

지중전력케이블의 허용전류 산정 규격의 최근 동향

정성환*, 김대경**, 최상봉**, 배정호**, 하태현**, 이현구**, 조성배***, 강지원***, 윤형희***

A Recent Trends of A Permissible Current-Carrying Capacity Standard in Underground Power Cables

S. H. Jeong, D. K Kim, S. B. Choi, J. H. Bae, T. H. Ha, H. G. Lee,**
S. B. Cho***, J. W. Kang***, H. H. Yoon.

Abstract - This paper was studied on a recent trends for the standard of calculating the cable current-carrying capacity.

1. 서 론

정상상태 허용전류를 계산하는 규격은 1957년 J.H. Neher와 M. H. McGrath의 "The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability" 논문이 발표된 이후 구미와 유럽에서는 IEC Pub 287 (1982) "Calculation of the continuous current rating of cables(100% load factor)"로, 일본에서는 일본전선공업회 규격인 JCS 168D (1980) "電力ケーブルの 許容電流"으로 각각 정착되어 왔다.

한편, 한국전력공사는 지금까지 일본전선공업협회의 JCS 168D(1980) 규격을 주로 사용하여 왔으나 케이블의 포설형태가 직매에서 관로로, 관로에서 전력구로 케이블 포설 환경이 변화되면서 고려해야 할 열적 파라메타들이 점점 늘어나고 있는 실정에 맞추어 지중송전케이블의 허용전류를 산정하는 기준을 IEC 287규격으로 개정하였다.

본 논문은 구미에서 주로 사용하고 있는 Neher-McGrath이론과 이 이론을 바탕으로 규격화된 IEC 287규격 및 JCS 168E규격에 대하여 허용전류계산식, 허용전류계산식에서 고려되는 각 종 저감계수 및 계산조건에 대한 최근 개정 동향을 살펴 보았다.

2. 허용전류계산 규격의 최근 변화

IEC 287규격은 1982년까지 부분적으로 개정되었으나 1993년 이후 표(2.1)과 같이 대폭적으로 개정하면서 규격번호를 세분화하였다. 즉, 이전 규격에서 Section이었던 것을 Part로 구분하여 새 규격 번호를 부여하였다.

한편 일본전선협회는 1949년에 JCS 제168호 "전력케이블의 허용전류"를 제정한 후 1964년 A판, 1967년 B판, 1973년 C판 및 1980년 D판으로 각각 개정하였으며, 최근 초고압/대용량 CV케이블의 사용빈도가 늘어나고 있고 D판보다 사용이 쉽도록 아래와 같은 내용을 추가하여 1995년에 E판으로 개정하였다.

- ① 시스리액턴스를 계산할 때 동심중성선차폐층에 대한 자기리액턴스 성분의 증가를 고려
- ② 금속피 CV케이블(CVAZ, CSZV)의 경우 케이블 심선 표면 방산열저항 계산식의 추가
- ③ Stainless피 CV케이블의 시스손실 계산시 고려사항을 명확화
- ④ 단시간과도부하시 과도상태의 허용전류계산방법에 있어서 "1단열등가회로"에 의한 것과 "다단열등가회로"에 의한 것의 비교

표(2.1) IEC 287의 세부규격

규격번호	규격명
IEC 287-1-1 (1995-08)	Electric Cables - Calculation of the Current Rating Part 1 : Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculations of Losses Section 1 : General
IEC 287-1-2 (1993-12)	Section 2 : Sheath eddy Current Loss Factors for Two Circuits in Flat Formation
IEC 287-2-1 (1994-12)	Part 2 : Thermal Resistance Section 1 : Calculation of Thermal Resistance
IEC 287-2-2 (1995-05)	Section 2 : A Method for Calculating Reduction Factors for Groups of Cables in Free Air, Protected from Solar Radiation
IEC 287-3-1 (1995-08)	Part 3 : Sections on Operating Conditions Section 1 : Reference Operating Conditions and Selection of Cable Type
IEC 287-3-2 (1996-10)	Section 2 : Economic Optimization of Power Cable Size

IEC 287규격과 JCS 168E규격이 최근 변경되면서 아래와 같은 부분에 있어서 조금씩 이견이 있어서 이것에 대하여 각 규격을 비교하였다.

