

이도 측정에 의한 가공송전선 도체의 교체수명 진단

(A Refurbishment Life Diagnosis for Overhead Transmission Conductors using Dip Measurement)

김성덕*

(Sung-Duck Kim)

요 약

가공송전선 도체는 장기간 동안 다양한 환경조건에 노출되어 있으므로 공기오염원이나 열적 이력에 의하여 서서히 열화된다. 노화도체는 전력시스템의 신뢰성과 공중 안전을 감소시킨다. 따라서 운용 중인 노화도체의 진단은 적절한 용량으로 전력을 안전하게 공급하거나 노화도체의 교체 또는 새로운 선로의 건설이라는 관점에서 매우 중요한 관심사가 되었다. 본 논문에서는 이도를 측정하여 노화도체의 교체수명을 진단하고 잔존수명을 추정하는 새로운 방법을 제안한다. 도체온도, 도체전류 및 장력 사이의 관계를 해석함으로써 이도가 노화도체의 기계적 인장손실을 정확하게 나타낼 수 있다는 것을 확인하였다. 몇 가지 수치해석결과를 토대로 제안된 방법이 가공도체의 교체수명이나 잔존수명을 진단하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

Abstract

Conductors in overhead transmission lines are exposed under various environmental conditions for a long period of time, so that they may be slowly degraded due to air pollutant or thermal history. Aged conductors may reduce power system reliability and public safety. Therefore, diagnosis of aged conductors in service becomes more important concerns with respect to keeping power delivery stable with a proper capability, replacing aged conductors, or constructing a new line. In this paper, we proposed a new method to diagnose the refurbishment life and estimate the remaining life of aged conductors by measuring dips. As analyzing some relations of conductor temperature, conductor current, and tension load, it could be verified that dip exactly shows mechanical tension loss for aged conductor. Based on several simulation results, it was shown that the proposed method may be effectively used to diagnose the refurbishment life or remaining one of overhead conductors.

Key Words : Overhead Transmission Conductor, Refurbishment Life, Dip Measurement

* 주저자 : 한밭대학교 전기·전자·제어공학부 교수

Tel : 042-821-1135, Fax : 042-821-1128

E-mail : sdkim@hanbat.ac.kr

접수일자 : 2008년 1월 16일

1차심사 : 2008년 1월 24일

심사완료 : 2008년 2월 6일

1. 서 론

1990년대에는 우리나라를 포함하여 영국, 캐나다, 뉴질랜드 전력회사들은 발전, 송전 및 배전분야를

이도 측정에 의한 가공송전선 도체의 교체수명 진단

분할하여 전력분야를 재편성하기 시작하였다[1]. 이 시기에 전력수요는 급격히 증가하는 반면에 예산이나 환경문제 때문에 새로운 선로를 증설하기 힘들어졌다. 따라서 노후설비의 정격을 재검토하고 수명진단이나 설비의 효율성 등을 평가하는 것이 필요하게 되었다. 가공송전선은 장기간 동안 대기 중에 노출되어 운용되기 때문에 기계, 재료 성질이 변화되어 서서히 열화된다. 이와 같이 노화도체(aged conductor)들은 시스템 운용 측면에서나 전력공급의 신뢰성, 경제성과 공중의 안전성을 감소시킨다[2]. 현수애자, 스페이서, 탭퍼, 변압기, 커패시터 뱅크와 같은 설비는 정기적인 검사를 통하여 필요한 경우에 보수하거나 교체한다. 그렇지만 도체는 교체수명(refurbishment life)의 명확한 척도가 없을 뿐만 아니라 적당한 평가방법도 없어 부분적으로 보수하거나 교체할 수밖에 없는 유일한 전력설비이다[3].

도체수명은 전력을 공급하는 동안의 환경적 이력에 의해 나타나는 인장손실로 결정된다. 장기간 대기 중에 노출되어 있는 도체는 점진적으로 부식이 진행되며 공급전류에 의한 도체온도로 재료적 어닐링이 가속된다. 따라서 각 전력 회사는 도체의 정적송전용량(static line rating : SLR)인 연속허용전류나 비상정격(emergency rating)을 엄격하게 규정하여 적용, 운용하고 있다[4-6]. 가공선로는 수명과 안전한 전력공급 측면을 고려하여 설계되는데, 선로의 적당한 이도를 유지함으로써 시설물 사이에 안전성을 확보하도록 규정된다[7].

