

가공송전선의 송전용량 평가와 증대 방안

김성덕 · 심재명 <한밭대학교 전기 · 전자 · 제어공학부 교수>
 이동일 <전력연구원 전력계통연구실 책임연구원 >
 강지원 · 장태인 <전력연구원 전력계통연구실 선임연구원>
 민병욱 <한국전력공사 송변전건설처 부장>

1 서 론

경제발전과 더불어 국민의 삶의 질이 향상함에 따라 대다수 국가들에서는 전력수요가 급격하게 증가되었다. 그러나, 발전소의 건설과 송전선로의 신설 등은 급증된 전력수요의 요구와 반대로 경제적인 이유, 환경문제 등으로 오히려 점점 어려움에 처해지기 시작하였다. 특히, 과거 10년 동안 전력회사들은 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].

기존선로의 송전용량(ampacity)을 증가시키기 위해서는 먼저 설계용량이 현실적으로 적당한 것인지를 검토해야 하고 장기간 사용된 선로의 최대허용용량(maximum admissible capacity)정확하게 평가하여 실제선로에 도입해야 한다. 송전용량은 주로 도체의 열용량(thermal rating)으로 결정된다. 따라서, 도체의 허용온도가 송전용량을 결정하는 주요 소이며 이 온도는 주로 기상조건에 의해 제약을 받는 파라미터이다. 송전용량은 최악의 기상조건에서 가정된 도체의 최고허용온도로부터 결정된다. 그러므로, 20세기말부터 각국의 전력회사들은 설계 파라미터와

기존 선로의 용량을 검토함으로써 선로를 증설하지 않더라도 기존 송전망을 통하여 송전용량을 증가시키는 방법을 연구하기에 이르렀다.

전력회사는 먼저 송전용량에 영향을 주는 요소들 중에 재질 상 허용온도를 검토하고 이 온도와 인장과의 관계를 정량화하는 작업부터 시도하였다. 도체 온도와 장력을 측정하여 송전용량을 결정하거나 이들이 도체의 이도(dip or sag)나 지상고(ground clearance)에 미치는 영향 등이 검토되는 한편, 철탑 등 구조물을 변경하지 않고 사용할 수 있는 고내열 도체의 개발에 역점을 두었다.

한국전력공사에서도 90년대에 이르러 국내의 전력수요가 매년 약 10[%] 정도로 증가할 것으로 추정하여 전력에너지 수급계획을 세워 수행해 왔다. 그러나, 전력산업의 개편으로 인한 예산의 제약, 좁은 국토의 지형적 조건, 환경단체의 반대와 사회적 민원문제 등으로 새로운 선로의 증설이 쉽지 않게 되었다. 특히, IMF 사태 이후 국내 경기의 악화와 2001년에 전력구조의 개편으로 인하여 신규 투자에 대한 압력이 증대되었으므로, 당분간은 신규 건설에 대한 투자보다는 다른 국가의 전력회사와 같이 기존 설비의 송전용량을 증대시키는 방안을 모색할 것으로 보인다. 따라서, 현재 운용되고 있는 전력설비의 진단과 평가가 우

선적으로 이루어져야 한다. 결국, 새로운 도체의 개발은 물론, 기존 선로의 용량검토, 기존 도체의 열용량 증대 방안과 이들의 적용에 대한 장·단기적 경제적 효과 등도 신중히 검토해야 할 것이다.

2. 평적 송전용량

2.1 송전용량

가공송전선의 허용전류는 도체의 재료특성과 이도 특성에 의해 결정된다. 도체의 전류와 기상 파라미터들이 주어지면 가공송전선의 온도는 도체의 주울열과 태양열에 의한 발산과 복사열이 열적 평형상태를 이룰 때 값으로 주어진다. 이 때, 도체가 흘릴 수 있는 최대허용전류(maximum allowable current)를 정상상태 열정격(steady-state thermal rating)이라고 하고 특정한 기상조건에서 도체가 흘릴 수 있는 최대 전류를 나타낸다. 이러한 정격은 때로 정적 송전용량(static line rating or static line rating : SLR)이라고도 한다[4]. SLR은 도체가 가설된 지역의 최고기온, 최저풍속을 가정하고 태양열이 최고인 여름철의 기상 데이터를 토대로 설계된다(5~10). 이 경우에 최대온도의 한계는 최대 이도(또는 최소 지상고), 어닐링(annealing)이나 크리프(creep)에 의한 도체인장 손실 등을 고려하여 결정된다.

STR은 최악의 기상조건에서 견딜 수 있는 도체의 허용온도로부터 계산된 것으로 이러한 기상조건은 실제 선로에 나타날 확률은 거의 없다. 따라서, STR을 전제로 운용되는 선로는 이렇게 정한 송전용량보다 항상 적은 부하에서 운용된다. 특수한 침두부하 시기를 제외하면 대부분의 선로는 가용 송전용량이 존재한다. 송전용량을 증가시키기 위해서 먼저, 현재 선로가 수용할 수 있는 용량을 정확하게 평가할 필요가 있다. 그 중 한 방안이 동적송전용량(Dynamic Line Rating : DLR)을 채용하는 방식이다. DLR은 SLR에 대한 상대적인 개념으로, 실시간에서 주어진 데이

터들로부터 산출되는 것으로 도체의 최대허용온도에서 동작할 수 있는 정상상태 부하로 정의된다[4]. 실제로 도체가 가설된 지역의 기온이나 일사량 등은 SLR을 결정할 때 주어진 값보다 작고 풍속은 일반적으로 크므로 DLR은 보통 SLR보다 큰 값이 된다.

