Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18, No.1, pp. 125~134 March 2004 논문 18-2-18

한국전력 가공송전선의 허용전류를 증가시키기 위한 기상모델의 평가

(An Evaluation of Weather Model for Increasing Ampacity in KEPCO's Overhead Transmission Lines)

김성덕*
(Sung-Duck Kim)

요 약

전력설비 시장의 새롭게 조정된 경제환경으로 인하여 송전선로에 대한 투자와 운용 정책에 근본적인 변화가 초래되었다. 따라서, 최악의 기상조건을 사용하는 형식적인 가정들을 토대로 주어지는 도체의 허용전류를 증가시키기 위하여 현재 설비를 평가하는 것이 중요하게 되었다. 여전히 세계의 대부분 전력회사에서는 정적송전용량을 채용하고 있지만, 몇몇 회사들은 송전용량을 증가시키기 위하여 동적송전용량을 실시간으로 모니터링 하는 등 다양한 시도를 해왔다. 이 연구는 기상모델로 규정된 한국전력공사(KEPCO)의 송전선로의 정적송전용량을 평가하기 위한 시도이다. 과거 기상청에서 관측된 기상 데이터를 근거로 송전용량을 결정하기 위한 몇 가지 환경적 특성을 검토하였다. 그 결과, 한국전력의 송전선로에 계절별 또는 지역별 정격을 적용할 수 있으며, 현재 운용 중인 도체를 새로운 고내열 도체로 교체하지 않더라도 기존 송전용량을 좀더 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract

The new deregulated economic environment in the power utility market is forcing fundamental changes in the investment and operational decisions regarding transmission lines. Hence, it has come to be an important issue to evaluate their current utility in order to increase conductor ampacity based on conservative assumptions of worst case weather conditions. Static thermal rating has been still applied in most power companies worldwide, however some of them have been done various trials such as monitoring dynamic line ratings to increase line ratings in real time. This study is an attempt to access the static line ratings in Korea Electric Power Corporation(KEPCO) transmission lines, which were specified by weather model. Several environmental performances for determining static line ratings are examined by using the past weather data of Korean Meteorological Administration. As a result, it is shown that seasonal or regional line ratings could be adopt to the KEPCO's transmission lines, and their line ratings could be more increased without refurbishing current conductors in service to new high-temperature ones.

Key Words : Ampacity, Static Line rating, Weather Model, Transmission Lines

* 주저자 : 한발대학교 전기 · 전자 · 제어공학부교수
Tel : 042-821-1135, Fax : 042-821-1128
E-mail : sdkim@hanbat.ac.kr
접수일자 : 2003년 10월 1일
1차심사 : 2003년 10월 9일
심사완료 : 2003년 10월 29일

1. 서 론

최대다수 국가들에서는 경제발전과 더불어 전력

수요가 급격하게 증가되었지만, 발전소의 건설과 송전선로의 신설 등은 경제적인 이유, 환경문제 등으로 점점 어려움에 처해지기 시작하였다. 특히, 과거 10년 동안 전력회사들의 구조 개편으로 정책의 결정과 경제적 투자가 용이하지 않게 됨에 따라 전력회사는 현재 운용되는 선로의 신뢰성을 유지하면서 전력공급용량을 최대로 증가시키는 방안을 찾을 수밖에 없었다[1~3]. 이러한 방안 중 하나가 기존 선로의 허용용량의 평가와 증대이다.

기존선로의 송전용량(line rating)을 증가시키기 위해서는 먼저 설계용량이 현실적으로 적당한 것인지를 검토해야 하고 장기간 사용된 선로의 최대허용용량을 정확하게 평가하여야 한다. 가공 송전선로의 송전용량은 도체의 최고허용온도로부터 구해지는 열용량(thermal rating), 즉, 최대허용전류(maximum ampacity)와 수전단의 전압강하 그리고 계통의 안정도 여유로부터 결정된다. 그러나, 전압강하는 선로특성으로 구해지고 계통의 안정도도 정해져 있으므로 송전용량은 주로 도체의 열용량으로 주어진다. 이 때, 도체의 허용온도가 송전용량을 결정하는 주요소이며 이 온도는 주로 기상조건에 의해 제약을 받는다. 그러므로, 송전용량은 최악의 기상조건에서 가정된 도체의 최고허용온도(maximum admissible temperature)로부터 구해진다. 전력회사는 송전용량에 영향을 주는 요소들 중에 재질 상 허용온도를 검토해야 하고 이 온도와 인장과의 관계를 정확히 정량화하는 것이 필요하다. 따라서, 도체 온도와 장력을 측정하거나 이들이 도체의 이도(dip or sag)와 지상고(ground clearance)에 미치는 영향 등이 검토되는 한편, 철탑 등 구조물을 변경하지 않고 사용할 수 있는 고내열 도체의 개발에 역점을 두었다[4,5]. 허용전류는 기본적으로 기상모델(weather model)로 결정되지만 도체온도 모델(conductor temperature model) 및 온도-새그 모델(temperature sag model) 등도 이용된다[6].

