

시계열 기상모델을 이용한 열적 위험확률 기반 동적 송전용량의 예측

論 文
55A-7-2

Prediction of Dynamic Line Rating Based on Thermal Risk Probability by Time Series Weather Models

金東珉*·裴引洙**·趙鍾萬**·金鎮吾[†]·張京***
(Dong-Min Kim · In-Su Bae · Jong-Man Cho · Jin-O Kim, Kyung Chang)

Abstract - This paper suggests the method that forecasts Dynamic Line Rating (DLR). Thermal Overload Risk Probability (TORP) of the next time is forecasted based on the present weather conditions and DLR value by Monte Carlo Simulation (MCS). To model weather elements of transmission line for MCS process, this paper will propose the use of statistical weather models that time series is applied. Also, through the case study, it is confirmed that the forecasted TORP can be utilized as a criterion that decides DLR of next time. In short, proposed method may be used usefully to keep security and reliability of transmission line by forecasting transmission capacity of the next time.

Key Words : Dynamic Line Rating, Forecast Rating, Thermal Overload Risk, Time Series, Monte Carlo Simulation

1. 서 론

가공 송전선의 송전용량은 선로의 최고 허용온도를 기준으로 얻어지는 최대 허용전류로 정의한다. 이 과정을 위해 IEEE STD.748에서 제공하는 열평형방정식을 활용할 수 있으며, 이 방정식은 몇 가지 기상요소를 입력 값으로 사용한다[1]. 대부분의 전력회사들은 이 허용전류의 한계를 최악의 기상조건에서 규정한 정적 송전용량 (Static Line Rating : SLR)으로 적용해 왔다. 그러나 기상상태를 실시간으로 모니터링해서 용량을 산정하는 동적 송전용량 (Dynamic Line Rating : DLR) 기법을 사용한다면, 기존 선로에 SLR 이상으로 전류를 공급할 수 있다[2]. 다시 말해, DLR은 현재 기상상태에서 송전선이 허용할 수 있는 최대 전류를 의미한다.

DLR 기법은 실용적 측면에서 본 사례 연구들이 이미 세계 각국에서 발표되었다. J.S Engelhardt, S.P Babu는 New Jersey에 실제 적용한 경험을 바탕으로, DLR 시스템의 설계 및 설치에 대해 설명하였다. 또한 SLR과 DLR을 실제 계산하여 비교함으로써, DLR 기법의 유용함을 확인하였다[3]. 비슷한 연구결과로서, J. K. Raniga와 R. K. Rayudu는 New Zealand의 적용사례를 통해 DLR 기법의 유용성을 보였다[4].

DLR 기법을 사용하면, 현재 선로의 허용 전류를 실시간으로 계산하여 운용자에게 선로의 전력수급에 필요한 정보

를 제공함으로써, 선로 운영자는 선로의 이용률을 기존의 방법에 비해 상당히 높일 수 있다. 또한, 피크 부하의 시기나 비상 상태의 경우 전력수급 조절을 위해 이 DLR 값을 실시간 감시의 기준으로 활용할 수 있다. 따라서 여기서 한 단계 발전하여 다음 시간의 DLR 값을 예측할 수 있다면, 선로 운영자가 대응하여 예비동작을 취하는 시간을 확보해 줌으로써 후자의 목적을 좀 더 보완할 수 있을 것이다.

위와 같은 이유로 송전선의 송전용량을 예측하기 위해, J.F.Hall과 A.K.Deb은 선로의 부하능력 및 과거 기상력을 시간 함수로써 모델링한 통계적 수법을 제안하였다[5]. 그러나 예측용량과 실제용량의 편차가 비교적 큰 단점이 있었다. 그 후, W.J. Steeley와 A.K.Deb은 2개 지점에서 측정된 기온 사이의 상관관계를 이용하여 송전용량을 예측하는 기본적인 방법을 제시하였다[6]. 이 연구는 측정지점에서 매 시간마다 기온을 측정하여 용량을 예측하는 방식이다. 순환방정식으로 예측 기온만 모델링하여 용량 계산에 이용하였기 때문에, DLR값에 가장 큰 영향을 미치는 풍속을 최저값으로 선정하는 등 실용상 문제가 있었다. 한편 James D. McCalley와 Jun Zhang은 DLR 계산의 입력변수가 되는 기상요소들을 Bayesian Approach을 통해 예측하였고, 이를 이용해 계산된 열적 과부하 위험확률(Thermal Overload Risk Probability : TORP)은 선로 운영자의 의사결정에 도움을 줄 수 있음을 사례 연구를 통해 확인하였다 [7].

본 논문에서는 과거 연구결과들의 장점을 수용하고, 한국 실정에 맞게 보완한 시계열 기상모델을 제안하였다. 또한 모델링한 예측 기상요소의 분포로부터 몬테카를로 모의(Monte Carlo Simulation : MCS)를 통해 선로온도의 예측 분포를 구하고, 이를 이용하여 DLR 예측을 위한 다음 시간의 TORP를 계산한다. 마지막으로, TORP를 기준으로 다음 시간의 DLR을 결정하는 방법을 설명하고, 사례 연구를 통해 제안한 방법의 유용성에 관하여 서술하였다.