현재 국내외의 전력회사는 미래에 유용하다고 판단된 새로운 선로를 건설은 경제적, 사회적 또는 환경적인 원인으로 인하여 선로를 증설하기보다는 현존하는 선로를 가급적 전부하로 운용하는 요구가 가중되고 있다. 이 경우에 DLR 방식을 채용하면 실시간으로 송전선로의 용량을 결정하여 열적 위험이나 지상고를 증가시켜 도체를 교체하지 않고서도 송전용량을 증가시킬 수 있다. 또한, 새로운 선로를 증설하지 않으면서 현존하는 철탑을 이용하여 송전용량이 큰 고내열 도체로 교환하는 방안도 있다. 그렇지만, 이러한 방법들은 DLR을 사용하여 기존 선로의 송전용량을 증가시키는 방법보다 더 많은 경비가 소요된다[11].

2.2 열평형 방정식과 허용전류

가공송전선의 전류용량은 도체의 대류에 의한 발열 및 일사로부터의 흡열과 도체로부터의 방열이 평형상태가 된 경우에 구한 도체온도가 도체의 재료적 변화 또는 연성정도에서 허용된 온도가 될 때의 전류로 규정하고 있다. 따라서, 도체의 허용전류는 도체의 주울열과 태양열 입력의 합이 대류열과 방사열의 합과 같다는 열평형 방정식으로부터 구해진다[9, 10]. 즉, 연속 및 단시간 허용전류 산정에 사용되는 열평형 방정식은 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 최고허용온도 T_c [°C]에서 도체의 전기적 특성에 따라 결정되는 교류저항이고, Q_s 는 도체가 태양으로부터 흡수하는 열(solar

기술해설

heat gain)이며, Q_c 는 대류에 의한 열방산 (convected heat loss), Q_r 은 방산에 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 주열에 의한 열손실은 부하전류와 도체의 교류저항으로 계산되며, 교류저항은 도체온도의 함수로 주어진다. 도체의 온도는 기상 및 부하가 급격하게 변하더라도 서서히 변한다.

국내에서는 2001년 한전에서 송전 설계기준 제·개정 및 보완 연구에서 규정이 정해졌다[12]. 표 1은 국내 송전선 산정기준에서 허용전류를 산출할 경우에 사용한 기상조건을 나타낸다. 이 때, 도체의 최고허용온도는 도체의 종류마다 다르게 규정되어 있으며 연속, 단시간 및 순시허용전류에서의 도체온도도 다르게 규정되어 있다.

표 1. 도체의 허용전류를 산출하는 경우의 기상조건

번호	항 목	기준치
1	주위온도	40[℃]
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	년일수	161(일)
9	태양시간	13(시)
10	대기상태	청정
11	최고허용온도(ACSR 경우)	90[℃]

(1) 주위온도

도체의 주위온도는 가설된 지역의 연중 최고기온을

적용하지만, 계절별 허용전류를 규정할 경우에는 계절별 최고기온을 적용하는 것이 일반적이다. 우리나라는 아직 계절별, 주야별 기온을 구분하여 관리하지 않고 있으므로 연중 최고기온을 적용하여 최악의 기상조건에서의 방사량을 산정하고 있다. 과거에 측정된 전국 72개 지역에 대한 기상청의 최고기온 데이터를 분석한 결과를 그림 1로 나타내었다. 국내 최고기온은 1942년 대구지역에서의 40.0[℃]로, 연중 송전전류 산출에는 주위온도를 40[℃]로 적용하였다.

월별 최고기온으로 국내 허용전류 산정에는 기상관측소의 위치, 고도에 따른 기온변화를 고려하지 않았다. 최고기온은 분포로 전국을 한 단위로 묶어서 설계기준을 정할 때 적용한 최고기온 대구지역의 40[℃]로써 지속시간은 1시간 정도도 되지 않을 것으로 추측된다. 따라서, 이러한 온도를 연속허용전류를 산정하기 위하여 적용하는 것보다 단시간 허용전류나 또는 비상시 허용전류로 규정하여 일정한 조건과 시간에서만 적용할 수 있을 것이다. 또한, 필요한 경우, 지역별이나 계절별 허용전류 규격을 별도로 정하여 운용할 수도 있다.

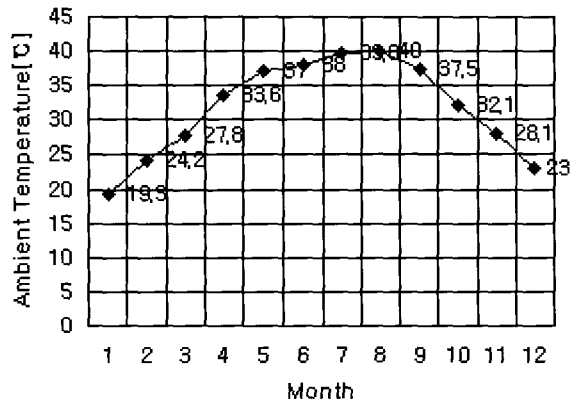


그림 1. 월별 최고기온

그림 2는 ACSR 410(mm²)의 예로 주위온도 변화에 대한 허용전류 변화를 보인다. 한전기준에 따르면

[12] 이 도체는 기온 40[°C]에서 연속허용전류는 $I = 848$ [A]이다. 만약, 주위온도를 44[°C]라 가정하면 ACSR의 최고허용온도를 90[°C]라 할 때 기준전류에 비해 약 4.8[%] 감소되는 반면에, 주위온도를 8[°C]라 하면 허용전류는 31.31[%]로 증가시킬 수 있다.

