

## 2회선 가공송전선의 단시간정격에 관한 평가방법

(An Evaluation Method for Short-Term Ratings of Double-Circuit Overhead Transmission Lines)

김성덕\* · 손홍관 · 장태인

(Sung-Duck Kim · Hong-Kwan Sohn · Tae-In Jang)

### 요 약

본 논문에서는 2회선 가공송전선에 대하여 2회선 중 1회선에 고장이 발생한 경우에 안전하게 운전할 수 있는 단시간정격을 결정하기 위한 해석적 방법을 기술한다. 도체의 온도특성을 나타내는 열평형방정식을 선형화함으로써 선형방정식으로 1회선 선로에 과부하가 발생하는 동안 과전류와 그 온도 특성을 쉽게 표현할 수 있다. 일반적으로 단시간 선로정격은 도체의 수명과 이도를 동시에 고려하여 결정해야 한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그렇지만 대부분의 전력회사는 단시간정격에 대한 각자의 다른 지침을 갖고 있다. 이 논문에서는 제안된 방법을 사용하면 과거 3시기에 건설된 한국전력공사의 가공송전선에 규정된 단시간정격을 재평가할 수 있고, 그 결과 단시간정격을 효율적으로 증대시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 이 방법은 2회선 선로 중 1회선에 고장이 발생할 경우에 기존 선로에 어떤 조치도 하지 않아도 단시간 동적송전용량을 결정하는데 직접 이용할 수 있을 것이다.

### Abstract

This paper describes an analytical method to determine the short-term ratings to reliably operate the overhead transmission lines with double-circuit lines when faulting one circuit of the two. As linearizing the thermal equilibrium equation that represents the temperature characteristic of conductors, we show that the linear equation can be easily presented the over-current and its temperature property during overloading the one line. Generally, it is well known that the short-term line ratings should be determined by considering both conductor life and dip. However, most power companies have their own different guides for the short-term ratings. Using the suggested method in this paper, it can be re-accessed the short-term ratings given in Kepeco's overhead transmission lines constructed during the past three different periods. As a result, it is verified that the short-term ratings could be increased more efficiently. Furthermore, it would be directly applied the given method to determine the short-term dynamic line ratings when occurring faults in one of the double-circuit lines, without doing any other actions for the current lines.

Key Words : Double-Circuit, Overhead Transmission, Short-term Ratings, Dip and Clearance

\* 주저자 : 한밭대학교 전기·전자·제어공학부 교수

Tel : 042-821-1135, Fax : 042-821-1128, E-mail : sdkim@hanbat.ac.kr

접수일자 : 2007년 2월 27일, 1차심사 : 2007년 3월 2일, 2차심사 : 2007년 4월 13일, 심사완료 : 2007년 6월 5일

## 1. 서 론

최근 십여 년 사이에 전력회사의 구조조정과 더불어 환경문제 및 경제적 부담으로 새로운 선로를 건설하기 쉽지 않음에 따라 현재 설비의 효율성을 극대화하는 방안들을 다각적으로 모색하기 시작하였다. 그 중 가장 기본적인 작업이 현재 가설된 송전선로의 도체정격이 타당성 있게 설계된 것인지를 판단하는 것이었으며, 선로의 수명진단, 노후도 평가 또는 기존설비의 효율성 등도 검토되었다. 송전용량은 최대허용도체온도(maximum allowable conductor temperature)에 대한 도체의 열정격(thermal line rating)인 정적허용용량(state line rating : SLR)으로 산정된다[1]. 그러나 SLR은 가혹한 기상조건을 가정하여 산정된 값으로 대부분의 선로는 이 기준값 이하에서 운용함으로써 설비이용율이 매우 낮다. 따라서 전력회사는 기상요소나 전류, 도체온도 등을 모니터링하여 실시간으로 용량을 조절하는 동적송전용량(dynamic line rating : DLR) 운용방법을 적용하기도 하였으며[2], 효율적인 전력공급을 증대하는 방안으로 단시간정격도 재검토하게 되었다.

단시간 비상정격(short-term emergency rating) 또는 단시간 부하율(short-term load rate)은 2회선 중, 1회선의 고장 시에 선로가 안전하게 공급할 수 있는 전력이다[3-4]. 전력회사는 일정한 고장단속시간을 정하고 이에 알맞은 선로보호 장치나 재폐로 장치를 설비해 운용한다[5-6]. 도체의 단시간허용전류에 대한 기준은 가혹조건에서도 안전한 지상고(ground clearance)를 유지하는 것을 상정하여 정해진 것으로 선로가 부담할 수 있는 고장전류나 과부하율(overload rate)을 의미한다. 따라서 가정된 상황에서는 100[%] 안정성을 보장할 수 있어야 하므로 현재 기준은 매우 엄격하게 규정되고 있는 실정이다. 단시간정격과 같은 기준은 최악의 조건을 가정하여 계산된 값들이지만 실제로 선로는 그와 같은 상황에서 운전되는 것이 아니다. 따라서 선로는 항상 상당량의 전력공급 여유를 갖고 있으며 그 값이 지나치게 커서 대부분의 설비는 정격보다 낮은 용량으로 운전된다.

