

송전선로 허용용량의 재평가와 합리적인 선로운영

■ 김진오 / 한양대학교 전기공학과 교수
 ■ 조종만 / 전력거래소 급전기술팀장

서론

송전선로에 혼잡(Congestion)이 발생하면 선로에 제약이 걸린 발전비용이 낮은 발전기가 전력을 생산하지 못하고, 혼잡이 없는 선로의 비싼 발전기를 운전하여야 한다. 이러한 송전 계통의 혼잡을 판단하는 기준으로서 송전선로의 열적용량이 중요한 요소가 되며, 따라서 정확한 용량 산정은 경제 급전 (Economic Dispatch)을 위한 전제 조건이 된다. 현재 우리나라의 가공송전선의 열용량은 허용전류 한계치를 최악의 기상조건에서 규정한 정적송전용량(Static Line Rating : SLR)을 연중 단일한 값으로 적용하고 있으며, 이는 대부분 시간 동안 실제 용량보다 낮게 평가되는 결과를 초래한다. 송전설비의 실제 기상상황을 고려하여 최적의 설비 용량한계를 결정하고 이에 따라 계통을 안정적이고 경제적으로 운영할 수 있도록 하는 연구는 매우 중요한 당면과제라 할 수 있다.

양방향 전력거래 시장을 도입하여 운영 중인 전력 선진국의 경우, SLR의 비경제성을 극복하고자, 주변여건에 따라 열용량을 신축성 있게 운영하는 동적 송전용량(Dynamic Line Rating : DLR)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 선로 주변의 주요 기상요소, 도체의 온도 및 전류 등을 모니터링 한 후 도체의 열용량 한계를 규정하는 열평형 방정식에 적용하는 간접적인 방식에 대한 연구가 보고 되고 있으며, 도체의 열용량은 노

출된 대기상태에 의해 결정되는 열적 특성이므로 근래에는 DLR을 구하는데 있어서 가장 기본이 되는 기상모형을 수립하는데 연구가 집중되고 있다. 또한 미국 뉴저지주와 뉴질랜드에서는 DLR 산정 시스템을 설계하고 설치하여, DLR 사용의 유용성을 입증하는 실용적인 연구결과가 발표되었다. 하지만 국내의 경우 지역별 주요간선에 대해 기상여건을 고려한 DLR 산정에 관한 연구는 미비한 수준이며, 계통운영자에게 이와 같은 정보를 제공할 수 있는 도구 또한 제공되고 있지 않다.

개개 송전선로의 신뢰성을 확보한 허용용량을 주기적으로 산정하고 이를 기준으로 각 선로의 한계치를 설정하여 운영한다면, 현재 포화되어 있는 국내 송전선로에 대한 활용도를 높일 수 있고, 선로 용량한계 설정의 투명성과 공정성 확보를 통해 경제성 있는 전력 계통의 최적 운영과 투자의 적정성을 확보할 수 있을 것이다. 또한 이는 향후 직거래 고객에 적용될 송전망 이용료 산정의 객관성과 공정성에 대한 기준을 제시하는데 기반 연구로서 활용이 가능하다.

이에 본 기고문에서는 계통운영자에게 미리 정해진 정적송전용량(SLR)이 아닌 계통의 현 상황에 따른 동적송전용량(DLR)의 의미를 논의하고, 과거 기상데이터를 이용하여 통계학적 분석을 통해 국내 계통상황을 고려한 예측용량(Forecasted DLR)을 추정함으로써 합리적인 선로 운영을 재고해 본다.

열평형 방정식과 송전 용량

가공 송전선로의 전류와 온도의 관계는 IEEE STD.748에서 열평형 방정식으로 정의하고 있다. 선로의 온도는 선로의 재질, 지름, 표면상태 외에 주위 기상상태, 선로에 흐르는 전류의 영향을 받는다. 이 중 선로의 재질과 지름은 선종에 따라 단일 값으로 정해지며, 표면 상태나 기상상태, 전류는 시간에 따라 변한다.

그림 1에 표현한 바와 같이, Joule 열(q_j)과 대류냉각(q_c), 방사냉각(q_r)은 선로온도(θ)에 대한 함수이며, 선로전류(I)는 Joule 열에 영향을 미친다.

이 열평형방정식은 선로온도의 산정을 통해, 허용 열용량 즉 정적 송전용량 (Static Line Rating :SLR) 및 동적 송전용량 (Dynamic Line Rating :DLR)의 계산에 활용한다.

