

한국전력 노후 가공송전선의 동적송전용량에 대한 재평가

(A Reassessment for Dynamic Line Rating of Aged Overhead Transmission Lines in
Kepco's Network)

김성덕*

(Sung-Duck Kim)

Abstract

During the past 2 decades, many electric power companies have been searching various solutions in order to supply power with economical and more efficiency in the present transmission utilities. Most interesting method to increase the line capacity of overhead transmission lines without constructing any new line might be to adapt Dynamic Line Rating(DLR). Specified rating is normally determined by any current level, not by conductor temperature. Although specified rating is essential to design transmission line, dip may be the most important factor in limiting transmission capacity. Transmission lines built by the oldest dip criterion among the 3 different design criteria for conductor dip are nearly over one-half of all Kepco's transmission lines. This paper describes an up-rating method for those transmission lines in order to apply DLR technique. Based on limit dip conductor temperature and current of the transmission lines, limitation performance and effectiveness in applying DLR with weather model are analyzed. As a result of analysis, it can be shown that an improved method could be effectively used for increasing the line rating of old transmission line which was built by the design criterion with low dip margin.

Key Words : Overhead Transmission Line, Dynamic Line Rating, Dip Margin

1. 서 론

21세기에 이르러 경제적, 환경적인 여건의 변화로 인하여 수많은 전력회사들은 전력의 생산, 공급 및 판매에 개선 방안을 모색하기 시작하면서 새로운 선로

의 건설이나 설비의 증설에 수많은 제약이 따르게 되었다. 따라서 기존 선로의 효율성과 경제성을 재검토 하기에 이르렀다. 장시간 대기 중에 노출된 도체의 노화는 계통의 운용, 유비보수, 전력공급에 지장을 초래 하거나 공중의 안전을 저해시키기도 한다. 그러나 도체는 사전검사에 의해 수리, 교체가 가능한 댐퍼나 클램프와 같은 송전설비에 비해 진단이나 보수할 수 없는 유일한 설비이다[1].

세계의 대부분 전력회사들이 가공송전선로의 도체

* 주저자 : 한밭대학교 전기전자제어공학부 교수
Tel : 042-821-1135, Fax : 042-821-1128
E-mail : sdkim@hanbat.ac.kr
접수일자 : 2010년 8월 2일
1차심사 : 2010년 8월 10일
심사완료 : 2010년 8월 25일

로써 ACSR(Aluminum Conductor Steel Reinforced)을 사용해 온 것처럼 국내의 송전선로도 주로 ACSR를 사용하였다. 가공도체의 인장손실을 초래하는 열화의 관점에서 ACSR 도체의 최대허용도체온도(maximum permissible conductor temperature)는 보통 90[°C]로 주어진다. 따라서 도체의 열용량(thermal rating)은 규정기상조건(specified weather conditions)에서 도체가 이 허용온도에서 열적 평형상태로 연속 사용할 수 있는 전류, 즉 정적열용량(Steady-state Line Rating : SLR)이다[2-3]. 일반적으로 최대허용도체온도는 규정기상조건 하에서 일정한 인장손실률, 이도여유(dip margin) 등을 고려하여 결정한다. 그동안 한국전력에서도 끊임없이 고강도-저이도 도체를 개발하거나 도체의 제조기술 개선 그리고 철탑의 설계기준 강화 등으로 기존에 적용하던 설계기준을 여러 번 개정, 보완해 왔다. 도체의 설계수명(design life of conductor)은 수십 년으로 통일된 값으로 규정되지 않지만, 현재의 국내 송전선로 중에는 설계기준이 다르게 적용되었거나 새로운 개발 도체를 사용하는 등 다양한 선로들이 건설되어 혼용되고 있는 실정이다.