도체의 연속허용전류나 단시간정격은 송전선의

열정격과 선로의 인장에 직접 관계된다. 도체의 최대허용온도는 알루미늄 소선의 어닐링으로 초래되는 인장강도의 저하에 의한 도체수명과 충분한 지상고를 유지하기 위하여 이도(dip)를 제한하기 위한 한계치로 정해진다. 도체의 크립신장(creep elongation)에 의해 발생하는 도체 인장 손실과 영구적인 이도변형은 도체의 노출 시간에 따라 축적된다[1]. 따라서 이러한 영향들을 충분히 반영하여 도체의 최대허용온도를 결정해야 한다. 결국 도체의 허용온도는 가혹한 기상조건에서 어닐링으로 도체의 인장하중 감소를 제한하고 안전한 지상고를 유지하기 위하여 적절한 이도를 보장하는 도체온도로 정해지는 것이다[7].

도체수명은 전력회사마다 일률적으로 규정한 것은 아니지만 연속허용온도에서 일정기간 동안 사용할 경우에 인장 손실이 대략 10[%] 정도 저하되는 시기를 기준으로 하고 있다. 따라서 연속부하로 운전할 수 있는 도체의 연속허용온도는 대략 90[°C]로 규정한다[3]. 단시간정격은 비상시에 운용하는 도체의 전류용량이므로 과부하율과 고장지속시간, 고장누적시간 그리고 도체의 교체수명 사이의 관계를 이용하여 산정된다. 이 경우에 도체의 고장횟수나 소선 구조, 장력의 크기 등은 도체의 온도상승에 의한 어닐링과는 무관한 것으로 알려져 있다[8-9].

도체의 열화문제가 단시간 결정에 큰 영향을 주지 않는 반면에 지상고는 중요한 요소이다. 지상고는 도체의 이도와 설계기준에 의한 철탑 높이 등과 직접 관계된다. 국내에서는 지상고를 고려하는 경우에 ACSR 도체는 80[%]의 전류에 상응하는 도체온도 75[°C]를 기준으로 정한다[7, 10]. 도체이도는 도체온도와 직접 비례하고 도체온도는 기상조건 및 도체전류와 관계되므로 지상고의 안전한 확보를 위하여 적당한 기준치가 되어야 한다. 도체의 온도특성과 단시간정격 사이에는 매우 밀접한 관계가 있다. 열평형방정식으로 지배되는 도체온도 특성은 잘 알려져 있으나 전력회사마다 지상고 기준이 다르므로 단시간 허용온도나 단시간 부하율을 다르게 규정되어 사용한다. 일반적으로 열평형방정식은 비선형방정식으로 고장지속시간을 온도 변화로 설명하기 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 열평형방정식을 선형화하

## 2회선 가공송전선의 단시간정격에 관한 평가방법

고 이를 토대로 국내 가설 송전선로의 단시간정격 특성을 분석, 평가한다. 열적 시정수(thermal time constant)를 이용하여 2회선 선로의 고장 시 과부하율과 한계이도온도(limit dip temperature)의 관계를 규명하여 국내 기준에 알맞은 단시간정격 산출방안을 제시한다.

### 2. 단시간정격과 열평형방정식

일반적으로 2회선 선로에서 1회선 고장 시에 고장 선로의 전류는 그림 1과 같이 건전 측 회선에 부담한다[3-4]. 2회선 선로는 안전한 선로운용을 위하여 정상시에 도체의 연속허용전류의 50[%] 이내의 부하로 운전하므로 이론적으로는 고장 시 전류부담에 의한 위험은 발생하지 않는다. 그렇지만 선로 건설 시 이도는 연속허용온도에서 이하에서 설계되므로 지상고 설계기준에 따라 고장지속시간 동안에는 연속허용온도를 초과할 수도 있다. 도체온도는 전류의 크기와 온도시정수에 의하여 지수적 증가 특성을 나타낸다. 따라서 그림 1과 같이 한계이도온도 이내에서 안전하게 선로를 운용할 수 있는 단시간정격을 결정할 수 있어야 한다. 그러므로 단속시간(intermittent time) 또는 고장지속시간(fault duration)과 안전전류에 대한 한계치의 해석은 매우 중요하다.