노화도체를 진단하기 위해서는 우선, 선로의 유효수명이나 잔존수명(remaining life)에 관한 정확한 정의가 필요하다. 도체수명이란 도체에 규정된 전력을 안전하게 공급할 수 있는 한계기간을 의미하는데, 설계수명 또는 교체수명을 기준으로 하거나 특별한 기준이 없는 전력회사도 있다. 일반적으로 도체는 대기부식, 전해부식 등으로 인하여 열화되지만 도체온도 특성들이 가미되어 매우 복잡한 현상으로 정량화가 쉽지 않다. 교체수명은 정격인장의 10[%]가 감소하는 시기로 정하고 이 기준과 대상선로의 이력, 환경적 요소나 부하율 등을 고려하여 적용하는 것이 보편적이다. 그렇지만 불행하게도 노화도체의 수명을 진단하거나 예측하여 정확

한 계량적인 결과를 운용자에게 제공하는 시스템은 개발되지 못했다. 노화를 나타내는 요소들은 대다수 정성적인 분석결과가 많아 지금까지는 선로 운용자나 경영진의 경험적 판단을 우선으로 하여 교체계획과 시기가 결정되어 왔다.

도체의 유효수명은 기본적으로 노화도체의 기계적 인장으로 판단할 수 있으므로 가장 간단한 수명평가방법은 샘플을 채취하여 인장을 검사하는 방법이다. 그렇지만 점퍼선과 같은 샘플 채취에 한계가 있을 뿐만 아니라 샘플 시험은 한 경간이나 선로의 기계적 특성을 대표하지도 못한다. 또한, 비파괴 탐상기(non-destructive detection system)나 열상기(thermo-vision system)를 이용하여 국부부식 등을 검사하는 방법도 사용되지만 수명을 진단하는 장치는 아니다[8~10]. 도체가 노출된 환경이나 고장횟수, 과부하율, 사용기간에 상관없이 선로의 현재 상태는 도체의 기계적 인장에 직접 관계되어 나타나는 이도 특성이다. 따라서 실제 이도를 정확하게 측정하여 설계이도와 비교함으로써 도체의 교체수명을 예측할 수 있다. 도체전류, 기상조건으로부터 도체온도, 이도를 구하고 교체수명이도 개념을 도입한다. 본 연구에서는 비파괴적인 수명진단 방식으로 실제 선로에 대한 데이터로부터 이도를 구하고 이 이도를 토대로 도체수명을 예측하는 방법을 제안한다.

2. 도체수명의 척도

지금까지 도체의 유효수명을 정확하게 진단하는 시스템은 개발된 예가 없으므로 대다수 전력회사는 노화도체를 평가하기 위하여 전문가의 경험이나 샘플 채취와 같은 방법을 통상 사용하고 있다. 경간이나 점퍼선에서 채취한 도체샘플에 대한 기계적 시험방법이 좀더 현실적인 것 같으나 때때로 이러한 시험결과는 불확실한 기계적 특성으로 인하여 오히려 잘못된 교체정보를 제공하기도 한다. 또한 전문가의 경험을 기반으로 한 판단도 주관적이며 정성적이다. 결국, 이러한 기준방법은 모든 전력회사에서 공동적인 기준으로 적용하는데 한계가 있다.

도체의 클립신장에 의해 발생하는 도체 인장손실과 영구적인 이도증가는 도체의 노출 시간에 따라

축적된다. 이러한 영향들을 충분히 반영하여 도체의 최대허용온도를 정하는 것이다. 결국 도체의 허용온도는 최악의 기상조건(worst weather condition)에서 어닐링으로 도체의 인장하중 감소의 제한하고, 안전한 지상고를 유지하기 위하여 적절한 이도를 보장하는 도체온도로 규정된다. 도체의 연속시간정격이나 단시간정격은 송전선의 열적 정격과 선로의 인장에 직접 관계된다. 도체의 열화문제가 단시간 결정에 큰 영향을 주지 않는 반면에 지상고는 도체의 이도와 설계기준에 의한 첩탑 높이 등을 결정하는데 사용한다. 이와 같이 연속시간정격이나 단시간정격은 운용 상, 지상고를 안전하게 유지하는 차원에서 고려하지만 일정 교체수명을 관리하기 위해 주어지는 것이 아니다.