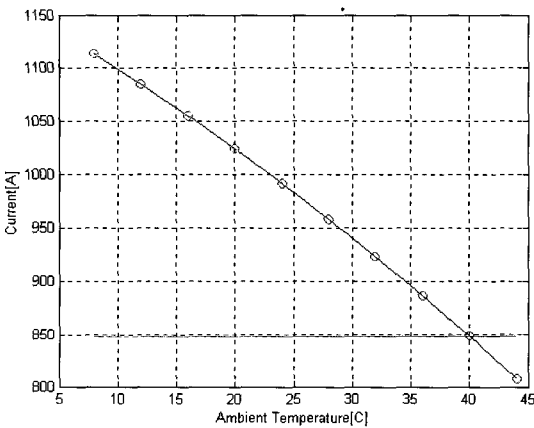


그림 2. 주위온도 변화

(2) 풍속과 풍향

최저풍속의 적용은 순간최저풍속보다는 평균최저풍속을 적용하는 것이 타당하다고 판단되나 우리 기상청에서는 평균최저풍속을 측정하지 않는다. 일본의 전기학회 보고[7]에 따르면 일본도 평균최저풍속에 대한 측정자료가 없어 현지 기상조사를 한 결과, 평균최저풍속은 0.5[m/sec]이하인 경우도 존재하며 그 비율도 최고 20[%]인 지역도 있다고 보고 되었다. 그렇지만, 기온이 35[°C] 이상, 풍속이 0.5[m/sec] 이하이며 일사량이 0.1[W/cm²]인 경우(허용전류를 결정하는 데 최악의 기상조건)의 확률은 0[%]로 분석하고 있다. 즉, 이들 기상조건이 동시에 나타날 확률은 없으므로 풍속을 0.5[m/sec]로 적용하는 데에는 무리가 없다고 보여진다. 또한, 미국의 시가지에서 측정된 결과는 0.62[m/sec]로 보고되어 있고,

CIGRE, IEEE, IEC에서는 명확하게 규정하고 있지 않지만 CIGRE는 0.5[m/sec], IEEE는 0.62[m/sec], IEC에서는 1.0[m/sec]로 계산한 예가 있다[5,6,9]. 따라서, 국내 기준 산정에는 평균풍속을 0.5[m/sec]로 적용하였다. 그렇지만, DLR을 운용하는 경우에는 0.5[m/sec] 이하의 저풍속에 대한 영향을 신중하게 고려해야할 것으로 추측된다.

풍속은 대류에 의한 열방산과 직접 관계되며 기온보다 허용전류에 더 밀접한 관계가 있다. 풍속이 적으면 도체에서의 열발산은 적어지며, 무풍인 경우가 최악의 조건으로 도체온도가 최고가 된다. 따라서, 이 경우에 허용전류는 그림 3에서와 같이 최저가 된다. 그렇지만, 앞에서 언급한 바와 같이 2 가지 최악의 조건이 겹치는 경우는 확률적으로 0[%]로 보고되어 있으므로 기존 기준들을 고려하여 0.5[m/sec]로 선정하는 것은 타당한 것으로 보인다. 수치해석에 따르면 무풍 시에는 약 23.6[%]의 허용전류가 감소되며, 0.9[m/s]로 가정하면 15.0[%] 정도 허용전류를 증가시킬 수 있다.

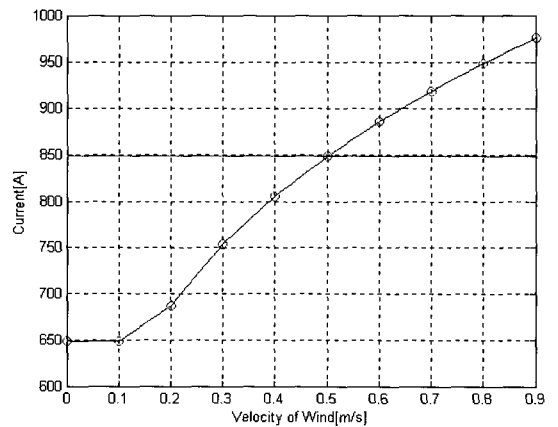


그림 3. 풍속에 대한 허용전류

한편, 바람이 도체에 부딪히는 각도는 선로에 따라 다르지만 허용전류 계산에는 많은 영향을 미친다. 따

라서, 특정한 선로의 경우에 바람의 방향과 선로의 방향을 고려해야 하지만 한전 기준에서는 바람이 도체에 직각으로 작용하는 것으로 가정하였다.

(3) 기타 요소

국내 송전선로는 대부분 산악지역을 통과하고 일부 선로는 500[m] 이상의 지역을 경과하고 있기 때문에 STR 계산에서는 고도를 500[m]로 선택하였다. 일반적으로 해발고도에 의해 공기밀도가 낮아 일사량이 증가되지만 기온은 고도 100[m] 증가할 때마다 약 0.6[°C] 정도 증가하는 것으로 알려져 있다. 고도가 0이면 허용전류가 최대이지만 1000[m]이면 약 3.6[%]의 허용전류 변화가 나타난다. 그렇지만, 고도가 높아지면 온도가 6[°C] 정도 낮아지므로 이 온도범위에서의 허용전류는 약 9[%]의 허용전류가 증가할 것이다.

