

기상모델을 이용한 가공선 동적 허용전류 산정방안

장태인*, 강지원*, 이동일*, 이정필*, 민병욱*, 김성덕**
 한국전력공사* · 국립한밭대학교**

Estimation Method of Dynamic Ampacity for Overhead Transmission Lines using Weather Model

T. I. Jang*, J. W. Kang*, D. I. Lee*, J. P. Lee*, B. W. Min*, S. D. Kim*
 KEPRI*, Hanbat University**

Abstract - 최근 전력산업의 구조개편, 선로건설의 어려움, 송전선로의 노후화, 선로용량 취약개소의 상시감시 필요성 등으로 인하여 선로의 허용 전류용량을 합리적으로 평가하는 한편, 도체의 허용전류를 실시간으로 산정하여 현재 운용상태와 비교하여 그 한계 및 여유 정도를 알아보는 것이 중요한 문제로 대두되었다. 본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로 먼저 기상모델을 중심으로 실시간 허용전류 산정 알고리즘에 대하여 살펴보고, 대전 지역의 가공 송전선로를 대상으로 선로 주변의 기온, 풍속, 지형 정보를 이용하여 동적으로 허용전류를 산정하여 그 이용 가능성을 확인하였다.

가능성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 허용전류 계산

가공 송전선의 전류용량은 도체의 대류에 의한 발열 및 일사로부터의 흡열과 도체로부터의 방열이 평형상태가 된 경우에 구한 도체온도가 도체의 재료 변화 또는 연성 정도에서 허용된 온도가 될 때의 전류로 규정하고 있다. 따라서, 도체의 허용전류는 도체의 주열열과 태양 흡수열의 합이 대류 및 방사에 의한 방산열의 합과 같다는 열평형 방정식으로부터 구해진다. 즉, 연속 및 단시간 허용전류 산정에 사용되는 열평형 방정식[1]은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$I^2 R_{ac}(T_c) \times 10^{-3} + Q_s = Q_r + Q_c \quad (1)$$

여기서, $R_{ac}(T_c)$ 는 도체의 최고 허용온도 T_c [°C]에서 도체의 전기적 특성에 따라 결정되는 교류저항이고, Q_s 는 도체가 태양으로부터 흡수하는 열(solar heat gain)이며, Q_c 는 대류에 의한 열방산(convected heat loss), Q_r 은 방사에 의한 열방산(radiated heat loss)을 나타낸다. 따라서, 도체의 연속 및 단시간 허용전류는 다음과 같이 구해진다.

$$I = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{R_{ac}(T_c) \times 10^{-3}}} \quad (2)$$

식 (1)에서 저항손실은 부하전류와 도체의 교류저항으로 계산되며, 교류저항은 도체온도의 함수로 주어진다. 도체의 온도는 기상 및 부하가 급격하게 변하더라도 서서히 변한다. 일반적으로 기상요소는 돌풍, 폭우나 구름의 이동 등에 의해 급변할 수도 있다.

2.2 정적 허용전류(SLR) 산정방법

표 1은 국내 송전선의 허용전류 산정기준에서 SLR을 산출할 경우에 사용하는 기상조건을 나타낸다. 이 때 도체의 최고 허용온도는 도체의 종류마다 다르게 규정되어 있으며, 연속, 단시간 및 순시 허용전류에서의 도체 온도도 다르게 규정되어 있다. 다음은 SLR 산정에 영향을 미치는 주요 파라미터의 종류 및 그 영향을 간략히 기술한다.

1. 서 론

최근 전력산업의 구조개편, 신규선로 가설시의 환경문제, 송전선로의 노후화, 전력수요 급증으로 인한 선로용량 취약개소의 상시감시 필요성 등으로 인하여 기존 선로의 허용전류 용량을 합리적으로 재평가하여 설비 이용률을 재고하는 한편, 송전선 도체의 허용전류 용량을 실시간으로 산정하여, 현재 선로의 운용상태와 비교하여 대상 선로에 대한 허용전류 용량의 한계 및 여유 정도를 파악함으로써 설비의 안정적 운용을 도모하고자 하는 문제가 중요하게 대두되었다.