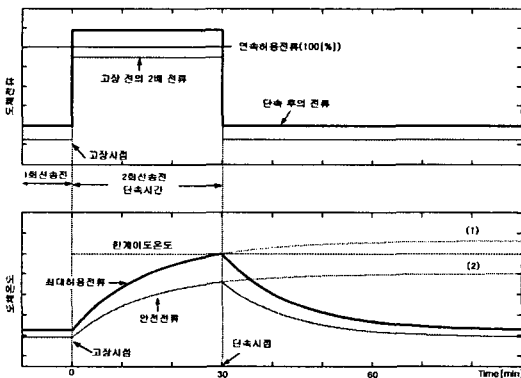


그림 1. 2회선 선로 고장 시의 부하 특성  
Fig. 1. Load characteristics when faulting in double-circuit lines

송전선로의 과부하율 기준을 결정할 경우에는 도체수명과 선로 안정성을 고려하고 지상고와 이격거리도 검토해야 한다. 이때 단시간정격은 도체의 허용온도와 이도를 중심으로 과부하전류에도 전력선의 이도 증가가 허용치 이내일 것과 도체온도가 단시간 허용온도를 초과하지 않아야 한다. 가공도체에 전류  $I[A]$ 가 흐르는 경우, 도체온도에 대한 열평형방정식은 다음과 같이 주어진다[1].

$$mC_p \frac{dT_c}{dt} - I^2 R_{ac}(T_c) = Q_c - [Q_r(T_c) + Q_s(T_c)] \quad (1)$$

여기서  $m[\text{kg/m}]$ 는 도체의 단위길이 당 질량이며  $C_p[\text{J/kg}^\circ\text{C}]$ 는 도체의 비열로  $mC_p[\text{J/m}^\circ\text{C}]$ 를 도체의 열용량이라 한다. 또한  $T_c[^\circ\text{C}]$ 는 도체온도,  $R_{ac}[\text{m}\Omega]$ 은 도체온도에서의 단위 길이 당 교류저항,  $Q_c[\text{W/m}]$  및  $Q_r[\text{W/m}]$ 는 도체의 대류열 및 방사열이며  $Q_s[\text{W/m}]$ 는 태양열에 의한 도체의 흡수열을 나타낸다.

그림 1과 같은 단시간정격을 검토하기 위해서는 도체온도의 시간특성을 정확하게 계산할 수 있어야 한다. 그렇지만 식 (1)은 비선형 미분방정식으로 그해를 쉽게 결정할 수 없으므로 온도 변화에 따른 전류 특성도 표현하기 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 단시간정격의 시간특성을 쉽게 해석할 수 있도록 식 (1)을 1계 상수계수 선형 미분방정식으로 근사화하였다. 이러한 방법을 이용하여 구한 미분방정식은 시정수로 나타낼 수 있기 때문에 도체온도의 시간특성을 정량화하기 편리하다.

식 (1)에서  $R_{ac}(T_c)$ 는 도체온도  $T_c$ 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$R_{ac}(T_c) = \beta R_{dc20} [1 + \alpha_{20}(T_c - T_a)] \quad (2)$$

여기서  $\beta$ 는 교직저항비이고  $\alpha_{20}$ 은  $20[^\circ\text{C}]$ 에서 저항온도계수이며  $R_{dc20}$ 은  $20[^\circ\text{C}]$ 에서 단위 길이 당 도체저항이다. 따라서 식 (2)는 다음과 같이 1차 함수로 쓸 수 있다.

$$R_{ac}(T_c) = a_1 T_c + b_1 \quad (3)$$

이 식에서  $a_1 = \alpha_{20} \beta R_{dc20}$  이고  $b_1 = \beta R_{dc20} (1 - 20 \alpha_{20} T_a)$ 이다.

대류에 의한 열방사,  $Q_c(T_c)$  는 무풍속, 저풍속 및 고풍속 영역의 특성이 다르게 기술되지만[1, 4] 연속허용전류는 SLR 조건(SLR을 결정할 때 사용되는 기상조건, 도체 종류, 지리적 조건 등을 의미하며 이하에서는 SLR 조건이라 한다)에서 규정된다. 이 SLR 조건에서 풍속은 저풍속 영역으로 다음과 같이 주어진다.

$$Q_c(T_c) = \{1.01 + 0.0372 \left( \frac{D \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \} \cdot k_f (T_c - T_a) \quad (4)$$

여기서  $D$ [mm]는 도체의 외경,  $\rho_f$ [kg/m<sup>3</sup>]은 공기의 밀도,  $V_w$ [m/sec]는 풍속,  $\mu_f$ [N/m·s]는 공기의 점도,  $k_f$ [W/m·°C]는  $T_c$ 에서 공기의 전도율을 나타낸다. 이 때, 식 (4)도 다음과 같은 선형함수로 표현할 수 있다.

$$Q_c(T_c) = a_{21} T_c + b_{21} \quad (5)$$

여기서  $a_{21} = [1.01 + 0.0372 (D \rho_f V_w / \mu_f)^{0.52}] k_f$ 이며  $b_{21} = -a_{21} T_a$ 이다.