도체의 안전도 측면에서 도체수명은 주로 기계적 특성 변화로 결정될 수 있다. 이때 기계적 특성은 도체가 가공 중에서 허용된 전류를 안정하게 공급할 수 있는 한계치이기도 한다. 일반적으로 가공선로의 도체와 첩탑은 송전용량과 지상고 기준 등을 고려하여 설계된다. 선로에서는 첩탑보다 주로 도체와 그 부속물들의 수명이 더욱 중요하다. 만약, 첩탑이 안정범위에 있다고 가정하면 선로 수명은 도체에 관계된 인장하중에만 관계될 것이다. 이러한 하중은 도체의 자중과 전류에 의한 열용량 등에 의해 영향을 받는다. 결국, 도체수명이란 도체의 기계적, 재료 특성들뿐만 아니라 공급전력, 풍압, 온도 등 다양한 요소들의 함수로 표현될 것이다.

영국의 National Grid 경우는 초기인장하중의 30[%] 저하되는 때를 교체시기로 정하였고[11], 캐나다 Ontario Hydro에서는 정격인장하중의 20[%] 감소된 시기로 규정하고 있다[10-11]. 이들 국가들은 인장하중 감소율로서 교체시기를 판정하지만, 일본의 관서전력과 같은 회사에서는 인장강도가 10[%] 저하되는 시기를 기준으로 약 36[년]을 교체주기로 사용하였다[5]. 그렇지만, 전력회사나 국가간의 통일된 기준은 없다.

국내는 대략 40[년]으로 설계수명이 정해져 있었으나 급속한 산업화로 인한 선로 증설 등으로 인하여 이러한 기준이 엄격하게 적용되어 전선을 교체하거나 신설한 경우는 드물었다. 90년대에 이르러 노

후 선로가 증가되어 단선사고들이 발생되면서 선로의 탐상, 유효수명 등에 대한 검토가 이루어졌다. 그 결과, 1999년 3월에 노후 전선의 교체기준이 한국전력공사의 송변전처에서 마련되었다[12]. 이 기준은 ACSR의 한계수명을 50년으로 하여 경년을 선형함수로 하고 이에 부하율, 정전요인, 송전전압, 공급능력 등을 일정한 비율로 고려하여 일정 기준점수 이상의 선로를 우선 교체대상으로 판정하였다. 그렇지만 이 기준도 도체수명을 정량적인 값으로 평가하는 데에는 객관성과 타당성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 도체수명을 일정기간으로 규정하지 않고 인장이 설계하중의 10[%]가 감소되는 시기를 교체수명으로 가정하여 진단법을 제안한다. 이때 이도를 교체수명이도(refurbishment life dip)라 하고 설계인장에 해당하는 이도를 설계수명이도(design life dip)라 정의한다.

3. 도체전류와 설계이도

이도는 도체온도에 의해 늘어나는 도체의 기계적 특성을 나타낸다. 그렇지만 도체온도는 공급전류와 선로주위의 기상조건 및 도체규격에 의해 결정된다. 일반적으로 가공송전선 도체에 전류 $I[A]$ 가 흐르는 경우, 도체온도, $T_c[^\circ C]$ 에 대한 열평형방정식은 다음과 같이 주어진다[4,6].

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

여기서 $R_{ac}[m\Omega]$ 은 도체온도에서의 단위길이 당 교류저항이고, $Q_c[W/m]$ 및 $Q_r[W/m]$ 는 도체의 대류열 및 방사열이며 $Q_s[W/m]$ 는 태양열에 의한 도체의 흡수열을 나타낸다.

식 (1)에서 $R_{ac}(T_c)$ 는 다음과 같이 표현된다.

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

이때 β 는 교직저항비이고 α_{20} 은 $20[^\circ C]$ 에서 저항온도계수이며 R_{dc20} 은 $20[^\circ C]$ 에서 단위길이 당 도체저항이다. 대류에 의한 열방사, $Q_c(T_c)$ 는 무풍속,

이도 측정에 의한 가공송전선 도체의 교체수명 진단

저풍속 및 고풍속 영역의 특성이 다르게 기술되지만, 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.

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

여기서 D [mm]는 도체의 외경, ρ_f [kg/m³]은 공기의 밀도, V_w [m/sec]는 풍속, μ_f [N/m-s]는 공기의 점도, k_f [W/m²·°C]를 나타낸다. 한편, 도체의 방사 열 $Q_r(T_c)$ 은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 ϵ 는 도체의 방사율이다.