한편, 도체의 방사율과 흡수율은 국가에 따라 다르게 적용하는 경우도 있다. 송전선은 가설초기(새 전선)에는 낮은 값을 나타내지만 약 5년 정도 경년이 되면 0.5~0.7 정도로 증가한다고 알려져 있다. 세계 각 규격에 제시되어 있는 흡수율 및 방사율은 고려하여 한전 기준에서는 IEEE 및 CIGRE의 대표치인 0.5로 적용하였다. 일반적으로 이 기준의 선정과정을 유심히 관찰하면 허용전류에 대한 기준은 새 선로의 가설초기 뿐만 아니라 전선의 교체시기까지에 안전을 고려해 선정한 것임을 알 수 있다. 이러한 사실은 예컨대, ACSR의 수명을 36년이라 가정할 경우에 도체의 설계 및 운용조건을 정한 것이라 보면 된다. 다시 말해서, 재질의 연성이 크게 변화되지 않는 범위라 가정하여 도체의 허용온도를 90[°C]에서 95[°C]로 높여 운용하면 그 만큼의 도체수명이 단축될 것임을 의미하는 것이다.

도체의 연속시간 허용전류에 대한 도체의 온도는 ACSR인 경우에 90[°C]로 규정되어 있으므로 이 조건에서 36년이 지나면 도체의 인장이 10[%] 정도

감소되어 교체되는 것으로 취급하고 있다. 도체의 교체시기를 인장특성 감소로만 가정할 때, 도체는 36년 동안 전부하로 운전하는 경우가 없으며 대략 평균 50[%] 미만으로 운용되고 있다. 따라서, 도체의 수명은 36년보다 증가될 것이 분명하다. 도체의 허용전류는 도체의 수명보다는 재질의 연화특성을 우선 고려하여 정한 것으로 보인다. 예컨대, ACSR의 경우에 90[°C] 이상, 예를 들어 100[°C]에서 3시간씩 3일 정도 이상 운전하면 알루미늄 소선의 재료특성이 변화하여 원래특성을 복귀하지 못하는 등의 문제가 먼저 고려된 것으로 추측된다. 이 점은 실험을 통해 확인할 가치가 있다.

선로의 방위각은 선로의 방향이 동서인지 남북인지에 대한 것으로 우리나라의 경우 거의 영향이 없으므로 큰 의미가 없다. 실제로 선로 방향이 동서인 경우가 남북인 경우에 대하여 약 0.13[%] 증가한다. 그러나, 한전 기준에서는 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 접근하는 날이 1월 1일부터 며칠 췌인가를 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.

3. 송전용량 증대 방안

3.1 기존선로의 송전용량 증대

전력산업 구조개편의 목적은 독점체제인 전력산업에 경쟁을 도입하여 전력공급의 효율성을 제고하고, 장기적으로 값싸고 안정적인 전력공급을 지속적으로 보장하며, 전력사용에 있어서 소비자의 선택권을 확

대하여 편익을 증진시키는데 있다. 그러나, 발전소의 건설과 송전선로의 신설 등은 급증된 전력수요의 요구와 반대로 경제적인 이유, 환경문제 등으로 오히려 점점 어려움에 처해지기 시작하였다. 따라서, 전력회사는 현재 운용되는 선로의 공급용량을 최대로 증가시키는 방안을 찾을 수밖에 없었다. 이것이 결국 기존 선로의 송전용량의 증대시키는 것이다.

2장에서와 같이 모든 선로에 대하여 기상조건 등 최악상태를 토대로 규정된 SLR의 적용은 비효율적이고 비경제적이다. 따라서, 기존설비를 그대로 두어 송전용량을 증가시키는 다양한 방법을 강구하기에 이르렀다[11]. 그 대표적인 예는 다음과 같다.

- (1) 도체를 보완이나 교체하는 방법
- (2) 동작온도를 증가시키는 방법
- (3) DLR을 이용하는 방법

과거에는 선로의 송전용량을 증가시키기 위한 방법으로 한 선로의 모든 도체를 전류용량이 큰 도체로 교체하는 것이 유일한 방법이었다. 이 경우에 송전용량을 증가시키기 위하여 동일한 철탑에 허용전류가 큰 새 도체로 교체하거나, 또는 정격의 2배 정도로 2도체를 병렬로 하는 방법을 채용하기도 한다. 만약, 가설되어 사용되는 도체의 잔존수명이 여유가 있다고 판정한 경우에는 가설도체와 같은 규격의 새 도체가 이 도체와 함께 2도체로 가설하는 방법을 사용될 수 있다.