[†] 교신저자, 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 正教授 · 工博
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
* 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 碩士課程
** 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程
*** 正會員 : 檀國大 工大 産業工學科 正教授 · 理博
接受日字 : 2006年 3月 15日
最終完了 : 2006年 6月 13日

2. DLR의 예측

예측 DLR을 구하기 위해, 본 절에서는 열평형방정식에 활용되는 각 기상요소의 예측분포의 모델링 방법을 제안한다. 또한 선로온도의 예측분포를 얻는 방법과, 이를 활용하여 다음 시간의 TORP를 계산하는 과정을 설명하고, 마지막으로 TORP를 기준으로 DLR을 예측하는 방법을 제안한다.

2.1 열평형 방정식의 활용

IEEE STD.748에서 제공하는 열평형 방정식은 다음과 같다[1].

$$I^2 R(\theta) + Q_s = Q_r(\theta, \theta_a) + Q_c(\theta, \theta_a, V) \quad (1)$$

여기서 θ, θ_a, V 는 각각 선로의 온도, 기온, 풍속을 의미하며, Q_s, Q_r, Q_c 는 각각 태양복사의 열 이득, 태양복사의 열 손실, 대류에 의한 열 손실을 나타낸다. 이 방정식은 주로 송전열용량 I 의 산정을 위해 식 (2)과 같이 활용될 수 있다.

$$I = \sqrt{\frac{Q_r(\theta, \theta_a) + Q_c(\theta, \theta_a, V) - Q_s}{R(\theta)}} \quad (2)$$

SLR은 식 (1)의 평형상태에서 최악으로 규정한 기상조건 및 선로의 한계 허용온도를 입력 상수로 결정하여 계산된 열용량이다. 그러나 일반적인 기상조건에서도 이 방정식은 항상 성립하므로, 이 기상요소들을 실시간으로 모니터링하여 입력 변수로 활용한다면, 실시간 DLR을 계산할 수 있다.

마찬가지로, 식 (1)은 결정된 I 와 다른 요소를 입력 변수로 계산하면 그 결과로서 선로온도를 계산할 수 있다.

그렇지만 식 (1)을 θ 에 대해 정리하면 단순한 다항식의 형태가 아니기 때문에, 직접 선로온도를 계산하기는 어려우며, 반복적인 수치해석기법을 적용해야 한다.

2.2 기상요소의 예측 모델

DLR 예측을 위한 첫 단계로, 우선 기상요소들의 예측 모델을 만들어야 한다.

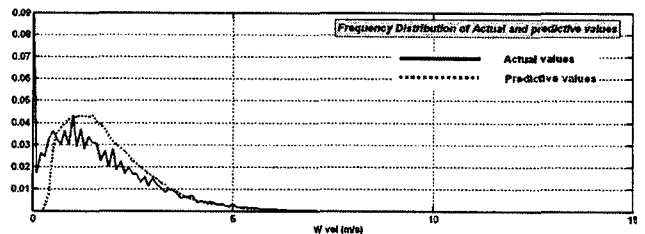
2.2.1 풍속 모델

본 논문은 풍속을 모델링하기 위해서 오차를 보정한 승법 계절 시계열 모델(Multiplicative Seasonal Time Series Model)을 제안한다. 제안된 풍속의 예측 식은 다음과 같다.

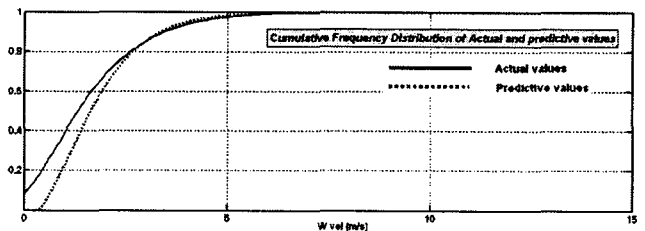
$$\hat{V}_t = (1 - \beta_3 B - \beta_4 B^2) \times (1 - \beta_1 B^{24} - \beta_2 B^{48}) \times V_{t-1} \quad (3)$$

여기서 V_{t-1} 는 현재 시간의 실측치, \hat{V}_t 는 다음 시간의

예측치이며, B 는 후진 연산자(backward operator)이다. 또한 상관 정도를 나타내는 미지의 계수 $\beta_n (n=1, 2, \dots, 4)$ 는 과거의 실측 자료들을 이용하여 결정할 수 있다. 본 논문에서는 천안 지역의 11년간 실측 풍속자료를 이용하여 결정하였다[8].