특정한 기상상태에서 도체에 전류가 흐르면 도체는 열적 평형상태에 도달하여 일정한 온도를 나타낸다. 비선형방정식인 식 (1)에서 T_c 를 구하기는 쉽지 않으나 등가관계를 이용하여 결정할 수 있다. 물론, $R_{ac}(T_c)$ 및 $Q_c(T_c)$ 은 T_c 에 대해 선형함수이므로, 식 (4)을 선형화하고 식 (1)을 이용하여 T_c 의 근사치를 손쉽게 구할 수도 있으나 이 경우에는 약간의 계산오차가 발생한다.

가공송전선의 이도는 도체온도와 재료·기계적 특성에 의해 변화된다. 이와 같은 이도는 송전선로 설계 시 선로가 가설되는 환경에 대한 조건과, 도체의 허용전류 및 철탑을 고려하여 안전한 선로 설계에 중요한 자료로 이용된다. 일반적으로 이도설계에 기본조건인 도체온도와 풍압은 도체가 허용전류나 온도 내에서의 가혹조건으로써 규정된다. 전선실장을 L_1 이라 하고 임의상태의 실장을 L_2 라 하면 전선의 온도, 장력에 의한 다음 관계가 성립하게 된다[7].

$$L_2 - L_1 = \frac{T_L - T_{LM}}{AE} + \alpha (T_c - T_{dc}) \quad (5)$$

여기서 T_{LM} [kgf]는 설계장력, T_L [kgf]는 임의조건에서의 장력, T_{dc} 는 설계도체온도로 고온계는 10 [°C]이도 저온계에서는 -5[°C]이다. 또한 A [mm²]는 전선의 단면적, E [kgf/mm²]는 전선의 탄성계수, α [1/°C]는 전선의 선팽창계수이다. 일반적으로 풍압조건에 따라 도체의 천이온도, 임계경간이나 이도 등이 결정되며 도체종류, 경간, 설치지역 등에 따라 매우 복잡하게 계산된다. 그러나 본 연구에서는 도체수명에 관계된 장력 및 이도만 검토하기 위하여 고온계 I 지역의 표준경간 도체라 하고 지지점의 고도차도 없는 것으로 가정한다.

자중이 W_c [kg/m]이고 도체장력이 T [kgf]인 도체를 경간 S [m]에 가설하면 도체길이는

$$L = S + \frac{W_c^2 S^2}{24 T^2} \quad (6)$$

이 식을 식 (5)에 적용하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} T_L^3 + \frac{W_c^2 S^2 EA}{24 T_{LM}^2} - T_{LM} + \alpha (T_c - T_{dc}) EA T_L^2 \\ = \frac{W_c^2 S^2 EA}{24} \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 도체온도 T_c 에서의 장력 T_L 를 구할 수 있으며 이때 이도는 다음과 같이 구해진다.

$$D = \frac{W_c S^2}{8 T_L} \quad (8)$$

일반적으로 식 (8)은 새 도체가 가설될 경우에 계산되는 설계이도이다. 그렇지만 도체의 열화는 대기 부식이나 장기간의 온도이력에 의해 인장을 감소시킨다. 따라서 2장에서처럼 설계인장의 10[%]가 감소되는 시기, 즉, 90[%]의 인장에 도달하는 시기를 교체수명으로 설정하면 교체수명이도, D_r 은 식 (8)에 의하여 $D_r = D/0.9$ 가 된다.

4. 교체수명의 진단

설계이도와 교체수명이도 특성을 검토하기 위하여 ACSR 410 도체가 경간 $S=300[m]$ 인 154[kV] 선로가 풍압조건이 고온 I 지역으로 이도설계기준에 따라 건설되었다고 가정한다. 우선, 무풍조건에서 도체온도에 대한 이도 특성을 그림 1에 나타낸다.

