

# 온도특성을 고려한 저압간선의 경제적인 설계기법에 관한 연구

(A Study on the Economical Design of Low-Voltage Feeder Considering the temperature character)

최홍규 · 조계술\*

(Hong-Kyoo Choi · KyeH-Sool Cho)

홍익대학교 전기공학과 · 전기설비연구소

## Abstract

A size of low-voltage conductor cables is determined by the voltage drop of a system, the cable impedance and the cable ampacity based on temperature correction factor in accordance with the condition of cable installation. Therefore, the proper temperature correction factor according to the condition of cable installation should be applied to determining the cable ampacity and also the skin effect and proximity effect, along with the kind and size of conductor and the condition of cable installation, should be properly considered to analyze the proper value of resistance and the reactance of the conductors. This paper addresses the systematic design flow for determining the size of low voltage level conductor cables in calculating the temperature character where error should be minimized in comparison with the general formula and which can be applied in design work for determining the size of conductor cables.

## 1. 서론

저압간선은 전동, 전열, 동력분전반에 전력공급을 위하여 부하중심이 되는곳에 분전반을 설치하여 각 부하 회로에 전력을 공급하게 된다. 여러 부하의 전력은 하나의 간선으로 공급되므로 간선의 고장 또는 이상 현상 등은 파급효과가 대단히 크므로 간선 계획시 공급 신뢰도, 안정성, 경제성등이 충분히 고려 되어야 한다. 일반 건축물의 간선설계의 경우 대부분이 간이식을 기준으로 한 계산식으로 적용되고 있고 일부 플랜트 분야의 경우에도 간선의 임피던스 산출이 임의 적용되는 사례까지 있으며, 포설조건에 맞지 않는 허용전류를 참조하는 경우도 있다. 간이계산법에 의한 전압강하 공식은 직류저항값 20[°C] 기준으로 한 연동선 계산식으로서 직류 저항대비 교류임피던스 값이 온도에 따라 현저한 변화를 가져오므로 간이 계산법으로는 실제 계산 결과와는 달리 허용 기준값보다 전압변동이 큰 상태로 설계되고 있다. 저압 간선 굵기 설계시 기존 계산공식은 도체의 최대 허용온도 값이 적용되고 있으므로 전압강하 계산식에 주어지는 교류도체 실효 저항값은 실제 저항 값보다 크게 적용되고 있다. 따라서 최대 부하 전류에서 실제 온도 상승 값에 의한 저항값을 적용하여 기존 계산 값보다 오차고 적고 보다 경제적인 공식을 적용하여 온도변화 특성에 의한 저압간선 굵기 선정 전압강하공식을 제안하였다.

## 2. 본론

도체는 금속이기 때문에 저항값은 반드시 온도계수가 있고 도체에 전류가 흐름에 따라 온도가 올라가면 도체의 저항값이 커진다. 이것을 저항 온도계수라 하며 일반적인 도체로는 동과 알루미늄이 있으며 그값은 표 1과 같다.

표 1. 저항 온도계수

Table 1. Temperature factor of resistance

도체 구분	저항 온도 계수
연동, 경동	0.00393
알루미늄	0.00403

### 2.1 온도계수 적용 분석

#### 2.1.1 일반계산식에 적용되는 온도계수 검토

전압강하 계산식에서 교류도체 실효 저항은 식 1과 같다.

$$R = R_0 \times \alpha_1 \times \alpha_2 \quad [\Omega] \quad (1)$$

여기서  $R_0 = 20[^\circ\text{C}]$ 에서 직류최대 도체 저항[Ω/m]

$\alpha_1 = 1 + \alpha (T_1 - 20)$  로 도체의 최고 허용 온도값 ( $T_1[^\circ\text{C}]$ )과 20[°C]와의 도체저항 비

$\alpha_2 =$  표피효과와 근접효과 계수

### 2.1.2 실용상의 문제점 분석

지금까지 적용되어온 저압간선의 전압강하 계산식을 살펴보면 교류도체 실효 저항값중 온도보정에 의한 저항값은 해당도체의 최고 허용 온도값을 적용하여 왔다. 그러나 실제 도체에 흐르는 전류는 해당도체의 포설조건에 따른 최대 허용전류값보다 작다. 즉 최대 부하전류값에 대응하는 도체의 굵기는 정해져 있는 도체 굵기의 단계별로 적용되기 때문에 포설하고자 하는 도체의 최대 허용전류값과 부하에 흐르는 최대 전류값이 일치할수는 없다. 따라서 간선굵기 설계시에 적용되고 있는 식 (1)에서의  $T_1$ 의 값은 적용하고자 하는 도체의 최대 허용온도값을 적용할 경우 도체에서 발생하는 실제온도와는 차이가 있어 전압강하 계산식에 주어지는 교류도체 실효저항값은 실제 저항값보다 크게 적용되고 있어 최대 부하전류에서의 온도 상승값을 적용할 수 있는 계산식이 요구되고 있다.