일반적으로 가공 송전선 도체의 허용전류는 기온, 풍속, 일사량과 같은 기상조건에 대하여 최악의 조건을 상정하고 도체의 수명기간 동안 기계적 강도 저하율이 10[%]이하가 되는 전선의 연속허용온도에서 그 정격용량이 결정되며, 이를 정적허용전류(Static Line Rating : SLR)라 한다. 이 방법은 허용전류 용량을 결정하기 위한 가장 보편적인 방법의 하나로서 IEEE standard 738에 규정되어 있으며, 한국전력공사에서도 이 규격과 CIGRE 및 JCS 규격을 토대로 허용전류에 대한 규정(안)을 마련하여 활용하고 있다.

그러나, 상기와 같은 방법으로 산정된 허용용량은 국내에서 지금까지 관측된 온도 중에서 최대온도와 특정한 값을 가지는 최저풍속을 이용하여 계산된 값으로 어떠한 지역에서 그러한 기상조건이 동시에 만족될 확률은 희박하며, 실제 용량은 주야, 기상상태, 지형 등에 의하여 항상 변동하고 있다.

따라서 기존의 선로에 대해 현재의 기상조건과 지형조건을 이용하여 허용전류 용량을 실시간으로 결정할 필요성이 있으며, 특히 허용전류 용량 계산에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요소인 기온 및 풍속을 실시간으로 관측하면 더욱 정확한 허용용량을 산정할 수 있다.

본 논문에서는 국내에서 아직 활성화 되어 있지 않은 실시간으로 송전 가능용량을 산정하는 동적 허용전류(Dynamic Line Rating : DLR) 산정 방법을 적용하기 위한 첫 단계로서 기상모델을 중심으로 실시간 허용전류 산정 알고리즘을 살펴보고, 대전 지역의 가공 송전선로를 대상으로 선로 주변의 기온, 풍속, 지형 정보를 이용하여 실시간으로 동적 허용전류를 산정하여 그 이용

2.2.1 주위 온도

SLR 계산에서 도체의 주위온도는 가설된 지역의 연중 최고 기온을 적용하지만 계절별 허용전류를 규정할 경우에는 계절별 최고 기온을 적용하는 것이 일반적이다. 우리나라는 아직 계절별, 주야별 기온을 구분하여 관리하지 않고 있으므로 연중 최고 기온을 적용하여 허용전류를 산정하고 있다.

표 1. 도체의 허용전류 산정 기상조건

번호	항 목	기준치
1	주위온도	40[°C]
2	풍속	0.5[m/sec]
3	도체와 바람각도	90[°]
4	해발고도	500[m]
5	방사 및 흡수계수	0.5
6	선로의 방위각	90[°]
7	위도	35[°]
8	연일수	161[일]
9	태양시간	13[시]
10	대기상태	청정
11	최고 허용온도(ACSR 경우)	90[°C]

그림 2는 ACSR 410[mm²] 가공선 도체를 대상으로 주위온도 변화에 대한 허용전류 변화를 나타낸다. 우리나라의 기준[2]에 따르면 이 도체는 기온 40[°C]에서 연속 허용전류가 848[A]이다. 만약 주위 온도를 44[°C]라고 가정하면 기준전류에 비해 약 4.8[%] 감소되는 반면 주위온도를 8[°C]라 하면 허용전류는 31.3134[%]가 증대 된다.

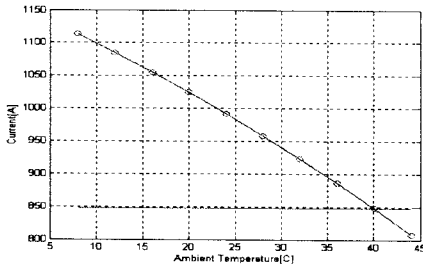


그림 2. 주위온도에 대한 허용전류 변화

2.2.2 풍속과 풍향

풍속은 대류에 의한 열방산과 직접 관계되며 기온보다 허용전류에 더 밀접한 관계가 있다. 풍속이 낮으면 도체에서의 열 방산은 적어지며 무풍인 경우가 최악의 조건으로 도체온도가 최고가 된다. 그림 3은 풍속에 대한 허용전류 변화를 나타내고 있다. 계산 결과에 따르면 무풍시에는 0.5[m/sec]일 때에 비하여 허용전류가 약 23.6[%]가 감소하며, 0.9[m/sec]일 때는 허용전류가 약 15[%] 정도 증가한다.