도체의 이도와 장력 사이에는 식 (8)과 같이 서로 반비례하므로 장력이 10[%] 감소하면 이도는 약 11[%] 정도 증가한다. 여기서 인장은 연선 조합된 도체의 전체 인장하중을 의미한다. 도체는 장기간 대기에 노출되어 운용함으로써 선팅창 계수, 탄성계수, 온도이력, 부식 환경 등 다양한 요소들에 의해 열화되어 인장을 감소시킨다. 따라서 일정온도에 대응하는 설계이도에 비해 인장의 감소로 인하여 실제 이도는 증가하게 된다. 예컨대, 그림 1에서 도체온도가 65[°C]이라면 설계이도는 9.91[m]이지만 경년 열화에 의해 인장이 10[%] 변화되면 이도는 11.03[m]로 기준 값에 비해 1.12[m] 정도 차가 나타난다. 따라서 현재 이도를 정확하게 측정함으로써 선로의 잔존수명을 예측하거나 교체여부를 판단할 수 있다.

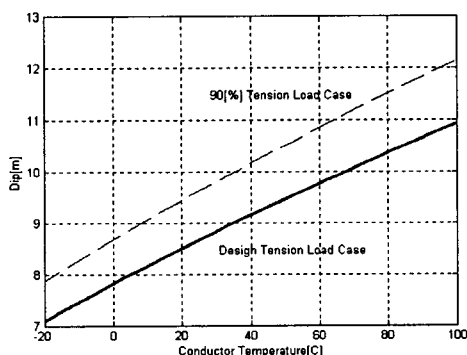


그림 1. 도체온도와 이도 특성
Fig. 1. Characteristics between conductor temperature and dip

교체수명은 도체의 장력이 일정한 값으로 감소된 시기로 정해지므로 전류, 도체온도, 이도와 장력 사이의 관계를 정확하게 정량화할 수 있어야 한다. 장력은 이도에 반비례하고 이도는 도체온도에 직접 비

례한다. 수치해석 조건으로 앞의 예와 같은 선로에 대하여 도체전류 682[A], 기온 30[°C], 평균풍속 0.9[m/sec], 태양사각 14[시], 연일수 120[일], 고도 100[m]이고 나머지 조건은 SLR을 구할 경우에 가정 하였던 조건들을 이용하였다. 이 경우에 도체온도를 구하면 55.12[°C]이고 이 온도에 대한 설계이도는 9.63[m]이다. 실제로 공급전류에 대한 도체온도를 측정하기는 거의 불가능하다. 이때 도체온도는 전류는 물론 도체가 가설된 환경의 기온, 풍속 등에 의해 영향을 받는다. 현재 운용 중인 선로의 이도는 도체 전류와 가설된 위치의 기상상태, 지형조건, 도체규격 등의 정보를 정확하게 알 수 있어야 추정 가능하다. 그렇지만 이러한 요소들 중에는 측정 불가능하거나 측정하기 쉽지 않은 요소들이 있으므로 이도추정에 중요한 영향을 주는 요소들을 측정, 이용해야 한다. 이도에 미치는 중요도를 분석하기 위하여 기상요소들 중 몇 가지 요소들을 고려하여 도체이도에 미치는 영향을 조사하였다. 기상조건 변화에 대한 도체 온도 특성이 그림 2 및 3이다. 각 수치해석에서는 변화량을 제외한 다른 요소들은 앞의 조건과 같다.

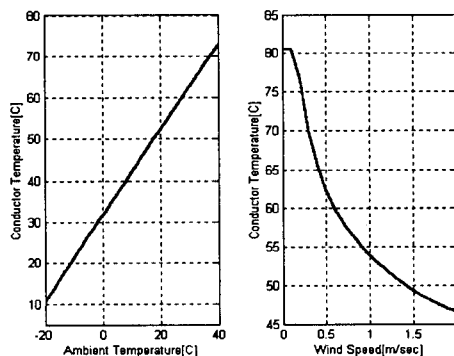


그림 2. 기온 및 풍속 변화에 대한 도체온도
Fig. 2. Conductor temperature for varying ambient temperature and wind speed

도체온도는 기온에 거의 비례하는데, 기온이 10 [°C] 변화되면 도체온도도 대략 10[°C]가 변화됨을 그림 2 (a)에서 알 수 있다. 따라서 기온은 이도를 추정하는데 사용되는 중요한 요소이다. 그림 2 (b)는 풍속변화에 대한 도체온도 변화로 저풍속 0~