대부분의 전력회사들은 송전선로 안전성을 확보하기 위하여 실제 선로가 부담할 수 있는 허용용량보다 현저하게 낮은 부하로 송전시스템을 운전한다. 그렇지만, 전력수요 증가, 환경문제, 구조개편, 및 경제적 압력으로 전력회사는 기존 선로를 정적송전용량(static line rating :SLR)에 가깝도록 전류를 증가시키기도 한다. 허용전류는 어닐링(annealing)과 인장손실 또는 지상고의 감소를 초래하는 과다한 도체온도 상승에 의하여 발생될 수 있는 위험성을 최소화할 수 있는 한계값이어야 한다. 따라서, 현재 선로의 상태와 SLR에 대한 신뢰성을 결정하는 것이 매우 중요하다. 이러한 검토 결과를 토대로 철탑 구조물을 높이거나, 재건설하거나 또는 도체의 장력을 다시 조절하는 방법을 사용하기도 한다. 그렇지만, 이러한 방식들은 선로를 휴전시켜야할 뿐만 아니라 비용이 높거나 또는 불가능한 경우도 있다. 이들 방식과는 달리, 동적송전용량(dynamic line rating : DLR)[7]은 도체 주위의 기상요소나 도체의 전류와 도체온도를 모니터링하는 방식으로 실시간으로 허용용량을 감시하여 전력공급을 증가 또는 감소시킬 수 있는 정확한 정보를 시스템 운용자에게 제공할 수 있다. DLR을 모니터링하기 위한 여러 가지 방법들이 시도되어 있지만 대부분의 모니터링 시스템은 광범위한 지역에 가설하기에는 적합하지 않을 뿐만 아니라 시설, 운용 등에 많은 어려움이 존재하므로 현재까지 대부분의 전력회사들은 SLR 정격을 적용하고 있다.

허용전류는 도체의 재료, 전기적 특성 뿐 만 아니라 기상요소 사이에 매우 복잡한 관계로 표현된다. SLR을 결정하는 기상요소들 대부분은 결정적 파라미터로 취급되나 랜덤변수들은 시변 상관으로 시계열 확률모델로도 모형화된다[8]. 국내에서는 주로 일본의 JCS 기준을 토대로 SLR을 규정하여 사용해 왔지만[13] 적용조건들이 국내 기상과 지형에 적합한 것인지는 검토된 바 없다. 따라서, 본 연구에서는 과거 기상청에서 관측되었던 기상데이터를 토대로 국내 한국전력공사(KEPCO)의 가공 송전선로에 적용하고 있는 SLR 정격을 평가하고 그 결과를 토대로 기존 선로의 송전용량을 증대시킬 수 있는 계절별 정격 운용방안을 제시한다. 이 때, 그 타당성 및 신뢰성을 검토하기 위하여 DLR 특성도 분석한다.

2. 송전용량 특성

2.1 정적송전용량

가공송전선의 SLR은 도체가 대류에 의한 발열 및 일사량으로부터의 흡열과 도체로부터의 방열이 평형된 상태에서 도체의 재료 변화 또는 연성이 허용되는 온도에 도달할 때의 전류로 규정하고 있다. 도체의 전류는 다음과 같은 열평형 방정식으로부터 구해진다[10~12].

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

여기서 $R_{ac}(T_c)$[Ω]는 도체의 최고허용온도 T_c[℃]에서 도체의 전기적 특성에 따라 결정되는 교류저항이고, Q_s[W/m]는 도체가 태양으로부터 흡수하는 열(solar heat gain)이며, Q_c는 대류에 의한 열방산(convected heat loss), Q_r은 도체의 열방산(radiated heat loss)을 나타낸다. 식 (1)에서 주울열은 부하전류와 도체온도의 함수인 교류저항으로 계산된다. 기상 및 부하가 급격하게 변하더라도 도체의 온도는 열 시정수(thermal time constant)에 의해서서히 변하며, 기상요소도 돌풍, 폭우나 구름의 이동 등에 의해 급변할 수 있다. 그러나, SLR을 규정하는 대부분의 경우에는 이러한 과도 특성은 고려하지 않았다. 식 (1)에서 도체의 전류는 다음과 같다.

$$I = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{R_{ac}(T_c)}} \quad (2)$$

도체의 허용전류를 산정하기 위한 열평형 방정식은 JCS, IEEE, IEC 및 CIGRE 등[9~12]에서 약간씩 다르게 사용되고 있다. 기상조건도 일률적으로 규정하여 사용하는 것이 아니라 지역적인 차를 고려하여 허용전류를 계산하는 방식을 채용하고 있다. 국내에서는 2001년에 한국전력공사의 『가공송전선 전선선정기준(안) 설계기준 1210』 [13]에서는 지역적 편차를 두지 않고 국내 전지역에 적용하는 연중 정격(annual SLR)을 규정하였다. 도체의 최고허용온도는 물론, 풍속, 방사계수 등 SLR을 결정하기 위해 적용된 조건들에 대한 특성은 KEPCO 기준을 설계할 때 고려되었던 사항들이므로 여기에서는 상세하게 다루지 않는다.

2.2 기상 데이터의 분석

국내에는 현재 78개 지점의 기상관측소와 약 400개의 자동기상관측소에서 기온, 풍향, 풍속, 일사량, 강우 등 여러 가지 기상요소들을 관측하고 그 결과를 기록하여 관리하고 있다. 따라서, 과거 기상청에서 측정된 데이터를 근거로 국내의 지역별, 일별, 계절별 등 최고기온, 평균 풍속 등을 분석할 수 있다. 그렇지만, 분석기간 및 데이터의 일관성을 위하여 자동기상관측소와 몇몇 관측지점을 제외한 68개 지점에서 1971~2001년 사이의 31년 동안 관측된 데이터를 분석 대상으로 하였다. SLR을 선정하는 경우에 최고기온, 최저풍속, 풍향 및 최고 일사량이 중요한 변수이지만 낮은 풍속에 대한 자료가 없을 뿐만 아니라, 풍속과 풍향은 관측소의 측정환경과 측정기 고유의 threshold와 저속에서의 측정오차로 인하여 SLR에 미치는 영향을 정확하게 분석하기 곤란하다. 일사량은 IEEE나 일본의 JCS 기준에 크게 벗어나지 않을 것으로 판단되어 우선, KEPCO에서 규정된 조건들을 대부분 수용하는 것으로 가정하였다. 따라서, 2장에서는 과거 관측데이터로부터 국내 송전선로에 대한 계절별, 지역별 SLR을 규정하기 위한 기온 영역을 결정할 수 있는지에 대한 분석에 초점을 두었다.