## 2.2 온도 계수 적용 제안공식 알고리즘

### 2.2.1 도체 온도와 전류 보정계수의 분석

도체 온도 보정계수는 식 (2)와 같이 표시되며

$$\sqrt{\frac{T_c' - T_a - \Delta T_d'}{T_c - T_a - \Delta T_d} \times \frac{\tau_c + T_c'}{\tau_c + T_c}} \quad (2)$$

여기서  $T_0'$  값이 새로운 도체의 최대 허용온도이므로 이를 최대 부하전류에서의 온도상승 값으로 대체할 수 있다. 또한, 도체온도 보정계수  $\times$  도체의 최대 허용전류 = 새로운 도체의 최대 허용전류 이므로 다음과 같다.

$$\text{도체의 최대 전류 수용율} = \frac{\text{최대 부하 전류}}{\text{도체의 최대 허용전류}}$$

즉, 도체 온도 보정계수 = 도체의 최대 전류 수용율로 바꿔 표현된다.  $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)$ 를 도체의 최대전류수용율 이라 하면 식 (3)과 같다

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right) = \sqrt{\frac{T_0 - T_0'}{T_0 - T_0'} \times \frac{\tau_0 + T_0'}{\tau_0 + T_0}} \quad (3)$$

여기에서  $\tau_0$ 는 저항 온도계수의 역수이다 일반적으로 동일 경우 234.5를 적용하므로 식 (4)과 같다.

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right) = \sqrt{\frac{T_0 - T_0'}{T_0 - T_0'} \times \frac{234.5 + T_0'}{234.5 + T_0}} \quad (4)$$

유도하고자 하는값은 최대 부하전류에서의 온도 상승 값  $T_c'$ 이므로 식 (2)에서  $T_c'$ 값을 유도해내는 과정은 식 (5)과 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 (T_0 - T_0') T_0' - T_0' (234.5 + T_0) \\ = - T_0 (234.5 + T_0) - \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 (T_0 - T_0) 234.5 \end{aligned} \quad (5)$$

즉,  $T_c'$ 는 식 (6)과 같이 나타낼수 있다.

$$T_{c0} = \frac{T_0 (234.5 + T_0) + 234.5 \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 (T_0 - T_0)}{(234.5 + T_0) - \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 (T_0 - T_0)} \quad (6)$$

일반적으로 실제 실무에 적용되는 기준 주변온도를 노출시에는 40 [°C], 매입 또는 지하덕트등에는 25 [°C]로 적용하고 있어 기준 주변온도를 40 [°C]로 한  $T_c'$ 값을  $T_{c40}$ 로 가정하고 기준주변온도를 25 [°C]로 한  $T_c'$ 값을  $T_{c25}$ 로 가정하면 식 (7)과 식 (8)으로 정리된다

$$T_{c40} = \frac{11725 \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + 12980}{324.5 - \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 \times 50} \quad (7)$$

$$T_{c25} = \frac{15243.5 \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + 8125}{324.5 - \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 \times 65} \quad (8)$$

교류도체 실효저항값 계산에 있어서 식 (1)의  $T_1$  값에 식 (7)과 식 (8)을 대입하여 계산하면 최대 부하전류값에 맞는 실효 저항값이 산출된다. 일반적으로 계산되고 있는 전압강하 계산식 교류도체 실효 저항값의 식 (1)에서  $\tau_1$ 의 값이 이미 주어지므로 식 (7)과 식 (8)에서의  $T_{c40}$  및  $T_{c25}$ 를 적용하기위해 실부하 적용 온도계수를  $T_{c40}$ 라 가정하고 주변온도 40 [°C]의 실부하 적용 온도계수를  $T_{c40}$ , 주변온도 25 [°C]의 실부하 적용 온도