열평형 방정식을 이용하여 송전용량을 산출하기 위해서는 변수로 활용되는 기상조건 외에 해당 선로마다 단일 값을 갖는 선로 파라미터와 모선정보가 필요하다. 각종 파라미터의 상세한 계산방법은 IEEE STD.748에서 제공하므로 본 기고문에서는 구체적으로 상술하지 않는다. 다음 그림은 열평형 방정식을 이용하여 송전용량 계산하는 흐름도이다.

1. 정적 송전용량 (SLR)

SLR은 선로가 설치된 지역의 연간 최고 기온, 최저 풍속 등을 가정하고 태양열이 최고인 여름철의 기상 데이터를 토대로 설계되며, 국내의 각국에서는 연중 단일 정격 SLR을 산정하기 위한 기상조건 및 각종 파라미터를 그림 3과 같이 규정하고 있다.

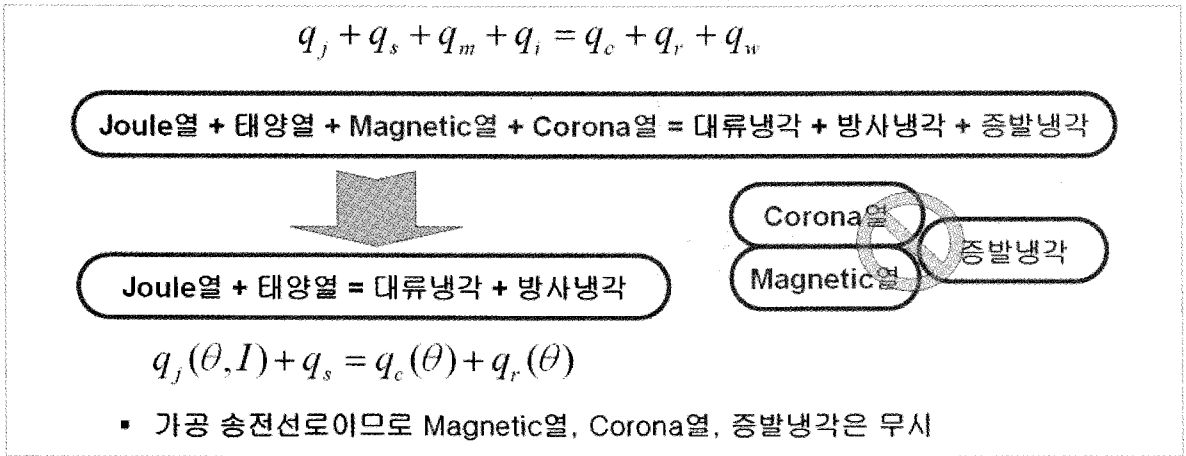


그림 1 가공 송전선로의 정상상태 열평형 방정식

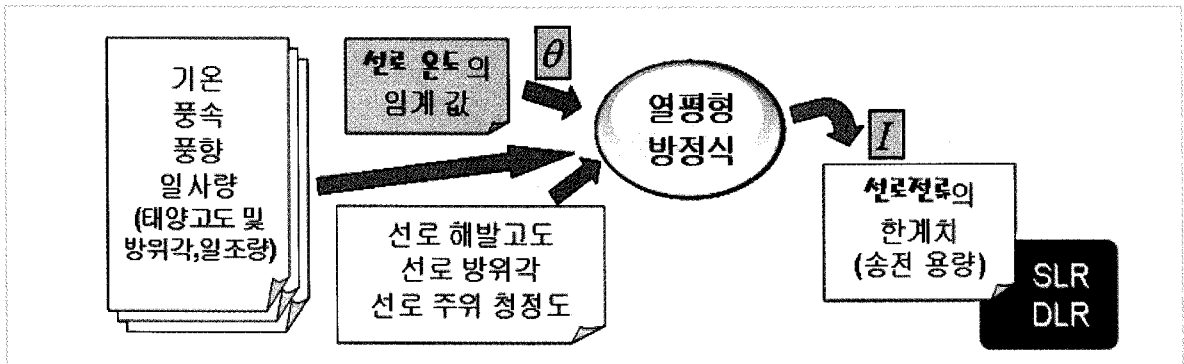


그림2 송전용량의 계산 과정

- 각국의 SLR 계산을 위한 기상조건 규정
- JCS, IEEE, IEC, CIGRE 등의 상이한 규정
 - 일률적 규정 / 지역적인 차를 고려한 규정