이도 측정에 의한 가공공전선 도체의 교체수명 진단

0.5[m/sec] 사이에서 도체온도는 약 18[°C] 정도가 변화되므로 DLR 값을 결정할 경우처럼 저풍속은 도체온도에 큰 영향을 주는 중요한 요소 중 하나임을 알 수 있다. 그림 3 (a)는 태양시각에 대한 도체온도 변화로 시각에 따라 약 10[°C]의 온도 차가 발생한다. 따라서 이도를 추정할 경우에는 연일수와 태양 시간도 정확히 이용하는 것이 필요하다. 하지만 고도는 그림 3 (b)에서와 같이 도체온도에는 큰 영향을 미치지 않는다. 도체의 흡수율, 방사율은 도체온도에 미치는 중요한 요소 중 하나이지만, 경년에 의한 추정흡수율 계산식을 이용하여 구하거나 도체의 상태를 감안하여 엔지니어의 판단으로 적당한 수치로 가정할 수밖에 없다. 결국, 설계이도의 계산오차를 줄이기 위하여 전류, 기온, 평균풍속, 태양시각 및 연일수에 대한 정보는 정확하게 이용해야 한다.

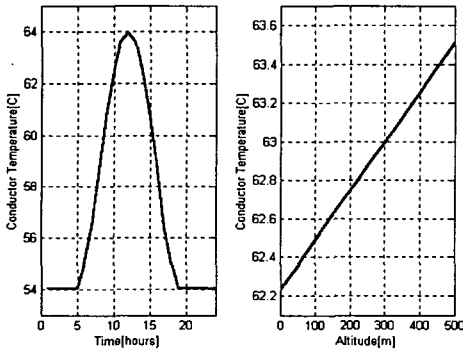


그림 3. 태양시각 및 고도 변화에 대한 도체온도
Fig. 3. Conductor temperature for varying sun-heat time and altitude

도체이도를 추정하는 경우에 선로에 공급되는 전류와 기온, 태양시간과 같은 간단한 기상조건은 실제 측정값을 이용하고 나머지 요소들은 가정된 값을 이용하면 현재의 도체온도를 계산할 수 있다. 이 경우에 계산된 도체온도는 특정조건에서 구해진 것으로 실제 도체온도보다 크거나 작을 수 있다. 따라서 이러한 도체온도로 계산된 이도와 실제 이도 사이에는 편차가 나타난다. 따라서 실제 값을 적용하기 어려워 가정된 기상조건들을 적용할 때에는 도체온도가 실제온도에 근접할 수 있도록 타당한 조건들

을 사용할 필요가 있다.

한편, SLR 값을 규정하거나 DLR(dynamic line rating)시스템을 운용하는 경우에 가장 민감하며 중요한 요소가 풍속이다. 풍속은 방향과 크기가 매우 불규칙할 뿐만 아니라 변화도 심하고 측정값의 감도도 좋지 않다. 특히, 도체의 온도시정수는 대략 15 [분] 정도이므로 풍속 변화에 따른 온도를 추정하는 것은 쉽지 않다. 그러므로 풍속은 저풍속용 초음파 풍속계와 같은 정밀한 계측장치로 측정해야 하고 10[분] 정도의 평균풍속을 이용하는 것이 바람직하다. 이와 같은 조치에도 불구하고 풍속은 이도에 민감한 영향을 주므로 세심한 주의를 요한다.

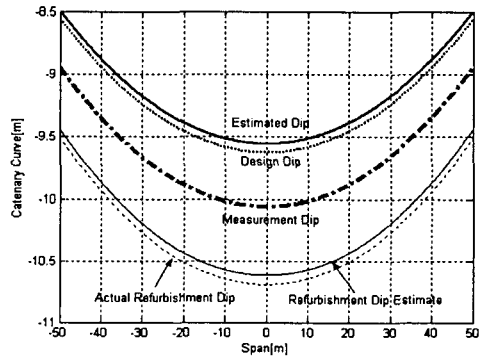


그림 4. 도체의 교체수명이도의 추정과 평가
Fig. 4. Estimation and access for the refurbishment life dip of conductor

실제풍속이 0.9[m/sec]이면 도체온도는 55.12[°C]이며 그림 4와 같이 카테너리 이도는 9.63[m]이다. 그러나 풍속을 1.1[m/sec]로 가정하면 도체온도는 52.93[°C]가 되고 이도는 9.56[m]로 약 7[cm] 감소된 값으로 계산된다. 따라서 10[%] 인장손실이 나타나는 이도는 설계이도에 대해서는 10.7[m]이고 풍속 1.1[m/sec]로 추정된 이도에 대해서는 10.6[m]이다. 실제로 이도변화가 10[cm] 정도가 나타나는 것은 큰 문제가 없으나 교체수명을 결정하는 10[%] 인장감소 이도에서는 신뢰성을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 풍속은 실측된 평균풍속 값이나 그보다 약간 큰 값을 사용하는 것이 바람직하다. 이러한 경우에 실측 이도가 그림 4에서와 같이 10.1[m]로 나타난다

면 이 도체는 교체수명이도에 도달하지 않았으며 그 수명도 설계수명의 1/2 정도가 남았다고 추정할 수 있다.

