

# 간접도체 방식을 이용한 가공송전선의 동적송전용량 추정

## (Dynamic Line Rating Estimation Using Indirect Conductor Method in Overhead Transmission Lines)

김성덕\* · 이승수 · 장태인 · 강지원 · 이동일

(Sung-Duck Kim · Seung-Su Lee · Tae-In Jang · Ji-Won Kang · Dong-Il Lee)

### 요 약

고가공도체의 최대허용전류인 열용량은 일반적으로 IEEE P738 기준에서 주어진 것과 같은 열평형 방정식을 기초로 계산된다. 이 정격은 기온, 풍속, 풍향 및 태양열과 같은 기상조건의 함수로 주어진다. 이러한 기상 파라미터들 중에 풍속은 그 값이 아주 작게 나타날 때 송전용량 결정에 강한 영향을 준다. 따라서 송전용량 모니터시스템에서 사용되는 풍속계 대부분은 낮은 감도와 실속 특성을 가지므로 부정확한 결과가 나타난다.

본 논문에서는 풍속계를 사용하지 않고 가공송전선의 동적송전용량을 결정하기 위한 새로운 방법을 도입한다. 풍속을 2개의 간접도체의 온도로 추정하고 실험을 통하여 추정풍속으로 구한 동적송전용량이 기상모델로 구한 결과와 매우 근접함을 밝혔다.

### Abstract

The thermal rating of an overhead conductor, which is the maximum allowable current, is generally calculated on the basis of heat balance equation found in IEEE P738 standard. This is given as a function of the weather conditions such as air temperature, wind speed, wind direction, and sun heat. Wind speed among such weather parameters is strongly affected on determining the line rating when it appears very low level. Therefore there may occur inaccuracy since most anemometers used in line rating monitor systems may show low resolutions and stall speed performance.

In this paper, we introduce a new methodology for determining the dynamic line rating in overhead transmission lines, without using any anemometer. It was shown that wind speed can be estimated by the temperatures of 2 indirect conductors, and through experimental study, the dynamic line rating obtained by the estimated wind speed was very closely that of weather model.

Key Words : Dynamic Line Rating, Weather Model, Overhead Transmission Lines

\* 주저자 : 한밭대학교 전기·전자·제어공학부교수  
Tel : 042-821-1135, Fax : 042-821-1128

E-mail : sdkim@hanbat.ac.kr  
접수일자 : 2004년 7월 7일  
1차심사 : 2004년 7월 9일  
심사완료 : 2004년 7월 21일

### 1. 서 문

가공송전선의 송전용량은 도체의 최고허용온도로 부터 구해지는 열용량(thermal rating), 즉, 최대허용

전류(maximum allowable current)로 정의된다[1~5]. 전력회사는 송전선로를 설계할 때, 사용 도체의 연성과 이도에 대한 규정 등을 고려하여 최악의 기상조건에서 도체의 정적송전용량(static line rating : SLR)을 결정한다. 따라서, 허용전류는 도체의 어닐링과 인장손실 또는 지상고의 감소를 초래하는 과도한 도체온도 상승에 의하여 발생될 수 있는 위험성을 최소화할 수 있는 한계 값이어야 한다. 그렇지만, ACSR 도체에 대한 허용온도는 50~100[°C]로 하거나 최고기온을 20~40[°C] 등으로 각 전력회사마다 다른 값을 적용하여 운용하기도 한다.

대부분의 전력회사에서는 전력공급의 신뢰성을 위하여 회사에서 규정한 SLR 보다 현저하게 낮은 부하로 운용해 왔다. 따라서 이 SLR을 규정할 때 적용하는 극한 기상조건이 발생할 확률이 거의 없으므로 실제로 선로 이용률은 극히 낮은 상태이었다. 현재 운용되는 선로의 많은 설비가 설계 수명에 도달하기 시작하고, 전력시장의 개방과 구조조정, 전력수급의 급격한 증가 등으로 인하여 설비의 재투자나 신설이 어려워지므로써 전력회사들은 SLR 기준을 다시 검토하기에 이르렀다. 따라서, 일정한 기상요소 기준을 적용해 연중 단일 정격으로 운용해오던 SLR은 실제 기상요소나 선로 데이터를 이용하는 동적송전용량(dynamic line rating : DLR)[6,7]을 적용하기 시작하였다. 이 방식은 도체 주위의 기상요소나 도체의 전류와 도체온도를 모니터링함으로써 실시간으로 허용용량을 계산하여 전력공급 상태에 대한 정확한 정보를 시스템 운용자에게 제공할 수 있다. 허용전류는 기본적으로 기상모델(weather model)을 사용하여 결정되지만 도체온도 모델(conductor temperature model) 및 온도-새그 모델(temperature-sag model) 등도 이용된다.