기상 조건 및 파라미터					
최고기온 [°C]	40	40	40	40	20
풍속 [m/sec]	0.5	0.5	0.62	0.5	1.0
풍향각 [°]	90	45	45	45	-
일사량 [W/m²]	-	1000	1020	980	900
해발고도 [m]	500	0	지역별	지역별	-
방사 및 흡수계수	0.5	0.9	0.5	0.5	0.5/0.6
선로 방위각 [°]	90	90	지역별	지역별	-
위도 [°]	35	36	지역별	지역별	-
연일수 [일]	161	161	161	지역별	-
태양시간 [시]	13	12	지역별	지역별	-
대기상태	청정	공해	지역별	지역별	-
허용온도 (ACSR의 경우)	90	90	90	90	90

그림 3 SLR 계산을 위한 기상조건 및 파라미터

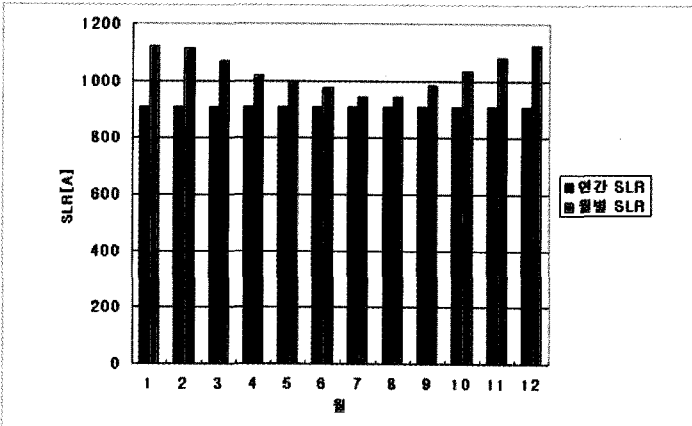


그림 4 송전용량의 비교 (아산 T/L)

현재 연중 단일 SLR을 적용하고 있으나, 과거 기상 이력을 이용하여 매 월마다 최악의 기상조건을 선정하고, 월별 SLR을 새롭게 정의하는 것이 가능하다. 이는 실시간 기상 데이터 습득이 어려운 경우 DLR의 대안으로서 사용할 수 있다.

2. 동적 송전용량 (DLR)

SLR은 최악의 기상조건에서 전달 수 있는 선로의 허용온도로부터 계산된 것으로 이러한 기상조건이 실제 가공 송전선로에 나타날 확률은 희박하다. 따라서 SLR을 전제로 운영되는 선로는 실제 열 정격에 의한 송전 용량보다 항상 작은 부하에서 운영된다. 송전용량을 증대시키기 위해서는 먼저 현재 선로가 수용할 수 있

는 용량을 정확하게 평가할 필요가 있다. 그 중 한 방안이 DLR을 채용하는 방식이다. DLR은 SLR에 대한 상대적인 개념으로, 모니터링 되고 있는 현재 측정 데이터들로부터 실시간으로 산출되는 것으로 선로의 연속 허용온도에 도달할 수 있는 최대 정상상태 전류를 의미한다. 연속허용온도가 SLR과 DLR 모두에서 일정할지라도 각 시간대별로 기상 상황이 다르기 때문에 동일한 허용온도에 도달하도록 하는 전류 값은 각각 다르게 계산된다. 실제로 선로가 설치된 지역의 기온이나 일사량 등은 SLR을 결정할 때 사용하는 기상조건 규정 값보다 작고 풍속은 일반적으로 큰 값이므로 그림 1을 통해 계산된 DLR은 일반적으로 SLR보다 큰 값이 된다.

DLR을 사용하면, 현재 선로의 허용 전류를 실시간으로 계산하여 운전자에게 선로의 전력수급에 필요한 정보를 제공함으로써, 선로 운영자는 선로의 이용률을 기존의 방법에 비해 상당히 높일 수 있다. 따라서, 피크 부하의 시기나 비상 상태의 경우 전력수급 조절을 위해 이 DLR 값을 실시간 감시의 기준으로 활용할 수 있다.

3. 송전용량의 비교

앞서 언급한 송전용량들의 계산 결과를 비교하기 위해 아산 T/L(345kV급)에 대한 연간/월별 SLR 및 DLR의 계산결과를 나타내면 그림 4와 같다.