기온은 1998년까지 일일 동안 6시간 또는 3시간 간격으로 측정되었으며 풍속, 풍향 및 일사량은 22개 관측소에서만 1971년 이후에 매시간 관측되었다. 따라서, SLR을 산출하는 기상요소 분석의 통일성을 기하기 위하여 샘플링 간격 등을 고려하지 않으면 안 된다. 기온 측정의 샘플링 특성을 조사하기 위하여 31년 동안 측정된 3, 9, 15, 21시의 일별 4회 측정 데이터와 1999~2001년 매시 측정된 데이터 사이의 분포도를 분석한 결과, 샘플링 수를 일일 4, 8회 또는 24회로 하더라도 기온분포는 그 경향이 거의 일치함을 확인하였다.

KEPCO의 SLR은 1940년 대구 관측소에서 기록되었던 최고기온인 40[℃]를 기준으로 설계되었지만 관측지점들은 고도와 지형 등을 고려하지 않았다. 따라서, 최고기온 특성을 분석하는 경우에 측정지점의 고도를 고려하지 않았다.

SLR을 규정하는 최고기온의 특성을 검토하기 위하여 월별로 최고기온을 나타내는 지점과 각 경우의 최고기온 분포를 그림 1에 나타낸다. 이 결과로부터 최고기온은 월별, 춘하추동의 계절별이나 동·하계

로 뚜렷하게 구분되는 것을 알 수 있다. 다른 국가의 전력회사는 간혹 계절별이나 동·하계 등으로 기간을 나누어 정격을 관리하는 것을 모색하거나 현재 적용하고 있는 경우도 있다. 일본 전기학회 보고[9]에서는 연중 2 구분하여 동계를 11~4월, 하계를 5~10월로 선정하였고, 미국의 PG&G와 같은 전력회사[14]에서는 11~2월을 동계로, 6~8월을 하계로 하고 중간 시기에는 선형화한 변동 SLR 기준을 적용하였다.

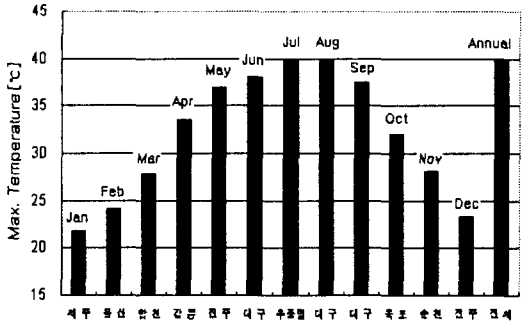


그림 1. 월별 최고기온 분포
Fig. 1. Seasonal maximum temperature distribution

일반적으로 JCS에서와 같이 동·하계로 분류하여 효율성이 떨어지고 춘추의 기상 특성이 유사하므로 그림 1을 고려하여 국내 송전선로에 대해서는 계절별 정격을 표 1과 같이 분류하였다. 이 때, 하절기를 5~9월로 5개월, 동계는 11~2월, 나머지 4개월을 춘추로 구분하였고, 춘추 및 동계에서의 최고기온은 31년 동안의 최고기온 통계로부터 각각 34[℃]와 25[℃]로 설정하였다.

표 1. 계절별 정격의 분류
Table1. Classification of seasonal line ratings

계절별 분류	기간[월]	최고기온 [℃]	관측 지점	ACSR 410[㎟] SLR[A]
하 계	5~9	40	대구	848
춘 추	3,4,10,11	34	강릉	907
동 계	12~2	25	울산	991

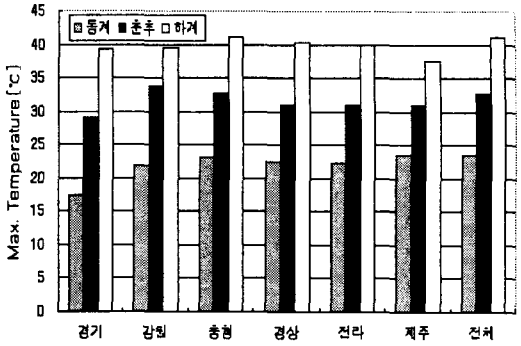


그림 2. 지역별 및 계절별 최대기온 분포
Fig. 2. Distribution of regional and seasonal maximum temperatures

기온분포를 고려하면 최고기온은 지역별로도 구분하여 적용할 수도 있다. 현재, 국내 송전선로는 9개의 전력관리처와 1개 지사가 관할 지역의 선로를 운용하고 있다. 물론, 선로의 특성에 따라 관리처는 행정상 도의 경계와는 다르다. 만약, 관리처별 선로의 개별 정격이나 또는 단체 정격이 필요할 경우에는 지형정보를 이용하여 관리처별로 선로 영역을 구한다. 본 연구에서는 해석의 편리 상, 그림 2에서와 같이 6개 지역으로 행정상 경계로 지역을 구분하였다. 이 결과를 이용하면 SLR은 계절별 정격뿐만 아니라 지역별 정격 관리가 가능함을 알 수 있다.

2.3 기상요소의 검토

일반적으로 기온은 열 시정수가 커서 변화율이 크지 않을 뿐만 아니라 측정장치도 비교적 안정되어 있으므로 데이터의 분석결과는 다른 요소들에 비하여 신뢰성이 있다. 따라서, 최고기온은 지역별, 계절별 SLR 결정에 직접 이용할 수 있다. SLR 및 DLR 특성을 분석하기 위하여 본 논문에서는 측정지점에 ACSR 410[㎟] 도체가 가설되었다고 가정하였다. 이 도체에 대하여 표 1과 같이 계절별 상한 기온을 사용하여 구한 SLR은 동계, 춘추 및 하계에 대하여 각각 991, 907 및 848[A]이었다.