DLR을 결정하는 가장 간단한 방식은 IEEE Standard F738[4]에서와 같이 도체 주위에 기상요소들을 사용하는 기상모델 방법이다. 이 방식은 도체 주변의 기상 파라미터들의 측정 또는 환산 값으로 허용전류를 구하는 가장 간단한 방법이지만 DLR 결정에 모든 파라미터들이 간접적으로 사용된다. 이와 같은 기상모델의 단점을 보완한 방식이 도체의 전류와 온도를 직접 측정하여 동적송전용량을 구하는 방

식(conductor temperature model)이다. 그렇지만, 이 방법은 선로의 공급전류 값이 작거나 도체온도가 외부기온에 비하여 그다지 높지 않은 경우에는 효율적이지 못하다. 또 다른 방법으로 도체의 장력과 이도의 관계로 선로 전류의 한계를 정하는 장력-이도 모델(tension sag model)도 이용한다. 도체온도를 직접 측정하는 방식이나 장력센서를 이용하는 방식은 선로에 직접 설치, 운용해야 하기 때문에 작업과정, 보수 등이 쉽지 않다. 따라서, 대부분 적용이 용이한 기상모델 방식을 이용하고 있다.

기상모델 방식은 주로 기온, 풍속과 풍향 및 일사량 등 기상요소들을 측정하여 DLR을 계산한다. 일반적으로 DLR은 도체온도 특성과 밀접하게 관계되는데 이 때, 도체온도는 기상 요소 중 풍속, 특히, 낮은 풍속에 따라 심한 온도변화가 나타난다[8,9]. 따라서, 풍속계의 감도, 종류에 따라 DLR 계산값의 신뢰도가 결정된다. 전형적으로 기상관측에 사용되는 컵형 또는 프로펠라식 풍속계는 베어링의 마모, 태풍이나 적설 등에 의한 고장, 저 풍속에서의 失速(stall speed) 등의 문제가 발생한다. 물론, 측정된 기상요소로 DLR을 간접적으로 환산하는 것이므로 일사량이나 강우 등에 대한 도체온도 변화를 정확하게 산출하기는 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 대상 선로와 동일 종류의 도체를 설치하여 사용하는 간접도체 방식을 도입한다. 간접도체 방식은 대상선로와 같은 종류의 도체를 시료로 선정하여 일정 전류가 공급된다는 가정 하에 계산된 열량을 임의로 공급하여 도체온도를 측정하고 그 측정온도로부터 풍속을 추정하여 DLR을 계산한다.

## 2. 기상모델과 풍속의 영향

가공송전선의 SLR은 도체가 대류에 의한 발열과 일사량으로부터의 흡열 및 도체로부터의 방열이 평형된 상태에서 도체의 재료 변화 또는 연성이 허용되는 온도에 도달할 때의 전류로 규정하고 있다. 이 경우에 열평형 방정식은 도체의 주열열과 태양열 입력의 합이 대류열과 방사열의 합과 같다는 조건으로부터 구해진다[1~5].

$$I^2 R_{ac}(T_c) + Q_s = Q_r + Q_c \quad (1)$$

여기서  $R_{ac}(T_c)[\Omega]$ 는 도체의 최고허용온도  $T_c$  [°C]에서 도체의 교류저항이고,  $Q_s[W/mm^2]$ 는 도체가 태양으로부터 흡수하는 열(solar heat gain)이며,  $Q_c$  [W/mm<sup>2</sup>]는 대류에 의한 열방산(convected heat loss),  $Q_r[W/mm^2]$ 은 도체의 열방산(radiated heat loss)을 나타낸다.

일반적으로 SLR은 기상요소의 최악조건을 사용하여 식 (1)을 만족하는 전류로 결정한다. 이 때, 계산조건이나 방식 등은 IEEE[4], CIGRE[1], IEC[2] 등 각 기준마다 약간 차이가 있지만, 기상요소, 도체 온도 사이의 특성은 IEEE 기준에서 잘 정립되어 있으므로 본 논문에서는 지면 상 구체적으로 기술하지 않으며 주로 풍속 특성 분석에 초점을 두었다. 또한, 본 연구에서의 해석이나 실험 결과를 구체적으로 설명하기 위하여 410[mm] 도체를 예로 사용하였다.

풍속에 직접적인 영향을 나타내는 파라미터는 식 (1)에서 대류에 의한 열방산,  $Q_c$ 뿐이다. 도체에 대한 열평형 상태에서  $Q_c$ 는 무풍영역,  $Q_{CN}$  저 풍속 영역,  $Q_{CF1}$  및 고 풍속영역,  $Q_{CF2}$ 에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{CN} = 0.0205 \cdot \rho_f^{0.5} \cdot D^{0.75} \cdot (T_c - T_a)^{1.25} \quad (2)$$

$$Q_{CF1} = \left\{ 1.01 + 0.0372 \left( \frac{D \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right\} \cdot k_f (T_c - T_a) \quad (3)$$

$$Q_{CF2} = 0.0119 \left( \frac{D \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \cdot k_f (T_c - T_a) \quad (4)$$

여기서  $\rho_f$ ,  $k_f$  및  $\mu_f$ 는 각각 공기에 대한 밀도, 열전도율 및 점도를 나타내며  $T_c$ 는 대기기온이다. 이 때,  $K_\phi$ 를 도체와 풍향사 사이의 보정계수라 할 때  $Q_c$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$Q_c = \max(Q_{CN}, K_\phi Q_{CF1}, K_\phi Q_{CF2}) \quad (5)$$

풍속은 대기 중에 대류 운동을 지배하므로 주위기온보다 도체온도에 더 큰 영향을 미친다. 풍속이 적으면 도체에서의 열 발산은 감소하기 때문에, 다른 조건이 일정하다고 가정하면 무풍인 경우에 도체온도는 최고가 된다. 따라서, 도체의 허용온도에 나타내는 허용전류 값은 최저가 된다. 전형적으로 SLR을 결정할 때 최소풍속 조건은 최대기온과 최대일사

량 상태에서 IEEE P738[4]이나 KEPCO 설계기준 1210[5]에서 모두  $V_w=0.5[m/sec]$ 로 설정하였다.