한편, 선로 도체에는 최대동작온도(maximum operating temperature)가 규정되어 있어서, 이 동작온도를 더 높은 온도로 증가시키면 송전용량도 증가된다. 이 경우에는 온도증가에 따른 이도가 증가되므로서 지상고를 검토해야 한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 새로운 최대동작온도에 따른 지상고를 증가시키기 위하여 경간을 새로 조절해야 하거나 도체 밑의 땅을 파서 지상과 도체 사이의 거리를 늘리거

나, 또는 철탑의 높이를 재조정해야 한다. 이러한 방법으로서, 도체의 장력을 다시 조절(re-tensioning), 절연체의 재정렬(rearrangement)과 필요한 만큼 철탑높이를 증가시키는 방법이 있다. 이와 같이 동작온도를 증가시키기 위하여 도체를 다시 조절하는 경우에는, 도체 모두를 교체하는 경우의 비용보다는 적지만 여전히 많은 경비가 든다. 따라서, 도체 전류와 온도를 추정할 수 있는 파라미터들을 실시간으로 모니터링하여 사용하는 DLR 방법이 가장 경제적이다.

3.2 도체온도를 증가시키는 방법

송전선로의 가공도체로 주로 사용하는 ACSR 도체는 정상동작온도가 75[°C]이고 비상동작온도가 93[°C] 정도로 규정되어 있다. ACSR은 경알루미늄으로 제조되기 때문에 동작온도가 93[°C] 이상이 되면 어닐링이나 연성(soften)으로 되어 이 온도 이하가 되더라도 이전 상태를 회복하지 못하게 된다[13, 14]. 따라서, 이도가 증가하게 되어 도체의 지상고가 규정치 이하로 감소하게 된다. 그러나, V.T. Morgan과 같은 학자[15]는 ACSR의 아연도금 강선은 250[°C]까지도 어닐링에 의하여 인장이 감소되지 않는다고 보고하고 있다. 이러한 사실은 ACSR의 대부분의 인장은 아연도금 강선이 담당하므로 알루미늄이 어느 정도 어닐링되어 있다고 하더라도, 강선의 인장 점유율에 의해 기존 ACSR의 동작온도를 증가시킬 수 있다는 것을 의미하기도 한다. 물론, 이러한 확실성은 기존 선로의 설계에 적용하기까지는 여러 가지 검증이 필요하겠지만 고려해볼 만한 가치가 있다고 생각된다.

한편, ACSR 도체가 93[°C] 이상에서 어닐링되어 장력이 감소되는 것을 역이용한 도체가 ACSS(Aluminum Conductors Steel Supported)이다 [16, 17]. 이 도체는 ACSR과는 달리 제조 당시에 어닐링된 알루미늄 소선을 사용한다. 일반적으로 어

닐링된 알루미늄은 인장이 매우 작으므로 이 도체의 인장은 전적으로 강선이 담당하도록 설계된다. 이 도체는 어닐링된 상태로 제조되기 때문에 ACSR와 유사한 규격과 선로 설계 조건에 대해서 약 200(°C)까지 사용 가능하다. 예컨대, ACSR 도체로 정상동작 온도 75(°C)에서 825(A)인 도체와 유사한 규격의 ACSS는 200(°C)에서 1,525(A)까지 송전이 가능하다. 결국, 동일한 철탑 구조에 대해서도 송전용량을 2배 정도로 증가시킬 수 있다고 보고되었다. 이 도체는 동작온도가 높을 뿐만 아니라 고온에서 이도 증가율이 작고 자기팽창 능력이 크며 크리프가 감소된다는 장점이 있는 반면, 인장이 적고 가격이 비싸다는 단점도 있다.

ACSS 도체가 개발된 1974 이후에는 강이나 계곡과 같은 부득이 경간이 길어지는 장소에만 한정적으로 사용되어 왔다. 그러나, 최근에 기존 선로의 교체시 ACSR 대신 ACSS를 사용한 예가 문헌 [16, 17]에 보고되었다. 물론, 이 도체가 국내 현실에도 적당한 것인지는 현재로는 알 수 없으나, 적극 검토해볼 가치가 있다고 여겨진다.

1994년부터 1997년 사이에 국내 선로에 적용된 인바심 고내열 알루미늄합금 도체, ZTACIR (Heat Resistant Aluminum Alloy Conductor with Invar Reinforcement) 또는 STACIR(Super Thermal Resistant Aluminum Alloy Conductor with Invar Reinforcement)도 도체의 최고온도를 높힘으로써 송전용량을 증가시킬 수 있는 초내열 도체이다[16, 18]. 이 도체는 고강도 합금강을 사용하여 동작온도를 210(°C) 정도로 증가시키므로서 공급전류를 대략 2배 정도 증가시키는 효과가 있다. ACSS와 유사하게 고온에서의 이도 증가가 작은 반면에, 인장이 ACSR에 비해 떨어지고 역시 가격이 대략 ACSR에 비하여 5~8배 정도로 비싸다. 물론, 교체 선로나 신설되는 선로에 STACIR 도체를 사용할 경우에 송전용량은 증가시킬 수 있지만 우리

나라와 같이 지형적으로 부식에 취약한 지역에서도 경제성이 있을지는 확인할 수 없다. 특히, 우리와 유사한 환경의 영국에서는 STACIR을 사용하는 예가 없고 주로 교체 전선으로 AAAC를 사용한 이유[17]를 정확하게 판단할 필요가 있다. 또한, 일본의 적용 사례도 검토해야 할 것이다.