한편, 바람이 도체에 부딪히는 각도는 선로에 따라 다르며 이는 허용전류 산정 결과에 적지 않은 영향을 미친다. 따라서, 특정한 선로의 경우에 바람의 방향과 선로의 방향을 고려해야 하나 일반적으로 바람이 도체에 직각으로 작용하는 것으로 가정하였다.

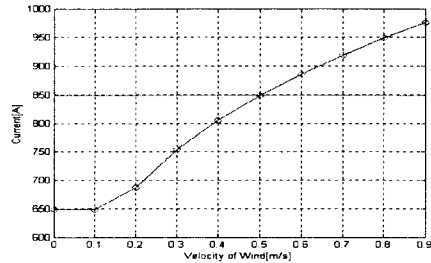


그림 3. 풍속에 대한 허용전류 변화

2.2.3 기타 요소

허용전류는 고도에 의해서도 영향을 받는다. 일반적으로 해발고도가 높아지면 공기밀도가 낮아 일사량이 증가 되지만 기온은 고도가 100[m] 증가할 때마다 약 0.6[°C] 정도 낮아지는 것으로 알려져 있다. 고도 1,000[m]일 때, 일사량만을 고려하면 고도 0[m]일 때와 비교하여 허용전류가 약 3.6[%] 정도 감소하나, 고도에 의한 온도저하 효과는 약 9[%]의 허용전류 증가를 유발할 것이다. 국내의 송전선로는 대부분 산악지역을 통과하고 있기 때문에 SLR 계산에서는 고도를 500[m]로 적용한다. 한편 도체의 방사율과 흡수율은 송전선의 가설초기에는 낮은 값을 나타내지만 약 5년 정도 지나면 0.5~0.7정도로 증가한다고 알려져 있다. 일반적으로 이 값은 IEEE 및 CIGRE의 대표치인 0.5가 적용된다. 선로의 방위각은 실제로 동서인 경우가 남북인 경우에 비하여 약 0.13[%] 증가하지만 본 계산에서는 남북선로로 가정하였다. 위도는 우리나라가 북위 33~38[°N]의 범위에 속하므로 35[°N]을 적용하였다. 이 위도 사이에 허용전류는 대략 0.03[%]로 그 편차는 무시할 정도이다. 연일수는 연중 태양이 가장 근접하는 날이 1월 1일부터 몇 일 쯤인가를 나타내는 것으로 일반적으로 161째인 6월 11일을 적용하고 있다. 태양시간은 1일 중 태양 고도가 가장 높은 시간을 말하며 13시를 적용하였다. 대기상태는 일반지역(clear, rural area)과 공업지역(industrial area)으로 구분하고 있으나 국내의 SLR 산출에는 일반지역으로 가정하였다.

2.3 동적 허용전류(DLR) 산정

DLR을 구하는 방법은 기상요소를 이용하여 구하는 방법(WM), 도체온도와 전류를 이용하여 구하는 방법(CTM), 온도와 이도를 이용하여 구하는 방법(TSM)이 제시되고 있다[3]. 이 논문에서는 IEEE 738에서와 같이 기온 및 풍속 등 도체 주변의 기상요소를 실시간으로 측정함으로써 허용전류를 산출하는 방법을 이용하였다.

현재 사용되고 있는 SLR 산정방식은 허용전류 계산에 있어 가장 큰 영향을 미치는 기온 및 풍속을 우리나라 기상측정 값 중에서 최악의 조건을 가정하여 계산하였다기 때문에 기온과 기상을 실시간으로 측정하여 송전 허용용량을 결정할 수 있는 DLR 산정 방식은 송전선로를 좀더 효율적으로 사용할 수 있게 해주며, 다른 한편으로 실시간 용량산정 값과 현재의 운용상태의 비교를 통하여 가공선 도체의 안정적 운용을 도모할 수 있다.