(a) 실측치와 예측치의 상대 도수 분포



(b) 실측치와 예측치의 누적 상대 도수 분포

그림 1 풍속의 실측치(V_t)와 예측치(\hat{V}_t)의 비교

Fig. 1 Comparison of Actual (V_t) and Predictive(\hat{V}_t) Values of Wind Velocity

그림 1은 기준 시점에서(t) 0.1m/s 단위로 측정된 실측치(V_t)들과 그 이전 시점의(t-1)으로부터 식 (3)을 이용하여 예측한 기준 시점의(t) 예측치(\hat{V}_t)들을 비교한 것이다.

이 결과, 본 논문에서 제안하는 예측 식은 전반적으로 풍속을 정확하게 예측하고 있으나 저 풍속 영역에서는 상대적으로 큰 편차를 보였다. 그러나 저 풍속 영역이 DLR에 상당히 민감한 영향을 주기 때문에 이 부분을 좀 더 정확히 예측할 필요가 있다[9,10].

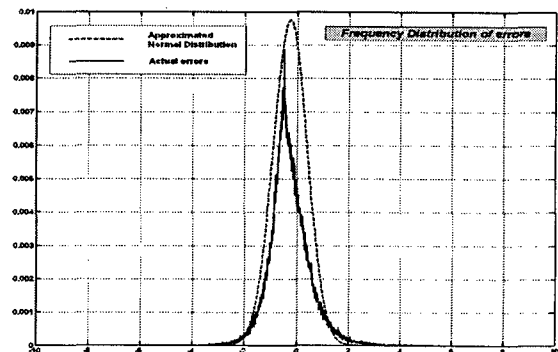


그림 2 실제 오차의 빈도 확률과 근사화한 분포(ε)

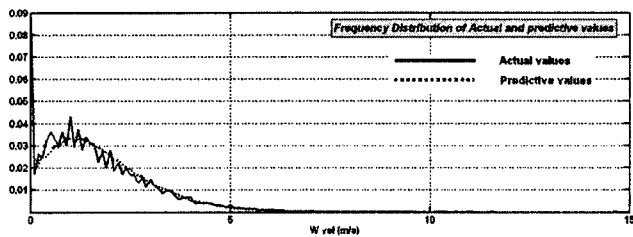
Fig. 2 Frequency Distribution of Actual Error Values and Approximated Distribution (ε)

그림 2는 지난 11년간의 실측치와 예측치(\widehat{V}_t)의 차로 계산한 오차의 값들을 도수 분포로 표현한 그림과 이를 정규 분포로 근사 화한 오차의 분포(ϵ)를 나타낸 것이다.

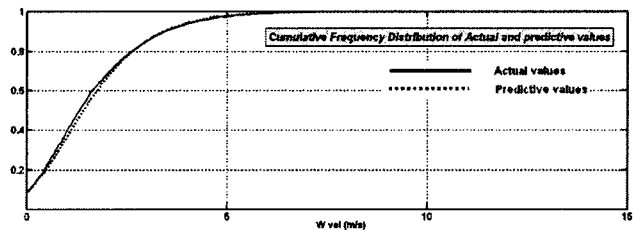
앞서 언급한 바와 같이, 예측 DLR에 큰 영향을 주는 저 풍속 영역을 보다 정확히 모델링하기 위해 풍속의 예측 값을 ϵ 로 보상한다. 따라서 오차가 보상된 풍속의 예측분포 (V_t^*)는 다음과 같이 구해진다.

$$V_t^* = \widehat{V}_t + \epsilon \quad (4)$$

다시 말해, 풍속의 예측분포 V_t^* 는 예측 식에 의해 계산된 값(\widehat{V}_t)을 평균으로 갖고, 오차 분포 ϵ 와 같은 분산을 갖는 새로운 정규 분포로 모델링된다.



(a) 실측치와 예측분포 난수의 상대 도수 분포



(b) 실측치와 예측분포 난수의 누적 상대 도수 분포

그림 3 풍속의 실측치 (V_t)와 예측분포 (V_t^*) 난수의 비교
Fig. 3 Comparison of Actual values (V_t) and Predictive random values (V_t^*) of Wind Velocity

그림 3은 11년간의 실측치와 각 시점의 한 시간 후를 예측한 분포 V_t^* 의 난수를 비교한 것이다. 예측 풍속 중, 음의 값은 모두 0m/s(무풍)로 취하였고, 그 결과 제안한 모델링 방법이 저 풍속 영역을 포함한 실제 풍속 관측치와 거의 근접한 예측을 하고 있음을 확인하였다.

2.2.2 풍향 모델

본 논문에서는 풍향을 예측하기 위해 1차 자동 회귀 Bayesian 시계열 모델을 사용하였다[7].

일반적으로 풍향($0 \leq \phi \leq 2\pi$)은 Von Mises (VM) 분포로 모델링한다[11]. VM분포의 PDF는 다음과 같다.

$$f(\phi) = [2\pi \cdot I_0(\kappa)]^{-1} \cdot \exp[\kappa \cdot \cos(\phi - \mu)] \quad (5)$$

여기서 μ 와 κ 는 각각 VM 분포의 위치 모수, 척도 모수로서, $0 \leq \mu \leq 2\pi$, $0 \leq \kappa \leq \infty$ 의 범위를 갖고, $I_0(\kappa)$ 는 정규화 상수(normalizing constant)이다.