3.3 동적 송전용량을 이용하는 방법

여러 해 동안 세계적인 연구 결과들에서는 송전용량에 대해 사용된 허용전류한계가 때때로, 진부적인 것으로 취급해 왔다. 이러한 연구 결과, 기존 도체가 정상적인 기상상태(favourable weather condition) 하에서 DLR 방법을 사용하면 규정된 이도 범위를 넘지 않으면서 전류를 더 많이 공급할 수 있다고 제시하였다[19~21]. DRL 시스템은 실시간으로 기상상태와 송전용량을 연속적으로 관측하므로 도체의 실제 이도를 산출할 수 있다. 이러한 방법으로 규정된 지상고를 유지하면서 전류를 증가시킬 수 있다.

DLR을 이용하는 방법은 IEEE P738처럼 기상모델(Weather Model : WM)을 사용하는 방법과 도체의 온도를 직접 모니터링하는 도체온도모델(Conductor Temperature Model : CTM), 및 도체온도와 이도를 측정하는 온도-이도모델(Temperature-Sag Model : TSM)을 사용하는 방법이 있다[4, 22]. 일반적으로 WM을 사용할 경우에 기상요소의 측정이 선로의 여러 지점에서 가능하지 않고 또한 그 측정치에 의해 간접 계산된 온도-전류 사이의 관계에 불확실성이 존재한다. 따라서, CTM이나 TSM은 도체온도를 직접 측정하거나 인장미터에 의해 이도를 측정하여 허용전류를 산정하는 방식이다.

DLR 모니터링 장비로 개발되어 사용하는 Valley Group의 CAT-1은 장력센서(tension sensor)와 일사량센서(radiation sensor)를 이용하여 DLR을 산출하는 방식을 이용한다. 이 장비는 1991년 이후 현재 수십 전력회사에서 사용되고 있는데 하계의 송

전용량에서도 수[%]에서 20[%] 정도의 증대가 가능하다고 보고 되었다[2, 11, 22]. 한편, 이와 유사한 시기에 Niagara Mohawk에 의해 개발된 Power Donut는 도체전류, 온도 등을 측정하여 DLR을 산출하는 방식을 이용한다. 이 시스템도 1994년 PSE&G의 실제 선로에 설치되어 송전용량을 실시간으로 모니터링하고 계산한 결과 증대효과를 보았다고 보고되었다[23].

3.4 동적 송전용량 적용

(1) SLR의 세분화

DLR은 실시간 송전용량을 산출하는 것이기 때문에, 산출하는 시각에 도체에 대응하는 국부적 기상조건을 확립하는 것이 필요하다. 일반적으로 정상적인 기상조건에서 결정된 SLR은 연중 최악조건에서만 적용된다. 2장에서 언급한 바와 같이, 도체의 온도는 기온과 풍속에 매우 민감한 반응을 나타낸다. 풍속과 풍향은 가변성이 큰 파라미터로 계절이나 지역별 기준을 정하는 것이 곤란하다. 그렇지만, 기온은 계절별로 그 최고값이 다르므로 송전용량을 증대시키기 위한 1단계의 방법으로 이용할 수 있다[24]. 표 2는 국내 최고기온을 계절별로 분류한 예를 나타낸다. 이 표 1에 따르면 동계에는 25[°C], 춘추계에서는 34[°C]로 연중 최고기온보다 현저하게 낮은 기온을 나타낸다. 예컨대, ACSR 410(mm²)의 연속허용전류는 연중 정격 40[°C]에 대하여 848[A]이지만 동일한 다른 기상조건에서도 34 및 25[°C] 각각에 대하여 905 및 984[A]로 증가한다.

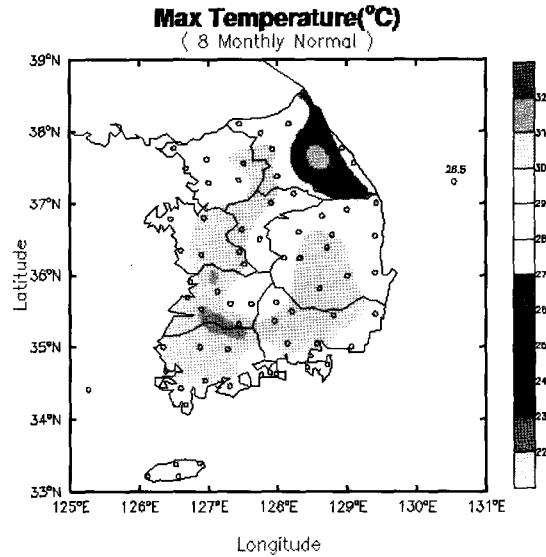


그림 4. 8월의 최고기온분포

한편, 그림 4는 8월의 최고기온분포로 각 지역의 기온이 다르게 나타나고 있다. 따라서, 연중 정격은 우리 나라 전체에 대하여 최고기온을 대구지방의 40[°C]로 가정하였지만 강원도(예컨대, 제천전력관리처)와 같은 지역은 최고기온을 다소 감소시켜 관리함으로써 송전용량을 증가시킬 수도 있을 것이다.

(2) DLR의 이용

허용전류를 항상 감시하고 조절하는 최선의 방법은 도체온도에 미치는 기상조건들을 실시간으로 모니터링하여 이용하는 DLR 방법이다. 도체의 전류, 온도나 이도 등의 관계를 산출하기 위해 기상요소, 도체온도와 전류, 또는 인장을 측정하여 허용용량을 결정할 수 있다. 이들 중 가장 기본적인 방식이 WM을 이용

표 2. 계절별 최고기온

계절	지명	기온(°C)	년	월 일	한계온도(°C)
동계(12~2월)	울산	24.2	1996	2월 14일	25
춘추(3, 4, 10, 11월)	강릉	33.6	1998	4월 20일	34
하계(5~9월)	대구	40.0	1942	8월 1일	40

하는 것으로 본 기고에서는 국내의 기상관측 데이터를 통해 몇 가지 특성을 분석하였다.