송전선로는 SLR 이하의 부하에서 운용되기 때문에 사고나 고장 등 특별한 경우를 제외하면 결코 최대허용온도를 초과하지 않는다. 특히 침두부하와 같은 중부하인 경우라도 규정기상조건이 발생할 확률은 거의 없으므로, 송전선로의 도체는 항상 어느 정도의 증대 가능한 열용량을 갖고 있다. SLR은 최대허용도체온도와 규정기상조건에서 규정되지만 동적송전용량, 또는 동적열용량(Dynamic Line Rating : DLR, 또는 동적송전용량이라 한다)은 현재의 기상상태에서 도체가 최대허용온도까지 도달하는 허용전류로 정의된다[4]. DLR을 적용하면 송전선로 설비를 최대이용률로 강화시킬 수 있으며 침두부하나 비상정격에서 전력선로를 효율적으로 제어할 수 있다. 만약 보호시간을 알 수 있으면 선로운영자는 비상시에 적당한 대책을 세워 선로가 심각한 상태로 진전하는 것을 막을 수 있다.

선로부하는 도체온도로 제어되는 것이 아니라 전력 또는 전류로써 관리된다. 그러므로 선로가 부담할 수 있는 최대전류가 제한되어 있다. 물론 이러한 전류는 도체의 온도와 밀접한 관계가 있지만 직접 도체온도

로 최대부하를 관리하는 것은 아니다. 일반적으로 선로의 허용용량을 결정하는 가장 중요한 요소가 이도이다. 이도는 도체전류와는 달리 도체온도와 직접 비례하므로, 선로의 허용용량을 결정할 경우에는 반드시 이도 설계기준을 고려해야 한다.

지상고(ground clearance)는 도체의 허용전류와 이도에 관계되고, 철탑, 변압기 또는 보호계전기 등과 같은 송·변전설비를 설계하는데 핵심요소이다. 다시 말해서 현존하는 송전선로의 용량을 증가시키는 방법은 그 선로에 적용된 이도 및 지상고 설계기준을 주의 깊게 고려해서 결정해야 한다. 이 연구에서는 과거 이도 설계기준을 적용하여 건설한 한국전력의 송전선로에 대한 송전용량 증대 방안을 모색한다. 1992년 7월 이전에 첫 번째 이도 설계기준[5]으로 건설되었던 노후 송전선로에 대하여 도체허용전류, 이도여유 또는 SLR 등을 실제 선로에 적용하여 DLR 적용할 경우에 선로의 효율화 방안을 검토한다.

2. 설계기준의 평가

2.1 열용량과 이도

선로를 안전하게 운용하기 위한 송전용량은, 알루미늄 어닐링 때문에 초래되는 도체의 인장감소를 고려하여 충분한 전선높이를 유지할 수 있는 최대허용도체온도로 제한된다. 이때 도체 최대허용전류는 도체온도, 기상조건 및 도체종류에 따라 열평형 상태에서 계산된다. 도체전류와 온도를 각각 I [A] 및 T_c [°C]라 하면 정상상태에서 열평형방정식은 다음과 같다[2-3].

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

여기서 R_{ac} [mΩ]는 도체온도에서의 교류저항이고, Q_c [W/m²], Q_r [W/m²], 및 Q_s [W/m²]는 각각 대류열, 방사열 및 태양열을 나타낸다.

이도는 도체의 신장률이 증가하면서 발생하는 도체 인장강도의 손실을 반영한다. 그러므로 이도는 규정

기상조건에서도 안전한 전력공급이 가능하도록 송전선로를 설계하는 경우에 고려해야할 중요한 요소들 중 하나이다. 경간 길이를 L_1 이라 하고 임의조건에서 도체길이를 L_2 라 할 때, 인장강도와 도체온도에 의해 다음 식이 얻어진다[6].