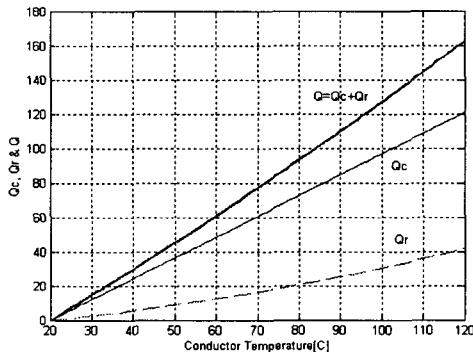


그림 2.  $Q_r(T_c)$  와  $Q_c(T_c)$  의 특성  
Fig. 2. Performances of  $Q_r(T_c)$  and  $Q_c(T_c)$  when varying conductor temperature

한편 도체의 방사열  $Q_r(T_c)$  은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_r(T_c) = 0.0178 D \epsilon \left[ \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

여기서  $\epsilon$ 는 도체의 방사율이다.  $R_{ac}(T_c)$  및  $Q_c(T_c)$  은  $T_c$ 에 대하여 완전한 선형함수이지만 식 (6)은 1차 함수로 표현할 수 없다.  $T_c$  변화에 대한  $Q_r(T_c)$  와  $Q_c(T_c)$  의 일반적인 특성을 확인하기 위하여 ACSR 410 도체에 대해 SLR 조건 중, 기온을 20~120[°C]으로 가정한 경우에 구한 결과를 그림 2에서 보여준다.

식 (6)의  $Q_r(T_c)$  은 선형함수가 아니지만 그림 2에서 보면  $T_c$ 에 거의 선형적인 특성을 나타냄을 알 수 있다. 따라서  $Q_{cr}(T_c) = Q_c + Q_r$  함수는 다음과 선형함수로 근사화가 가능하다.

$$Q_{cr}(T_c) \cong a_2 T_c + b_2 \quad (7)$$

식 (3) 및 (7)을 비선형 미분방정식인 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 1계 상수계수 선형 미분방정식이 된다.

$$\tau \frac{dT_c}{dt} + T_c = K \quad (8)$$

여기서  $\tau$ 는 도체의 온도시정수이고  $K$ 는 정상상태 도체온도로 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \frac{mC_p}{a_2 - a_1 I^2} \quad (9)$$

$$K = \frac{Q_s + (b_1 I^2 - b_2)}{a_2 - a_1 I^2} \quad (10)$$

식 (8)에서의 같이 도체온도는 시정수,  $\tau$ 로 시간 특성을 설명할 수 있고 식 (10)에 의해 전류에 따른 도체의 정상상태온도를 간단히 계산할 수 있다. SLR 조건에서 전류  $I_0$ 가 흐르고 있다면 정상상태

## 2회선 가공송전선의 단시간정격에 관한 평가방법

에서의 도체온도  $T_0$ 을 구할 수 있다. 전류가  $I_0$ 에서  $I$ 로 변경된다면 도체온도는  $T_0$ 에서  $T$ 로 변화되며 이때 온도특성은 온도시정수에 의해 지배된다. 따라서 도체의 종류, 규격과 기상조건 및 전류를 알면 도체온도의 시간특성을 구할 수 있고 이 결과를 토대로 단시간정격인 허용온도, 허용전류나 부하율을 결정할 수 있다.

### 3. 국내 설계기준과 단시간정격의 특징

국내 송전선로는 그동안 2번의 설계기준이 개정되었고 선로의 설계, 시공도 이러한 기준에 따라 3시기로 구분되며 각 시기에 적용된 단시간정격도 일률적이지 못했다[7]. 1992년 6월 이전에 가설된 송전선로(이하 Group I이라함)는 지상고 설계 시 도체온도는 ACSR 도체에 대하여  $T_c=40[^\circ\text{C}]$ 로 가정하였다. 이 시기 이전의 송전선로는 도체에 대한 연속, 단시간 허용온도, 과부하율 등이 규정되어 있었으나 적용되지 않았다. 1992년 7월부터는 지상고를 설계하는 경우에 도체온도기준을  $T_c=75[^\circ\text{C}]$ (연속허용온도  $90[^\circ\text{C}]$ 의 83%)로 변경하였다(Group II). 이 온도는 ACSR 도체의 연속허용온도인  $90[^\circ\text{C}]$ 에 대한 전류의 80%가 흐르는 경우에 해당된다. 이후 이 기준은 1997년 10월 지상고 설계기준만 개정되었다(Group III). 단시간정격은 도체온도, 이도 및 지상고 사이의 관계로부터 정해지는 것이므로 국내의 다른 기준으로 가설된 선로의 건설시기를 알고 있어야 한다. 이러한 검토 결과로부터 기존에 통상적인 기준만 규정하고 있을 뿐 적용하지 않았던 단시간정격을 검토하여 정립할 필요가 있다.

