

# 가공송전선의 부하용량과 이도 특성에 관한 실험적 연구

(A An Experimental Study for Load Capacity and Dip Characteristic  
in Overhead Transmission Lines)

김성덕\*

(Sung-Duck Kim)

## Abstract

Overhead transmission lines in domestic area have been built by several different design standards of dip and ground clearance. This paper describes an experimental study for evaluating load capacity and dip margin in overhead transmission lines. Such design standards for selection of overhead transmission conductors, dip and ground clearance, as well as electrical equipment technical standard are discussed. Based on daily load and weather data, several characteristics such as line utilization factor, load factor, conductor temperature and dip, etc. are analyzed, and compared with the specified levels of design standards. As a result, it is verified that DLR method can be a clue of the solving of the problem, for occurring in old transmission conductors which may be rarely operating below standards.

Key Words : Overhead Transmission Lines, Dip and Clearance, Load Factor, Dynamic Line Rating

## 1. 서 론

1990년 이후 세계의 전력회사들은 경영의 합리화를 위한 구조조정을 시작하면서 국내에서도 전력산업구조조정 계획에 따라 발전과 송배전 분야를 분리하고 이어 전력거래 분야를 별도로 운용하게 되었다. 따라서 전력회사는 전력설비를 새로 건설하거나 투자하기 보다는 기존 설비의 효율성, 경제성을 분석하여 최대 효율로 운용하는 방안을 찾기 시작하였다. 송배전 설

비도 정격용량, 수명, 기술기준의 합리성 등이 검토되었다. 전력공급의 신뢰도를 향상시키고 경제성을 제고하기 위하여 관련 기술표준이 정립되어야 하고, 따라서 재료, 설계, 제작, 시공, 검사 등의 표준화를 도모할 수 있다. 특히 WTO의 활성화와 맞물려 기술기준이나 규정 등이 국내뿐만 아니라 세계에 공통 기준에 맞지 않으면 안 되었다[1]. 국내에서도 전기사업법, 전기설비기술기준 등이 정비되고 한계이도전선도 설계 기준을 새롭게 제정하거나 개정하였다[2]. 이렇게 마련된 기준에 따라 기존 설비의 운용 상태를 파악하여 효율성 및 합리화하는 방안들을 찾기 시작했다.

특히 송전설비나 선로는 장기간에 걸쳐 건설되었기 때문에 현재는 기준이 다르게 적용된 설비들이 혼재

\* 주저자 : 한밭대학교 전기전자제어공학부 교수  
Tel : 042-821-1135, Fax : 042-821-1128  
E-mail : sdkim@hanbat.ac.kr  
접수일자 : 2010년 8월 26일  
1차심사 : 2010년 8월 31일  
심사완료 : 2010년 9월 16일

되어 있는 실정이다. 따라서 효율성이나 경제성을 판단하기 위해서는 설비에 적용된 설계기준이나 기술기준에 적합한 것인지를 먼저 검토해야 한다. 본 연구에서는 신설은 물론, 교체나 보수 등이 어려운 가공송전선로에 대해 과거에 적용된 설계기준과 운용실태를 분석하여 전력공급의 효율성을 높이는 방안을 모색하였다. 2000년 이후에 전선의 허용전류 설계기준[3]이 개정, 보완되었고 이도(dip) 및 지상고(ground clearance) 설계기준[4-5]은 그 동안 여러 차례나 개정되었다. 특히 국내에는 과거 설계기준으로 건설되어 경년이 20년 이상인 선로가 전체 선로 중에 40% 이상을 점유하고 있다. 본 연구에서는 초기의 이도 설계기준으로 가설되어 운용하는 선로에 대한 부하율(load factor), 설계조건, 지상고 안전성 등을 분석한다. 동적송전용량(dynamic transmission capacity or dynamic line rating: DLR)의 적용 방안도 함께 검토된다.