식 (5)에 시계열의 개념을 도입하여, 우도 함수(likelihood function)로 표현하면, 다음과 같다.

$$P(\phi_t | \mu_t, \kappa) = [2\pi \times I_0(\kappa)]^{-1} \cdot \exp[\kappa \cdot \cos(\phi_t - \mu_t)] \quad (6)$$

이제 식 (6)에서, κ 를 상수라 가정하면, μ_t , 즉 Φ_t 의 기대 값은 식 (7)과 같이 그 이전 시간의 관측치 ϕ_{t-1} 의 함수로 표현되는 1차 자동 회귀(auto regression : AR)의 형태로 표현할 수 있다[11].

$$\begin{aligned} \mu_t &= E(\Phi_t) \\ &= 2 \tan^{-1} \left(\alpha_1 \tan \left(\frac{\phi_{t-1}}{2} \right) + \alpha_0 \right) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 회귀식에 의해 새롭게 정의한 모수 $\alpha_0, \alpha_1, \kappa$ 의 사전 분포(prior distribution)는 다음과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} \alpha_0 &\sim Normal(0, 10^4) \\ \alpha_1 &\sim Normal(0, 10^4) \\ \kappa &\sim Gamma(1, 10^{-3}) \end{aligned} \quad (8)$$

이제 식(6)과 식 (8)을 이용하여 다음과 같이 풍향의 사후 분포를 표현한다.

$$\begin{aligned} &P(\alpha_0, \alpha_1, \kappa | \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n) \\ &\propto \prod_{t=2}^n [2\pi I_0(\kappa)]^{-1} \times \exp[\kappa \cos[\phi_t - \mu_t]] \\ &\quad \times \exp(-0.5\alpha_0^2 10^{-4}) \\ &\quad \times \exp(-0.5\alpha_1^2 10^{-4}) \\ &\quad \times \exp(-10^{-3}\kappa) \end{aligned} \quad (9)$$

마지막으로 모수 추정 계산이 용이하도록 식 (9)를 Log 스케일로 변환한 후, Gibbs Sampler를 적용하여, 각 모수 ($\alpha_0, \alpha_1, \kappa$)를 추정한다.

이전 시간의 관측치 ϕ_{t-1} 에 따라 다음시간의 예측분포의 모양을 결정하는 모수 $\alpha_0, \alpha_1, \kappa$ 가 결정되기 때문에, 예측 시점에 따라 다른 분포가 그려짐을 그림 4에서 확인할 수 있다.

그림 4의 (a)는 2002년 6월 9일 오전 7시에 한 시간 후인 8 시의 풍향을 예측하였으며, (b)는 오후 2시에 3 시의 풍향 예측한 결과이다.

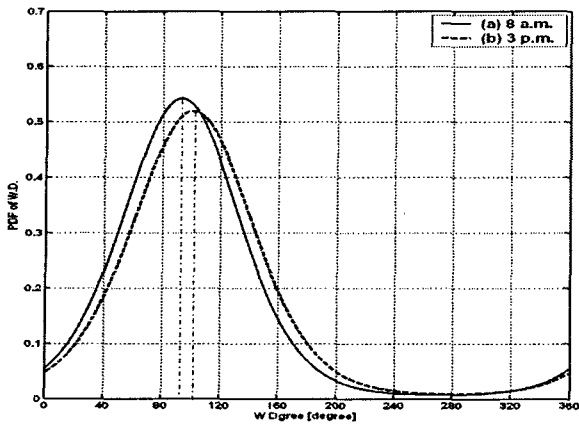


그림 4 천안의 풍속 예측분포의 실례 (2002년 6월 9일)
 (a) $\mu_t = 92.95^\circ, \kappa = 2.17$
 (b) $\mu_t = 100.86^\circ, \kappa = 2.02$

Fig. 4 Examples of Predictive Wind velocity Distribution in Cheonan, Korea, (June 9, 2002)

표 1은 아침(7시) 시간과 낮(2시) 시간의 대표시간을 선정하여, 모델링한 풍향 예측분포의 평균 μ_t 와 그 시점의 실측 풍향을 비교한 것이다. 그 결과 기상청의 풍향 관측 단위(10°)를 고려할 때 실측값과 상당히 가까운 예측임을 보이고 있다.

표 1 실측 풍향과 예측 풍향 분포의 평균의 비교

Table 1 Comparison of Actual and Mean Value of Predictive Distribution

2002년 천안	June 9th		June 12th	
	8시	15시	8시	15시
예측 풍향(μ_t) [°]	92.95	100.86	118.34	184.15
실측 풍향 [°]	90	110	110	180

2.2.3 기온과 일사량 모델

최근 대한민국의 기상청에서는 그림 5와 같이 3시간 단위로 기상예보를 제공하고 있다. 그 중 기온은 수치 정보로 제공되며, 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[12] 기온의 모델링은 이 예보 기온을 직접 사용하였다.