$$L_2 - L_1 = \frac{T_L - T_{LM}}{AE} + \alpha(T_c - T_{dc}) \quad (2)$$

여기서 T_{LM} [kgf] 및 T_L [kgf]은 각각 설계장력 및 임의조건 장력을 나타낸다. T_{dc} 는 도체의 설계온도로 고온계에서는 10[°C], 저온계에서는 -5[°C]이다. 또한 A [mm²], E [kgf/mm²], 및 α [1/°C]는 각각 도체의 단면적, 탄성계수 및 신장률을 나타낸다. 일반적으로 이도는 천이온도, 임계경간, 풍압조건, 도체종류 또는 설치지형 등과 같은 수많은 요소들이 관련된 복잡한 수식으로 결정된다. 자중이 W_c [kg/m]인 도체를 경간 S [m]에 가설하면 도체온도 T_c 에서의 장력 T_L 를 구할 수 있으며 이때 이도는 다음과 같다.

$$D = \frac{W_c S^2}{8T_L} + \frac{W_c^2 S^4}{384T_L^3} \quad (3)$$

식 (3)은 도체가 가설될 경우 계산되는 설계이도이다.

도체가 규정된 최대온도나 전류에 도달한다는 가정으로 실제 기상요소, 지리적 요인들이나 도체전류로 계산되는 DLR로 송전용량 여유 값을 추정할 수 있다. DLR 기법은 이미 여러 학자들에 의해 다양한 방법으로 연구되고 실용화되었다[7]. 이러한 DLR은 기상조건, 도체전류, 이도나 장력을 측정하여 결정할 수 있다. DLR을 산정하기 위한 대부분의 방법들은 기본적으로 현재의 기온, 풍속, 일사량이나 풍향 등의 기상요소들을 사용한다. 때때로 이러한 기상요소들은 기상 센서로부터 직접 측정하기도 하지만 기상청으로부터 실시간으로 수신하여 사용할 수도 있다. 이와 같이 현재 도체허용전류를 추정하므로써 선로 운용자는 도체의 공급 또는 수요전력에 관한 정보를 판단할 수 있다.

2.2 이도 및 지상고 설계기준

송전선로에서는 도체의 최대허용전류에 따라 변압기 용량이나 차단기 규격이 결정되며, 이도나 지상고 설계기준[5,8]에 의해 철탑이 설계된다. 금속도체의 어닐링 특성에 의해 최대허용온도가 결정되므로 연속 사용가능한 최대허용온도 값은 유사하다. 국내 가공송전선 도체의 8~9 종류 중 약 80~90[%] 정도가 ACSR이므로 본 논문에서는 이 도체만 분석대상으로 가정한다. 일반적으로 ACSR의 최대허용온도는 90 [°C]이지만, 이도 또는 지상고 설계기준이나 허용전류, 단시간 정격의 채용 여부에 따라 각 전력회사는 50~120[°C] 사이에 적당한 값의 최대허용온도를 적용한다.

국내 이도 설계기준[5]에 따르면 지상고를 검토할 때, 연속허용온도를 90[°C]로 기준으로 하는 일반도체인 경우에 도체온도를 설계기준 개정 시기에 따라 40 및 75[°C]로 다르게 규정하고 있었다. 이러한 지상고 및 이도 설계기준에 따라 가설하는 경우에 적용 도체온도는 최대허용온도 이하이다. 따라서 최대허용온도에서도 안전한 이격거리가 확보될 수 있도록 하기 위하여 지상고 설계기준에서는 전기설비기술기준에 규정된 공작물별 이격거리를 가산하여 최저지상고를 결정하게 된다. 이와 같이 가산하는 이격거리를 이도여유(dip margin)라 한다.

이도 특성은 도체종류와 규격이나 전압크기 및 적용경간에 따라 다르다. 본 연구에서는 ACSR 410[mm²] 이하인 도체가 사용되는 154[kV], 고온 III지역, 경간이 700[m]인 선로를 대상으로 기술한다. 1992년 7월 이전 설계기준(이하에서는 이 기준에 의해 건설된 선로를 Group I이라 한다)에 따르면 지상고를 결정하는 경우에 도체의 적용온도가 40[°C]이면 계산이도는 37.04 [m]이다. 여기에 0.5[m]의 이도여유를 가산하면 최저이도는 37.54[m]가 되고 이러한 이도는 도체온도가 51[°C]인 경우의 이도와 같다. 이와 같은 최대이도에 도달하는 온도를 한계이도 도체온도(limit dip conductor temperature)라 하고 이 온도에서 공급할 수 있는 전류를 한계이도 도체전류(limit dip conductor current)라 가정한다.

