

**간접도체 방식에 의한 가공선 동적허용전류 추정**

장태인\*, 강지원, 홍동석, 이성두, 이동일, 민병욱  
한국전력공사

**A Study on Estimation of Dynamic Line Rating Using the Indirect Conductor Method**

T.I.Jang\*, J.W.Kang, D.S.Hong, S.D.Lee, D.I.Lee, B.Y.Min  
KEPCO

**Abstract** - 선로의 DLR을 추정하는 방식 중에서 간접도체 방식은 시험도체가 선로의 도체와 유사한 환경에 직접 노출되어 있어서 일사량, 풍속, 풍향 등 측정감도가 낮은 요소들을 직접 측정하여 사용하지 않아도 이들의 종합적인 효과를 반영할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 간접도체 방식에 의한 DLR 추정 알고리즘을 보이고 가열도체와 비가열도체를 사용한 실험을 통하여, 추정 풍속 및 DLR 산정결과가 실측 풍속 및 기상요소로 추정한 값들과 거의 일치함을 보임으로써 DLR 산정 방식으로서 간접도체 이용의 타당성을 제시하였다.

**1. 서 론**

일반적으로 가공선 도체의 DLR을 산정하기 위하여 사용되는 선로 모니터링 시스템에는 기상요소, 장력, 이도, 도체온도 모니터링 시스템 등이 있다. 이들 방식은 각각 고유의 장단점이 있으므로, 측정값의 정확도, 비용, 설치환경 등 다양한 조건들을 검토해야 한다. 간접도체 방식은 대상선로와 같은 종류의 도체를 시료로 선정하여 일정 전류가 공급된다는 가정 하에 계산된 열량을 임의로 공급하여 도체온도를 측정하여 이용하는 방식을 이용한다[1]. 일반적으로 기상과 지형적 조건 및 전류에 의한 열량은 IEEE P738의 기상모델에서 구할 수 있다[2,3]. 물론, 이 간접도체 방식도 앞의 여러 방식들에 비하여 몇 가지 단점을 갖고 있지만 기상시스템에서의 풍속계 문제, 선로의 휴전 문제, 시스템의 비용 문제에 대해 비교적 자유로울 수 있으며, 설치, 운용 및 보수 등이 간편하고 특히, 가열된 도체와 유사한 환경에 직접 노출되어 있으므로 일사량, 풍속, 풍향 등 측정감도가 낮은 요소들을 직접 측정하여 사용하지 않아도 이들의 종합적인 효과를 반영할 수 있다. 본 논문에서는 이 간접도체 방식에 의한 DLR 추정 알고리즘을 제시하고 가열도체와 비가열도체를 사용한 실험 및 분석을 통하여 그 타당성을 검토하였다.

**2. 본 론**

**2.1 시험도체의 설계**

간접도체방식의 측정시스템에서는 비가열도체와 가열도체 등 2개의 시험도체를 적당하게 설계해야 한다. 비가열도체는 전류가 흐르지 않는 도체의 온도를 측정하는데 사용하고 일사량이 온도상승에 미치는 효과를 조사하는데 사용한다. 가열도체에는 열선을 사용하여 도체의 일정 전류에 대응되는 주열열을 공급한다. 이 때, 도체에 공급되는 전력은 가급적 크게 하는 것이 온도를 측정할 때 양호한 측정감도를 나타낸다. 가열도체의 온도가 기온보다 너무 낮으면 냉각효과나 풍속, 특히 저풍속 효과를 추정하는 경우에 감도가 낮을 것으로 추정되므로 가급적 가열도체의 온도를 높일 필요가 있다.

**2.2 간접도체 방식을 이용한 DLR 추정 알고리즘**

KEPCO 설계기준에 규정된 기상모델에 관한 수식과 간접도체 방식을 채용하는 경우에 적용되는 수식[4]들을 토대로 다음과 같은 과정으로 DLR을 구한다.

①  $Q_r$ (방산에 의한 열방산)의 계산

$$Q_r = 0.138 D_s \epsilon_s \left[ \left( \frac{T_{sh} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_s + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (1)$$

②  $Q_c$ (대류에 의한 열방산)의 계산

$$Q_c = P - Q_r \quad (2)$$

③  $V_w$ (풍속)의 추정

$$Q_{CN} = 0.0205 \cdot \rho_f^{0.5} \cdot D_s^{0.75} \cdot (T_{sh} - T_s)^{1.25} \quad (3)$$

$$Q_{CF1} = \{ 1.01 + 0.0372 \left( \frac{D_s \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \} \cdot k_f (T_{sh} - T_s) \quad (4)$$

$$Q_{CF2} = 0.0119 \left( \frac{D_s \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \cdot k_f (T_{sh} - T_s) \quad (5)$$