앞서 언급한 바와 같이 일사량 예측 모델은 결정론적인 방법으로 계산하였다. 일사량은 태양의 고도와 방위각에 비례하며, 맑음의 정도를 나타내는 값인 일조량을 곱하여 계산된다[8]. 상세한 구름 데이터를 확률 통계적인 방법으로 모델링하는 것은 매우 어려우며, 다행스럽게도 DLR은 일사량에 아주 민감하지는 않다. 따라서 본 논문은 항상 맑은 날씨로 가정하고(일조 = 100%), 태양의 고도와 방위각을 계산하는 프로그램을 만들어 결정론적인 방법으로 일사량을 계산하였다. 위의 그림 6은 직접 계산한 천안 관측소의 7일간의 태양의 고도와 방위각의 그래프이다.

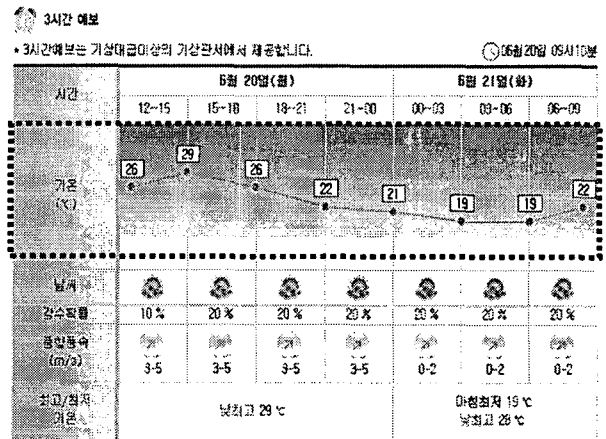


그림 5 대한민국 기상청의 3시간 예보 시스템
 Fig. 5 3-hour Interval Weather Forecast System in Korea

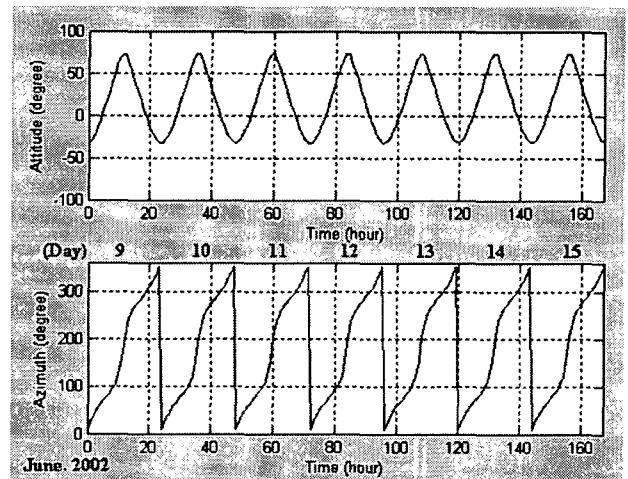


그림 6 천안 기상청의 태양의 고도와 방위각의 변화 (2002년 6월 9일~15일, 위도 36.47도)
 Fig. 6 Variation of Solar Altitude and Azimuth in Cheonan Meteorological Administration. (June 9th~15th, 2002, latitude=36.47 [degree])

2.3 선로온도의 예측분포를 이용한 TORP의 계산

2.3.1 선로온도의 예측분포

앞서 설명한 현재의 기상요소에 의해 계산된 현 시각의 DLR값과 기상 예측 모델을 이용하여 선로온도의 예측분포를 얻는다. 이 예측분포는 열평형 방정식을 MCS를 수행하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는, ϕ 와 V 는 확률 분포를, θ_a, Q_s 그리고 I 는 결정론적인 방법으로 구한 단일 값을 입력 변수로 하여, 그 결과로서 θ 의 확률 분포를 계산하였다.

그림 7은 이 과정을 나타내는 개략도이다. 즉, ϕ 와 V 의 분포 함수와 나머지 입력 변수들(Q_s, θ_a, I)을 이용하여 열평형방정식에 MCS를 적용하면, 선로온도 θ 의 예측분포를 얻을 수 있다.

여기서, 전류 I 에 대해 현재의 DLR값을 적용하여 계산하

였다. 다시 말해, 선로의 예측 온도 분포를 계산하는데, 기상요소들은 모두 예측분포 또는 예측 값이지만 전류 요소만은 현재의 값이다. 이 방법은 현재의 DLR로 선로 정격을 다음 시간까지 유지할 때의 선로의 온도분포를 예측함으로써, 다음시간의 선로의 위험 수준에 대한 정보를 제공한다.