분석 데이터에서 최저 풍속은 대부분 실속(stall speed) 범위인 0.2~0.3[m/sec] 이하이거나 또는 0이었다. 따라서, 각 지역이나 계절별 최저풍속을 조사하여 적용하는 것은 의미가 없다. 과거 기상데이터

에 대하여 기온과 풍속의 실측값을 사용하면 각 계절에서 이 SLR보다 적은 값이 나타나는 확률을 구하면 대부분은 거의 1/1,000~1/10,000의 작게 나타났지만, 이 결과는 선로의 안전성 확립에는 장애가 된다. 따라서, 표 1로 분류한 계절별 최고기온의 한계와 기타 다른 기상조건들을 안전 측면에서 보완해야 한다. 예컨대, 최고기온 한계를 증가시켜 각 계절에서의 SLR의 최소값을 감소시키는 방법도 한가지 대안이다. 측정값 중 풍속은 기준 최저풍속인 0.5[m/sc]의 SLR에 비하여 0~0.15[m/sec] 이하에서 SLR은 약 23[%] 정도가 감소된다. 이와 같이 저 풍속은 SLR 결정하는 중요한 요소이지만 현재, 기상관측소에서 사용하는 3배식 풍속계나 로빈손 풍속계는 낮은 풍속을 정확하게 측정하지 못한다. 특히, 기계식 풍속계는 고유하게 나타나는 threshold가 적어도 0.5[m/sec] 정도이며 1~2[m/sec] 이상의 영역에서의 오차도 0.3[m/sec] 정도가 된다. 따라서, 최저풍속인 0.5[m/sec] 이하의 측정치는 거의 threshold 영역에 속할 뿐만 아니라 측정오차도 매우 큰 편이다. 결국, 기상관측소의 풍속 데이터 중 0.5[m/sec] 이하의 풍속값은 거의 신뢰성이 없다고 판단되므로, 분석에는 JCS나 IEEE에서 규정한 것과 마찬가지로 0.5[m/sec]를 최저풍속으로 가정하였다.

KEPCO 기준에서는 연일수 161[일], 위도를 35[°], 방사 및 흡수율을 0.5, 고도를 500[m], 태양시각을 13[시]로 가정하여 일사량 최대치를 구하면 1080[W/㎡]이다. 일본의 JCS에서는 위도를 35[°], 방사 및 흡수율을 0.9, 고도를 0[m], 태양시각을 12[시]를 기준으로 1000[W/㎡]로 가정하였다. KEPCO의 기준도 일본 JCS의 기준들을 고려하면 대략 1029[W/㎡]로 거의 유사한 값을 나타낸다. 따라서, 국내의 기준에 이용된 일사량 값은 타당한 것으로 판단된다. 일사량에 대한 계절별 기준은 없지만 연중 일사량을 1080[W/㎡]으로 가정하면 동계와 춘추는 연일수가 각각 59 및 120[일]이므로 그 값을 구하면 939[W/㎡] 및 1021[W/㎡]이다. 또한, 하계, 춘추 및 동계의 SLR은 848, 866 및 873[A]이다. 따라서, 동계의 SLR은 일사량에 의해 대략 3[%] 정도 증가시킬 수 있다.

계절별 정격에 기온, 풍속 및 일사량 기준치의 타당성을 검토하기 위하여 기온은 표 1에 의해 계절별 최고기온으로, 풍속은 저 풍속기준 0.5[m/sec]으로, 일사량은 최고기준 1080[W/㎡]으로 분포율을 구했다. 이 때, 관측지점 중 일사량이 측정된 22개 지점의 데이터를 사용한 결과, 기온은 전체 데이터 중 약 0.12[%] 정도가 34[℃]를 초과하며 25[℃] 이하가 86[%] 이었다. 따라서, 현재 연중 정격으로 운용하는 것은 매우 비경제적인 것임을 알 수 있다. 물론, 안전성만 유지할 수 있으면 이러한 분석 결과를 토대로 현재 설비로도 충분하게 전류용량을 증가시킬 수 있을 것이다. 일반적으로 연중 SLR은 최고기온, 최저풍속 및 규정 일사량 이상으로 최악의 기상상태를 조건으로 하고 있다. 그렇지만, 계절별 기온과 최저풍속 및 최대 일사량이 발생할 확률을 조사한 결과, 각 조건이 동시에 발생할 확률은 전혀 없는 것으로 분석되었다.

하계의 최고기온은 40[℃]로 가정하였지만 분석결과, 거의 대부분 춘추의 한계기온인 34[℃] 이하이었다. 풍속은 0.5[m/sec] 이하인 경우가 16[%] 정도 나타나며 일사량도 최고값을 초과하는 빈도도 0.5[%] 미만이었다. 특히, 기온이 34[℃] 이상이고 풍속이 0.5[m/sec] 미만이 동시 발생할 확률은 0.02[%]로 거의 나타나지 않았다. 춘추, 동계도 유사한 결과가 얻어졌다.

2.4 계절별 SLR 특성

2.2~2.3절에서는 기상요소 중 주로 최고기온을 대상으로 계절별, 지역별 특성을 분석하였다. 물론, 기온 이외에 풍속과 일사량 등 다른 요소들도 중요하지만 수집된 데이터 특성 상 SLR을 결정하는 조건에 적합하지 않다. 일반적으로 SLR을 결정할 경우에 기상조건은 최고기온, 최저풍속이나 최대 일사량 등은 최악의 상태를 가정한다.