위 결과는 월간 SLR을 사용하면 최악의 기상상황을 가정한 연중 단일 정격에 비해 경제적인 선로 활용이 가능함을 보여준다. 특히 겨울철(11월~2월)의 경우, 단일 정격 917A에 비해 20%이상 전류를 더 허용하여도, 선로의 열적 위험상태에 다르지 않는다는 것을 알 수 있다.

연간/ 월별 SLR 및 DLR의 계절별 비교를 위해서, 겨울철 대표일로 2002년 1월 8일을 선정하고 여름철 대표일로 2002년 8월 8일을 선정하여, 24시간 동안의 실제 DLR을 계산하였다. 그림 5는, 현재 국내계통의 기

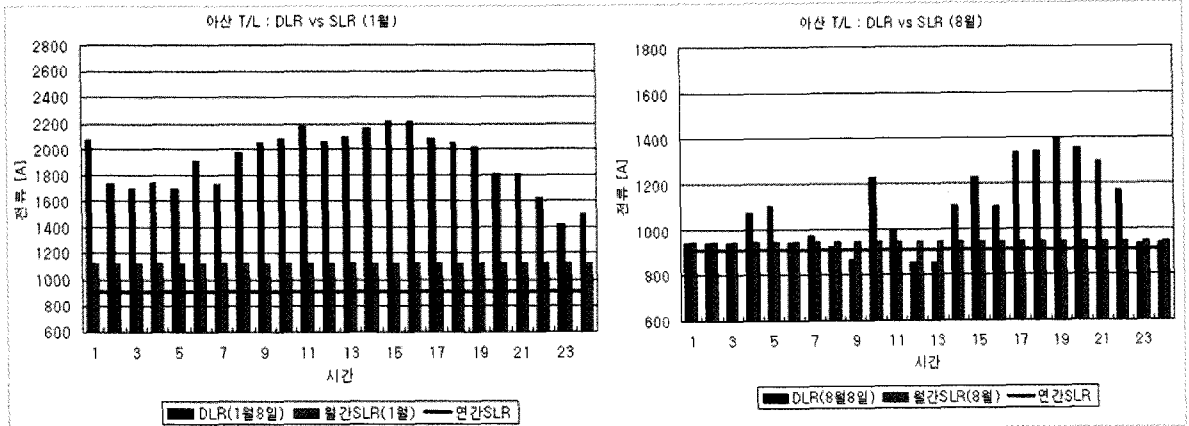


그림 5 송전용량의 비교 II (아산 T/L)

준인 연간 SLR을 기준으로 월별 SLR과 함께 실시간 기상을 고려한 DLR을 비교한 그래프이다.

겨울철 대표일의 경우, 연간 SLR에 비해 월별 SLR이 높아졌으며, DLR은 월별 SLR보다 거의 모든 시간대에서 월등히 높은 값을 보이고 있다. 따라서 송전 용량으로서 DLR을 사용하는 것이 전력 계통운영의 경제성 측면에서 바람직하다.

반면 여름철 대표일의 실적을 비교 분석하면 모든 선로에서 연간 SLR보다 월별 SLR이 약간 높게 나타나고 있지만, 일부 시간대에는 현재 적용하고 있는 연간 SLR이나 월별 SLR보다 DLR이 오히려 낮은 시간대가 존재한다. 이는 현재 사용되는 SLR이 실제 기상 상태를 반영한 DLR보다 높은 값으로 책정됨으로서 부정확한 송전용량 산출로 인해 전력계통의 안정운영을 위협하는 요소로 작용할 수 있다. 따라서 실 계통에 실시간으로 변화하는 기상자료를 이용하여 매시간 변화하는 DLR을 적용하는 것은 전력계통 운영의 경제성뿐만 아니라 안정성 면에서도 유용하다.

예측 동적송전용량 (FDLR)과 합리적인 선로운영

DLR은 현시점의 열용량이므로, 사용의 목적이 '평가'에만 국한된다. 따라서 다음 시간의 DLR 값을 예측할 수 있다면, 선로 운영자가 대응하여 예비동작을 취

하는 시간을 확보해 줌으로써 '운영'의 관점으로 확대하는 것이 가능하다.