도체온도를 직접 측정하는 방법이 아니라면 풍속 뿐만 아니라 기온, 전류 등 도체온도에 관계되는 요소들의 불확실성 때문에 계산된 도체온도에는 오차가 발생된다. 따라서 정밀한 측정시스템을 사용하거나 또는 직접 도체온도나 장력을 측정하는 시스템도 있으나 여러 가지 단점들이 존재한다. 이와 같은 방법 중 가장 간편한 방법으로, DLR시스템 운용과 유사한 형태로 24시간 기온, 풍속, 태양시각을 측정하여 연속적으로 이도를 측정하여 평균적인 잔존수명을 추정함으로써 추정결과의 신뢰도를 높이는 방법이다. 이 때 추정도체전류는 682[A]로 일정한 것으로 가정하였으며 일사량은 계산치를 이용하였다. 그림 5는 일일 기온과 평균풍속을 실시간으로 측정하고 이 데이터로 추정한 이도특성을 나타낸다.

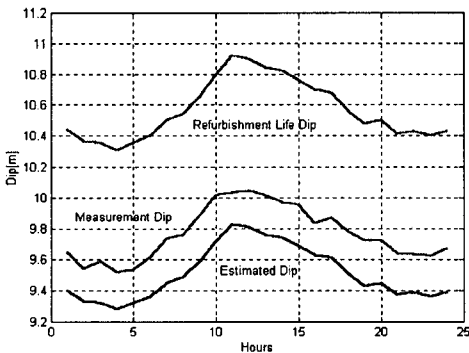


그림 5. 실시간 이도 변화
Fig. 5. A realtime dip variation

실시간으로 이도를 추정하기 위하여, 측정기온과 풍속을 사용하여 도체온도를 계산한 다음 이 온도를 사용하여 이도를 계산하고 실제 이도를 측정한다. 이때 추정이도로부터 교체수명이도를 구한다. 실제 선로는 장기간 열화에 의해 장력이 감소하기 때문에 도체이도는 이들 2가지 이도 사이에서 측정될 것이다. 그림 5에서 실측이도는 가상적인 데이터로 이 결과로부터 도체는 아직 교체수명에 이르지 않은 것으로 판정할 수 있다. 이와 같은 방법은 측정치의 평균

치를 이용하므로 결과의 신뢰성을 증대시키는데 기여한다. 한 선로에는 수십 또는 수백 개의 철탑이 다양한 지형에 가설되지만, 운용 상태에서 대표적인 경간을 선정하여 각 경간의 이도를 측정하면 선로의 평균적인 잔존수명이나 교체시기 또는 이 결과를 토대로 정기점검 시기 등을 조절할 수 있다.

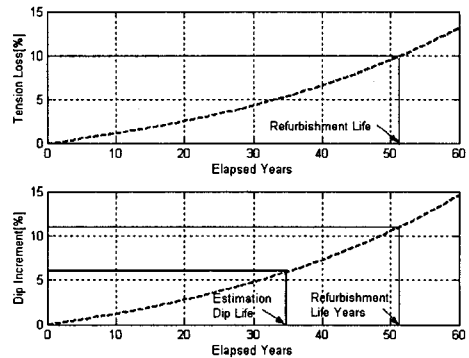


그림 6. 도체수명곡선에 의한 잔존수명 예측
Fig. 6. Remaining life estimation by the life curve

본 연구에서는 도체의 교체수명을 진단하는 한 가지 방안을 제시하였지만 그림 4와 5의 결과로부터 도체의 잔존수명이나 유효수명도 추정할 수 있다. Ontario Hydro의 연구진들에 의해 제시되었던 도체의 인장손실률은 초기인장강도(initial tensile strength)에 대하여[10]