계수를  $T_{CO05}$ 로 분류하여 식 (9)과 식 (10)으로 표현된다.

$$T_{CO040} = \frac{1 + \alpha (T_{C40}' - 20)}{1 + \alpha (T_1 - 20)} \quad (9)$$

$$T_{CO025} = \frac{1 + \alpha (T_{C25}' - 20)}{1 + \alpha (T_1 - 20)} \quad (10)$$

즉, 교류도체 실효 저항값에 식 (9)과 식 (10)을 적용하면 주변온도 40 [°C]의 교류도체 실효저항값을  $R_{40}$ 이라 하고 주변온도 25 [°C]의 교류도체 실효저항값을  $R_{25}$ 라 하고하면 식 (11)과 식 (12)으로 정리 된다.

$$R_{40} = \square \times T_{CO040} \quad (11)$$

$$R_{25} = \square \times T_{CO025} \quad (12)$$

### 2.2.2 프로그램에 의한 실무하 적용 온도계수값 도출

그림 1은 40 [°C]에서 실효저항 적용계수 Curve Fitting을 종합하여 표시하였으며, 최소 오차값의 실무하 적용 온도계수를 찾기 위하여 여러 가지 함수와 그래프를 검토하였다.

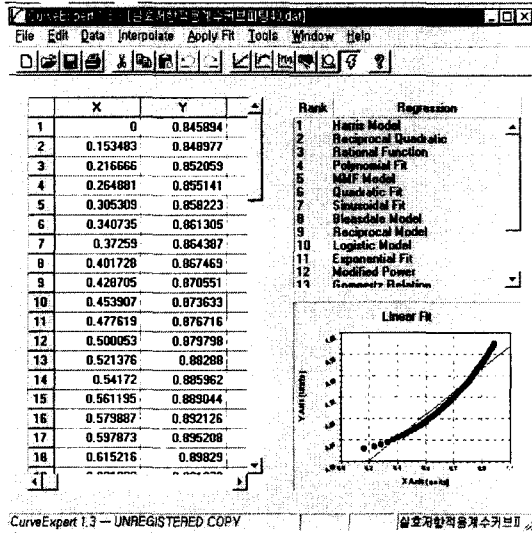


그림 1. 실효저항 적용계수 Curve Fitting 40 [°C]  
Fig. 1. Curve Fitting of conversion factor of effective resistance 40 [°C]

여러 가지 공식 중에서 가장 오차값이 적고 사용하기에 간편한 식을 찾으면 Harris Model의 식 (13)이 도출된다.

$$\square = \frac{1}{(a + b \square^c)} \quad (13)$$

여기서  $a = 1.1821808$   
 $b = -0.18218104$   
 $c = 1.999624$

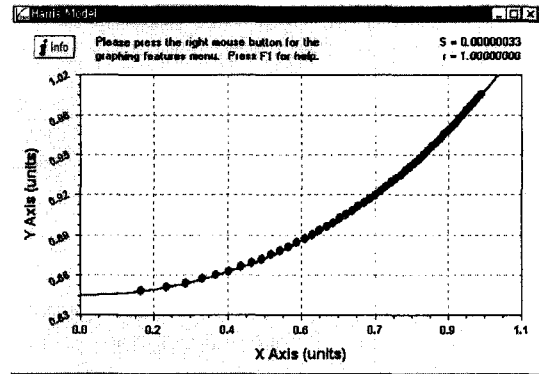


그림 2. Harris Model 그래프 40 [°C]  
Fig. 2. Graph of Harris Model 40 [°C]

그림 3은 25 [°C]에서 실효저항 적용계수 Curve Fitting을 종합하여 표시하였으며, 최소 오차값의 실무하 적용 온도계수를 찾기 위하여 여러 가지 함수와 그래프를 표시하였다.