## 2. 선로이용률 및 부하율

### 2.1 분석 배경

송전용량(transmission capacity)은 전선뿐만 아니라 철탑, 금구류, 변압기나 차단기 등 여러 설비의 규격과 기준들을 고려하여 결정한다. 이때 가선된 전선의 최고전류까지 허용하는 계통으로 설계되지 않는다. 이도 및 지상고의 한계가 정해져 있기도 하고 발전설비용량이나 변압기용량이 일정한 범위로 제한되어 있기 때문이다. 선로이용률(line utilization factor)은 가선된 전선의 최대허용부하에 대한 현재 부하의 비율이며, 설계된 규정부하에 대하여 현재 부하의 비율을 부하율로 정의한다.

본 연구를 위하여 한계이도전선 대전충남본부 관할인 덕진-공주TL를 이용하였다. 154[kV] 2회선, ACSR 410[mm<sup>2</sup>] 2도체인 이 선로는 1989년 12월 건설되었다. ACSR 410[mm<sup>2</sup>]의 연속허용전류(continuous allowable current)는 848[A]이므로 회선 당 선로설비용량은 452[MVA]이다. 이 선로는 초기에 제정된 이도 및 지상고 설계기준을 적용하여 건설되었으므로 지상고 고려 시 설계전선온도는 40[°C]이고 이도여

유(dip margin)는 0.5[m][5-6]이다.

“이도여유”이란 전기설비기술기준[6]에서 정한 이격거리(clearance) 기준치와 이 기술기준을 바탕으로 한계이도전선에서 제정된 이도 및 지상고 설계기준[3,4]에서의 설계치 사이의 이도 차를 의미한다. 이때 이도여유는 전압별, 전선종류나 규격에서 정한 이도 기준들 중에서 그 값이 최저인 이도이다(이하에서는 한계이도전선의 설계기준은 ‘설계기준’이라 하고 전기설비기술기준은 ‘기술기준’이라 표현한다). 전기사업법이나 기술기준은 ‘자율적 기준(autonomous specification)’이 아니라 ‘강제적 기준(mandatory specification)’이므로 한계이도전선의 설계기준은 기술기준을 반드시 준수하도록 규정한다. 실제 선로 운용에서는 한계이도(limit dip)를 초과하는 상황이 발생하더라도 기술기준에 공작물과 선로 사이의 최소이격거리가 규정되어 있으므로 선로가 한계이도 이상으로 늘어져 그 즉시 공작물과 접촉이 되거나 지락이 되는 상황이 초래되지는 않는다. 그렇지만 선로는 전계나 자계 기준을 초과하여 선로 주위의 사람이나 동식물에 위해하거나 위험을 초래할 확률이 상승하게 된다. 여기서 한계이도란 설계이도에 이득여유를 가산한 이도를 말한다.

전선은 전류에 의한 주열 열과 전선 주위의 날씨에 따라 온도가 변화된다. 따라서 부하나 한계이도로 전선온도를 계산하거나 최대허용온도(maximum allowable temperature)를 토대로 DLR, 또는 이도를 검토하기 위하여 2009년 1년 동안의 해당선로 부하일보와 근처의 기상관측소 기상일보를 이용하였다.

### 2.2 부하 특성

선로는 전선의 종류, 이도기준 등에 따라 최고로 허용할 수 있는 전류가 규정되어 있다. 따라서 전선의 열용량은 규정기상조건(specified weather condition, 이 조건은 전류나 온도 산정에서 가장 열악한 기상상태로 가혹기상조건(worst weather condition)이라고도 한다)에서 이러한 전선허용온도로써 열적 평형상태로 연속 사용할 수 있는 전류 즉, 정적송전용량(steady-state line rating: SLR)을 의미한다[7]. 일반

적으로 전선의 최고허용온도는 규정기상조건 하에서 일정한 인장손실률, 이도기준치 등을 고려하여 결정된다. 송전선로의 전선은 SLR 이하의 부하에서 운용되기 때문에 특별한 경우를 제외하면 결코 최대허용온도를 넘지 않는다. 특히 첩두부하와 같은 중부하인 경우라도 SLR을 산정하는 가혹기상조건이 형성될 확률은 거의 없으므로, 송전선로는 항상 증대 가능한 열용량을 갖고 있다. SLR은 최대허용 전선온도와 규정기상조건에서 산정되지만 DLR은 현재의 기상상태에서 전선의 최대허용온도까지 도달하는 전류로 정의된다 [7]. DLR시스템은 현재 시각의 전선온도(또는 전류)를 알고 이 정보로부터 전력계통이 허용할 수 있는 도체온도까지의 용량을 계산하는 방식을 사용한다. 그러므로 일정한 규정 값으로 부하를 설정하여 운용하는 SLR시스템과는 달리 실시간으로 계산한 값으로 전력공급이나 수용부하를 연속적으로 조절할 수 있다.