1. 송전 용량의 예측

송전용량을 예측하는 기법에 대한 연구는 국내외에서 활발히 연구되어 왔으며, 본 기고문에서는 예측동적송전용량(Forecasted Dynamic Line Rating ; FDLR)을 산정하기 위해 시계열 기상모델을 이용한 열적과부하위험확률 (Thermal Overload Risk Probability ; TORP) 기반 알고리즘을 적용하는 방법을 간략히 소개한다.

FDLR은 다음과 같은 4단계를 수행하여 결정한다.

[Step 1] 현재의 DLR 계산

현재 기상요소를 입력으로 열평형 방적식을 계산하여 현재의 DLR값을 계산한다.

[Step 2] 기상요소의 예측

각 기상요소의 예측모델은 송전용량 예측의 정확성에 직결되므로, 각 요소의 특성에 맞는 통계적 또는 수치적 방법의 선택이 중요하다.

(1) 기온

최근 기상청에서는 그림 6과 같이 3시간 단위로 기상예보를 제공하고 있다. 그 중 기온은 수치 정보로 제

공되며, 실제 기상관측 값과 큰 편차 없이 비교적 정확한 값으로 주어진다. 예보기온과 실측 기온 사이의 상관계수(Correlation Coefficient)는 0.91-0.99로 신뢰도가 매우 높기 때문에 기온의 모델링은 이 예보 기온을 직접 사용할 수 있다.

(2) 풍속

풍속은 DLR의 평가에 가장 큰 영향을 주는 기상요소로서, 특히 저 풍속 영역의 정확한 추정이 중요하다. 그러나 기상청에서 제공하는 기상 예보는 예보풍속을

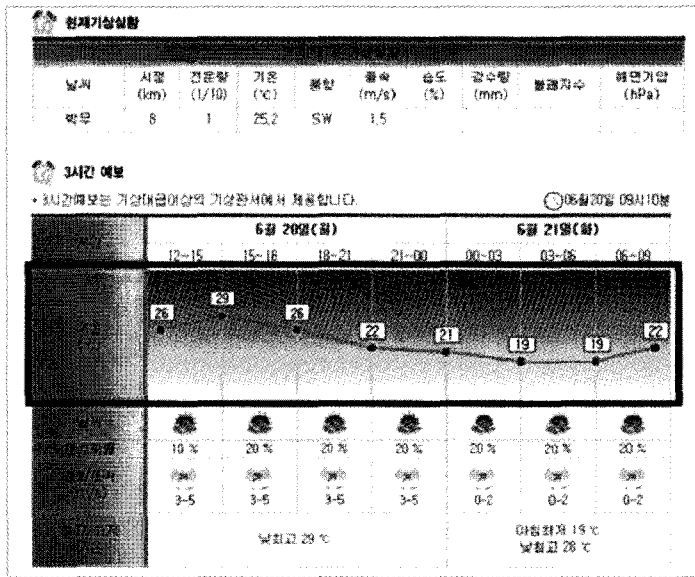


그림 6 대한민국 기상청의 3시간 예보 시스템

단일 값으로 추정하지 않기 때문에 열평형 방정식에 직접 활용하기에 알맞지 않다.

다음은 두 가지 이상의 주기를 갖는 자료에 대한 분석에 일반적으로 이용되는 통계적 기법인 승법 계절 시계열 분석(Multiplicative Seasonal Time Series)을 통한 풍속 예측의 결과이며, 여기에 잔차분석을 이용하여 저풍속 영역에 대한 보상이 추가되었다.

(3) 풍향

풍향은 $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 의 범위를 표현할 수 있는 Von Mises (VM) 분포로 모델링한다. 그림 8은 1차 자동 회귀 베이저안 시계열 분석(First Order Auto-regressive Bayesian Time Series)을 통한 풍향의 예측 결과이다.