지상고 검토 시 1992년 7월 이후에는 도체의 연속허용전류의 80[%]에 해당되는 도체온도인 75[°C]로 높였으며 이도여유는 0.5[m]를 그대로 사용하였다(Group II). 그러나 1997년 10월 개정기준에서는 이도여유만 2.05[m]로 상향 조정하였다(Group III). 따라서 154[kV] 동일도체에 대해 한계이도 도체온도는 Group II 및 III 각각에 대해 86[°C] 및 122[°C]이다. 본 연구는 Group I의 선로만 대상으로 하며 각 선로 개별적인 지상고 특성은 고려하지 않았다. 따라서 이도여유나 한계이도 도체온도 등은 Group I의 모든 선로에 적용할 수 있는 최저기준을 의미한다. Group I 선로는 한계이도 도체온도는 51[°C]로, 규정기상조건에서 한계이도 도체전류는 157[A]로 ACSR의 연속허용전류인 848[A]의 18.5[%]에 불과하다. Group II의 도체는 한계이도 도체온도가 86[°C]로 여전히 ACSR의 최대허용온도보다 낮다. 반면에 Group III의 도체는 122[°C]로 최대허용온도 90[°C]를 초과한다. 일반적으로 도체는 최대허용온도 이하에서 운용하므로 Group III의 선로는 SLR을 공급할 경우에도 충분한 지상고를 유지할 수 있다. 국내 송전선로의 ACSR 도체는 최대허용온도를 90[°C]로 정하고 이 값에 규정기상조건에서 연속허용전류를 SLR로 결정하고 있다. 그렇지만 Group I의 ACSR 도체에는 연속허용전류를 부담시킬 수 없으므로 최대효율로 선로를 이용할 수 없었다. 왜냐하면 Group I은 규정기상조건에서 이 도체가 안전한 지상고를 유지하기 위한 한계온도 51[°C]를 초과할 수 없기 때문이다.

3. 저이도 선로의 DLR 적용

3.1 사례연구

국내 전체선로 중 50[%] 정도인 Group I의 송전선로는 저이도 및 낮은 도체설계온도 기준을 적용하였기 때문에 도체허용용량보다 현저하게 낮은 한계이도 도체전류에서 최대부하를 제한하고 있다. 실제로 Group I은 한계이도 도체온도에 의해 산정된 부하율이 37[%]에 불과하다. 국내 154[kV] 송전선로 길이는 2009년 통계로는 약 70[%]이다. 또한 Group I의 대부

분 선로는 최저 2~30년 이상의 경년을 나타냄으로써 대기부식이나 열화에 의하여 이도가 증가하는 등 많은 문제를 내포하고 있다. 따라서 기존 선로의 효율화와 경제적인 운용은 Group I의 154[kV] 선로의 부하운용과 송전용량 증대문제와 직결되어 있다.

부하운용과 DLR 특성을 검토하기 위하여 한국전력 대전전력관리처 관할인 덕서 TL을 분석대상으로 하였다. 이 선로는 154[kV], ACSR 410 2도체 2회선으로 1987년 8월에 가설되었으며 최대선로용량은 회선 당 450[MVA]이다. 이 선로에서 1년간의 측정된 부하전류로부터 선로이용률(line utilization factor)을 구하면 최대 12.9[%]이고 평균이용률은 3.6[%]이었다. 여기서 선로이용률은 도체의 연속허용전류 1696[A]에 대한 백분율이고, 부하는 ACSR 410 2도체 1회선에서 측정된 전류이다. 이도 설계기준을 고려하지 않으면 선로이용률은 매우 작으며 2회선 선로의 1회선 부하부담을 50[%]로 가정하더라도 이 선로는 상당한 부하여유를 갖고 있었다.