그림 1은 실측부하 특성으로 TL#1의 최대부하는 53.7[%], TL#2는 49.6%이다. TL#1 및 #2는 정상적인 동작 상태에서는 비슷한 용량의 부하가 걸리고 있다. 120일 근방에서 #2는 최대부하 부하율은 48.7[%]로 전류는 825[A]이며 회선의 최대허용전류, 1,696[A]를 고려하면 과부하 상태는 아니다. 분석대상 선로의 ACSR 410[mm<sup>2</sup>] 전선은 한계이도온도가 51[°C]이며 한계이도전류는 314[A]이다. 여기서 한계이도전선전류 (limit dip current of conductor: 이하 한계이도전류라 한다)란 규정기상조건에서 전선이 이도여유까지 늘어짐을 허용할 경우에 전선온도인 한계이도전선온도 (limit dip temperature of conductor: 이하 한계이도온도라 한다)에 도달하는 전류로 정의한다.

분석선로는 계절적 부하특성이 뚜렷하게 나타나지 않았지만, 첩두부하가 예상되는 여름철에는 평균부하 유형으로 나타나고 있는 반면, 오히려 11, 12월의 겨울 부하가 크게 나타났다. 과거에는 첩두부하가 주로 여름철에 발생하였으나, 최근에는 일 년에 2번 정도로 여름철과 겨울철에 발생하는 경향이 뚜렷하다. 다시 말해서 연중부하유형은 W 형태로 나타난다. 기온이 낮은 겨울에는 고온의 여름철보다 DLR 용량이 크므로 첩두부하 관리에는 다소 여유가 있다.

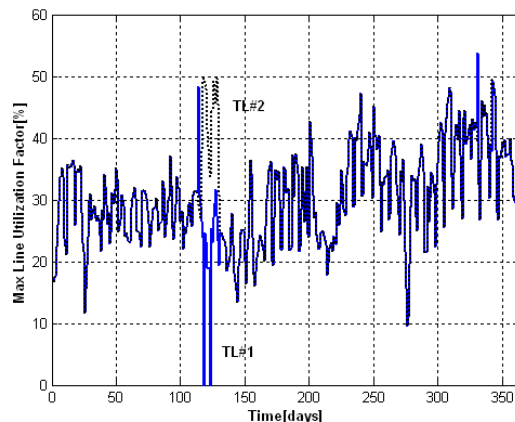


그림 1. 연중 선로이용률  
Fig. 1. Annual line utilization factor

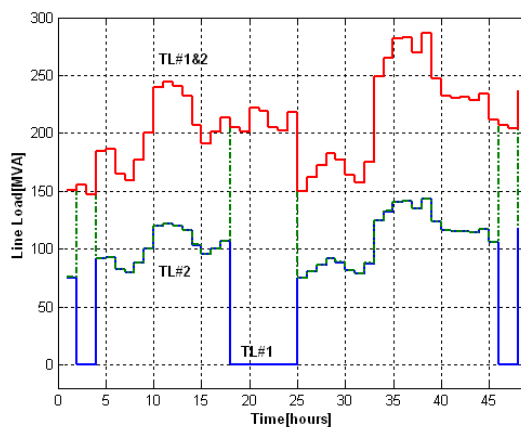


그림 2. 이상상태 동작 일일부하 특성  
Fig. 2. Daily load characteristic during any mal-operation

한편 고장발생 또는 부하변동, 회선상태 등을 구체적으로 검토하기 위한 예로 5월 6, 7일의 특성을 그림 2에서 보여준다. TL#1은 2시부터 2시간 정도, 18시부터 7일 1시까지 8시간 정도가 회로 차단된 상태이다. 특히 TL#1이 차단된 시간에는 고장회선의 부하가 건전회선 TL#2로 부담했음을 알 수 있다.