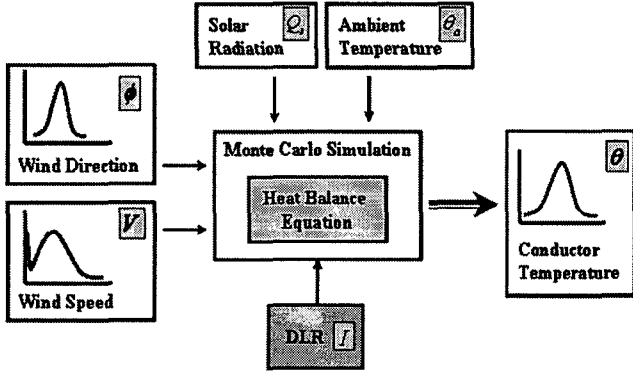


그림 7 MCS를 이용한 선로온도의 예측분포
Fig. 7 Predictive Conductor Temperature Distribution by MCS

따라서 본 논문에서 제안하는 방법은 선로 운영자에게 '현시점의 정격을 기준으로, 다음 시간의 정격을 좀 더 올려서 적용하는 것이 가능한지, 더 내려서 적용해야 할지'를 결정하는 지표로 활용 될 수 있다.

2.3.2 TORP의 계산

설계상에 정해진 선로의 임계 온도를 θ_{cf} 라 하고 앞서 계산된 선로의 온도를 θ 라 하면 선로의 열적 위험 확률 TORP는 다음과 같이 정의할 수 있다[7].

$$TORP = P_r(\theta \geq \theta_{cf}) = \frac{N_f}{N} \quad (10)$$

여기서 N 은 MCS의 총 회수, N_f 는 선로온도가 임계 온도를 넘어선 회수이다. 따라서 선로의 위험 확률 TORP는 $\theta_c \geq \theta_{cf}$ 일 확률로 표현한다. 즉, 다음 시간에 기상요소가 변할 때까지, 현재 DLR을 그대로 유지하면 위험한 정도들이 TORP 값으로 확인할 수 있다.

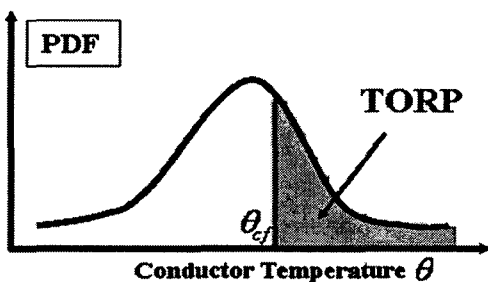


그림 8 TORP의 개념도
Fig. 8 Concept of TORP

그림 8은 선로온도의 예측분포로부터 계산된 TORP의 의미를 보여준다.

2.4 예측 DLR 값의 결정

TORP의 값을 이용하여 DLR을 예측하기 위해서는 정책적으로 또는 운영자의 경험에 의해 임계 TORP의 기준을 결정하여야 한다. 즉 경제성을 고려한다면 선로의 열적 위험 확률(TORP)을 50%까지 허용할 수 있으며, 안정성에 초점을 둔다면, TORP의 기준을 더 낮추어 다음 시간의 허용 전류 값, 즉 예측 DLR 값을 결정하여야 한다.

따라서, 현재 DLR을 기준 전류 값으로, 임계 TORP의 기준에 맞는 전류 값을 찾아 이를 예측 DLR로 결정하는 전 과정을 요약하면 그림 9와 같다.

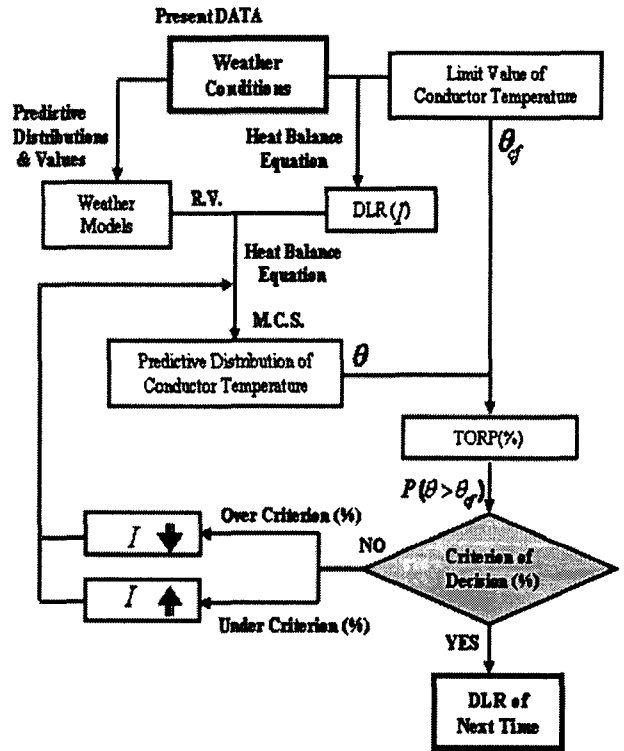


그림 9 다음 시간의 DLR을 예측하는 과정
Fig. 9 Process to Determine Next Time's DLR.