대상선로는 이도여유가 작아 ACSR 도체의 연속허용전류를 공급할 수 없다. 이 선로의 한계이도 도체전류는 회선 당 314[A]이므로 이 전류에 대한 실측전류사이의 연중부하율을 구하면 최대 69.6[%], 평균 19.6[%]로 그림 1과 같이 나타난다. 일정기간 동안에는 50[%] 부하를 초과하고 있으나 이 값 역시 한계이도 도체전류에 의한 허용부하 이하임을 알 수 있다. 따라서 이 선로도 한계이도 도체전류보다 한계이도 도체온도 51[°C]를 기준으로 DLR을 계산하여 운용하는 경우에 적어도 30[%] 이상의 부하를 더 공급할 수 있다.

DLR을 산정하는 기상데이터는 동일 기간에 선로주변의 기상관측소에서 1년간 관측된 데이터를 사용하였다. 풍속은 규정기상조건에서 0.5[m/s]로 DLR에 가장 민감한 영향을 주는 기상요소 중 하나이다. 특히 저풍속 범위인 0 및 0.2[m/s]에서 계산전류는 0.5[m/s]로 산출한 전류에 대해 각각 23, 및 19[%]가 감소된다. 측정풍속 중, 12.2[%]는 0.5[m/s] 미만이었고 6.5[%]는 0.2[m/s] 미만이었으며 0으로 주어진 데이터도 4.4[%]나 되었다. 일반적인 프로펠러 풍속계는 저속에서 감도가 낮아 분석결과와 신뢰성이 떨어진다. 그러나 이

러한 조건도 DLR 산정에 가혹조건이 되므로 측정풍속을 분석에 그대로 사용하였다.

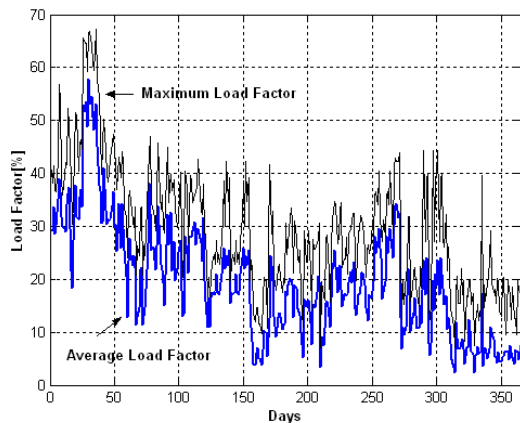


그림 1. 한계이도 도체전류를 고려한 도체의 부하율
Fig. 1. Conductor load factor considering limit dip current

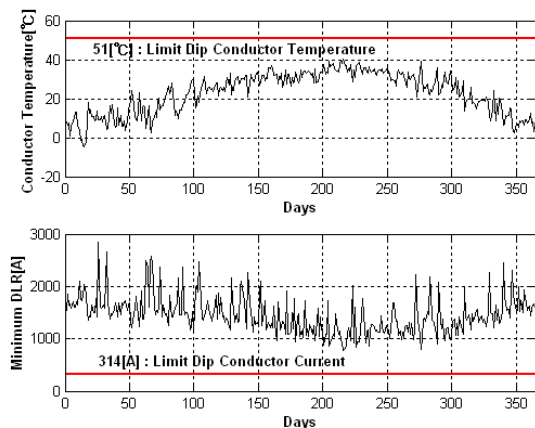


그림 2. 추정도체온도와 DLR
Fig. 2. Estimated conductor temperature and DLR

측정전류에 대한 도체의 추정온도와 실제기상 측정값으로부터 도체가 한계이도 도체온도까지 허용할 수 있는 전류, 즉 DLR을 구하면 그림 2와 같다. 추정도체온도를 일일 중 최대로 구하면 DLR은 최소가 된다. 따라서 실제 선로는 부하전류에 의해 도체온도가 한계이도 도체온도 이하이므로 지상고는 안전하게 유지된다. 또한 이 선로는 도체온도가 51[°C]가 될 때까지

증가시킬 수 있는 부하는 772[A] 정도로, 이때 부하율은 91.0[%], 선로 이용률은 45.5[%]로 개선된다.