### 2.3 기상요소와 부하수요

부하는 날씨와 상당히 밀접한 관계를 갖고 변화되

며, 특히 일일부하유형은 기온이나 풍속에 영향을 많이 받으며 각각의 유형도 비슷하다. 이러한 결과들은 선로의 부하예측이나 침투부하 관리는 물론 동적송전용량 적용에 핵심요소로 사용될 수 있다. 그림 3은 과거 10년 동안 측정된 기온 및 풍속과 공주-덕진 TL의 2009년 부하특성이다. 야간부하에 비해 높은 주간부하는 종형(bell shape: 鐘形)으로 나타난다. 풍속도 기온과 유사한 경향을 나타내고 있지만 기온에 비하여 약 1 시간 정도 지연됨을 볼 수 있다. 특히 주간에는 풍속이 기온 변화를 선도하기보다는 오히려 기온이 풍속 변화를 이끈다는 사실이다. 일반적으로 기온보다 풍속이 전선의 온도에 미치는 영향이 크기 때문에 DLR은 풍속보다 지연된 특성을 보인다.

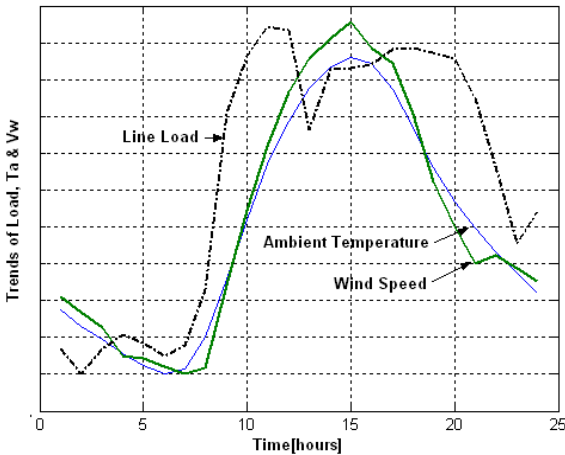


그림 3. 기온, 풍속과 선로부하 유형  
Fig. 3. Trends for ambient temperature, wind speed and line load

부하수요도 기온 및 풍속과 밀접한 상관성이 있다. DLR은 기온이 낮게 되면 그 값이 크고 풍속이 낮으면 크게 된다. 따라서 기온과 풍속이 낮은 시간이 부하수요가 적은 시간대에 형성되므로 DLR을 운용하는 측면에서는 가혹조건을 완화해주는 효과가 있다. 분석 선로의 부하유형이 기상요소들과 상당히 밀접한 관계를 갖고 있다는 사실은 이 분석결과를 응용함으로써 선로의 장단기 부하예측이 가능함을 암시한다.

## 2.4 선로이용률과 부하율

2009년 부하로 전선의 최대허용용량에 대해 선로이용률을 구하면 그림 1에서와 같이 평균 20~30[%]에 지나지 않는다. 최대이용률 중에 50[%]를 초과하는 시간(1회선 차단 시에 고장회선의 부하가 건전회선에 가중된 경우)이 나타나지만, 대부분의 시간에 전선의 허용전류용량의 50[%] 이내에서 운전되었다는 것을 확인하였다. 따라서 선로 운용 상 전선전류나 온도에 대한 어떤 문제도 발생하지 않는다. 결국 2회선인 이 선로에서 선로이용률은 크게 문제가 될 것이 없다.

전선의 한계이도와 한계온도 때문에 부하율은 선로이용률과 관계없이 선로 운용에 매우 중요한 의미를 갖는다. 한계이도전선온도가 51[°C]이므로 가혹조건에서 전선의 최고허용전류는 314[A]이고 따라서 이 전류에 의한 한계부하 즉, 회선의 최대허용부하는 84[MVA]가 된다. 선로설비용량 452[MVA]는 최대허용부하의 5.38[배] 정도이다. 한계부하에 대한 실측부하는 대부분 시기에서 20~30[%]인 선로이용률에 비해 100~150[%] 이상의 부하율을 나타낸다. 따라서 전선은 한계이도온도를 초과하게 된다. 선로에 한계이도전류 이상의 전류가 흐르면 가혹기상조건에서 전선은 한계이도 이상으로 늘어지게 된다. 따라서 이격여유를 초과하게 되어 기술기준의 지상고 기준을 만족하지 못하게 된다.