그림 3은 68개 기상관측소 지점의 위도와 고도를 고려하고 기타 조건들은 KEPCO 기준을 적용하여 각 지점의 매월 최고기온으로 계산한 허용전류와 연중 정격에 대한 SLR 백분율을 나타낸다. 이 결과에서 보면 겨울인 1월에는 SLR이 가장 크며 각 지점의 기온 차로 인하여 그 변화 폭도 크다. 반면에, 여름철인 7, 8월에는 기온 편차가 비교적 작으며 SLR 편차

도 적게 나타난다. 결국, 대부분의 지점에서는 연중 SLR 정격에 대하여 비교적 큰 여유가 있으며 앞에서 기술한 바와 같이 계절별 또는 지역별 정격의 적용이 가능하다고 판단된다.

한편, 표 1과 같이 계절별 최고기온을 규정하여 각 계절별로 분류하면 그림 4와 같다. 이 결과로부터 동계, 춘추 및 하계의 SLR 평균 증가율은 각각 125.2, 116.4 및 107.2[%]이고 최저값은 123.1, 113.3 및 104.7[%]이다. 이러한 사실은 여름철에도 적어도 4.7[%] 정도 SLR을 증가시킬 수 있다는 것을 의미한다.

그림 5는 관측된 최고기온만 고려한 경우에 지역별 최고기온이 나타나는 지점의 계절별 SLR 특성을 나타낸다. 전체 68개 지점에서 최고기온으로 산출한 SLR은 하계에서는 5[%] 정도, 동계에서는 적어도 20[%] 정도를 증가시킬 수 있다. 그러나, 지역별 분류를 우선하여 지역 내에서 최고기온 지점을 선택하고 최저풍속을 0.5[m/sec]로 가정한 경우에 하계는 경상도 지방이, 동계에서는 제주지방이 SLR이 가장 적게 나타나는 것을 알 수 있다.

국내 가공송전선으로 주로 사용되는 ACSR 도체의 연속허용온도는 90[℃]이고 단시간 허용온도는 100[℃]이므로 풍속을 0.5[m/sec]로 가정하고 표 1에서와 같은 최고기온을 적용하면 계절별 SLR의 운용이 가능해진다. ACSR 410[㎟] 도체에 대해서는 연중 연속허용전류 848[A]에 대하여 동계 및 춘추 정격을 적용하면 그 각각에 대하여 16.9 및 7.0[%]의 전류용량을 증대시킬 수 있다.

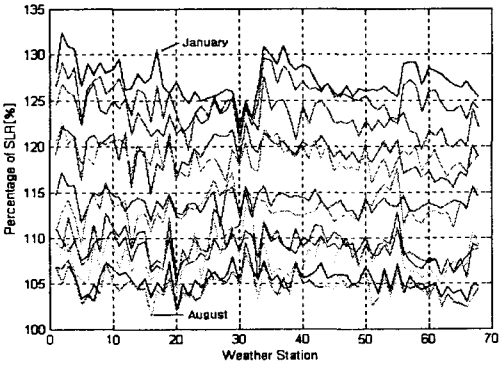


그림 3. 관측지점의 SLR 특성
Fig. 3. SLR performances for weather stations

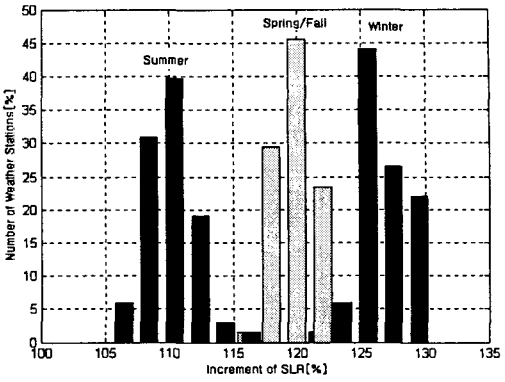


그림 4. 계절별 SLR 분포
Fig. 4. Distribution of seasonal SLRs

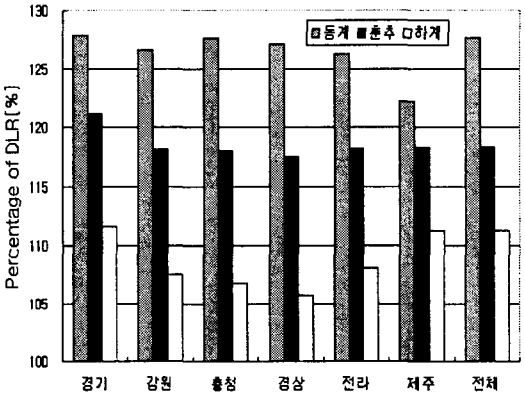


그림 5. 최고기온만 고려한 경우의 SLR의 변화율
Fig. 5. SLR Variations when considering maximum temperatures

3. DLR 분석

3.1 실제 선로의 운용

송전용량은 도체의 열용량 뿐만 아니라 송전선로의 길이, 변전설비, 부하 등에 영향을 받기 때문에 SLR 및 DLR을 실제 선로에 적용하기 전에 우선, 현재 운용되고 있는 선로의 상태를 정확하게 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 한국전력공사의 대전전력관리처 관할의 덕진변전소를 중심으로 일부 선로의 2001년 8월에 운용된 데이터를 토대로 선로나 변압기의 이용율 등을 검토하였다. 이 선로는 154[kV], 2회선으로 도체는 ACSR 410[㎟]이었다.