3.2 한계이도 도체전류와 도체온도

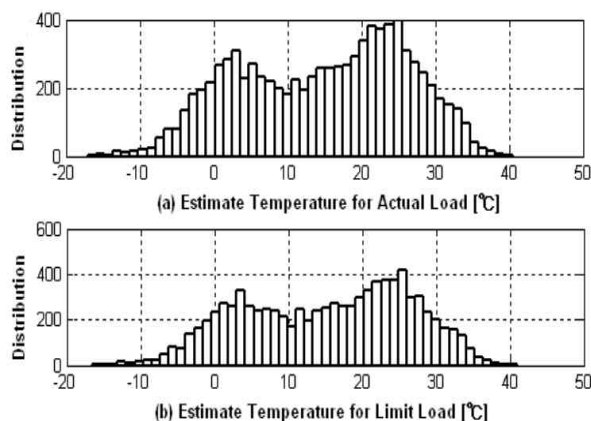


그림 3. 도체온도 추정치
Fig. 3. Conductor temperature estimates

그림 3 (a)는 대상선로의 실제 부하전류와 각 시간에서 측정된 기상요소들을 사용하여 추정된 도체온도 분포를 나타낸다. 이 선로의 한계이도 도체온도는 51 [°C]로 도체의 추정온도는 한계 값 이하임을 알 수 있다. 따라서 앞에서 기술한 바와 같이, 침두부하 관리를 위하여 최대허용부하를 부담시키지 않는 한, 이도여유가 작은 설계기준으로 건설된 선로라도 안전한 지상고를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

한편 동일한 기상조건에서 한계이도 도체전류를 최대부하로 인가할 경우에 추정도체온도 분포를 그림 3(b)에서 보여준다. 규정기상조건 중 풍속이 0.5[m/s]에서 0으로 변화되면 SLR은 23[%]가 감소되고 풍속이 0인 데이터가 4.4[%]로 주어져지만, 기온 등 다른 기상요소들이 가혹조건이 아니므로 추정도체온도는 한계이도 도체온도를 초과하지 않는다.

그림 4는 부하전류로 구한 추정도체온도 특성을 나타낸다. 일일 최대도체온도는 이 선로의 지상고 설계시에 한계이도 도체온도 51[°C] 이하이므로 이 선로에는 상당한 부하를 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 실제로 이 선로의 부하를 한계이도 추정온도로 관리한

다면 그림 5와 같이 적어도 772[A] 정도의 부하 증대가 가능할 것이다. 이 값은 한계이도 도체전류 부하보다 2.45배 증가된 값으로 나타났다.