ACSR 410[mm] 도체의 SLR은 규정된 풍속 0.5[m/sec]에서 848[A]이다. 그림 1은 2001년 1년 동안 대전지방기상청에서 측정된 풍속[10]의 분포로, SLR 규정 풍속인 0.5[m/sec] 이하가 14.43[%] 정도로 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 실제 날씨를 관측하여 DLR을 계산하면 그 값이 그다지 크지 않게 된다. 만약, 기온  $T_a=40[°C]$ 에서 풍속이  $V_w=0.0[m/sec]$ 이면 허용전류는  $I_c=648.5[A]$ 로 SLR에 대하여 23.5[%] 감소된 값을 나타낸다. 문헌[4]에 따르면 최악조건에서 풍속이 0.5[m/sec] 이하가 될 확률은 거의 없다고 보고 되어있지만, DLR에서는 실시간으로 측정된 풍속을 사용해야 하기 때문에 낮은 영역의 풍속 특성은 매우 중요하다.

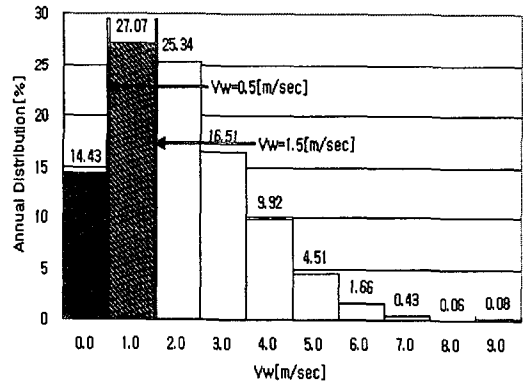


그림 1. 풍속 분포  
Fig. 1. Distribution of wind speed

한편, ACSR 410[mm] 도체에 대하여 풍속 변화에 의한 대류 열을 구하면 그림 2와 같다. 이 결과에서 보면  $V_w=0.1\sim 0.16[m/sec]$ 가 무풍 영역으로, 이 범위에서는 일정한 대류열이 발생하는 자연대류 현상이 나타난다. 저 풍속 영역은  $V_w=0.16\sim 1.32[m/sec]$  사이로 대류열의 증가율이 크게 되고 그 보다 큰 고 풍속 영역에서는 대류열 증가율은 다소 감소되면서 바람에 의해 강제대류가 나타나게 된다. 이러한 영역들은 도체종류, 기상요소나 위도나 고도와 같은 지형적 조건에 의해 그 경계가 약간 차이가 난다.

## 간접도계 방식을 이용한 가공송전선의 동적송전용량 추정

무풍의 한계 영역인 0.16[m/sec]와 SLR을 결정하는 풍속조건인 0.5[m/sec]의 편차는 불과 0.34[m/sec]이지만 기상관측용으로 사용하는 기계식 풍속계의 최소감도에 지나지 않는다. 따라서, 0.5[m/sec] 정도나 그 이하의 풍속 값은 기계식 풍속계의 threshold 영역을 벗어나지 못한다. 문제는 이 정도의 작은 풍속 범위에서도 DLR은 20[%] 이상 변동하게 된다는 점이다. 일반적으로 DLR의 채용이 기존 선로의 허용전류를 약 15[%] 정도 증대시키는데 효율적으로 사용하는 방법이지만, 풍속의 작은 편차가 DLR을 20[%] 이상 변화시키므로 저 풍속을 정확하게 측정할 수 있어야 한다.

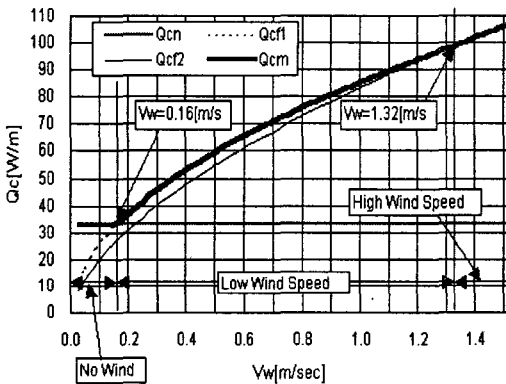


그림 2. 풍속과 대류열의 특성  
Fig. 2. Properties of wind speed and convective heat

### 3. 의사풍속의 도입

도체종류와 규격, 위도와 고도 등이 알려지면  $Q_c$ 는 무풍 이상의 범위에서는 식 (2) 및 (3)에 의해 기온 이상으로 상승하는 도체온도에 비례한다. 즉,  $Q_c$ 는 저 풍속이나 고 풍속 영역에서는 도체와 기온의 온도차, 즉,  $T_c - T_a$ 와 풍속  $V_w$ 의 함수 형태로 표현할 수 있다. 물론, 무풍 영역에서  $Q_c$ 는 오직  $T_c - T_a$ 에 비례하지만 풍속에는 무관하게 주어진다. 따라서, 저 풍속 이상의 영역에 대하여  $Q_c$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_c = f_c(T_c - T_a, V_w) \quad (6)$$