- Step 1. 현재 기상요소를 이용하여 현재의 DLR값을 계산하고 기상요소의 예측 모델을 완성한다.
- Step 2. 앞 단계에서 구한 현재의 DLR값과 기상예측 모델을 이용하여 몬테카를로 모의 (MCS) 과정을 통해 선로온도의 예측분포를 계산한다.
- Step 3. 선로온도의 예측분포로부터 계산된 TORP가 기준 값과 일치한다면 그 값을 예측 DLR로 결정한다.
- Step 4. 결과치가 기준 TORP에 맞지 않다면, MCS 과정에 입력이 되는 I 값 (초기 값 : 현재의 DLR)을 보정하여 Step 2, 3을 반복한다.

3. 사례 연구

본 절에서는 사례 연구를 통해, 제안한 방법의 결과를 비교, 분석하고 그 유용성을 확인할 것이다.

3.1 선로 정보 및 모의 조건

모의 선로는 예산과 아산 간 154kV 선로를 활용하였다. 모의 선로의 정보는 표 2와 같으며, 이는 열평형방정식을 계산하는데 이용된다[1].

표 2 모의 선로의 정보 (예산-아산 TL #2)
Table 2 Information of Overhead Transmission Line for Simulation (From Yesan to Asan TL #2)

항 목	정 보
길이	14.4 km (2회선 가공선로)
선로 방위각	60 도
기상위치	천안 관측소 100 % (위도 36도47분)
선로 높이	해발 24.9 m
선종	ACSR 410 mm ²
설치지형	평지 76 %, 산악 24 %

또한, 예산과 아산 간 송전선로는 천안관측소의 기상조건을 100% 따르므로 입력 데이터는 그림 10과 같이 천안 관측소 DB에서 필요한 요소만을 취하여 사용하였다.

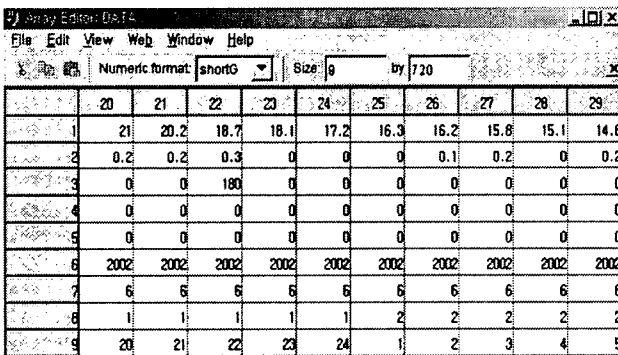


그림 10 천안관측소의 기상데이터 (2002년 6월)
Fig. 10 Weather and Date in Cheonan, Korea

표 4 모의 결과
Table 4 Result of Simulation

예산-아산 TL (천안 기상청, 2002)		June 9th (a)		June 12th (b)		June 12th (c)		June 12th (d)	
		현재	다음 시간	현재	다음 시간	현재	다음 시간	현재	다음 시간
		7 시	8 시	5 시	6 시	7 시	8 시	14 시	15 시
DLR [A]	직접 계산	1018.54	982.67	1471.59	1476.83	1324.96	1313.64	1008.98	1147.97
	제안한 방법		1064.46		1429.75		1318.94		1085.27
TORP [%]		46.3		72.4		66.6		42.3	

마지막으로, 제안하는 알고리즘의 한계 값 및 기준 값 등 모의 조건들은 다음과 같다.

표 3 모의 조건
Table 3 Conditions of Simulation

항 목	정 보
선로의 임계온도 (θ_{cf})	100[°C]
기준 TORP	50 [%]

여기서, 각 항목은 세로 방향으로 기온, 풍속, 풍향, 일사, 일조, 년, 월, 일, 시를 나타내고 있으며, 자료가 부족한 4월과 5월의 일조, 일사의 데이터는 Null 값으로 처리를 한 후 태양의 고도와 방위각으로 직접 계산하여, 입력으로 사용되었다.

3.2 결과 및 분석

표 4의 '직접 계산' 항목은 단일 예측 기상 값을 이용하여 임계 선로온도가 될 때의 전류 값을 예측 DLR값으로 결정하는 기존의 방법이며, 이를 위해 MCS 과정에 이용된 기상 요소의 예측 난수 값들의 평균을(풍속: \hat{V}_t , 풍향: μ_t) 단일 예측 기상 값으로 활용하였다. 또한 '제안한 방법' 항목은 그림 9에서 설명하고 있는 Step 2, 3, 4의 과정을 통해 예측 DLR을 결정하는 방법이다.

본 절에서는 표 4의 결과를 이용하여 다음의 두 가지 관점에서 비교하고 분석한다.

우선 예측 DLR과 실측 DLR을 비교해 보면, 기존의 '직접 계산'한 방법과 TORP 기준을 활용한 '제안한 방법'은 모두 100A 이내의 오차로 DLR을 상당히 정확히 예측하고 있다. 이 결과는 본 논문에서 제안한 기상요소의 예측 모델의 정확성을 보여준다.