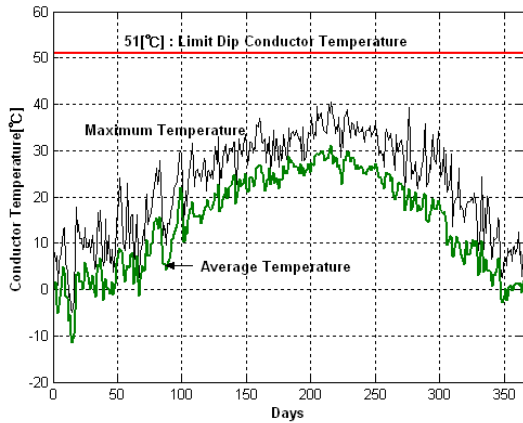


그림 4. 추정된 연중 도체온도
Fig. 4. Annual temperature estimates of conductor

분석한 바와 같이, 규정기상조건에서 Group I의 한계이도 도체온도, 51[°C]를 기준으로 대상 송전선로에는 314[A], 84[MVA] 밖에 공급하지 못한다. 그러나 이 선로에 하계첨두부하처럼 164[MVA]를 최대부하로 상정하면 규정기상조건에서 도체온도는 55[°C] 정도로 추정된다. 따라서 이론 상 Group I에 속하는 이 선로는 한계이도 도체온도를 초과하기 때문에 도체의 늘어짐이 증가하여 지상고를 안정하게 유지하지 못한다. 그렇지만 규정기상조건은 확률적으로 거의 0이므로 이러한 위험성은 상당히 감소된다. 따라서 확률적 문제이지만 한계이도 도체온도 이상의 온도 증가(전류 부담 증가)가 가능할 수도 있다. 예컨대 동일한 기상 상태에서 한계이도 도체전류, 314[A]보다 높은 첨두부하 164[MVA](622[A]/회선)를 연속하여 공급한다고 가정하더라도 도체는 한계이도 도체온도, 51[°C]에 도달하지 않는다. 따라서 규정기상상태가 아닌 한 여유부하를 더 공급할 수 있는 것이다. 결국 이러한 분석결과로부터 송전선로의 DLR은 도체의 규정온도에 의해 산정된 전류보다 도체전류에 의해 주어지는 도체온도로 관리하는 것이 합리적이라 판단된다.

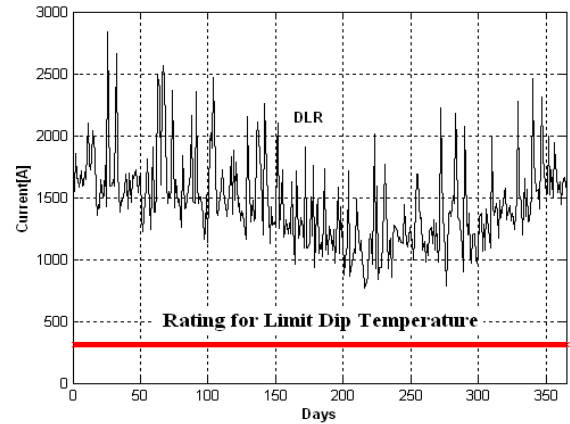


그림 5. 한계이도 도체전류와 추정된 최소 DLR
Fig. 5. Estimated minimum DLR and rating of limit dip temperature

4. 결 론

다른 이도 설계기준으로 건설된 국내 송전선로 중, 가장 오래된 기준으로 가설된 송전선로는 현재에도 전체 선로 중 절반을 넘고 또한 상당한 경년으로 노후화되었다. 이러한 선로들은 현저하게 낮은 도체온도와 작은 이도여유로 설계되었기 때문에 안전한 지상고를 유지하기 위해 선로용량을 제한할 수밖에 없다. 따라서 이들 선로에 대한 송전용량 증대 가능성과 그 효율성에 대해 검토되었다.

본 논문에서는 실측부하와 기상데이터를 사용하여 낮은 이도여유의 설계기준으로 건설, 운용되는 송전선로용량을 증가시키기 위한 방안을 모색하였다. 한계이도 도체온도와 한계이도 도체전류를 정의하고 이 척도들을 이용하여 기상모델 DLR의 적용가능성을 확인하였다. 해석 결과 낮은 이도 설계기준 하에서도 한계이도 도체온도 이내에서는 DLR 운용이 가능할 뿐만 아니라 제한적이긴 하나 송전용량을 어느 정도 증가시킬 수 있음을 밝혔다. 따라서 안전한 지상고 유지 때문에 허용용량이 제한되었던 송전선로라도 경제적이고 효율적으로 운용할 수 있다고 판단된다.

References

- [1] 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.
- [2] Draft standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors, IEEE Standard P738, 1999.
- [3] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-2006.
- [4] 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.
- [5] 가공송전선 이도 설계기준 - 1211, 한국전력공사, 2003.
- [6] 가공송전선 이도 설계기준 - 1211, 해설서, 한국전력공사, 2003.
- [7] 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.
- [8] 송전선로 지상고 설계기준 - 1020, 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. 2000~2001년 미국 Kansas State University 객원교수. 현재 한밭대학교 전기전자제어공학부 교수.