먼저, 식 (4)를 사용하여 의사풍속  $\hat{V}_w$ 를 계산한 다음 이 값을 식 (5)에 대입하여,

$$Q_{CO} = \max(Q_{CN}, K_\phi Q_{CF1}, K_\phi Q_{CF2}) \quad (6)$$

에서  $Q_{CO} = K_\phi Q_{CF1}$ 이면 계산된 풍속  $\hat{V}_w$ 을 그대로 사용하고  $Q_{CO} = K_\phi Q_{CF2}$ 이면 풍속은 식 (6)으로 다시 구한다. 또한,  $Q_{CO} = Q_{CN}$ 이면  $\hat{V}_w = 0$ 으로 가정한다. 이렇게 구한 유효풍속  $V_w$ 와 도체의 최대허용온도  $T_{max} = 90 [^\circ C]$  및 실제 선로의  $D_a$  및  $\epsilon_a$ 를 적용하여  $Q_c(T_{max}, T_s, \hat{V}_w)$  및  $Q_r(T_{max}, T_s)$ 을 계산하고 다음 식으로 DLR을 결정한다.

$$I_{DLR} = \sqrt{\frac{Q_c(T_{max}, T_s, \hat{V}_w) + Q_r(T_{max}, T_s)}{R(T_{max})}} \quad (7)$$

여기서,  $D_s, \epsilon_s$  : 실제 선로의 직경 및 방사율

$T_{sh}, T_s$  : 가열 도체 및 비가열 도체의 측정온도

$P$  : 가열도체의 공급전력

$Q_{CN}, Q_{CF1}, Q_{CF2}$  : 무풍영역, 저풍속영역, 고풍속 영역의 대류에 의한 열방산

$K_\phi$  : 도체와 풍향각 사이의 보정계수

$\rho_f$  : 공기밀도,  $k_f$  : 열전도율

**2.3 간접도체의 실험 및 분석**

해당도체에 일정한 전류가 흐르는 경우와 같은 열량을 공급하기 위하여 간접도체에 열선으로 전력을 공급하였다. 간접도체의 열량과 전류를 설정하기 위하여, ACSR

410mm<sup>2</sup> 도체에 대하여 기온  $T_a=20[^\circ\text{C}]$ , 무풍 및 야간을 가정하여 구한 전류-열량 관계를 이용하였다. 일반적으로 열원의 구성과 온도측정 위치 설계에 대한 구체적인 정량화나 교정과정이 필요하지만 본 실험에서는 그림 1을 토대로 실험하고 그 특성만 분석하였다. 열량을 공급하기 위한 열선은 길이가 50[cm]인 도체 표면에 감고 온도는 강심측 내부에 PT100 온도센서로 측정하였다. 이때, 열원은 소비전력을  $P=18[\text{W}]$  정도로 하였지만, 열원의 장착과 열전달 구조 등으로 인하여 6[W/m] 정도가 도체에 유효열량을 공급하는 효과가 나타났고, 그림 1에 의하여 이 열량은 동일도체에 전류가  $I_c=273[\text{A}]$  정도 흐를 때 발생하는 열량으로 추정되었다. 이 때 도체는 기온보다 대략 7.5[ $^\circ\text{C}$ ] 높은 것으로 계산되었다.

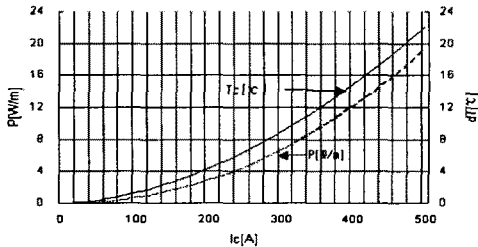


그림 1. 도체전류에 의한 주열열 및 온도변동

제작된 가열도체와 비가열도체를 기상측정시스템과 같이 야외에 설치하여 2004년 6월 중, 3일간 실험하였다. 그림 2는 3일간 측정된 기온과 가열도체 및 비가열도체의 온도이며 그림 3은 풍속과 일사량 측정치이다.