국내 선로에는 ACSR, TACSR 및 STACIR 등이 사용되지만[4] 선로 중 약 80~90%는 ACSR 도체이다. 송전전압도 66, 154, 345 및 765[kV] 등이 있고 전압의 크기마다 주로 사용되는 도체 규격이 다르나 단시간정격을 추정하는 방식은 유사하므로 본 논문에서는 154[kV]선로의 ACSR 410 도체를 대상으로 해석하였다. 154[kV] 선로에서는 ACSR 240, 330 및 410 등이 사용되지만 동일한 조건에서 ACSR 410 도체의 이도변화가 가장 크다.

ACSR 410 도체는 연속허용온도가  $90[^\circ\text{C}]$ , 단시간 허용온도가  $100[^\circ\text{C}]$ 이며, 연속 및 단시간허용전류는 각각 848 및 939[A]이다. 이때 최고기온,  $40[^\circ\text{C}]$ , 풍속,  $0.5[\text{m}/\text{sec}]$  등 기상조건과 지리적 조건들로부터 전류가 계산되었다. 설계기준 1211[10]에 규정된  $154[\text{kV}]$ 의 최대경간인  $S=700[\text{m}]$ 를 가정하여 이도가 가장 크게 나타나는 고온 III 지역에서 이도, 이도여유와 이 이도에 해당하는 도체온도를 계산하였다[11]. 설비기준을 토대로 SLR 조건에서 Group II에서는 이도여유가  $0.5[\text{m}]$ 이고 한계이도에 도달하는 도체온도는  $86[^\circ\text{C}]$ 이었다. Group III 선로에서의 이도여유는  $2.05[\text{m}]$ 로 강화되었으며 이때 한계이도온도는  $122[^\circ\text{C}]$ 이지만 기존 ACSR 도체의 기준을 감안하여 현재  $100[^\circ\text{C}]$ 로 낮추어 규정하고 있다. 도체온도는 설계조건(최악의 기상조건과 최대 경간, 가혹한 풍압조건인 고온 III지역 적용)에서 해당 이도가 나타날 때 계산된 도체의 온도로, 도체가 이 온도에서 최저이도(계산이도와 이도여유의 합)가 나타난다는 것을 의미한다.

### 4. 단시간정격의 산정

표 1. 국내 단시간정격 기준  
Table 1. Short-term rating specifications in Kepeco's lines

구분 건설 시기	지상고 설계시 도체온도 기준	한계이 도온도	한계이도 여유	경간 700[m] 최대이도	비고
Group I	$40[^\circ\text{C}]$	$51[^\circ\text{C}]$	$0.5[\text{m}]$	$37.54[\text{m}]$	~1992.6
Group II	$75[^\circ\text{C}]$	$86[^\circ\text{C}]$	$0.5[\text{m}]$	$39.11[\text{m}]$	1992.7~ 1997.10
Group III	$75[^\circ\text{C}]$	$100[^\circ\text{C}]$	$2.05[\text{m}]$	$40.66[\text{m}]$	1997.11~

표 1에서 알 수 있는 바와 같이, Group III 선로는 지상고 설계 시 도체온도가  $40[^\circ\text{C}]$ 이고 한계이도온도가  $51[^\circ\text{C}]$ 이므로 과부하 적용은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 Group II와 III의 선로에 대해서만 단시간 특성을 검토한다. 우선 Group II의  $154[\text{kV}]$  선로에 대해 SLR 조건과 표 1의 가정 하에 과부하 지속시간을  $20[\text{min}]$ 으로 가정하여 구한 결과가 그림

3이다. 2회선 선로라 가정하였으므로 SLR의 50[%] 부하인 424[A]가 흐르는 도체의 온도는 59.1[°C]이다. 이때 고장에 의해 2배의 전류가 건전 측 1회선에 부담된다면 848[A]가 흐르고 그림 3에서와 같이 이 전류가 계속하여 흐르면 도체는 약 90[°C]로 상승하여 한계이도온도는 86[°C]를 초과하게 된다. 그렇지만, 선로 고장이 20[min] 이내에서 자동 복구되거나 과부하계전기가 동작되면, 이도는 과부하지속시간 20[min] 동안에도 한계이도온도인 86[°C]에 도달하지 못하므로 이 고장지속시간 동안에도 선로는 안전한 지상고를 유지한다.

일반적으로 하계의 침두부하 시에도 고장을 예방하여 2회선 선로에는 50[%] 이상의 전류를 공급하지 못한다. 그렇지만 고장지속시간이 20[min] 이하라면 그림 3에서(점선)와 같이 과부하의 여유를 갖게 된다. 이 여유를 감안하면 정상운전 시에 이 선로의 각 회선에는 448[A](약 53[%] 부하)의 전류를 공급하더라도 비상시에 896[A](약 106[%] 부하)가 20[min] 되는 시점에서 한계이도온도인 86[°C]에 도달하고 복구 후에는 정상적으로 안전한 전력공급이 가능하다. 일반적으로 Group II에 속하는 선로는 한계이도온도가 86[°C]이고, 이도설계기준온도도 75[°C]로 ACSR 도체의 연속허용온도, 90[°C]보다 낮다. 따라서 회선 당 증가시킬 수 있는 부하여유는 그다지 크지 못하다.