2.3.1 DLR 시스템의 구성

DLR은 정적 허용전류 산정과는 달리 실시간 또는 오프-라인 분석을 위하여 데이터의 측정, 수집 및 분석의 절차를 거쳐야 한다. 따라서, 동적 허용전류 산정시스템은 그림 4와 같은 구조를 갖는다. 일반적으로 DLR 모델의 적용 방식에 따라 모니터링 또는 측정해야 하는 파라미터들이 달라질 수 있지만, 본 논문에서는 기상모

델을 중심으로 그 특성을 검토하였다.

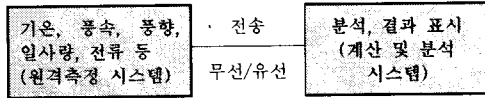


그림 4. 동적 허용전류 산정시스템의 구조

2.3.2 DLR 산정 결과 및 검토

일반적으로 계절별 정격은 계절적으로 뚜렷하게 구별되는 최고기온 값을 토대로 결정될 수 있다. 그러나, 일일 시간대별 기온은 주로 낮 14:00 정도에 최고기온을, 그리고 새벽 시간에 최저기온을 나타낸다. 풍속 또한 기온과 거의 유사한 형태를 보일 것으로 추정된다.

그림 5는 한전 대전전력 관리처의 A T/L 중 일부를 지형정보와 함께 나타내고 있는 것으로서 기상상태가 지형에 따라 매우 다양하게 변화될 것이라 추측된다.

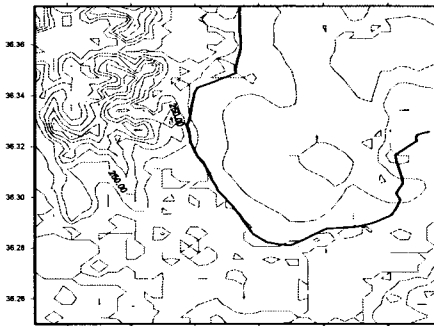


그림 5. 선로 및 주변의 지형정보

그림 6과 7은 2001년도 8월, 이 A T/L 근방에 위치한 8개 지점의 기상청 AWS(automatic weather system)에서 실측된 기온과 풍속을 나타낸다. 이들 결과를 보면 기온 및 풍속 특성은 시간, 지역적 변화가 매우 불규칙하여 일정한 형태로 모델링하는 것이 쉽지 않다는 것을 알 수 있다.

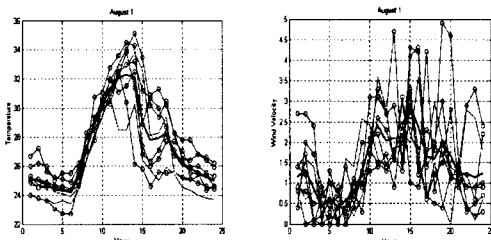


그림 6. 관측 기온과 풍속 (8월 1일)

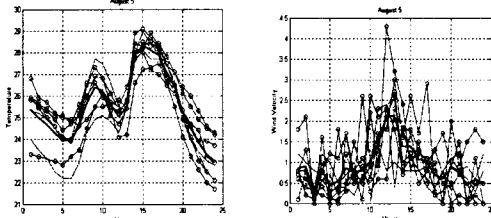
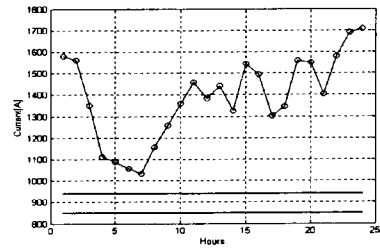
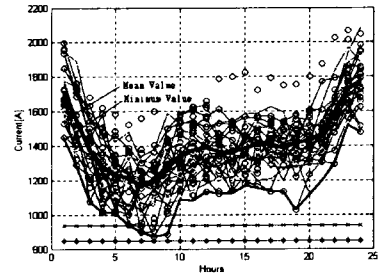


그림 7. 관측 기온과 풍속 (8월 5일)

그림 6, 7의 기상 데이터 및 그림 5의 지형정보를 이용하여 선로의 특정지점에서 DLR을 구해보면 그림 8과 같다.