- ① 허용전류계산식의 비교
- ② 허용전류 계산 조건 비교
- ③ 시스손실률의 계산식 비교
- ④ 각 종 저감계수(율)의 비교

2.1 허용전류계산식의 비교

2.1.1 IEC 287 규격

최근 IEC 287 규격은 직매포설시의 열폭주현상과 대기중 다회선포설시 허용전류가 감소되는 것을 고려할 수 있도록 허용전류계산 방법을 제시하고 있다. 다음은 각 포설방식별 IEC 287규격의 허용전류계산식이다.

(1) 직매포설(건조지역)

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

여기서, n : 한 케이블내 심선(도체) 수

θ_c : 도체 허용온도

θ_a : 주변온도

R : 허용온도에서의 교류도체저항 [Ω/m]

λ_1 : 시스손실률 (= W_s/W_c)

λ_2 : 아모아손실률 (= W_a/W_c)

W_c : 도체손실

W_d : 유전체손실
 W_a : 아모아 손실
 T_1 : 도체와 시스간의 열저항(절연체 열저항)
 T_2 : 시스와 아모아간 열저항
 T_3 : 케이블 외장의 열저항
 T_4 : 케이블이외의 외부열저항
 $\Delta\theta$: 도체온도상승분(= $\theta_c - \theta_a$)
 $\Delta\theta_X$: 토양온도의 상승분(= $\theta_x - \theta_a$)
 θ_X : 토양의 건조시 임계온도
 (건조영역과 습한영역 경계에서의 온도)
 ν : 건조시의 토양열저항률과 습한시의 토양열저항률의 비

$$I = \sqrt{\frac{T_1 - T_2 - T_d - T_s}{nrR_m}} \quad (2.7)$$

여기서, n : 케이블내 심선(도체) 수
 (pipe type : $n=3$, treplex케이블 : $n=1$)
 r : 교류도체저항
 T_1 : 도체허용온도
 T_2 : 주변온도(토양)
 $T_d = W_d(\frac{R_1}{2} + R_3' + R_2 + R_3)$
 $R_m = R_1 + R_3' + (1 + P_s)(R_2 + R_3)$
 $T_s = C_s W_a d_s R_3 \frac{1}{M_a} \times 10^{-1}$
 : 일사에 의한 온도상승분
 C_s : 케이블표면과 흑체와의 복사계수의 비(통상, $C_s=0.9$)
 W_s : 일사량(= 0.1 W/cm²)
 M_a : 케이블 수
 R_{th} : 케이블 및 주변매질에 대한 전열저항
 η_0 : 대기중 다회선포설에 의한 허용전류 저감계수

(2) 직매포설(건조지역이 아닌곳) 및 관로포설

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_a - W_d \left\{ \frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right\}}{R(T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4))}} \quad (2.2)$$

(3) 기중포설(일사의 영향이 없는 곳)

$$I = F_g \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_a - W_d \left\{ \frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right\}}{R(T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4))}} \quad (2.3)$$

여기서, F_g : 대기중 포설시 다중포설에 의한 전류저감률(IEC 287-2-2 참조)

(4) 기중포설(일사의 영향이 있는 곳)

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_a - W_d \left\{ \frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4^*) \right\} - \sigma D_c^* H T_4^*}{R(T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4^*))}} \quad (2.4)$$

여기서, σ : 케이블표면의 태양열 복사열 흡수계수
 H : 각 위도별 태양열 복사 강도
 (= 10³ W/m²)
 D_c^* : 케이블외경
 T_4^* : 대기중의 케이블이외 외부열저항

2.1.2 JCS 168E 규격

JCS 168E 규격은 케이블 포설방식별로 다음과 같이 구분하여 허용전류를 계산하고 있다.