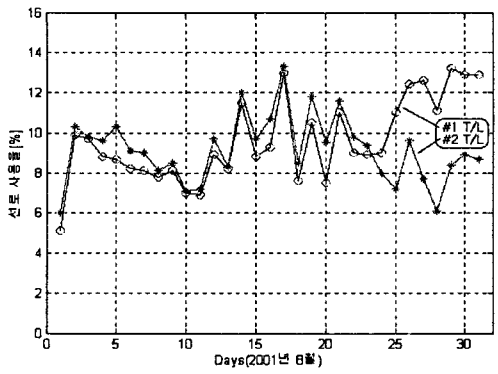
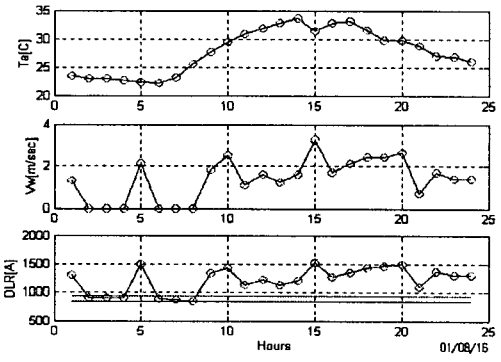


그림 6. 예제 선로의 사용율
Fig. 6. Utilization rate for an example line

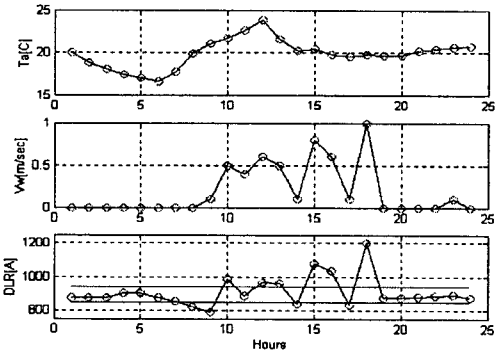
그림 6은 덕진 T/L의 선로 이용율로 이 시기가 연중 첨두부하 시임에도 불구하고 선로는 도체 열용량의 최대 14[%] 정도만 이용되고 있다. 일반적으로 2회선 선로는 1회선 단락 등 사고 시 부하부담을 위하여 1회선에 SLR의 50[%] 이하의 전류를 부담시킨다. 따라서, 이러한 점을 고려하더라도 이 도체에는 약 28[%] 정도만 이용되고 나머지 22[%] 만큼 전류를 증가시킬 수 있는 여유를 가진다. 이 시기에 덕진 변전소에 가설된 4대의 변압기 이용율은 최대 70[%] 정도이었다. 따라서 이 선로를 최대송전용량으로 운용하기 위해 어느 정도 도체의 전류를 증가시킬 수 있다. 송전선로의 공급전력은 도체의 열용량, 전압강하 및 안정도여유 등을 고려하여 결정되는데, 이 선로는 40[km] 미만이므로 대략 역율 0.95인 경우에 거의 최대 용량으로 송전할 수 있다고 판단된다.

한편, 계절별 SLR의 신뢰성을 평가하기 위하여 대전지방기상청에서 2001년 실제 관측된 데이터를 사용하였다. 선로가 이 지점에 가설되어 있고 기상 모니터시스템을 설치하여 운용한다는 가정으로 실제 관측된 데이터만을 사용하여 이 지점의 DLR을 계산하였다. 이 때, 측정 데이터는 매시간 측정된 365일 데이터 중 기온, 풍속만을 사용하였다. 선로는 예제 선로와 동일한 규격의 도체를 사용한다고 가정하면 연중 정격은 연속 및 단시간 허용전류가 각각 848 및 939[A]이다.

그림 7(a)는 8월 중 16일에 측정된 기온과 풍속 및 이 데이터로 추정된 DLR 결과를, 그림 7(b)는 8월 1개월 동안의 관측치의 최소 측정치를 보인다. 대부분 기상측정에 의해 구한 결과에 따르면 실측치에 의한 허용전류는 기온은 물론 풍속에 모두 영향을 받지만 풍속 특성이 보다 직접적인 영향을 미친다. 따라서 풍속이 급격하게 변동하면 허용전류도 변동폭이 크다. 이것은 기온 변화보다 풍속은 낮은 영역에서 DLR 변화폭이 크기 때문에 나타나는 현상이다. 일반적으로 일일 기온과 계절별 기온분포는 일정한 주기성을 나타내고 있지만, 풍속은 그 변화가 매우 불규칙하므로 DLR은 기온과 같은 주기적인 특성은 관측되지 않았다. 기온은 오전 6시경이 제일 낮았으며 낮 동안에는 비교적 높았으며 풍속은 야간에 아주 낮은 것을 볼 수 있다. 따라서, DLR은 야간에 적은 값을 나타내며 이러한 현상은 역시 저 풍속에 기인한 것으로 추측된다.