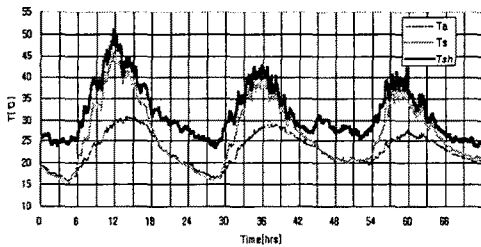


그림 2. 3일간의 비가열도체와 가열도체의 온도 및 기온

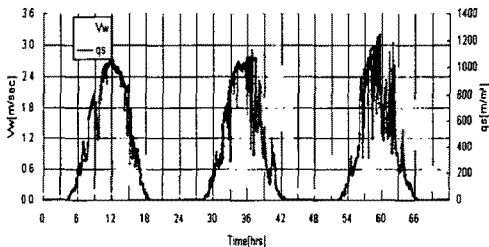


그림 3. 3일간의 풍속과 일사량

측정된 데이터들 중 마지막 날의 측정치를 사용하여 간접도체로 DLR 추정이 가능한지를 검토하였다. 먼저, 주어진 조건에서 기상모델 방식을 이용하여 그림 4에서 보면 야간에는 비가열도체와 기온이 풍속에 관계없이 거의 동일한 온도를 나타내고 가열도체와 기온 사이에는 대략 6.3[ $^\circ\text{C}$ ]의 온도차가 발생한다. 이러한 결과는 그림 1에서 7.5[ $^\circ\text{C}$ ]와 약간 편차를 보이고 있다. 주간의 비가열도체는 직사 일사량에 의해 온도가 상승되며 이 때, 가열도체와 비가열도체는 모두 바람의 양에 따라 냉각된다. 일반적으로 풍속에 의한 냉각효과는 비가열도체에

비하여 가열도체가 큰 것을 알 수 있다.

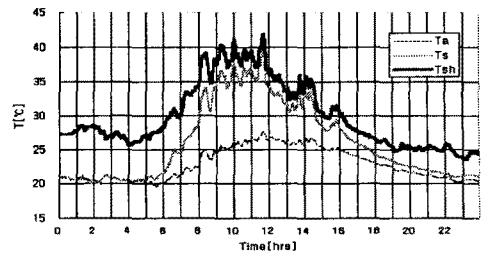


그림 4. 비가열도체와 가열도체의 온도 및 기온

그림 5는 측정 풍속과 일사량으로 풍속은 야간에 비하여 기온이 높은 주간이 높으며 따라서 저 풍속 영향이 큰 허용전류는 야간보다는 주간 시간대에서 보다 높게 된다. 직사 일사량은 대기 중에 구름에 의해 영향을 받으므로 이 영향이 그대로 온도 특성에 전달되는 것을 확인할 수 있다.

한편, 기온, 풍속 및 일사량의 측정치를 사용하여 구한 DLR 특성을 그림 6에서 보인다. 이 결과에서 알 수 있듯이, 대부분의 시간에서 DLR은 SLR보다 높으나 0-8 [시] 사이에 비교적 낮은 값으로 나타난다. 이러한 결과는 기상모델 방식을 사용하는 경우에 나타나는 일반적인 경향이다.

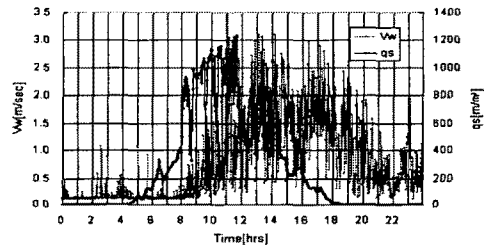


그림 5. 측정 풍속 및 일사량

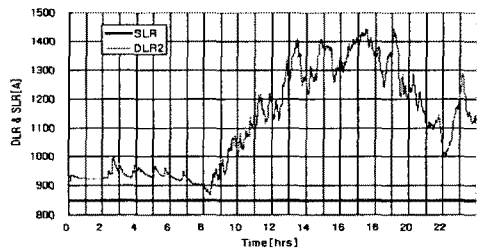


그림 6. SLR 및 기상요소로 추정한 DLR

주어진 조건에서 측정된 기상요소들로부터 비가열도체 ( $I_c=0[\text{A}]$ 로 가정)와 가열도체 ( $I_c=273[\text{A}]$ 로 가정)의 도체 온도를 산출할 수 있다. 그림 7과 8은 가열도체 및 비가열도체의 실측 온도와 기상요소로 추정한 추정온도를 나타낸다. 이 결과에서 측정된 도체온도가 추정온도보다 약간 높은 값을 나타냈지만, 그 경향은 아주 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다. 비가열도체의 온도도 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 비가열도체의 측정온도와 거의 유사한 값을 나타낸다. 결국, 기상요소 대신에 가열 및 비가열도체의 실측온도를 이용하여 DLR을 계산할 수 있다.

앞에서 밝힌 바와 같이, 가열 및 비가열도체의 온도로써 DLR을 추정하는 방식은 기온, 풍속, 풍향 및 일사량 등의 측정치를 사용하여 구하는 결과와 거의 일치한다. 이를 확인하기 위하여 간접도체 방식에 대한 알고리즘을 사용하여 의사풍속을 추정하고 이 추정된 값을 이용하여 DLR을 구하였다. 그림 8은 풍속계로 측정한 풍속과 알고리즘으로 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 일반적으로는 그 결과는 실제 풍속 값의 하중이 크게 나타낸다. 다시 말해서, 의사풍속 값은 주로 풍속의 경향과 그 크기에 종속된 값으로 결정된다.