(a) 8월 1일의 평균 DLR 계산결과



(b) 8월 1개월간의 평균 DLR 계산값

그림 8. 기상모델을 이용한 DLR 산정

그림 8(a)는 지형정보를 고려하여 선로의 특정 지점에 대해 추정된 기온과 풍속을 사용하여 계산한 8월 1일의 DLR 전류를 나타낸다. 또한, 그림 8(b)는 2001년 8월 한 달 동안에 대전지방기상관측소에서 측정된 기온과 풍속을 고려하여 계산된 시간대별 추정전류를 나타낸다. 이 경우에, 풍향, 일사량 등은 고려하지 않았고 ACSR 410[mm]에 대해 한전 규정을 그대로 적용하여 계산하였다. 선로 운용은 신뢰도 측면에서 최저 허용전류가 중요하다. 최저값들을 구해보면 아침 시간대와 수일 동안 단시간 정격보다 적게 나타나는 경우도 보이고 있다. 그렇지만, 모든 시간대에서 최대기온 40[°C], 최저풍속 0.5[m/s]로 계산된 848[A] 보다는 큰 값을 나타내고 있다. 또한, 시간대별로 나타난 평균치 및 최저치를 보면 일반적인 경향과 거의 유사한 특성을 보이고 있다. 즉, 아침 시간대에 최저값을 보이고 야간시간(20:00~04:00)에 비교적 높은 전류용량을 나타낸다. 특히, 주목할 것은 여름철 첨두부하(peak load)가 걸리는 오후 2, 3시쯤에는 어느 정도 여유가 있다는 점이다.

이들 결과에서 알 수 있듯이, 최저 허용전류는 4~7시 사이에 나타나고 주간보다는 야간의 허용전류 용량이 증가되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 주야간의 일반적인 예상결과와 유사하지만, 여름 최대부하율이 나타나는 오후 2~4시의 허용전류 산정 예측과는 약간 다른 결과를 보인다. 즉, 여름철에도 최저 허용전류는 부하가 피크로 발생하는 오후가 아니라 아침 5, 6시로서 이러한 결과는 오히려 송전선로를 운용할 경우에 다소 융통성이 있다는 것을 암시하기도 한다. 즉, 허용송전용량이 가장 작은 새벽 및 아침에는 오후 2, 3시에 전부하로 운전되는 경우보다 저부하이기 때문에 여름철 최대부하가 나타나는 시간대의 예비율을 확보하는데 다소 도움이 될 것으로 보인다. 따라서, 최대부하가 나타나는 시간대를 해석하여 운용에 반영하면 지금보다 경제적인 운용

이 가능할 것으로 추측된다. 그렇지만, 계절별 정격과는 다르게 그 특성이 불규칙하여 주야 정격을 규정하는 것은 곤란하다고 판단되었다.

다음 그림 9~12는 위와 유사하게 2001년 1년치의 기상 데이터를 이용하여 추정된 계절별 DLR 특성 및 연중 최소 추정 허용전류 분포를 나타낸다. 여기서, 계절별 연속 및 단시간 정격은 표 2와 같다.

표 2. 계절별 정격

분류	기간[월]	최고기온 [°C]	허용전류[A]	
			연속시간	단시간
1 하계	5~9	40	848	939
2 춘추	3,4,10,11	34	905	989
3 동계	12~2	25	984	1056

그림 9는 동계(12~2월) 동안에 모니터링 지점의 일별 평균, 최대, 최소 추정전류의 시간별 특성을 나타낸다. 평균치는 오전 9시경이 제일 낮았으며 낮 동안에는 비교적 높은 DLR 추정값을 갖는다. 그러나, 최소값을 보면 10~16시 사이에 일부 표 2의 단시간과 연속시간 정격보다 작은 값이 나타나고 있는 데, 이러한 현상은 역시 저풍속(0[m/s])에 기인한 것으로 추측된다. 한편, 그림 10과 11은 각각 춘추 및 하계의 DLR 추정값을 나타낸다. 이 결과 역시 최소치가 단시간과 연속시간 정격전류 이하인 경우가 존재하고 동계와 유사한 현상으로 설명될 수 있다.