## 3. 전선온도 추정과 DLR 적용

설계기준에서 정한 허용온도는 규정기상조건으로 계산된 전선의 최고온도이다. 그러므로 가혹기상조건이 아닌 실제 기상조건에서는 일정한 여유부하를 갖기 마련이다. 이때 부하는 현재 기상조건들이 전선온도에 미치는 영향을 정확하게 반영하여 결정한다. 일반적으로 DLR은 현재 기상상태에서 전선의 허용온도로 운용될 수 있는 전류로, 최대전류로 부하를 제한하는 경우에 비하여 상당한 부하증대 효과를 얻을 수 있다. 그렇지만 현재 상태의 기상요소들을 사용하여 전선허용온도에 대응하는 전류 값을 계산할 수 있어야 하고 이 결과를 이용하여 계통을 자동적으로 감시, 조

절할 수 있어야 한다. 선로는 적용 설계기준에 상관없이 전선의 최고허용온도 이하에서 운전된다. 이러한 전제 하에 선로의 부하 제한은 이도와 지상고 문제로 귀결된다. 이도는 전선온도와 비례하므로 부하와 현재 기상으로 결정되는 전선온도 특성으로부터 과부하 상태를 판단하는 것이 실용적인 방법이다.

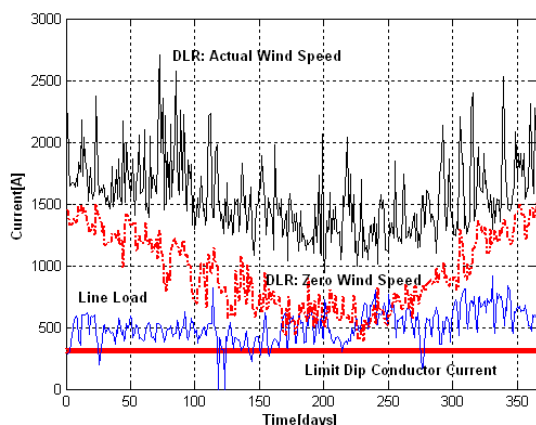


그림 4. 실제 풍속 및 풍속이 0인 경우에 DLR  
Fig. 4. DLRs determined by actual and zero wind speed

그림 4는 실제 풍속 측정치를 사용한 경우와 0으로 가정한 경우의 DLR 특성이다. 선로의 최대부하는 912[A]로 한계이도전류, 314[A]의 290[%]이지만 실제 측정풍속으로 구한 전선온도 최대치는 40.9[°C]로 전선온도의 한계치 51[°C]보다 작다. 최대측정기온은 32.3[°C]이었으나 부하전류의 주울 열에 의해 추정온도는 최대 10[°C] 정도가 높아졌을 뿐이다. 결국 과부하로 인하여 이도여유를 초과하는 상태는 발생하지 않으며, 이때 이 선로는 한계이도전류에 약 300[%] 정도인 945[A]의 DLR 부하를 공급할 수 있다.

풍속이 0이면 0.5[m/s]로 규정된 가혹조건에서 계산된 전선의 연속허용전류가 23[%] 정도 감소된다. 그러므로 풍속 특성을 사전에 정확하게 알지 않으면 DLR의 효율성도 유지하기 곤란하다. 풍속을 0으로 가정하면 도체온도는 증가하고 DLR은 감소된다. 즉 DLR의 최소값은 387[A]이고 평균은 1,974[A]이다. 실제 부하는 한계이도전류 314[A]를 대부분 초과하고 있지만

실제 기상상태 하에서 운용된다면 전선이 51[°C] 허용 온도 범위 내에서 DLR과 같은 상당한 부하를 증가시킬 수 있다.