한편, 방사에 의한 열 방산은

$$Q_r = 0.0178D\epsilon \left[ \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

이다. 여기서  $Q_r$  역시 도체온도  $T_c$ , 기온  $T_a$  및 방사율(emission factor)  $\epsilon$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$Q_r = f_r(T_c, T_a, \epsilon) \quad (8)$$

도체가 태양으로부터 흡수되는 열은

$$Q_s = \alpha \cdot q_s \cdot \sin\theta \cdot A' \quad (9)$$

이고 여기서  $\alpha$ 는 흡수계수(absorption factor)로 0.23~0.91 정도이며,  $q_s$ 는 태양으로 받는 일사량으로 도체의 위치, 연일수나 태양시각, 설치지역의 오염도 등과 도체의 투영단면적  $A'$ 에 의해 결정된다. 그러나 식 (9)에서 보면  $Q_s$ 는 단지 흡수율  $\alpha$ 의 함수가 됨을 알 수 있다.

결국, 식 (6), (8) 및 식 (9)의 관계를 열평형 방정식 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I^2 R_{ac}(T_c) + f_s(\alpha) = f_c(T_c - T_a, V_w) + f_r(T_c, T_a, \epsilon) \quad (10)$$

IEEE P738에서와 같이  $\alpha = \epsilon$ 라 하고 그 값을 안다 고 가정할 때 전류  $I$ 를 결정하기 위해서는  $T_w$ ,  $T_c$  및  $V_w$ 를 알아야 한다. 따라서 이러한 파라미터들은 센서로 측정하거나 또는 다른 방식으로 추정하여 DLR 계산에 이용할 수 있어야 한다.

식 (10)에서  $I^2 R_{ac}(T_c)$ 는 도체온도가  $T_c$ 인 경우에 흐르는 도체전류에 의해 발생하는 주열열을 나타낸다. 도체의 단위 길이 당 전력  $P$ [W/m]가 공급될 때 이 전력에 의해 발생하는 주열열로 도체의 온도가 상승한다. 이와 같이 일정한 주열열이 발생하도록 제작한 시험도체를 가열도체(heating conductor)라 하고 이 온도를  $T_{sh}$ 라 가정한다. 이에 대해 전류가 흐르지 않는 도체를 비가열도체(non-heating conductor)라 하고 이 도체의 온도를  $T_s$ 라 한다. 시험도체의 흡수율과 방사율은  $\alpha_s = \epsilon_s$ 라 하고 실제 도체에 대한 흡수율과 방사율은  $\alpha_a = \epsilon_a$ 라 하고 이

값들은 알고 있다고 한다.

일사량이 없는 야간에 비가열 도체온도는 기온과 같으므로 식 (10)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I^2 R_{ac}(T_{sh}) = f_c(T_{sh} - T_s, V_w) + f_r(T_{sh}, T_s) \quad (11)$$

이 때 가열도체는 공급전력에 의하여 발생하는 주울열에 의해 온도가 상승하는 반면, 풍속에 의해 냉각된다. 그러나, 주간에서는 가열도체는 물론 비가열도체도 태양열의 입사에 의해 온도가 상승한다. 2개의 도체는 모두 동일한 조건에서 일사량에 의해 온도가 상승할 것이므로 2 도체의 온도 차,  $T_{sh} - T_s$ 는 순수하게  $Q_s$ 에 의해 상승된 온도를 나타낸다. 이 경우에 식 (11)은

$$I^2 R_{ac}(T_{sh}) + f_s(\alpha) = f_c(T_{sh} - T_s, V_w) + f_r(T_{sh}, T_s) \quad (12)$$

비가열도체에는 전류가 흐르지 않으므로  $I^2 R(T_s) = 0$ 이고 도체온도는  $T_s$ 이므로 식 (12)의 열평형 방정식은

$$f_s(\alpha) = f_c(T_s - T_a, V_w) + f_r(T_s, T_a) \quad (13)$$

로 표현된다. 여기서 일사량에 의해 나타나는 도체 온도,  $T_s$ 는 무부하 도체온도로 오로지 태양열에 의한 입사열,  $Q_s$  때문에 기온  $T_a$  이상으로 상승된 값을 나타낸다. 식 (13)은 비가열도체에 대한 열평형 방정식으로  $Q_s$ 의 증가식을 나타낸다. 물론, 이 식의 우변에는 기온과 풍속이 미지이므로 단순히 식 (13)을 사용하여  $Q_s$ 를 구할 수 없다. 다만, 식 (13)은 순수한 태양열에 의한 항을 나타낸다. 여기서 주목할 것은 식 (13)에서 기온  $T_a$ 가 도체온도  $T_s$ 와 같은 경우에는  $Q_s$ 는 0이 된다는 사실이다.