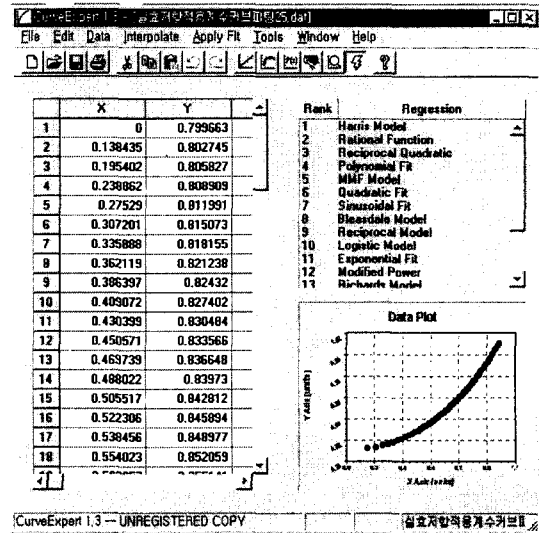


그림 3. 실효저항 적용계수 Curve Fitting 25 [°C]  
Fig. 3. Curve Fitting of conversion factor of effective resistance 25 [°C]

또한 여기에서도 여러 가지 공식 중에서 가장 오차값이 적고 사용하기에 간편한 식을 찾으면 역시 Harris Model의 식 (14)이 도출된다.

$$\Delta = \frac{1}{(a + bT^c)} \quad (14)$$

여기서  $a = 1.2505277$   
 $b = -0.26052805$   
 $c = 1.999944$

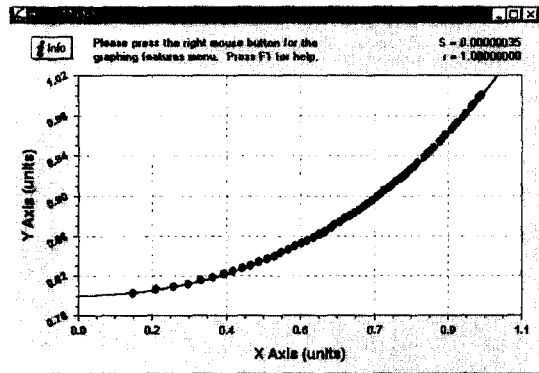


그림 4. Harris Model 그래프 25 [°C]  
 Fig. 4. Graph of Harris Model 25 [°C]

### 2.2.3 실부하 적용 온도계수식 선정

#### ① 오차 분석

Curve Expert 프로그램을 이용한 실부하적용 온도계수식을 그림 1에서 그림 6까지 분석한 결과 40 [°C]에서 최소오차는 Harris Model일 경우 0.0000033[%]이며, 25 [°C]일 경우 Harris Model에서 0.0000033[%]으로 최소 오차 값을 얻었다.

#### ② 연구된 계수식 정리

오차분석에서와 오차값이 가장 적은 실부하 적용 온도계수식은 Harris model에 의하여 도출된 식 (15) 및 식 (16)과 같다.

$$T_{C0040} = \frac{1}{1.1821808 - 0.18218104 I_{CD0}^{1.9999624}} \quad (15)$$

$$T_{C0025} = \frac{1}{1.2505277 - 0.25052804 I_{CD0}^{1.9999438}} \quad (16)$$

상기의 식 (15)과 식 (16)에서 오차를  $10^{-8}$ 범위로 하

여도 실용상 전혀 관계없으므로 간략화하면 다음 식 (17) 및 식 (18)으로 표현된다.

$$T_{C0040} = \frac{1}{1.182 - 0.182 I_{CD0}^2} \quad (17)$$

$$T_{C0025} = \frac{1}{1.25 - 0.25 I_{CD0}^2} \quad (18)$$

### ③ 연구된 온도특성을 적용한 전압강하 계산식

전류 수용률에 따라 변화되는 온도계수값을 전압강하 계산식에 적용하여 실용상 적용할 수 있는 공식으로 도출하고자 한다. 정식계산 방법에 실부하 적용 온도계수  $T_{CD}$ 를 적용한 식을 표현하면 식 (21)과 같다.

$$\Delta U = U_0 (R_0 T_{CD}^{\theta} + X_0 T_{CD}^{\theta}) I \ell \quad (19)$$

여기에서  $I_{CD}$ 는 도체의 최대 전류 수용률로서

$$I_{CDf} = \frac{\text{최대 부하 전류}}{\text{도체의 최대 허용전류}} \text{이다.}$$

식 (19)에서  $T_{CD}$ 는  $T_{CD40}$ 과  $T_{CD25}$ 로 분류되며 Curve Expert 프로그램을 통하여 분석된 식 (17)과 식 (18)을 주변온도 40 [°C] 일때의 전압강하값을  $\Delta U_{40}$ , 주변온도 25 [°C]에서의 전압강하값을  $\Delta U_{25}$ 라 하여 대입하면 식 (20)과 식 (21)으로 표현된다.