(1) 직매, 관로포설시 및 Trough포설

$$I = \sqrt{\frac{T_1 - T_2 - T_d}{nrR_m}} \quad (2.5)$$

여기서, $T_d = W_d(\frac{R_1}{2} + R_3' + R_2 + R_3 + R_5)$: 직매포설

$T_d = W_d(\frac{R_1}{2} + R_3' + R_2 + R_3 + R_5)$: 관로포설

$R_m = R_1 + R_3' + (1 + P_s)(R_2 + L_s R_5)$: 직매포설

$R_m = R_1 + R_3' + (1 + P_s)(R_2 + R_3 + L_s R_5)$: 관로포설

(2) 대기중 및 암거포설 (일사의 영향이 없는 경우)

$$I = \eta_0 \sqrt{\frac{T_1 - T_2 - T_d}{nrR_m}} \quad (2.6)$$

여기서, $T_d = W_d(\frac{R_1}{2} + R_3' + R_2 + R_3)$

$R_m = R_1 + R_3' + (1 + P_s)(R_2 + R_3)$

(3) 가공포설(일사의 영향이 있는 경우)

2.2 계산조건 비교

IEC 287 규격 및 JCS 168E 규격의 적용범위, 계산되는 허용전류의 종류 및 케이블이 포설되는 조건과 각 규격의 제약조건은 표(2.2)와 같다.

표(2.2) 계산조건 비교

구분	IEC 287	JCS 168E
적용 범위	- AC : 거의 모든 케이블 - DC : 최대 5kV	- 전력케이블
허용 전류의 종류	- 100% 연속상시허용전류	- 상시 허용전류 - 단시간 허용전류 - 단락시(지락시) 허용전류
포설 조건	- 직매 - 관로(Duct형태) - Trough(매설, 노출) - 대기중	- 직매 - 관로 - Trough - 암거
제약 조건	- 시스손실계산시 1회선 - 2회선일 경우(IEC 287-1-2)	- 포설조건별 시스손실률 표로 제시
비교	- 과도상태: EC 853-1, 853-3 - 비상시(단시간)허용전류 : IEC 949	- 암거 혹은 일사의 영향이 없는 포설 포설은 전력구 포설

2.3 시스손실률의 비교

시스손실률은 시스순환전류에 의한 손실과 와전류에 의한 손실의 합으로 표현되며, 케이블의 배열방식 및 시스의 접지방식에 따라 계산되어야 할 항은 각각 다르다.

와전류에 의한 손실은 케이블의 상배열, 도체중심간의 간격 및 타회선에 의해 영향을 받기 때문에 JCS 168E 규격에서는 와전류손실률 계산 수식과 이 수식에 포함되어 있는 상수값을 표로 제공하고 있다. 그리고, IEC 287규격은 종래에는 1회선 삼상 단심케이블에 대해서만 계산이 가능할 뿐 2회선이상일 경우에는 계산이 불가능하였으나, 최근 규격의 세분화를 통해서 2회선 수평배열에 대한 와전류 손실을 계산하는 알고리즘을 IEC 287-1-2에서 제공하고 있다. 그러나, 2회선이상에 대한 시스 손실률 계산식에 대해서는 현재 검토중에 있다.

2.4 각 종 저감계수(율)의 비교

IEC 287규격 및 JCS 168E규격의 열저항계산식에 사용되고 있는 각 종 저감계수(율)의 종류는 <표 2.3>과 같다.

2.4.1 기중다회선 포설에 의한 허용전류저감계수 (F_g 혹은 η₀)

케이블이 대기중에 여러 개의 단심 단상 케이블 혹은 수회선의 단상 케이블이 포설될 경우 각 케이블에서 발생하는 열은 계산하고자 하는 케이블의 표면온도를 상승시켜 허용전류를 저감시키는 효과가 있다. 이때, 저감되는 허용전류의 양을 비율로 나타낸 것을 기중다회선 포설에 의한 허용전류저감계수라 한다.

표(2.3) 각 종 저감계수(률)의 비교

구 분	JCS	IEC	비 고
	기호	적용식	
기중다회선포설에 의한 허용전류 저감계수	η ₀	허용 전류식	F _g - 케이블배치
차폐층에 의한 저감률	η ₁	R ₁	- 케이블형상 - 다심케이블의 형상계수
지하수에 의한 토양열저항저감률	η ₂	R ₅	- 지하수의 영향 - 직매 및 관로포설시
전력구(통도)포설시 토양열저항 저감률	η ₃	R ₇	- 지하수의 영향 - 전력구포설시 전력구 형상
시스-외장(방식층)간 열저항저감률	η ₄	R _{3'}	- 케이블 형상 - CV케이블에서만 적용

JCS 168D(1980) 규격은 대기중에 여러 개의 케이블이 포설될 경우 기중다회선 포설에 의한 허용전류저감 계수를 표로 제공하고 있으나, IEC 287의 경우는 포설 조건에 따라 상호 가열효과를 무시할 수 없을 경우 아래 식과 같이 계산하고 있다.