(a) 16th August



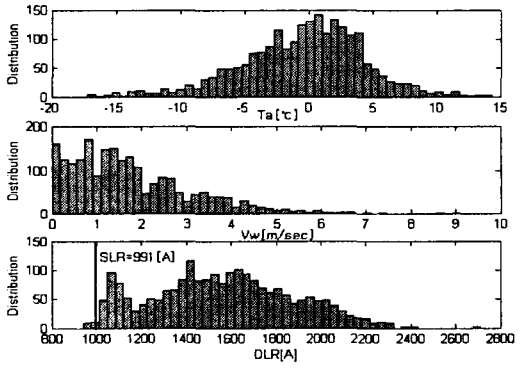
(b) Minimum value

그림 7. 측정 데이터와 DLR
Fig. 7. Measurement data and DLR

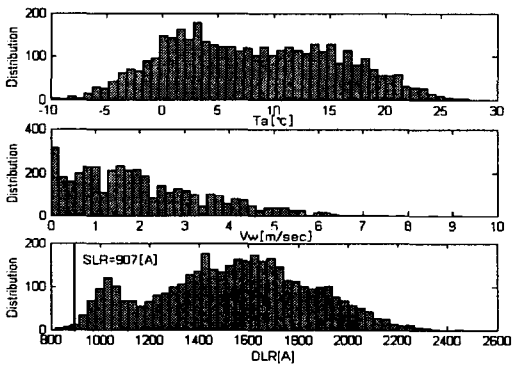
연중 SLR을 규정할 때 적용하는 풍속은 국내 기준에서는 0.5[m/sec]이다. 실제로 8월 1개월 간 측정된 풍속 중, 0.5[m/sec] 이하인 경우가 11.4[%] 이었다. 따라서 이 풍속을 직접 적용하여 DLR을 구한 결과에서도 SLR 이하로 나타나는 DLR은 총 13회(1.7[%])가 발생하였다. 이러한 해석결과는 전력공급의 안정성에 문제가 되지만, 앞에서와 같이 2회선 선로에는 최대 50[%] SLR 값 이하에서 상시 운전되기 때문에 실제로 SLR보다 낮게 나타나는 시간에서도 전력공급의 신뢰성은 유지된다고 판단된다. 물론, 이와 같이 SLR 이하로 나타나는 DLR 결과는 측정오차와 threshold 영역 이내의 풍속값에 의한 것으로 1차적으로 풍속 측정에 문제가 있었다고 판단된다. 특히, 그림 8(b)에서 보면 측정치 중 풍속이 0.5[m/sec] 이하가 되어 계산된 허용용량이 연속허용전류 기준보다 적은 영역이 다수 나타났다. 이러한 특성은 DLR을 계산 결과에 저속인 풍속의 영향이 직접적으로 영향을 주고 있음을 의미한다. 송전용량은 주로 풍속 특성에 의해 변화되므로 현지 모니터링 시스템을 설치하여 운용하는 것이 DLR 운용의 신뢰성 확보에 도움이 될 것으로 생각된다. 다만, 모니터 시스템이 설치되는 지점 선택과 저 풍속을 정밀하게 측정할 수 있는 방안을 강구해야 한다.

3.2 계절별 정격의 신뢰성 분석

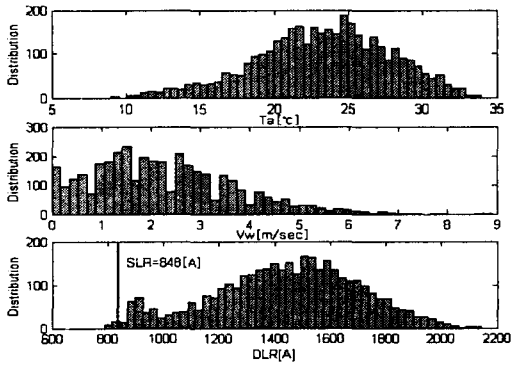
2장에서 제시한 계절별 정격의 신뢰성을 검토하기 위하여 계절별 평균, 최대, 최소 추정전류의 시간별 특성을 그림 8에 나타낸다. 그림 8(a)는 동계에 대전지방기상청에서 측정된 기온과 풍속 그리고 이들 데이터를 사용하여 계산된 DLR의 분포이다. 표



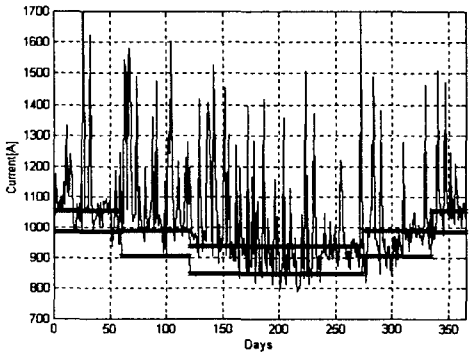
(a) Winter



(b) Spring/Fall



(c) Summer



(d) Minimum DLRs

그림 8. 계절별 DLR 특성
Fig. 8. Performances of seasonal DLR

1에서와 같이 국내 전 지역을 대상으로 동계 최고기온을 25[℃]인데 비하여 이 지역은 15[℃] 이하이다. 그러나, 풍속은 SLR의 기준인 0.5[m/sec] 이하인 측정치가 다수 나타났다. 컵형 풍속계의 실속 범위를 0.15[m/sec]라 가정할 때 이 범위 이하의 풍속은 전체 측정치의 7.5[%] 정도이었다. 그렇지만, 실측된 풍속을 사용하여 구한 DLR이 최저풍속 0.5[m/sec]와 최고기온 25[℃]로 계산한 연속허용전류 991[A]보다 작은 측정치는 0.7[%]로 현저하게 감소되었다. 이와 같은 현상은 춘추와 하계 정격 907 및 848[A]에 대하여 풍속이 0.15[m/sec] 미만인 빈도는 각각 8.0 및 4.5[%]이었고 SLR 미만이 되는 비율은 0.5 및 0.7[%]로 나타났다.

연중 정격에 적용된 조건이 모두 하계에 나타나므로 기존의 연중 정격은 실제 하계 정격과 동일하다. 특히, 주목할 것은 그림 8(c)의 하계에서 기온은 최고기온 40[℃]보다 현저하게 작지만 DLR이 SLR인 848[A] 미만이 0.7[%]로 발생한다는 것이다. 이것은 이제까지 적용해오던 연중 정격을 그대로 적용하여 최대허용전류를 흘릴 때 이 선로에 이 정도의 위험율이 내포되었음을 나타낸다. 따라서, SLR에 적용되는 조건을 더욱 엄격히 하거나 SLR을 감소시켜야 한다. 그렇지만, 연중 정격은 JCS나 CIGRE, IEEE 738 등과 거의 유사한 조건을 사용하였고 실제 어떤 첨두부하에서도 최대허용전류로 운용하는 경우는 없으므로 앞에서의 계산된 위험도는 낮은 풍속에 기인된 것이라 볼 수 있다. 결국, 이러한 특성을 고려할 때, 동계 및 춘추의 계절별 분류는 타당하게 주어졌다고 판단된다.