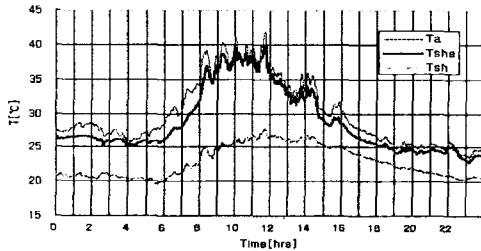


그림 7. 가열도체의 측정온도와 추정온도

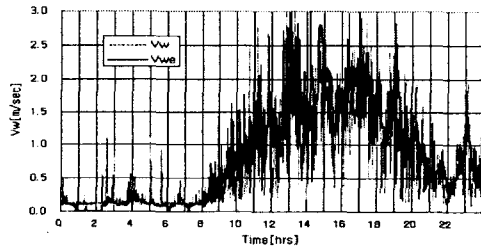


그림 8. 측정 풍속과 추정 풍속

추정풍속이 그림 8과 같이 실제 풍속 측정치와 유사한 값으로 계산되므로 이 값을 사용하여 구한 DLR 값도 거의 일치할 것이다. 그림 9는 기상모델 방식을 사용하여 기온, 풍속 및 일사량 측정치로 구한 DLR과 추정된 의사풍속으로 계산한 DLR 특성을 보인다.

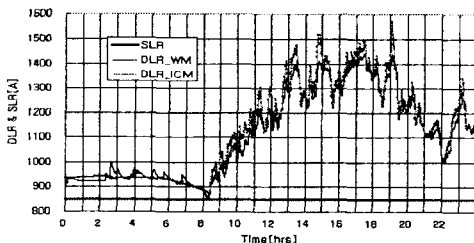


그림 9. 추정 허용전류

참고로 그림 10 및 11은 3일간에 연속으로 측정된 데이터로부터 추정된 의사풍속 및 추정 DLR 특성을 보인다. 이 결과들에서 알 수 있듯이, 간접도체의 온도 값을 사용하여 풍속이나 일사량을 측정하지 않고서도 DLR을 추정할 수 있다. 물론, 그림 10 및 11의 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 보정계수나 요소 하중을 설계해야 한다. 그렇지만, 본 논문에서는 DLR을

산정하는 방식으로 간접도체의 이용에 대한 기초 실험만 수행하여 그 타당성만 제시하였다.

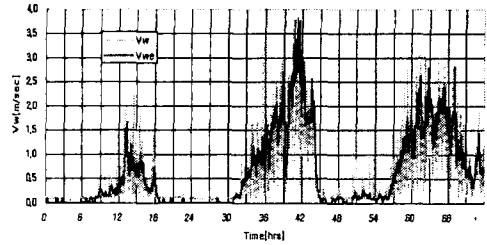


그림 10. 3일간의 측정풍속과 추정풍속

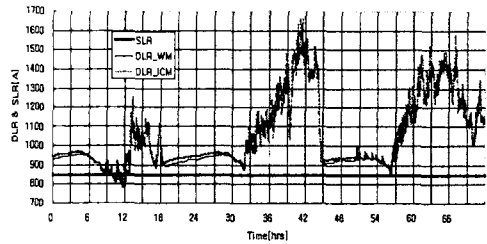


그림 11. 3일간의 기상모델 방식과 간접도체 방식에 의한 DLR 추정

### 3. 결 론

본 논문에서는 본 논문에서는 간접도체 방식에 의한 DLR 추정 알고리즘을 제시하고 가열도체와 비가열도체를 사용한 실험을 통하여 이용 가능성을 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 제작된 가열도체와 비가열도체를 기상측정시스템과 같이 야외에 설치하여 2004년 6월 중, 3일간 실험하여 측정된 기상요소들로부터 비가열도체와 가열도체의 도체온도를 산출한 결과 추정온도가 가열 및 비가열도체의 측정온도와 거의 유사한 값을 나타내었다.
- (2) 위의 결과를 바탕으로 간접도체 방식에 대한 알고리즘을 사용하여 의사풍속을 추정하고 이 추정된 값을 이용하여 DLR을 구한결과 SLR 및 기상요소로 추정된 DLR과 거의 거의 일치함으로써 DLR을 산정하는 방식으로 간접도체의 이용의 타당성을 제시할 수 있었다.

이 연구는 산업자원부 “전력산업기술개발사업”의 연구비 지원에 의하여 수행 되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] D.C. Lawry and J.R. Daconti, "Overhead line thermal rating calculation based on conductor replica method", 2004.
- [2] IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors, IEEE Standard 738, 1993.
- [3] Draft standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors, IEEE Standard P738, 1999.
- [4] 송전 설계기준 제·개정 및 보완 연구, 한국전력공사 전력연구원, TR.OOPJ09.J22001.319, 2001.5.