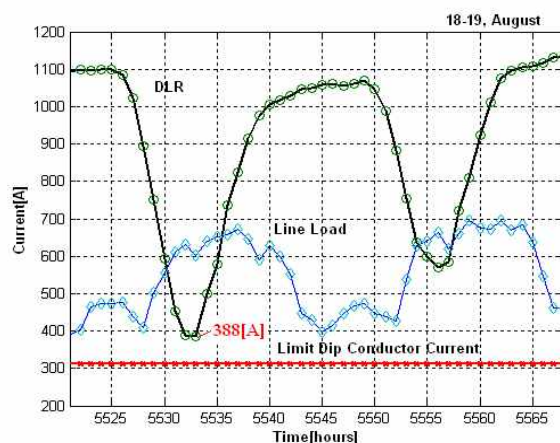


그림 5. 풍속을 0으로 가정한 경우에 일일부하 예  
Fig. 5. Daily load example for assuming zero wind speed

DLR의 효율성을 구체적으로 확인하기 위하여 230, 231일(8월 18, 19일)의 특성을 그림 5에 나타낸다. 8월 19일 5시 예를 들면, DLR이 1,100[A]이고 부하전류가 475[A]로 DLR이 크며 두 값이 모두 한계이도전류, 314[A]를 초과한 경우이다. 부하전류와 DLR이 한계이도전류를 초과하므로 이 조건에서는 전선이 한계이도온도 51[°C]보다 아주 작은 30.5[°C]가 된다. 따라서 선로에 어떤 조치를 취하지 않더라도 이도여유 내에서 안전하게 운전된다. 또한 같은 날에는 DLR이 388[A]로 부하전류, 630[A]보다 낮지만 한계이도전류, 314[A]보다 크다. 이 상태에서는 부하전류가 51[°C]로 전선온도가 상정되어 구한 DLR 값보다 크므로 전선온도는 한계이도온도를 초과한 약 55.7[°C]가 된다. 이 시간에 전선은 이도한계를 벗어나 기술기준의 기준치 이하로 지상고가 낮아진다. 따라서 선로를 기준에 맞도록 운용을 위해서는 현재 부하를 감소시키면 된다. 두 경우에 부하전류는 유사하지만 DLR 값은 현저한 차가 나며 상황처리도 다르게 된다. 이러한 판단과 문제해결은 오직 DLR을 채용하는 경우에만 가능하다.



#### 4. 전선온도에 의한 이도 추정

이도는 전선온도에 의한 재료·기계적 변형을 나타낸다. 이도는 선로가 가설되는 환경 조건과 전선의 허용전류 및 철탍 형태를 고려하여 선로와 대지 또는 공작물 등으로부터 안전한 이격거리를 설계하는 중요한 요소이다. 설계기준에서 지상고는 기술기준에 명시된 공작물별 이격거리를 가산하여 최저값을 결정하는데, 특히 특고압 송전선로의 지상고는 정전유도 전압도 고려하여 정한다. 일반적으로 이도 계산은 전선의 구조와 재료 특성뿐만 아니라 가설 장소의 풍압조건 등 복잡한 관계식으로부터 구해지므로 자세한 설명은 생략한다[5]. 다만 경간은 154[kV] 선로의 최대경간인 700[m]으로 가정하였고, 고온계 III지역의 풍압하중인 88[kgf/m<sup>2</sup>]를 적용하였다. 이도의 계산에는 실제 부하와 기상데이터로부터 구한 전선추정온도를 이용하였다.

분석선로에 대한 적용 설계기준에 따라 지상고 설계시 전선온도, 40[°C]와 한계이도온도, 51[°C]를 기준으로 하였다. 전선온도는 선로에 미치는 기상요소들의 영향을 나타내고 있으므로 전선종류와 풍압조건이 일정하면 이도는 전선온도에 거의 비례하는 특성을 나타낸다. 우선 설계전선온도 40[°C]에서 이도를 구하면 37.0[m]이고 한계이도온도 51[°C]에서는 37.5[m]이다. 따라서 이들 사이의 차 즉, 이득여유는 0.5[m]로 이도 설계기준과 기술기준에서 규정한 이격거리 차 중 최소값과 일치한다.