도체의 송전용량의 결정에 있어서 안전성이 제일 중요하므로 최소값들의 분포에 주의를 해야 한다. 그림 8(d)는 1년 전체에 대한 최소치와 연속/단시간 정격을 나타낸다. 이 결과에서 보면 5월은 춘추로 하고 10월을 하계로 포함하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 또한, 안전영역은 이들 전류값보다 대략 50[A] 정도 감소시키면 100[%] 안전할 것으로 생각된다. 또는 이 정격전류에 대하여 이 전류보다 낮은 값으로 허용전류가 산정되는 경우를 모니터링하여 이 경우에만 정격을 별도로 관리 운용하는 방안도 고려할 수 있다.

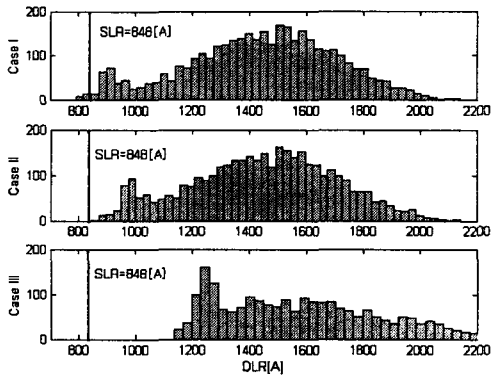


그림 9. 하계의 풍속기준 변화에 대한 DLR 특성
Fig. 9. DLR performances when varying wind speed during summer

KEPCO의 SLR 기준은 2장에서 기술한 바와 같이 최고기온에 대하여 최저 풍속을 0.5[m/sec]로 가정하였다. 따라서 실측된 풍속 데이터에 대하여 풍속이 0.3 및 0.5[m/sec]를 기준으로 이 값들 미만에 대한 데이터를 각각 0.3(Case II) 및 0.5[m/sec](Case III)로 처리하여 하계의 DLR을 구하면 그림 9와 같다. 여기서 Case I은 실측치를 그대로 사용한 결과이다. 실제 풍속 측정치를 사용하여 구한 DLR 중 0.7[%]는 SLR 미만으로 나타났지만, JCS나 IEEE 738 등에서 같이 국내 SLR을 산출할 경우에 사용한 최저풍속 기준 0.5[m/sec]이나 그 이하인 0.3[m/sec]를 사용하여도 DLR이 SLR 미만으로 되는 확률은 0이 됨을 확인할 수 있다. 결국, 2장에서 제시한 계절별 정격에 관한 기준은 최고기온 측면뿐만 아니라 일반적인 기준에 불명확했던 저 풍속 특성도 고려하므로써 실제 KEPCO의 가공 송전선에 직접 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 한국전력공사의 송전선로에 대해 일반적인 기상모델을 근거로 산출된 도체의 허용전류 기준인 정적송전용량에 대한 특성이 분석되었다. 일반적으로 송전용량은 기상요소들을 최악조건으로 하여 산출한 값으로써 이러한 기상조건이 나타날 확률은 거의 없다. 따라서, 상시 운전 시에는 도

체가 부담할 수 있는 최대허용전류보다 아주 적은 전류가 공급된다. 특히, 현재 한국전력의 기준은 연중 단일 정격으로 동계나 춘추에는 더욱 많은 여유분을 갖는다. 본 연구에서는 과거 30년 동안 국내에서 관측된 기상 데이터를 분석하고 그 결과를 토대로 국내의 송전용량을 3 시기로 나누어 계절별 운용이 가능함을 밝혔다. 이 경우에 동계에는 약 16.9[%], 춘추에는 7.0[%] 정도의 전류용량을 증대시키는 것이 가능하다고 판단되었다. 또한, 지역별 최고기온차를 이용하면 국내 선로의 관리처별 정격관리가 가능하다. 결국, 기존 선로를 교체하지 않더라도 어느 정도 송전용량을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 계절별 정격에 대해 동적송전용량을 추정한 결과, 일부 저 풍속에서의 정격 값의 신뢰성 확보가 필요하다고 생각되나, 제안된 계절별, 지역별 정격과 실시간 모니터링 시스템을 구축하면 이러한 문제는 해결될 것으로 판단된다.

References

[1] G.C. Baker, "The wave of deregulation: operational & design challenges", IEEE Power Engineering Review, Vol. 19, No. 11, pp. 15-16, 1999.

[2] T.O. Seppa, "Increasing transmission capacity by real time monitoring", 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, pp. 1208-1211, 2002.

[3] 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.

[4] R.J. Carrington, "New technologies for transmission line uprating", 1998 IEEE 8th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation & Live-Line Maintenance Proceedings, ESMO '98, pp. 311-318, 1998.

[5] I. Zamora, "Uprating using high-temperature electrical conductors", CIRED 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions, Vol. 1, pp. 90-94, 2001.

[6] J. Raniga and R.K. Rayudu, "Stretching transmission line capabilities - A Transpower Investigation", Transpower, New Zealand, 2001.

[7] D.A. Douglass and A.A Edris, "Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1407-1418, 1996.

[8] J.L Reding, "A method for determining probability based allowable current rating for BPA's transmission lines", IEEE Trans. on. Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 153-161, 1994.

[9] 가공송전의 전류용량, 일본 전기학회기술보고, 제660호, 1997.

[10] Draft standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors, IEEE Standard P738, 1999.

[11] The thermal behavior of overhead conductor, CIGRE WG22-12, Electra, No. 144, 1992.

[12] Overhead electrical conductors calculation methods for stranded bare conductors, IEC-1957 First Edition Technical Report-Type 3, 1995.

[13] 송전 설계기준 제·개정 및 보완 연구, 한국전력공사 전력연구원, TR.00PJ09.J22001.319, 2001.5.

[14] T.O. Seppa, E. Cromer, and W.F., Jr. Whitlatch, "Summer thermal capabilities of transmission lines in Northern California based on a comprehensive study of wind conditions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 1551-1561, 1993.

◇ 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 한발대학교 전기·전자·제어공학부 교수. Tel. (042)821-1135. email : sdkim@hanbat.ac.kr.