 있다고 가정한다. 각 구간간의 케이블 길이는 500m로 한다. 각 구간별 당해연도 평균 최고 전류  $I_{\max}$ 는 다음과 같다.

<표 2.2> 각 구간별 당해연도 평균 최고 전류  $I_{\max}$

구 간	전류 (A)
1	160
2	144
3	128
각 변전소에서 16A씩 감소	...
9	32
10	16

주기적 인자  $M$ 는 모든 부하에 대하여 1.11로 가정하며 케이블의 경제적 수명기간 일정하다고 가정한다.

#### ② 포설조건

경제적 예산 수명기간  $N$ 은 30년으로 하고, 최대 손실에서 운전하는 시간  $T$ 는 연간 2250시간으로 한다. 또한 10kV에서 당해연도 말에서 도체 손실의 단가  $P$ 는  $60.9 \times 10^{-6}(\text{cu/W}\cdot\text{h})$ 로 하며 연간 공급손실비  $D$ 는  $0.003(\text{cu/W}\cdot\text{year})$ 로 한다. 단위 길이당 케이블별 단가 및 포설 단가는 다음 표와 같다.

이 때 부하는 매년 0.5%(=a)씩 증가하고, 매년 에너지 단가는 매년 2.0%(=b)씩 증가하고, 감가상각비율  $i$ 는 5.0(%)로 한다. 도체크기에 의존하는 설치단가의 계수  $A$ 는  $0.1133(\text{cu/m}\cdot\text{■})$ 으로 한다. 따라서 보조량은 다음과 같다.

$$r = \frac{[1 + (0.5/100)]^2 [1 + (2/100)]}{1 + (5/100)} = 0.98117$$

$$Q = \frac{1 - 0.9812^{30}}{1 - 0.9812} = 23.081$$

$$F = \frac{3 \cdot 1 \cdot (2,250 \cdot 60.9 \times 10^{-6} + 0.003) \cdot 23.08}{1 + (5/100)} = 9.2341$$

<표 2.3> 단위 길이당 케이블별 단가 및 포설 단가

케이블 크기 ■	상당 교류저항		1차 단가		
	Q/km at 40°C	Q/km at 80°C	케이블 (cu/m)	설치(포설) (cu/m)	합 (cu/m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
25	1.298	1.491	10.62	17.23	27.85
35	0.939	1.078	11.65	17.33	28.98
50	0.694	0.798	13.19	17.49	30.68
70	0.481	0.553	15.24	17.71	32.95
95	0.348	0.400	17.81	17.97	35.78
120	0.277	0.318	20.37	18.24	38.61
150	0.226	0.259	23.45	18.55	42.00
185	0.181	0.208	27.04	18.92	45.96
240	0.140	0.161	32.69	19.51	52.20
300	0.114	0.131	38.85	20.14	58.99
400	0.091	0.104	49.11	21.20	70.31

#### ③ 케이블 데이터

이 예제의 목적을 위하여 삼심 6/10kV형 케이블로 가정한다. 40°C와 80°C에서 도체의 교류저항은 <표 2.3>의 (2)와 (3)열에 각각 나타내었으며 상세한 단가는 (4)열에서 (6)열까지 나타내었다. 최고 도체 허용온도는 80°C로 하며 지중에 포설되었을 때 20°C의 주변온도에 대한 정상상태 허용전류는 <표 2.4>와 같다.

<표 2.4> 정상상태 허용전류

공칭단면적 ■	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
전류용량 A	103	125	147	181	221	255	281	328	382	429	482

## 3. 결 론

지금까지는 도체 손실로 인한 손실 비용을 고려하지 않은 채 전력케이블의 최고 허용전류만을 기준으로 도체 크기를 선정해 왔으나 향후 이러한 방법으로 최적의 도체 크기를 선정할 필요가 점점 증대되고 있다. 본 논문은 도체 손실을 고려한 전력케이블의 경제적인 도체 크기를 선정하는 방법과 예제를 제시함으로써 향후 예상되는 최적 도체 크기 선정을 위한 기초적인 기술을 정립할 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] IEC 60287-3-2, Part 3 : Selections on operating conditions-Section2:Economic optimization of power size, 1995