$$\epsilon = e^{1.41 + 0.024y} \quad (9)$$

로 주어진다. 여기서 y 는 경년을 나타낸다. 일반적으로 도체의 초기인장은 정격인장강도(rated tensile strength) 또는 설계인장에 비하여 5~12[%] 이상 높다. 식 (9)에서 초기인장 영향을 배제하면 인장손실률 및 이도증가율은 그림 6과 같다. ACSR 도체의 교체수명을 인장손실 10[%]로 가정하는 경우에 약 52[년]으로 주어지고 그림 6 (b)의 예처럼 실측이도의 증가율이 6[%]이면 경년은 대략 35[년]으로 추정된다. 결국, 그림 4나 5에서 설계이도와 실측이도 사이의 증가율을 계산함으로써 해당 도체의 경년이나

이도 측정에 의한 가공송전선 도체의 교체수명 진단

잔존수명까지도 산출 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

국내의 송전선로의 대부분은 가공선로이며 주로 ACSR 도체를 사용해 왔다. 일반적으로 가공도체는 장기간에 걸쳐 다양한 환경조건에서 가설되어 운용 되기 때문에 대기 중에서 서서히 열화되어 인장이 감소된다. 따라서 기존 설비의 교체수명 진단은 매우 중요한 문제가 되었다. 가공도체의 설계수명은 40~50[년]으로 규정되어 있다. 하지만 장기간 동안에 대기 중에 노출된 도체의 이력이나 운용 조건이 수명에 미치는 영향을 정량화하기는 곤란하므로 노후도체의 교체 시기는 각 회사마다 다르게 적용되는 실정이다.

도체의 교체는 일정한 인장감소 시기로 규정되는 것이 일반적이다. 이와 같은 인장감소는 이도 증가로 나타나며 따라서 본 연구에서는 가공송전선 도체의 잔존수명을 추정하기 위하여 이도 측정 진단법을 제안한다. 도체수명에 관련된 기준을 검토하여 교체수명시기를 설계장력의 10%가 감소되는 시기로 가정하였다. 기온, 풍속과 같은 기상요소와 도체규격, 선로의 지리적 조건 및 도체 전류로부터 도체온도를 구하고 이 도체온도와 장력으로부터 이도를 계산하였다. 이렇게 계산된 이도는 가정된 조건에서 초기가설 시에 주어지는 설계이도이다. 이 설계이도로부터 현재 도체의 교체수명이도를 구하고 실측이도 사이의 관계로부터 평균잔존수명이나 경년을 추정할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] M.F. Ishac, I.F. Boulos, A.P. Goel and D.J. Horrocks, "Life extension of an existing transmission line", The Seventh International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance, pp. 17-23, Ohio, 1995.
- [2] D.L. Rudolph, "A systematic approach to the replacement of an aging distribution system", 1997 IEEE Rural Electric Power Conference, A4.1-8, Minneapolis, 1997.
- [3] R.L. Jackson, R.R. Gibbon, J.M. Ferguson and K.G. Lewis, "The condition of the supergrid and a strategy for refurbishment", International Conference on Revitalizing Transmission and Distribution Systems, pp. 44-48, 1987.
- [4] Draft standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors, IEEE Standard P738, 1999.
- [5] 가공송전선의 전류용량, 일본 전기학회 기술보고 제660호, 1997.
- [6] 가공송전선용 전선 선정기준 - 1210, 한국전력공사, 2003.
- [7] 가공선 이도 설계기준 - 1211, 한국전력공사, 2003.
- [8] J. Sutton and K.G. Lewis, "The detection of internal corrosion in steel reinforced aluminum overhead power line conductors", U.K. Corrosion, pp.343-359, 1986.
- [9] D.G. Harvard, et. al, "Aged ACSR conductors. I. Testing procedures for conductors and line items", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 581-587, 1992.
- [10] D.G. Harvard, et. al, "Aged ACSR conductors. II. Prediction of remaining life", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 588-595, 1992.
- [11] J.M. Ferguson, and R.R. Gibbon, "Overhead transmission lines-refurbishment and developments", Power Engineering Journal, Vol. 8, No. 3, pp. 109-118, 1994.
- [12] 송전운용업무기준, 한국전력공사 송변전처, 1999.

◇ 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. 2000~2001년 미국 Kansas State University 객원교수. 현재 한밭대학교 전기·전자·제어공학부 교수.