그림 5는 2001년 8월 31일 동안에 대전지방기상 관측소에서 측정된 기온과 풍속으로부터 계산된 시간대별 추정전류를 나타낸다. 이 경우에, 풍향, 일사량 등은 고려하지 않았고 ACSR 410(mm)에 대해 한국 전력 규정을 그대로 적용하여 계산하였다. 선로 운용은 신뢰도 측면에서 최저허용전류가 중요하다. 최저값들을 구해보면 아침 시간대와 수일 동안에는 단시간 정격보다 적게 나타나고 있다. 그렇지만, 모든 시간대에서 최대기온 40(°C), 최저풍속 0.5(m/s)로 계산된 848(A) 보다는 큰 값을 나타내고 있다. 또한, 시간대별로 나타낸 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 3, 4시쯤에는 어느 정도 여유가 있다는 사실이다.

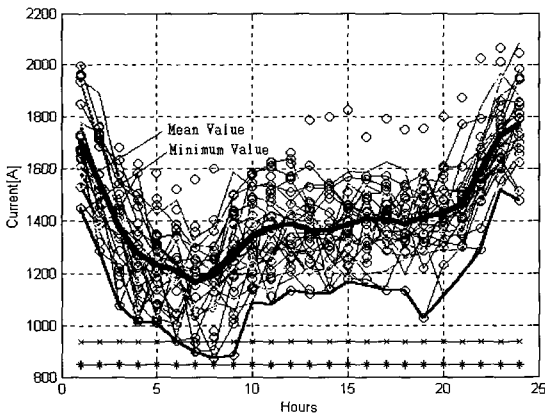


그림 5. 동적 허용전류의 평균값과 최소값

한편, 그림 6은 AWS 5개 지점의 측정 데이터를 이용하여 대전지점의 전류를 추정한 결과(*)와 대전 지점의 실측 데이터로 계산한 허용전류(o)를 상단에 표시하고, 실측된 기온과 풍속을 하단에 각각 나타내

었다. 이 경우에 DLR이 SLR보다 적은 시간은 오전 6, 7시 근방이고 이 시간에서 풍속이 거의 0에 가까운 것을 알 수 있다. 결국, 실측치에 의한 전류 계산 결과는 풍속의 변화에 대략 비례하는 특성을 보이고 있으며 풍속의 급격한 변동에 의해 계산된 허용전류도 변동폭이 크다. 그러나, AWS(Automatic Weather System) 지점 데이터로 추정한 허용전류는 다소 변화 폭이 적게 나타났지만 계산 허용전류와 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서, 이들 사이의 특성 차가 주로 풍속에 의해 기인된 것으로 보아 현지 모니터링 시스템을 설치하여 운영하는 것이 신뢰성 측면에서 도움이 될 것으로 생각된다.

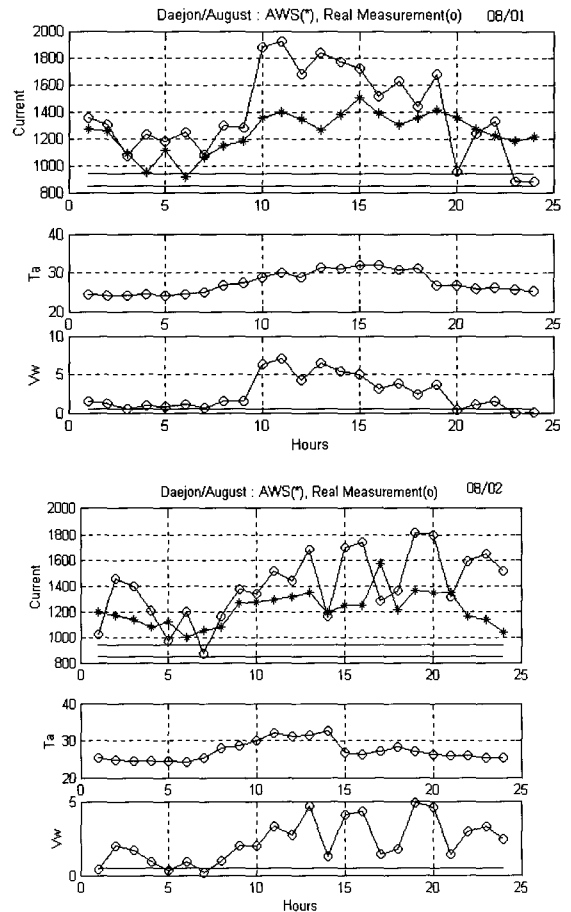


그림 6. 추정전류 특성

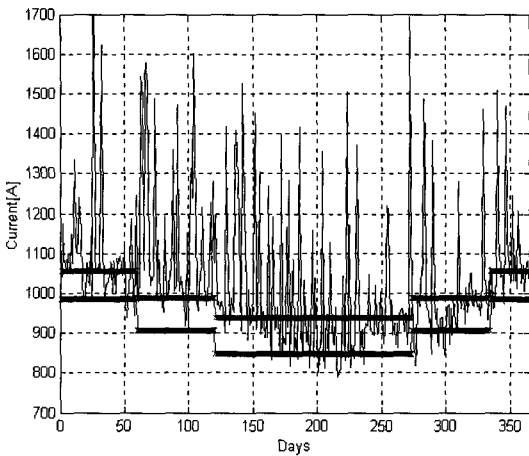


그림 7. 최소 추정전류 분포

그림 7은 1년 동안 측정된 대전관측소의 데이터를 이용하여 구한 DLR 중 최소치와 연속 및 단시간 정격을 나타낸다. 이 결과로부터 송전용량은 이들 전류 값보다 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.