(4) 일사량

일사량은 태양의 고도와 방위각에 관한 함수로서, 태양의 맑음의 정도를 나타내는 값인 일조량을 곱하여 계산된다. 상세한 구름 데이터를 확률 통계적인 방법으로 모델링하는 것은 매우 어려우며, 항상 맑은 날씨(일조 = 100%)로 가정한다면, 태양의 고도와 방위각을 계산하는 프로그램을 이용하는 결정론적인 방법으로 일사량을 계산할 수 있다. 그림 9는 이와 같이 계산된 아산 T/L

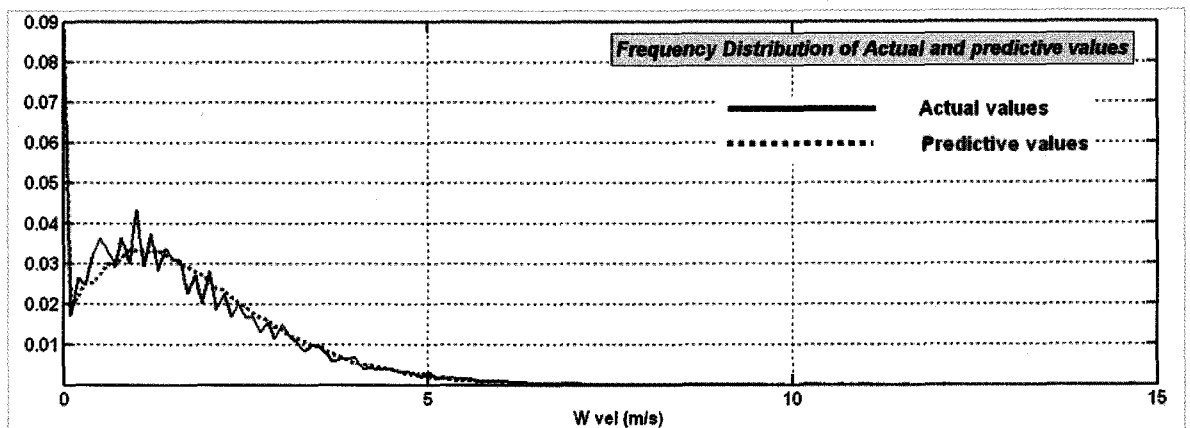


그림 7 풍속의 실측치와 예측치 상대 도수 분포

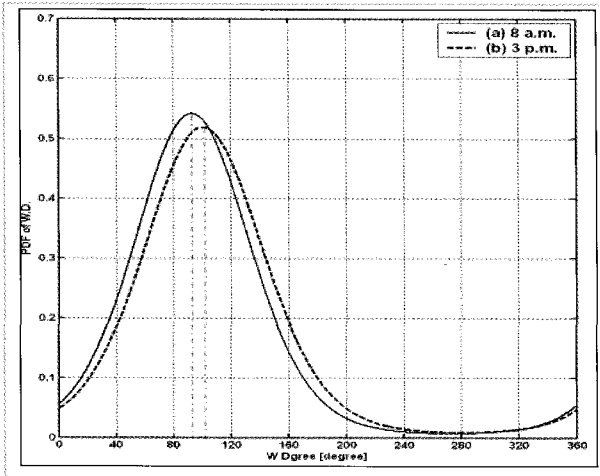


그림 8 풍향의 예측분포

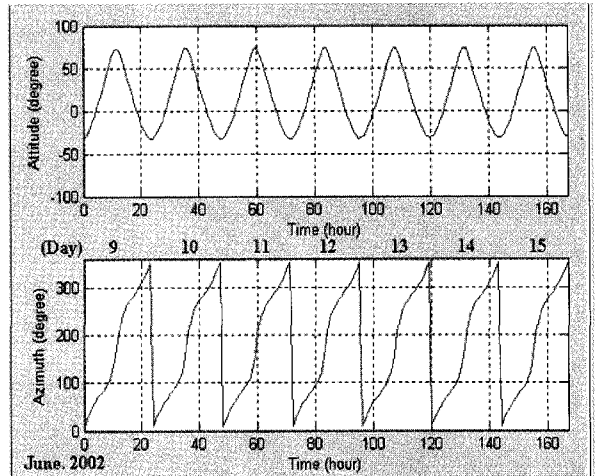


그림 9 천안 기상청의 태양의 고도와 방위각

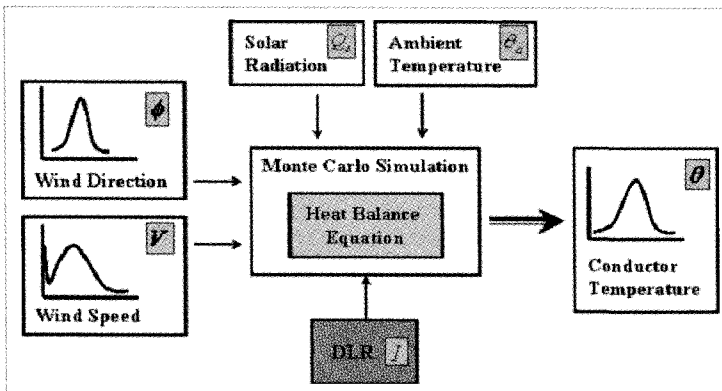


그림 10 MCS를 이용한 선로온도의 예측분포

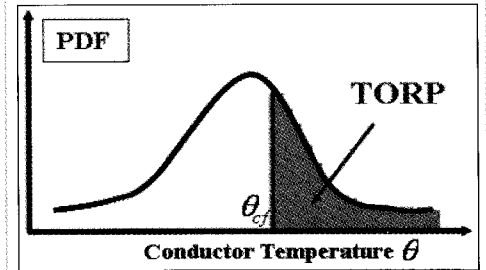


그림 11 TORP의 개념도

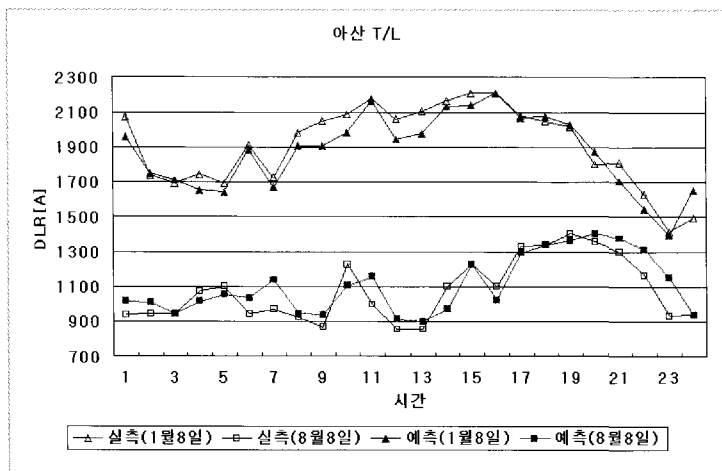


그림 12 FDLR과 그 시점의 실측 DLR (아산 T/L)

의 기상위치인 천안 관측소의 7일간의 태양의 고도와 방위각의 실례이다.

[Step 3] 선로온도의 예측

앞서 구한 현재의 DLR값과 기상예측 모델을 이용하여 몬테카를로 모의 (Monte Carlo Simulation :MCS) 과정을 통해 선로온도의 예측분포를 계산한다.

[Step 4] 선로온도를 통한 FDLR 결정