$$F_g = \sqrt{\frac{1}{1 - k_1 + k_1 \times \left(\frac{T_{4g}}{T_{4l}}\right)}} \quad (2.8)$$

여기서, $k_1 = \frac{\text{케이블표면온도상승분}}{\text{도체온도상승분}} = \frac{W \cdot T_{4l}}{\theta_c - \theta_a}$

이때, (T_{4g}/T_{4l})의 계산은 아래 식과 같이 계산된다.

$$\left(\frac{T_{4g}}{T_{4l}}\right)_{n+1} = (h_l/h_g) \left[\frac{1 - k_1}{\left(\frac{T_{4g}}{T_{4l}}\right)_n} + k_1 \right]^{0.25} \quad (2.9)$$

2.4.2 차폐층에 의한 저감률 η₁

차폐층에 의한 저감률은 다심 SL형 케이블에 대해서만 적용하며 JCS 168E 규격에서만 사용하고 있다.

2.4.3 지하수에 의한 토양 열저항 저감률 η₂

지하수에 의한 토양열저항 저감률은 직매 및 관로 포설시 토양 열저항의 계산식에서 흙열원으로서의 지하수가 존재할 경우에 지중의 온도분포를 전개해석법으로 구하여 실험적으로 구한 것이다. 이때 지하수위와 케이블 매설깊이의 위치에 따라 온도상승의 저감효과가 다르기 때문에 JCS 168E에서는 지하수위를 3m를 기준으로 하였다.

그러나, IEC 287은 지하수에 의한 토양 열저항 저감률에 대한 특별한 규정이 없다

2.4.4 전력구(통도)포설시 토양열저항 저감률 η₃

전력구포설과 같이 기중 혹은 암거 포설에 대하여 허용전류를 계산할 경우 JCS 169E에서는 전력구 내부온도를 40℃로 가정하고, 전력구 외부의 토양 열저항 성분을 고려하지 않는 것이 일반적 이었다. 그러나, JCS 168E규격에서는 케이블 조수가 많고 케이블로 부

터 발생하는 손실이 큰 전력구에 포설될 경우에는 외부 토양 열저항을 고려한 열회로를 가정하여 케이블의 허용 전류를 계산하고 있다. 이때 토양열저항 저감률을 지하수에 의한 토양 열저항 저감률과 마찬가지로 토양열저항 계산식에 곱하게 된다. 이 저감률은 일본의 특수한 지리적인 조건 때문에 도입된 경우이다.

2.4.5 도체심과 시스간의 열저항 저감률 η₄

금속연피가 붙은 CV케이블은 시스아래에 시스의 파형상에 의해 공간이 존재하게 되는데, 이 공간에서의 열전달 기구는 대류와 전도에 의해 지배되고 그 공간의 온도에 의존하게 된다. JCS 168E규격에서는 이 공간에서 열저항을 케이블 심심 표면방산 열저항으로 정의하고 있다. 도체심과 시스간의 열저항 저감률 η₄는 이 부분에서의 열 저항식에 곱하고 있는데 파부강관 외장 케이블을 이용한 실험에서 구한 실측치를 기본으로 하여 저감률 80%를 도입하고 있다.

3. 결 론

IEC 287규격과 JCS 168E 규격을 비교한 결과 양 규격 모두에 있지만 계산상의 차이점이 있는 항목, IEC 287 규격에만 있는 항목 및 JCS 168E 규격에만 있는 항목으로 나눌 수 있으며, 각 규격이 적용되고 있는 자연적인 환경과 케이블의 종류에 따라 적용 방식에 있어서 차이가 있음을 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
- [7] IEC std. 853-1. "Calculation of the Cyclic and Emergency Current Rating of Cables, Part 1 : Cyclic Rating Factor for Cables up to and including 18/30(36)kV", 1985
- [8] IEC std. 853-2. "Calculation of the Cyclic and Emergency Current Rating of Cables, Part 2 : Cyclic Rating of Cables greater than 18/30(36)kV and Emergency Ratings for Cables of all Voltage", 1989
- [9] JCS 168E, "전력케이블의 허용전류", 일본전선공협회, 1995