한편, 전류가 흐르는 가열도체에서 주울열  $I^2 R$ 이 발생한다면 열 평형 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$I^2 R_{ac}(T_{sh}) + f_s(\alpha) = f_c(T_{sh} - T_a, V_w) + f_r(T_{sh}, T_a) \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)를 비교해 보면 우변항의 증가분은 좌변에  $I^2 R_{ac}(T_{sh})$ 에 의한 것으로, 이 경우에도 태양열에 의한  $f_s(\alpha)$ 는 변하지 않으며, 이 값은 식 (13)에서는 비가열도체, 식 (14)에서는 가열도체 주위의 태양열에 의한 것으로 동일한 값이다. 따라서 식 (14)의  $f_s(\alpha)$ 에 식 (13)을 대입하여 정리하면 다

음 관계가 얻어진다.

$$I^2 R_{ac}(T_{sh}) = f_c(T_{sh} - T_s, V_w) + f_r(T_{sh}, T_s) \quad (15)$$

식 (15)은 기본 열평형 방정식 식 (6)에서 기온,  $T_a$  대신에  $T_s$ 를, 도체허용온도  $T_c$  대신에  $T_{sh}$ 로 대치하고 태양열  $f_s(\alpha)$ 를 0으로 가정한 수식이 된다. 따라서,  $T_s$ 를 사용하면, 기온과 태양열 입력을 측정하여 대입한 결과와 동일하다.

2개 시험도체온도,  $T_s$  및  $T_{sh}$ 를 측정하고 가열도체의  $P$ 를 알고 있다면 식 (15)에서 대류

$$f_c(T_{sh} - T_s, V_w) = P - f_r(T_{sh}, T_s) \quad (16)$$

로 구할 수 있다. 식 (16)에서 보면,  $P$ ,  $T_s$  및  $T_{sh}$ 가 주어지면 좌변의  $f_c = Q_c$ 를 구할 수 있고 따라서, 풍속 영역에 대해 다르게 주어진 식 (2)~(4)로부터 풍속  $V_w$ 를 추정할 수 있다. 이 풍속을 의사풍속(pseudo wind speed) 또는 유효풍속(effective wind speed)이라 한다.

의사풍속은 도체의 냉각효과를 나타내는 풍속과 풍향각에 관계되어 결정되는 등가풍속 값으로 실제 풍속과는 다른 값이다. 도체의 정격 측면에서 보면 어떤 각도의 풍속과 다른 각도의 또 다른 풍속과 등가될 수 있다. 예컨대, 어떤 도체에 대하여 수직인 0.5[m/sec]의 풍속은 도체와 평행인 풍속 3.0[m/sec]와 유사한 냉각효과를 나타내고 이 경우에 정격은 같게 계산됨을 의미한다. 전형적으로 유효풍속은 도체에 수직으로 계산되어지고 이러한 방식은 부수적인 기상 분석에도 유용하게 이용된다.

의사풍속을  $\hat{V}_w$ 라 하고 도체의 최고허용온도를  $T_{max}$ 라 할 때 DLR은 식 (15)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{DLR} = \sqrt{\frac{f_c(T_{max} - T_s, \hat{V}_w) + f_r(T_{max}, T_s)}{R_{ac}(T_{max})}} \quad (17)$$

결국, 추정풍속과 비가열도체의 측정온도로부터 동적허용전류를 결정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 시험도체

3장에서는 비가열도체와 가열도체 등 2개의 시험도체온도와 가열도체에 일정한 전력  $P$ 를 공급한다

는 가정 하에 대상 도체의 DLR을 추정할 수 있음을 밝혔다. 따라서, 이 방식을 적용하기 위하여 비가열 도체와 가열도체 등 2개의 시험도체를 적당하게 설계, 제작해야 한다. 시험도체들은 측정선로와 가까운 위치에 대상선로와 동일한 방향으로 위치시킨다. 시험도체들은 가급적 실제 선로의 도체와 동일한 종류와 규격이어야 하며 공급전력에 의한 가열효과나 풍속에 의한 냉각효과를 고려하여 길이를 충분히 긴 것으로 제작해야 한다. 또한, 설치할 때, 2개의 도체는 바람이나 햇빛에 서로 간섭받지 않도록 충분한 간격을 갖도록 해야 한다. 시험도체는 선로의 도체와 동일한 재질, 직경, 열용량과 방사율이 거의 같도록 제조되어야 한다. 따라서, 히터의 설치나 온도 센서의 부착 등에 주의를 하여 제작하여야 한다. 시험도체는 재질과 직경 등을 동일한 것으로 선택할 수 있지만 측정 대상선로와 흡수율, 방사율과 가급적 유사하게 제조하거나 또는 시험도체와 대상 선로의 흡수율 값을 정확하게 알고 있어야 한다.

비가열도체는 전류가 흐르지 않는 도체온도를 측정하는데 사용하고 일사량이 온도 상승에 미치는 효과를 조사하는데 사용한다. 야간에는 이 비가열도체 온도가 기온과 같도록 방사효과 등을 고려하여 측정치를 교정하여 사용한다. 주간에는 비가열 도체온도는 태양열 입력으로 기온 이상으로 상승하며 이때 이 값도 풍속의 영향도 받는다.

가열도체에는 열선을 사용하여 도체의 일정 전류에 대응되는 주열을 공급한다. 이 때, 도체에 공급되는 전력은 가급적 큰 것이 온도를 측정하여 이용할 때 양호한 측정감도를 나타내지만 원격지 측정 등을 고려하여 적당한 값으로 선택하여야 한다. 가열도체온도가 기온보다 너무 낮으면 냉각효과나 풍속, 특히 저 풍속 효과를 추정하는 경우에 감도가 낮을 것으로 추정된다. 따라서, 가급적 가열도체온도를 높일 필요가 있다. 다만, 이 시스템을 태양전지 등으로 운영하는 경우에 24시간 소비되는 전력 공급이 문제가 된다. 만약, 상시 전원을 이용할 수 있는 장소이면 소비전력은 문제되지 않는다.