선로온도의 예측분포로부터 계산된 열적 과부하 위험도 (Thermal Overload Risk Probability: TORP)가 기준 값에 일치하는

전류 값을 FDLR로 결정한다. 그림 11에서 θ_f 는 연속 선로의 허용 온도이며, 국내에서는 ACSR의 경우 90°C로 정하고 있으며, 이는 선로 수명을 고려하여 설계 시 산정된 값이다.

그림 12는 위 과정을 통해 한 시간 후를 예측한 DLR과 실제 DLR의 결과를 비교한 것이다.

2. 합리적인 선로 운영

계통운영자 측면에서는 현재보다는 다음 시간에서의 운영을 미리 계획, 준비하여야 하기 때문에, 현 시점의 실제 DLR보다 다음 시간에서의 DLR 값을 필요로 한다. 예를 들어, 선로 운영의 목표를 N-1 상정사고를 고려하여 50%로 가정하였을 때, 한 시간후 실제 허용 조류량은 FDLR의 50%로 결정된다. 따라서 현 DLR을 기준으로 운영할 경우에는 계통운영자가 원하는 방향과는 다른 계통 상태에 도달하게 되며, FDLR 기준을 이용할 경우에는 DLR 예측 정도에 따라 계통상태가 변하게 된다. 매시간 변하는 DLR은 불가항력적이므로 계통운영자가 간섭할 수 없는 영역이지만, 기상요소에 대한 예측이 정확할수록 계통운영자가 원하는 수준의 계통 상태를 유지할 수 있는 FDLR을 이용한 운영은, 차후 예측기법 등의 발달에 따라 그 유효성을 더욱 보장받을 수 있는 방식이다.

따라서 계통운영자의 입장에서는 FDLR을 산출하고 이를 현재 선로전류와 비교하는 것이 더 정확도를 높일 수 있으므로, 선로 운영 시에는 FDLR은 해당 가공 송전선로가 다음시간의 허용하는 최대 전류의 기준이 되며 이 기준 내에서 계통조류를 변화시켜야만 계통운영의 안정성을 보장받을 수 있다.