4. 결 론

과거 10년 동안 전력회사들은 구조 개편으로 정책의 결정과 경제적 투자가 용이하지 않게 됨에 따라 전력회사는 현재 운용되는 선로의 신뢰성을 유지하면서 전력공급용량을 최대로 증가시키는 방안을 모색하기에 이르렀다. 전력회사는 운용선로의 송전용량을 증가시키기 위해서는 먼저 기존 설계용량을 검토해야 하고 장기간 사용되어 노화된 선로의 최대허용용량을 정확하게 평가, 분석하여 실제선로에 도입해야 한다. 일반적으로 연중 일정한 값으로 제한되는 정적 송전용량(SLR)은 주로 도체의 열용량을 제한하는 값으로 최악의 기상조건에서 계산된 도체의 최고허용온도

로부터 결정된다. 이에 대하여 동적 송전용량(DLR)은 실시간으로 모니터링된 기상요소나 도체온도 또는 장력으로부터 산출되며 도체의 최대허용온도에서 동작할 수 있는 정상상태 부하로 정의된다. 본 기고에서는 먼저 SLR을 결정하는 요소들과 기온, 풍속 등의 효과를 간단히 검토하였다. 또한, 기존 선로의 송전용량을 증대시키는 몇 가지 방법과 기술 동향을 소개하였다. 따라서, 현재 전력산업의 개편과 더불어 대두된 기존 송전선로의 경제적인 운용 방안을 송전용량 증대에서 찾을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [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] D.A. Douglass, "Weather-dependent versus static thermal line ratings (power overhead lines)", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, pp. 747-753, 1988.
- [5] The thermal behavior of overhead conductor, CIGRE WG22-12, Electra, No. 144, 1992.
- [6] Overhead electrical conductors calculation methods for stranded bare conductors, IEC-1957 First Edition Technical Report-Type 3, 1995.

기술해설

- [7] 가공송전의 전류용량, 일본 전기학회기술보고, 제 660호, 1997.
- [8] N.P. Schmidt, "comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards", IEEE PWRD, Vol. 14, No. 4, 1999.
- [9] Draft standard for calculating the current-temperature relation ship of bare overhead conductors, IEEE Std P738, 1999,
- [10] 가공전선의 송전용량 결정기법, 배전기술센터, 2001.9.
- [11] J. Raniga and R.K. Rayudu, "Stretching transmission line capabilities - A Transpower Investigation", Transpower, New Zealand, 2001.
- [12] 송전 설계기준 제·개정 및 보완 연구, 한국전력 공사 전력연구원, TR.00PJ09.J22001.319, 2001.5.
- [13] 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, 1996.
- [14] G.C. Baker, "Reconductoring power lines-an example exercise in conductor selection", 2001 IEEE Rural Electric Power Conference, pp. D1/1-D1/6, 2001.
- [15] V.T. Morgan, "Effect of elevated temperature operation on the tensile strength of overhead conductors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 345-352, 1996.
- [16] I. Zamora, "High-temperature conductors: a solution in the uprating of overhead transmission lines", 2001 IEEE Power Tech Proceedings, Vol. 4, pp. 61-66, 2001.
- [17] 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.
- [18] B.W. Min, M. Choi, and A.K. Deb, "Line-rating system boosts economical energy transfer", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 10, No. 4, pp. 36-39, 1997.
- [19] T.O. Seppa, "Factors influencing the accuracy of high temperature sag calculations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 1079-1089, 1994.
- [20] T.O. Seppa, "A practical approach for increasing the thermal capabilities of transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery., Vol. 8, No. 3, pp. 1536-1550, 1993.
- [21] 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.
- [22] T.O. Seppa, "Accurate ampacity determination: temperature-sag model for operational real time ratings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No.: 3, pp.1460-1470, 1995.
- [23] J.S. Engelhardt, and S.P. Basu, "Design, installation and field experience with an overhead transmission dynamic line rating system", IEEE 1996.
- [24] 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.

◇ 저 자 소개 ◇



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 Kansas State University 객원교수, 현재 한밭대학교 전기·전자공학부 교수.



강지원(姜地原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1992년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.



심재명(沈在明)

1951년 11월 13일 생. 1976년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1979년 명지대학교 대학원 졸업(석사), 1992년 명지대학교 대학원 졸업(박사). 현재 한밭대학교 전기·전자공학부 교수.



장태인(張太因)

1968년 12월 5일생. 1990년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1994년 한양대학교 대학원 졸업(석사). 1994년~1995년 (주)삼성SDS 공공개발팀 근무. 현재, 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.



이동일(李東一)

1958년 3월 15일생. 1979년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1983년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 책임연구원.



민병욱(閔丙旭)

1955년 3월 3일생. 1988년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 1994년 한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 송변전처 송전건설팀장.