가열도체에 히터를 설치하면 도체에서 발생하는 전체 열량은 히터의 소비전력으로 나타낼 수 있지만 히터는 구조상 일정한 길이의 도체 내에서 일부분에

장착되므로 도체는 국부가열 상태가 될 것이다. 또한 이러한 경우에는 히터에서 발생된 열이 시험도체 전체에 골고루 전달되지 않아 온도분포가 일정하지 않게 된다. 물론, 도체온도를 측정하기 위한 센서의 위치마다 출력이 다르게 될 것으로 추정된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 가열도체는 히터로 가열할 것이 아니라 도체 양단에 일정한 전류와 전압을 공급하면 이 전류에 의해 도체에는 위치에 거의 무관하게 평균적인 온도분포를 나타내게 될 것이다. 따라서 비가열 도체에서의 유사한 방법으로 센서를 도체 내부에 설치하여 온도를 측정하면 된다.

### 5. 시험 결과 분석

간접도체 방식으로 풍속을 추정하여 DLR을 계산하기 위하여 앞의 4장에서 기술한 것처럼 시험도체를 제작하였다. 해당도체에 일정한 전류가 흐르는 경우와 같은 열량을 공급하기 위하여 간접도체에 열선으로 전력을 공급하였다. 간접도체의 전력과 전류를 설정하기 위하여, ACSR 410[mm<sup>2</sup>] 도체에 대하여 기온, 무풍 및 야간을 가정하여 전류-열량 관계를 계산하였다. 열량을 공급하기 위한 열선은 길이가 50 [cm]인 도체 표면에 감고 온도는 강심 1개를 빼고 유사한 직경의 PT100 온도센서를 스테인리스 관 형태로 삽입하여 온도를 측정하였다. 이 때, 열원으로 9[W/m]의 히터를 사용하였으나 장착과 열전달 구조 등에 의해 6[W/m] 정도가 도체에 유효열량을 공급하는 효과가 나타났음을 확인하였다. 이 열량은 동일도체에 전류가  $I_c=285[A]$  정도 흐를 때 발생하는 열량이다.

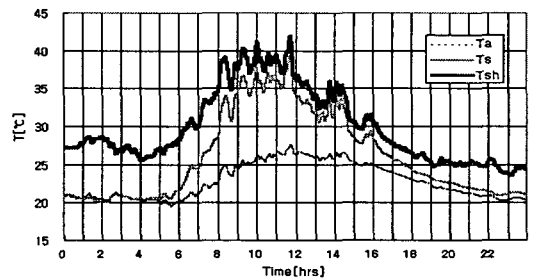


그림 3. 기온 및 비가열도체와 가열도체의 측정온도  
Fig. 3. Ambient temperature and Measured temperatures for non-heating and heating conductor

제작된 가열도체와 비가열도체를 기온, 풍속 및 일사량을 측정하는 기상관측시스템과 같이 야외에 설치하여 실험하였다. 모든 파라미터는 1[sec]로 샘플링 하여 1분 평균값으로 데이터 로거(data logger)를 통해 실시간으로 측정하였다. 시험도체는 사용 후 수거된 전선으로 흡수율을 0.8로 가정하였다. 그림 3은 기온 및 2개 시험도체의 실측 온도를 나타낸다.

그림 3에서 보면 야간에는 비가열도체 측정온도와 측정기온이 풍속에 관계없이 거의 동일한 값을 나타내고 가열도체와 기온 사이에는 대략 4~6.3[°C]의 온도차가 나타난다. 주간에는 비가열도체는 직달 일사량에 의해 온도가 상승되지만, 가열도체와 비가열도체는 모두 바람에 의하여 냉각된다. 일반적으로 풍속에 의한 냉각효과는 비가열도체에 비하여 가열도체가 큰 것을 그림 3에서 알 수 있다.

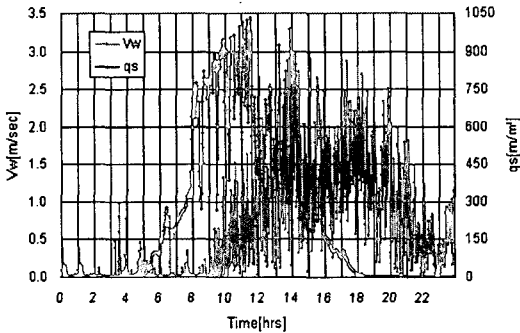


그림 4. 측정 풍속 및 일사량  
Fig. 4. Measured wind speed and sun heat radiation

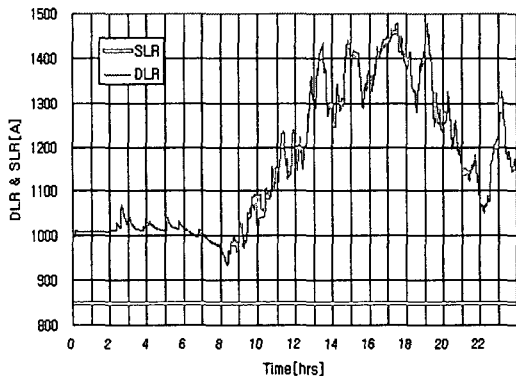


그림 5. SLR 및 기상요소로 추정된 DLR  
Fig. 5. Estimated DLR using SLR and weather elements

그림 4는 측정 풍속과 일사량으로 풍속은 야간에 비하여 기온이 높아지는 주간이 높으며 따라서 저 풍속 영향이 많은 허용전류는 주간보다는 야간 시간대에서 보다 높게 된다. 직달 일사량은 대기 중에 구름에 의해 영향을 받으므로 이 영향이 그대로 온도 특성에 전달되는 것을 확인할 수 있다.