결 론

전력시장의 경쟁체제에서는 전력 사용량이 증가함에 따라 새로운 선로를 추가로 건설하기보다는 기존 송전선로의 이용현황에 따라 전류량을 증가시키는 것이 경제적인 관점에서 유용할 수 있다. 그렇지만 계통의 안전을 고려한 과도한 설비사용으로 인한 송전설비 수명 단축을 방지하기 위해서는, 기존 송전선로의 용

량을 정확히 파악하고 어느 수준까지 사용하는 것이 가능한지를 결정하기 위한 기준이 필요하다.

가공 송전선로의 열용량을 계산하기 위한 기존의 SLR을 이용한 기법은 최악의 상황을 가정하는 방식이다. 이에 비해 실시간으로 기상 파라미터를 재평가하여 DLR을 이용하면 정해진 선로의 이용률을 다소 증가시키는 것이 가능하다. 이 때, 월별 SLR을 산정하여, 실시간 기상 데이터 습득이 어려운 경우 DLR의 대안으로서 사용할 수 있다.

본 기고문에서는 SLR의 단점을 개선한 월별 SLR 및 DLR을 계산하고 비교하여 그 유용성을 논하였다. 비교 분석한 결과, DLR을 적용하는 것은 전력계통 운영의 경제성뿐만 아니라 여름철 일부 시간의 경우 안정성 면에서도 유용하다는 것을 알 수 있었다.

또한 선로 용량 '평가'를 위한 용량산정에서 더 나아가 선로 '운영'을 위한 FDLR을 결정하는 방법을 설명하고, 합리적인 선로운영을 위해 FDLR은 해당 가공 송전선로가 다음시간의 허용하는 최대 전류의 기준이 되어야함을 논의하였다.

DLR을 통한 선로 용량의 재 평가는 신뢰성 있는 전력거래의 전제 조건이며, FDLR의 산정은 합리적인 송전선로 운영의 기준으로서 크게 이바지할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 기획시리즈는 산업자원부 지정 '전력신뢰도/품질 연구센터'에서의 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다. 본 센터에는 경상대, 서울대, 숭실대, 전북대, 한양대의 교수들과 대학원생들이 연구원으로 참여하고 있습니다.

참고문헌

- [1] A. Chakrabarti and A.K. Mukhopadhyay "Operating problems in longitudinal power supply systems", TENCON '89. Fourth IEEE Region 10 International Conference, Vol. 22-24, pp. 932-935, 1989.
- [2] 송전설계기준 제개정 및 보완연구(최종보고서),

- 한전 전력연구원, pp.207, 2001.5.
- [3] D.A. Douglass and A.A Edris "Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1407-1418, 1996.
- [4] T.O. Seppa, "Increasing transmission capacity by real time monitoring", 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, pp. 1208-1211, 2002.
- [5] "IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors", IEEE Std 738, 1993.
- [6] N.P. Schnidt "Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 14, No. 4, pp1555-1559, 1999.
- [7] ACSR 전선수명 예측시스템 개발, 한전 전력연구원, pp.18, 2000.1.
- [8] 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.
- [9] J.S Engelhardt, S.P Babu, "Design, Installation, and Field Experience with an Overhead Transmission DLR System", Transmission and Distribution Conference, 15-20 Sept. 1996 pp. 366 - 370
- [10] J. K. Raniga, R. K. Rayudu, "Dynamic Rating of Transmission Lines - A New Zealand Experience", Power Engineering Society Winter Meeting, 23-27 Jan. 2000, IEEE Vol. 4, pp. 2403 - 2409
- [11] J.F.Hall and A.K.Deb, "Prediction of overhead transmission line ampacity by stochastic and deterministic models", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No.2, pp.789-800, 1988.
- [12] D. Douglass, "Wind Speed for Line Ratings Variation with Time, Sheltering & Instrumentation", IEEE PES Meeting, Denver, June 8, 2004.
- [13] N. I. Fisher, Statistical Analysis of Circular Data, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press. 1993.
- [14] Jun Zhang, Jian Pu, James D. McCalley, Hal Stern, and William A. Gallus, Jr. "A Bayesian Approach for Short-Term Transmission Line Thermal Overload Risk Assessment", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, pp. 770-778, 2002.