$$\Delta U_{40} = U_0 \left( R_0 \left( \frac{1}{1.182 - 0.182 I_{CD0}^2} \right)^{\theta} + X_0 \right) I \ell \quad (20)$$

$$\Delta U_{25} = U_0 \left( R_0 \left( \frac{1}{1.25 - 0.25 I_{CD0}^2} \right)^{\theta} + X_0 \right) I \ell \quad (21)$$

상기의 식 (20)과 식 (21)이 연구된 식의 결과이다.

표 2. 일반 계산식에 의한 600 [V] 허용 길이표  
 Table 2. 600 [V] allowable length table by a formal formula

MOTOR DATA						케이블 최대 허용 금장 (m)													
사용전압 380[V]		정격전압 380[V]				케이블 크기, mm <sup>2</sup>	3.5	5.5	8	14	22	38	60	100	150	200	250	325	
HP	KW	P.F.	EFF	FLA	1.25x FLA	허용전류 (A)	10	15	23	35	51	85	127	162	247	316	383	488	
0.5	0.37	63.0	65.0	1.4	1.7	584													
0.8	0.56	63.0	65.0	2.1	2.6	389	600												
1.0	0.75	70.0	71.5	2.3	2.8	322	498												
1.5	1.12	70.0	71.5	3.4	4.2	215	332	477											
2.0	1.49	75.0	78.0	3.9	4.8	176	273	393											
3.0	2.24	77.0	81.0	5.5	6.8	122	189	272											
5.0	3.73	78.0	83.0	8.8	10.9	-	116	168											
7.5	5.60	77.0	85.0	13.0	16.2	-	-	114	196										
10.0	7.46	78.0	86.0	16.9	21.1	-	-	87	149	229									
15.0	11.19	79.0	87.0	24.7	30.9	-	-	-	101	155	257								
20.0	14.92	79.5	88.0	32.4	40.5	-	-	-	-	118	196								
25.0	18.65	80.0	88.5	40.0	50.0	-	-	-	-	95	158	235							
30.0	22.38	80.5	89.0	47.5	59.3	-	-	-	-	-	132	197							
40.0	29.84	81.5	89.5	62.2	77.7	-	-	-	-	-	100	150	227						
50.0	37.30	81.5	90.0	77.3	96.6	-	-	-	-	-	-	120	182						
60.0	44.76	83.0	95.0	86.2	107.8	-	-	-	-	-	-	107	162	223					
75.0	55.95	83.5	90.5	112.5	140.6	-	-	-	-	-	-	-	124	171					
100.0	74.60	84.5	90.7	147.9	184.9	-	-	-	-	-	-	-	-	130	242				
125.0	93.25	85.0	91.2	182.8	228.5	-	-	-	-	-	-	-	-	124	131	138			
150.0	111.90	86.0	91.5	216.1	270.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111	117		
175.0	130.55	87.0	91.7	248.6	310.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96	102	108	
200.0	149.20	87.0	91.7	284.1	355.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89	94	
225.0	167.85	88.0	92.0	315.0	393.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85
250.0	186.50	88.0	92.0	350.0	437.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77
300.0	223.80	88.0	92.4	418.2	522.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

표 3. 온도계수 적용 제안공식에 의한 600 [V] 허용 길이표  
 Table 3. 600 [V] allowable length table by a proposed temperature application formula