실측 부하와 기상으로 결정한 전선추정온도를 사용하여 이도를 구하면, 전선온도가 한계이도온도를 넘지 않은 것처럼 추정이도도 이도여유 한계를 초과하지 않았다. 따라서 운용된 실제 부하가 한계이도전류를 초과하는 부하임에도 불구하고 기상상태가 일 년 내 한 번도 가혹조건 이하로 나타나지 않았으므로 안전한 선로 운용이 가능하였다. 가혹기상조건이 나타날 확률은 거의 없지만 기상요소 중 풍속이 전선온도에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 기온은 실제 측정된 값을 그대로 사용하고 풍속을 0으로 가정한 경우에 전선온도를 계산하였다. 이때 설계이도를 기준으로 추정이도여유를 나타내면 그림 6과 같다. 실제풍속을

사용한 경우에는 이도여유 이하로 나타나지 않지만, 풍속을 0으로 가정한 경우에는 최대이도가 37.7[m]로 한계이도 37.5[m]를 넘어 기술기준에 따르면 평지의 지상고 6[m]보다 약 0.2[m] 정도 감소된다. 따라서 이도가 이격여유 범위 이상으로 늘어서 기술기준을 만족하지 못하게 된다. 그렇지만 앞에서 언급한 바와 같이, 송전선로의 DLR을 추정함으로써 이러한 문제를 개선할 수 있고 노후 선로라도 부하를 증가시켜 공급할 수 있다.

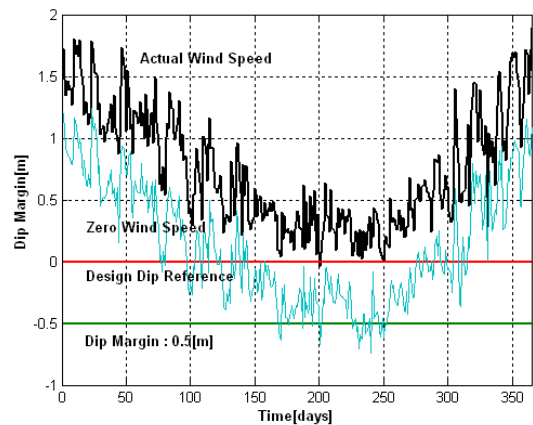


그림 6. 분석 선로의 이도여유 특성  
Fig. 6. Dip margin characteristics of analysis line

#### 5. 결 론

국내 가공송전선로는 이도 및 지상고 기준들이 시기에 따라 각각 다르게 적용되어 운용되고 있다. 본 연구에서는 초기의 설계기준으로 건설된 송전선로의 부하일보를 토대로 설계기준과 선로운용실태를 분석하였다. 실제 선로를 대상으로 선로이용률과 부하율을 검토하였고 한계이도온도와 한계이도전류 개념을 도입하여 선로의 허용부하용량을 산출하였다. 기상관측값을 사용하여 부하전류에 의한 전선온도를 추정하였으며, DLR 적용 방안을 검토하였다. 또한 전선추정온도로 현재 선로부하에 대한 이도를 계산한 결과를 설계기준과 비교하였다. 현재 낮은 이도 설계기준으로 건설, 운용되고 있는 선로의 운용실태와 문제점을 분석하였다. 기존의 설계기준으로 건설, 운용되고 있는

노후 송전선에 대해 초래할 수 있는 이도나 과부하 문제들을 해결하는 방법 중 하나로 DLR이 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

### References

- [1] 국가표준기본계획, 산업자원부 공고 제2000 - 177, 2000. 11. 30.
- [2] 김남호, 국제표준화 동향과 우리의 대책, 한국전기기술기준위원회, 2002.
- [3] 가공송전선용 전선 선정기준 - 1210, 한계이도전선공사, 2003.
- [4] 송전선로 지상고 설계기준 - 1020, 한계이도전선공사, 2003.
- [5] 가공선 이도 설계기준 - 1211, 한계이도전선공사, 2003.
- [6] 전기설비기술기준 및 판단기준. 2007년 1월, 산업자원부.
- [7] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-2006.
- [8] L. Ren, J. Xiuchen and S. Gehao, "DLR Research for dynamic increasing transmission capacity", 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing China, 2008.

### ◆ 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 전기전자제어공학부 교수.