기온, 풍속 및 일사량의 측정치를 사용하여 기상 모델로 구한 DLR 특성을 그림 6에서 보인다. 이 결과에서 알 수 있듯이, 대부분의 시간에서 DLR은 SLR보다 높으며, 주간에 비해 0~8[시] 사이가 비교적 낮은 값으로 나타난다. 이러한 결과는 기상모델 방식을 사용하는 경우에 나타나는 일반적인 경향과 일치한다.

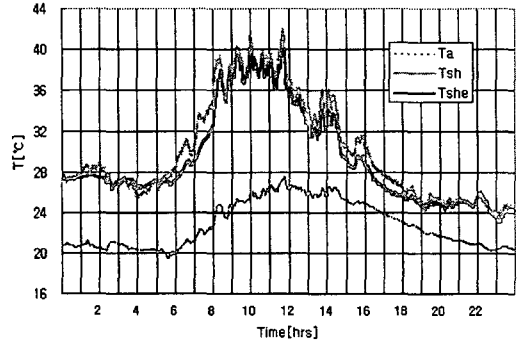


그림 6. 가열도체의 측정온도와 추정온도  
Fig. 6. Measured and estimated temperatures for heating conductor

주어진 조건에서 측정된 기상요소들로부터 비가열도체와 가열도체의 도체온도를 산출할 수 있다. 그림 6은 가열도체의 실측 온도,  $T_{sh}$ 와 기상요소로 추정한 온도,  $T_{she}$ 를 나타낸다. 이 결과에서 측정된 도체온도가 추정온도보다 약간 낮은 값을 나타냈지만, 그 편차가 크지 않으며 특히, 그 경향은 아주 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 7에서 보여준 비가열도체에 대해서도 측정치,  $T_s$ 와 추정온도,  $T_{se}$  사이에 유사한 특성을 나타낸다. 이 때 수치모델과 실측 값 사이의 편차는 기상모델을 사용할 때, 흡수율, 지형적 조건 설정치 등과 센서의 구조나 위치, 열원의 구성 등에 의해 발생하는 것이다. 그렇지만, 앞에서 사용한 조건들에 대한 불확실성이 일부 존재한다고 하더라도 추정온도는 가열 및 비가열도

## 간접도체 방식을 이용한 가공송전선의 동적송전용량 추정

체의 측정온도와 거의 일치한다. 결국, 기상요소 대신에 가열 및 비가열 도체의 실측 온도를 이용하여 도체의 DLR을 계산할 수 있다.

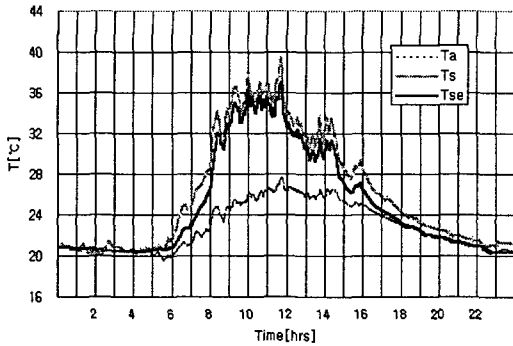


그림 7. 비가열도체의 측정온도와 추정온도  
Fig. 7. Measured and estimated temperatures for heating conductor

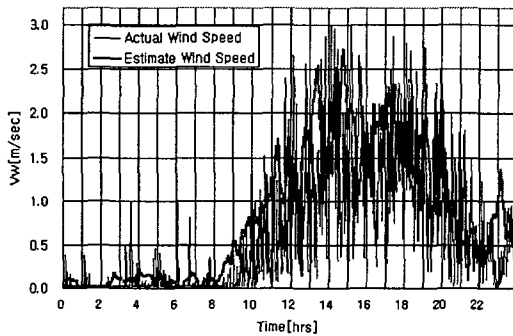


그림 8. 측정 풍속과 추정 풍속  
Fig. 8. Measured and estimated wind speeds

앞에서 밝힌 바와 같이, 가열 및 비가열도체온도로 DLR을 추정하는 방식은 기온, 풍속, 풍향 및 일사량 등의 측정치를 사용하여 구하는 결과와 거의 일치한다. 이를 확인하기 위하여 간접도체 방식에 대한 3장의 알고리즘으로 의사풍속을 추정하고 이 값을 이용하여 DLR을 구하였다. 그림 8은 풍속계로 측정된 풍속과 추정된 의사풍속 특성을 나타낸다. 이 결과에서 보면, 추정된 풍속은 실측된 풍속 값에 거의 일치하는 값으로 계산되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 의사풍속은 실제 풍속과 일사량 등 다른 기상요소들의 영향을 모두 나타낸 것이지만 그 결과는 실제 풍속 값의 특징이 그대로 유지한다. 다시 말해서, 의사풍속 값은 주로 풍속의 경향과 그 크기에

종속된 값으로 결정되는 것이다.