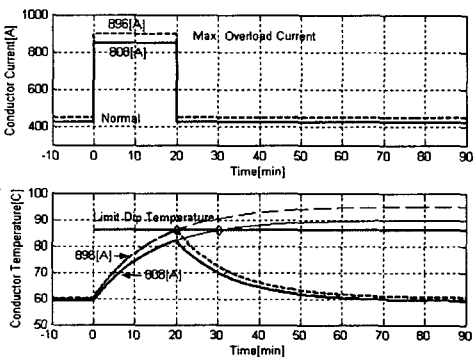


그림 3. Group II 선로에서의 과부하 특성  
Fig. 3. Overload characteristics for Group II Lines

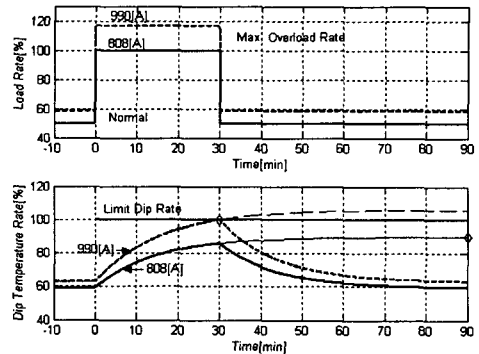


그림 4. Group III 선로에서 부하율과 이도온도비율  
Fig. 4. Load rate and dip temperature rate for Group III lines

한편 지상고 여유가 증가된 기준으로 설계된 Group III의 선로들은 현재 설비기준에서 규정한 단시간허용온도 100[°C]에서도 비교적 큰 과전류가 흘러도 안전한 전력공급이 가능하다. 그림 4는 그림 3과 동일한 조건에서 한계이도온도를 100[°C], 과부하지속시간을 30[min]으로 변경한 경우에 과부하율 및 한계이도 특성을 나타낸다. 이 선로에는 하계에도 회선 당 약 58[%](495[A])까지 공급가능하고 비상시에도 약 117[%](990[A])의 부하에도 지상고는 안전범위에서 유지된다.

단시간온도나 전류정격은 열화에 의한 도체수명과 도체온도에 따른 이도를 함께 고려하여 결정한다. 예컨대 동경전력에서는 과부하지속시간을 30[min]이고 연 20[회], 36[년]으로 120[°C]에서 고장누적시간 약 400[시간]으로 단시간 허용온도를 120[°C]로 상향조정하였다[3]. 97년 10월에 개정된 설계지침으로 시공된 선로는 비교적 큰 이도여유를 갖으며, 이러한 지상고를 유지하면서도 안전하게 운전할 수 있는 한계이도온도는 가혹조건에서 122[°C]로 계산된다. 따라서 국내의 현재 기준치로 되어 있는 단시간 허용온도 100[°C]를 120[°C]로 상향해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

그림 5는 그림 4와 동일한 조건에서 단시간허용온도를 한계이도온도인 86(Group II 선로), 100, 110, 및 120[°C](Group III 선로)으로 가정한 경우에 최대 허용온도를 나타내고 표 2는 그 결과를 요약한 것이

2회선 가공송전선의 단시간정격에 관한 평가방법

다. 표 2에서와 같이 단시간허용온도가 100[°C]인 경우에는 비상시에 117[%]의 과부하가 가능하지만 110 및 120[°C]인 경우에는 각각 127 및 137[%]의 과부하에도 선로는 안전하다. 특히 단시간 허용온도를 110 및 120[°C]로 상향 조정하면 2회선 송전선로는 가혹조건인 하계에도 회선 당 부하를 각각 64 및 67[%]로 현재 50[%]에 비해 현저하게 증가된 전력 공급이 가능해진다.

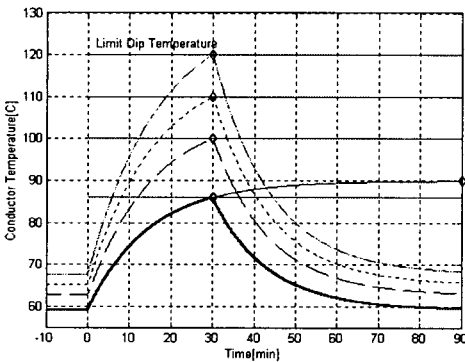


그림 5. 단속시간이 변화되는 경우에 최대허용전류에 대한 도체온도

Fig. 5. Conductor temperature for the maximum allowable current when varying intermittent time

표 2. 단시간 허용온도를 변화시킨 경우에 부하 특성  
Table 2. Load characteristics when varying short-term allowable temperature

1회선 도체 전류 [A]	1회선 도체 온도 [°C]	고장 발생시 최대허용 전류 [A]	최대허용 정상상태 도체온도 [°C]	단시간 정격 한계이도 도체온도 [°C]	고장 지속 시간 [min]
424.4	59.2	848.8	90.1	86	30
495.2	62.7	990.4	106.3	100	30
539.3	65.2	1078.6	118.2	110	30
579.9	67.7	1159.8	130.4	120	30