MOTOR DATA						케이블 최대 허용 금장 (m)													
사용전압 380[V]		정격전압 380[V]				케이블 크기, mm <sup>2</sup>	3.5	5.5	8	14	22	38	60	100	150	200	250	325	
HP	KW	P.F.	EFF	FLA	1.25x FLA	허용전류 (A)	10	15	23	35	51	85	127	162	247	316	383	488	
0.5	0.37	63.0	65.0	1.4	1.7	1028													
0.8	0.56	63.0	65.0	2.1	2.6	682	1054												
1.0	0.75	70.0	71.5	2.3	2.8	563	874												
1.5	1.12	70.0	71.5	3.4	4.2	370	579	837											
2.0	1.49	75.0	78.0	3.9	4.8	301	474	688											
3.0	2.24	77.0	81.0	5.5	6.8	202	323	474											
5.0	3.73	78.0	83.0	8.8	10.9	-	188	285											
7.5	5.60	77.0	85.0	13.0	16.2	-	-	186	334										
10.0	7.46	78.0	86.0	16.9	21.1	-	-	133	248	392									
15.0	11.19	79.0	87.0	24.7	30.9	-	-	-	157	257	440								
20.0	14.92	79.5	88.0	32.4	40.5	-	-	-	-	187	330								
25.0	18.65	80.0	88.5	40.0	50.0	-	-	-	-	143	261	397							
30.0	22.38	80.5	89.0	47.5	59.3	-	-	-	-	-	215	331							
40.0	29.84	81.5	89.5	62.2	77.7	-	-	-	-	-	154	246	376						
50.0	37.30	81.5	90.0	77.3	96.6	-	-	-	-	-	-	192	298						
60.0	44.76	83.0	95.0	86.2	107.8	-	-	-	-	-	-	167	263	368					
75.0	55.95	83.5	90.5	112.5	140.6	-	-	-	-	-	-	-	193	278					
100.0	74.60	84.5	90.7	147.9	184.9	-	-	-	-	-	-	-	-	206	248				
125.0	93.25	85.0	91.2	182.8	228.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	124	133	141		
150.0	111.90	86.0	91.5	216.1	270.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112	119		
175.0	130.55	87.0	91.7	248.6	310.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96	103	110	
200.0	149.20	87.0	91.7	284.1	355.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89	96	
225.0	167.85	88.0	92.0	315.0	393.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	86
250.0	186.50	88.0	92.0	350.0	437.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77
300.0	223.80	88.0	92.4	418.2	522.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### 3. 결 론

저압간선 시스템에서 온도변화 특성에 의한 전압강하 계산공식을 유도한 결과 표 2의 일반 계산식에 의한 600[V] 허용길이 표 및 표 3의 온도계수 적용 제안공식에 의한 600 [V] 허용길이 표에서 온도계수 적용 제안 공식이 일반계산식보다 허용길이 최대 1.76배 더 길다. 여기서 도체온도는 90 [°C], 주위온도 40 [°C] 기준으로 3도체를 기준으로 작성한 것이며 표 2와 표 3을 각각 비교 하여보면 간선의 포설조건에서 간선의 길이가 길면 길수록 일반 계산식으로 적용하는 것 보다는 연구된 식의 적용이 더 경제적이라는 것을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] NEMA WC52-1986 (ICEA P-54-440) [Ampacities of Cables in open-top Cable Trays]
- [2] IEEE 835-1994 (IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables)
- [3] IEEE S-135-1 - 1962 (ICEA P-46-426) [Power Cable Ampacities Volume 1-Copper Conductors]
- [4] IEC 949 - 1988 [Calculation of Thermally Permissible Short-Circuit Currents, taking into account Non-Adiabatic Heating Effects]
- [5] KS C 3611-1933 [600V 폴리 에틸렌 케이블]
- [6] KS C 4202-1977 [일반용 저압 3상 유도 전동기]
- [7] JCS 168E - 1995 [전력 케이블 허용전류 - 1]
- [8] NEC HANDBOOK - 1999 Article 310 [Conductors for General Wiring]
- [9] "전기 설비 기술계산 핸드북", 기다리, pp115 ~ 170.
- [10] 최홍규외, "전력 사용시설물 설비 및 설계", 성안당, pp245 ~ 398, 1999
- [11] 新版・電力 ケーブル 技術 ハンドブック, 電氣書院, 1989
- [12] 조계술, "저압 간선의 설계기법에 관한 연구", 한국조명 전기설비 학회 2001년 학술대회, 2001
- [13] S.D. Streams, R.A.David, "Signal Processing Algorithms", Prentice-Hall International, Inc., 1988
- [14] Gunter G. Seip, "Electrical Installations Handbook Part 2", Siemens Aktiengesellschaft Jhon Wiley & Sons, 1987
- [15] IEEE 141-1993 (Recommended Practice for Electric Power Distribution for Instrial Plants)
- [16] 대한전기협회, 내선규정, 2000
- [17] 박영문 배전공학, 문운당, 1976
- [18] 배전기술 종합 매뉴얼, 일본올사, 1991
- [19] 배전계통, 일본 전기서원, 1976