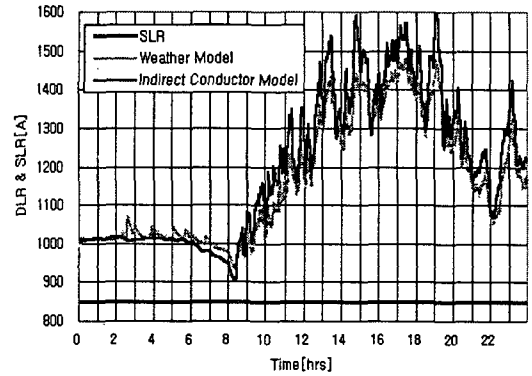


그림 9. 추정 허용전류  
Fig. 9. Estimated allowable current

그림 9는 기상모델 방식을 사용하여 기온, 풍속 및 일사량 측정치로 구한 DLR과 추정된 의사풍속으로 계산한 DLR 특성을 보인다. 이 결과들에서 알 수 있듯이, 가열 및 비가열도체인 간접도체온도 값을 측정하여 기상요소들을 측정하지 않고서도 DLR을 추정할 수 있다. 특히, DLR 모니터링 시스템에서 풍속계에 고유하게 나타나는 저 풍속에 대한 저 감도나 실속효과에 대한 문제가 발생하지 않는 효율적인 방식임을 알 수 있다. 이와 같은 특징들 이외에도 간접도체 방식은 기상모델에서 고려하지 못했던 경우, 적설이나 안개 등에 대한 영향이 직접 도체온도 변화로 나타난다. 물론, 그림 8-9의 결과는 도체를 가열할 경우에 열원의 구성, 센서의 위치, 흡수율의 선정, 열량과 대응 도체전류 관계 등의 정확한 모델링과 각 요소들 사이의 열적 평형에 미치는 효과에 대한 특성을 실험하거나 분석하여 필요한 경우에 보정 계수나 요소하중을 설계해야 한다.

## 6. 결 론

송전선로 도체의 동적송전용량은 선로의 기상이나 도체온도 또는 장력 등을 실시간으로 모니터링하여 도체에 흘릴 수 있는 최대전류 값이다. 동적송전용량을 결정하는 방식들 대부분은 기상모니터링 시스템을 기본적으로 사용하며, 이 때, 풍속의 측정값도에 따라 계산 결과의 신뢰성이 결정된다. 본 연구



에서는 측정값도가 낮을 뿐만 아니라 失速 영역이 나타나는 풍속계를 사용하지 않고 도체의 허용전류를 산정하는 간접도체 방식을 도입하였다. 특정한 전류에 대한 열을 발생시키는 가열도체와 전류가 흐르지 않는 도체를 제작하고 그 온도를 측정하였다. 측정 온도로부터 실제 선로의 열평형 방정식의 풍속을 환산하는 방안을 제시하였다. 간접도체로 측정된 온도로 풍속을 추정하였고 이 의사풍속을 사용하여 DLR을 계산하였다. 그 결과, 풍속계의 문제를 해결하면서도 신뢰성 있는 DLR 값을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

\* 본 연구는 2002년도 산업자원부 지원 전력산업연구 개발사업의 일환으로 연구되었음.

### References

- (1) The thermal behavior of overhead conductor, CIGRE WG22-12, Electra, No. 144, 1992.
- (2) Overhead electrical conductors calculation methods for stranded bare conductors, IEC-1957 First Edition Technical Report-Type 3, 1995.
- (3) Ampacity of Transmission Lines, Report no. 660 in JEE, 1997.
- (4) Draft standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors, IEEE Standard P738, 1999.
- (5) Enactment, Revision and Supplement of Transmission Line design Standards, KEPRI, TR.00PJ09.J22001.319, 2001.5.
- (6) D.A. Douglass, D.C. Lawry, A.A. Edris, and E.C. Bascom, "Dynamic thermal ratings realize circuit load limits", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 13, No. 1, pp. 38-44, 2000.
- (7) T.O. Seppa, "Increasing transmission capacity by real time monitoring", 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, pp. 1208-1211, 2002.
- (8) T. Seppa, "Closure of the Panel on "Selection of Weather Parameters for Overhead Line Ratings"", IEEE PES Meeting, Denver, June 8, 2004.
- (9) D. Douglass, "Wind Speed for Line Ratings Variation with Time, Sheltering & Instrumentation", IEEE PES Meeting, Denver, June 8, 2004.
- (10) Weather Stations and AWS Monitor DB in KMA, 2001.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 김성덕 (金成德)

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

#### 이승수 (李承秀)

1978년 10월 6일생. 2004년 한밭대학교 전자공학과 졸업. 현재 한밭대학교 전자공학과 대학원 재학.

#### 장태인 (張太因)

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

#### 강지원 (姜地原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1992년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

#### 이동일 (李東一)

1958년 3월 15일생. 1979년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1983년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). IEEE Member, CIGRE B2(가공송전) 한국대표. 대한전기학회 기술위원, 편집위원. 현재 한전전력연구원 계통연구실 송전기술그룹 그룹장.