한편 그림 6은 한계이도온도가 86[°C]로 비교적 작은 Group II 선로에서 최대허용전류가 고장 시에 흐를 때, 고장지속시간의 변화에 대한 도체온도 특성을 나타낸다. 온도에 대한 과부하율을 계산하면

고장지속시간이 30 및 5[min]인 경우에 각각 100 및 140[%] 정도로 나타난다. 표 2 및 그림 3에서 기술한 것처럼 Group II의 선로는 고장지속시간이 20[min]인 경우, 비상시에 약 106[%]의 과부하 정도를 공급할 수 있었다. 그렇지만 단속시간이 5[min]이면 약 140[%]의 과부하가 가능하고 이 경우에 정상운전 시에도 회선 당 595[A](SLR의 약 70[%])의 전류 공급이 가능해짐으로써 선로 이용율을 높일 수 있다. 이와 같은 해석법을 적용하면 단시간허용온도 100[°C]인 경우에는 선로 이용율은 더욱 증가된다. 예컨대 고장지속시간이 30[min]인 경우에 과부하율이 117[%]이던 것이 5[min]으로 설정하면 167[%]로 증대되므로 정상상태 운전에서 회선 당 495[A](약 58[%] 부하)이던 것이 706[A](약 83[%] 부하)로 최대허용부하율을 증가시킬 수 있다.

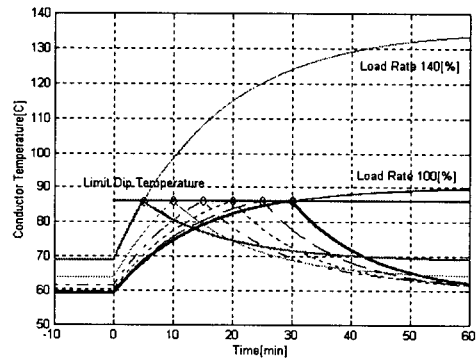


그림 6. 단속시간 변화에 대한 최대허용도체온도  
( $T_{cdip} = 86(^{\circ}C)$ )

Fig. 6. Maximum allowable conductor temperature when varying intermittent time ( $T_{cdip} = 86(^{\circ}C)$ )

그림 7 및 표 3은 단시간허용온도와 지속시간 변화에 의한 과부하율 특성을 나타낸다. ACSR 도체의 연속허용온도는 90[°C]로 규정되었음에도 불구하고, 이도를 설계하는 경우에 도체온도를 75[°C]로 상정하였다. 이 온도는 도체의 연속허용전류의 80[%]의 전류에 해당한다. 154[kV] ACSR 410 도체가 Group II에 속한 것이면 가혹환경에서 이도여유를 고려한다고 하더라도 한계이도온도는 86[°C]에 지나지 않는다. 이러한 사실은 최악의 기상조건, 풍압조건 등

에서는 도체의 온도가 86[°C](808[A]) 이상이면 선로는 지상고 유지에 문제가 발생할 수 있음을 의미한다. 실제로 이러한 가혹한 조건이 발생될 확률은 거의 0이나 선로의 안전성을 위해 이 규정에 맞도록 선로를 운용할 수밖에 없다. 그렇지만 과부하의 지속시간의 선택에 따라 보호시스템을 구성하면 고장지속시간이 30[min]인 경우에는 도체의 연속허용전류까지 흘릴 수 있고 5[min]이라면 대략 140[%]의 과부하에도 선로는 안전한 운용이 가능하다.

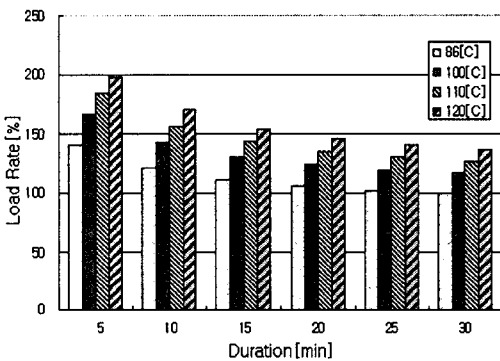


그림 7. 고장지속시간에 의한 부하율 변화  
Fig. 7. Load rate variations for fault duration

표 3. 한계이도온도 및 고장지속시간 변화에 대한 과부하율[%]

Table 3. Overload rate[%] for varying limit dip temperature and fault duration.