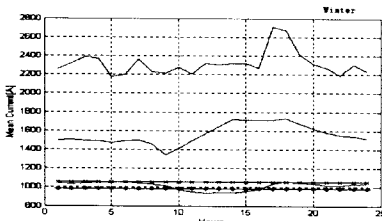


그림 9. 동계의 DLR(최대/평균/최소)

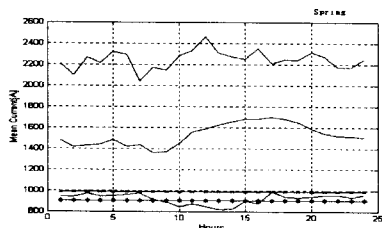


그림 10. 춘추의 DLR(최대/평균/최소)

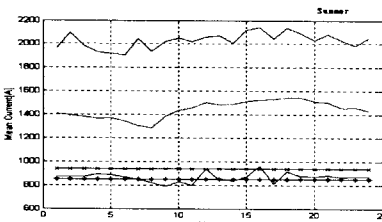


그림 11. 하계의 DLR(최대/평균/최소)

그림 12는 연중 DLR 특성을 보여 주고 있는 것으로 대전 기상청의 1년 동안 측정된 기온 및 풍속 데이터를 이용하여 구한 DLR 중 최소치와 연속 및 단시간 정격을 나타낸다.

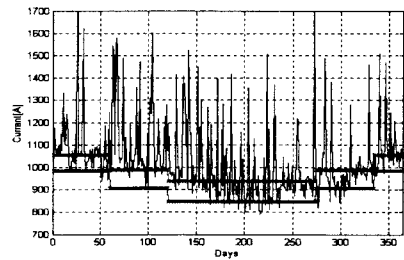


그림 12. 최소 추정 허용전류 분포

그림 12를 분석해 보면 송전용량은 이들 최소 추정 전류값보다 대략 50[A] 정도 감소시키면 100[%] 안전한 영역에서 운용이 가능할 것으로 추정된다. 또한, 정격전류보다 낮은 값으로 허용전류가 산정되는 경우를 실시간으로 모니터링하여 이 시간 동안에만 정격을 별도로 비상 관리하는 방안도 고려할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 가공 송전선의 허용용량을 합리적으로 평가하여 선로의 효율적 이용 및 안정적 운용을 도모하기 위한 한 방법으로서 기상모델을 중심으로 동적 허용전류 산정방법 및 그 이용에 대하여 검토하였다. 특히, 대전 지역의 가공송전선로를 대상으로 선로 주변의 기온, 풍속, 지형 정보를 이용하여 동적 허용전류를 산정해 보았다.

허용전류 산정에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요소인 기온 및 풍속을 실시간으로 관측하여 보다 합리적이고 정확한 허용 송전용량의 산출이 가능하게 되어, 이를 실제 송전용량과 비교하여 선로를 운용하면, 그 한계 및 여유폭의 추정이 가능하여 매우 안정적으로 선로를 운용할 수 있음을 확인하였다.

향후 본 연구를 바탕으로 하여 기상측정시스템, 도체의 전류 및 표면온도 측정 시스템 등을 도입하여 선로의 실시간 허용전류 산정에 관한 연구를 지속적으로 추진할 예정이다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 日本 電氣學會, “架空送電線の 電流容量”, 日本電氣學會技術報告, 第 660號, 1997
- [2] IEEE, “IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors”, IEEE standard P738, 1999
- [3] 전력연구원, “송전 설계기준 제, 개정 및 보완 연구, 한전 전력연구원, TR00PJ09.J22001.319, 2001.5
- [4] J. Raniga and R. K. Rayudu, “Stretching transmission line capabilities - A Transpower investigation”, Ranspower, New Zealand, 2001