한계이도온도 [°C] 고장지속시간 [min]	86	100	110	120
5	140.4	166.6	184.4	198.8
10	121.2	142.5	156.4	170.0
15	111.3	130.5	143.0	154.4
20	105.7	123.7	135.2	145.8
25	102.3	119.6	130.3	140.3
30	100.0	116.8	127.2	136.8

한편 지상고 기준이 강화된 설계기준에 의해 가설된 Group III의 선로는 최악의 조건에서도 현재 단시간허용온도인 100[°C]를 적용하더라도 고장지속시

간 30 및 5[min] 각각에 대해 117 및 167[%]로 과부하율을 현저하게 개선할 수 있다. 특히 과부하 누적시간 등을 고려하여 단시간허용온도를 120[°C]상향 조정할 수 있으며 가혹조건에서 고장지속시간이 30[min] 정도로 선택하는 경우라도 120[°C]에서는 137[%]의 과부하에서 안전한 전력공급이 가능하다. 결론적으로 선형화된 열평형방정식을 사용하여 단시간허용온도와 과부하 지속시간 사이의 관계를 분석함으로써 현재 선로의 단시간정격에 대한 신뢰성을 해석할 수 있다. 또한 이와 같은 해석을 토대로 현재 규정된 2회선 선로의 정상운전상태의 허용부하율이나 비상상태에서의 최대허용전류를 현저하게 증대시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 2회선 송전선로의 비상용량인 단시간정격을 분석하는 방법을 제안하였다. 도체의 온도 특성을 나타내는 열평형방정식을 선형화하여 과부하가 발생하는 동안의 전류 및 온도 특성을 해석하였다. 일반적으로 단시간정격은 도체의 수명과 이도를 고려하여 결정한다. 도체수명에 미치는 단시간 과부하는 고장지속시간의 누적시간으로 환산되므로 이 기간 동안에 허용할 수 있는 도체의 허용온도를 적당하게 선정해야 한다. ACSR 도체는 고장지속시간이 30[min]인 경우에 120[°C]에도 안전한 지상고를 유지할 수 있다. 실제 지상고는 이와 같은 조건에서 설계되지만 1997년 10월 이전에 설계기준은 이도 여유가 작아 단시간정격의 증대효과가 크지 않았다. 반면 그 이후에 건설된 선로는 충분한 지상고 여유가 있음으로써 현재 단시간 허용온도 기준인 100[°C]를 120[°C]로 규정하여도 운용 상 문제가 발생하지 않음을 확인하였다. 따라서 본 해석방법에 의하면 현재 설비의 비상정격의 타당성은 물론, 전력공급의 신뢰성을 높일 수 있는 방안을 강구할 수 있을 것이다.

가혹조건에서의 단시간정격을 검토, 평가함으로써 기존 설비의 과부하율을 증대할 수 있음을 보였다. 그러나 기존과 같은 신뢰성 있는 요소를 사용하면 비상 시 동적송전용량시스템을 운용하는 경우



## 2회선 가공송전선의 단시간정격에 관한 평가방법

에도 단시간정격인 과부하용량을 현저하게 개선할 수 있을 것이다.

본 연구는 2006년도 산업자원부 지원 전력산업연구개발사업의 일환으로 연구되었음. (과제번호 : R-2005-7-331)

### References

- [1] Draft standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors, IEEE Standard P738, 1999.
- [2] J.S. Engelhardt, and S.P. Basu, "Design, installation and field experience with an overhead transmission dynamic line rating system", Proceedings of IEEE, Transmission and Distribution, pp. 366-370, 1996.
- [3] 가공송전선의 전류용량, 일본 전기학회 기술보고 제660호, 1997.
- [4] 가공송전선용 전선 선정기준 - 1210, 한국전력공사, 2003.
- [5] IEEE General principles for rating electric apparatus for short-time, intermittent or varying duty, IEEE Standard 96-1969.
- [6] Working paper on a proposed transmission relay loadability standard, SPCTF of the NERC Planning Committee, Dec. 2005.
- [7] 송전선로 지상고 기준 - 1020, 한국전력공사, 2003.
- [8] V.T. Morgan, "Effect of elevated temperature operation on the tensile strength of overhead conductors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 345-352, Jan. 1996.
- [9] R.D. Findlay, D. Brocilo, and V.T. Morgan, "Sensitivity analysis of aluminum conductor steel reinforced (ACSR) using historical permeability data from a single wire versus stranded steel core permeability data", IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 2, pp. 906-909, 1998.
- [10] 가공선 이도 설계기준 - 1211, 한국전력공사, 2003.
- [11] 이도 설계 프로그램, Tower+, 한국전력공사, 2003.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 김성덕 (金成德)

1951년 10월 1일생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 1988년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1990~1991년 Australia National University 객원교수. 2000년~2001년 미국 Kansas State University 객원교수. 현재 한밭대학교 전기·전자·제어공학부 교수.

#### 손홍관 (孫洪寬)

1962년 3월 21일생. 1985년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1987년 한양대학교 대학원 졸업(석사). 2004년 충남대학교 대학원 졸업(박사). 현재 전기연구원 전력연구단 책임연구원.

#### 장태인 (張太因)

1968년 12월 5일생. 1990년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1994년 한양대학교 대학원 졸업(석사). 1994~1995년 (주)삼성SDS 공공개발팀 근무. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.