또한 '직접 계산' 과 '제안한 방법으로 계산'의 항목을 통해 예측 방법에 따른 실측치와의 차이를 비교해 볼 수 있다. 예측 DLR의 목적이 선로 운영자가 비상사태에 대응하여 예비동작을 취하는 시간을 확보해 주는데 있다는 관점에서, 다음의 두 경우는 본 논문에서 제안하는 TORP 기준 활용 방법이 유용함을 보여준다.

우선, 표 4(a)를 보면, 현 시점의 DLR과(1018.54A) 실제 예측 시점에 DLR을(1064.46A)을 비교해보면, 허용 전류는

상승하여 적용할 수 있음을 보여준다. 제안한 방법은 TORP가 46.3%이므로 50%의 기준을 맞추기 위해, 허용용량을 현시점과 비교하여 높여(1082.99A) 적용하여도 가능함을 판단하지만 직접 계산한 방법은 허용용량을 낮추어(982.67A) 적용해야 할 것으로 잘못 판단하고 있다. 또한 표 4(b)는, 실제 예측시점에 DLR 하락하는 경우로, TORP 기준을 활용하면 허용용량을 줄여야함을 판단하며, 직접 계산하면 허용용량을 늘여도 가능할 것으로 잘못 판단하게 된다.

그림 11은 2002년 6월12일 24시간 동안 모의 선로의 실측 DLR과 두 가지 방법으로 예측한 DLR을 비교한 것이다. 두 가지 방법 모두 비교적 실측 DLR 값과 근사한 값을 따라가고 있으며, 5시와 6시 사이의 표시 부분은 앞서 언급한 표 4(b)의 경우로, 직접 계산한 예측 DLR은 선로 운영자의 의사 결정에 문제를 발생시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

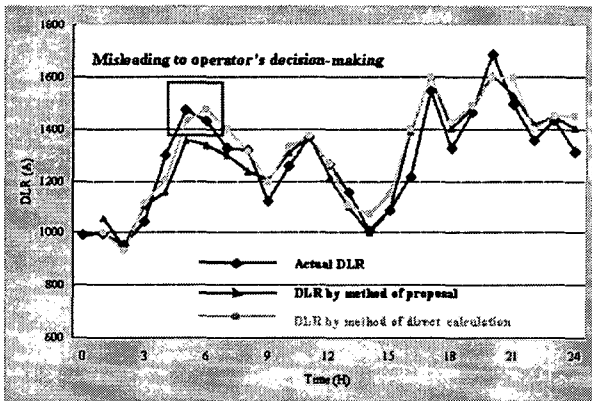


그림 11 선로 운영자의 의사 결정 문제를 발생시키는 실제 (2002년 6월 12일)

Fig. 11 Example of Misleading to operator's decision-making (June 12th, 2002)

4. 결 론

본 논문에서는 DLR을 예측하는 방법을 제안하였다. DLR 예측을 위해, TORP를 산정하는 알고리즘과 이를 위한 선로의 온도를 결정하는 기상 요소의 모델을 제시하였다.

DLR에 가장 큰 영향을 주는 풍향과 풍속은 시계열 통계 모델을 통해 실측치와 상당히 근접한 예측분포를 만들 수 있었으며, 기온과 일사량은 예보 기온과 태양의 고도와 방위각을 활용하여 결정론적인 방법을 적용하였다. 또한, 예측 기상모델을 이용하여 산정한 열적 과부하 위험확률(TORP)은 다음시간의 DLR을 결정하는데 지표로 사용될 수 있음을 사례연구를 통해 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 방법은 다음시간의 송전 용량의 증감을 예측함으로써 송전선로의 안전과 전력 공급의 신뢰도를 유지하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2005년 한국과학재단의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, (R01-2005-000-11214-0) 관계 부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Standard pp.738, 1993.
- [2] 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.
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] W.J. Steeley and A.K. Deb, "Ambient temperature correlated dynamic transmission line ratings at two PG&E location", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No.3, pp. 1234-1242, 1991.
- [7] 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.
- [8] From 1992 to 2002, DB of AWS in Korea Metrological Administration [Online]. Available: <http://www.kma.go.kr/eng/index.jsp>
- [9] T. Seppa, "Closure of the Panel on "Selection of Weather Parameters for Overhead Line Ratings", IEEE PES Meeting, Denver, June 8, 2004.
- [10] D. Douglass, "Wind Speed for Line Ratings Variation with Time, Sheltering & Instrumentation", IEEE PES Meeting, Denver, June 8, 2004.
- [11] N. I. Fisher, Statistical Analysis of Circular Data. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press. 1993.
- [12] 서영경, 김근현, 나득균, "동적선형모형을 이용한 3시간 기온예보 모델의 운영", 2002년 한국 기상학회지 불 학술발표 논문집, 2002.

저 자 소 개



김 동 민 (金 東 珉)

1978년 9월 24일생. 2004년 한양대 전자전기공학부 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 02-2220-0347

E-mail : rlaehdals@ihanyang.ac.kr



배 인 수 (裵 引 洙)

1975년 1월 14일생. 1998년 한양대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2220-0347

E-mail : bis@ihanyang.ac.kr



조 종 만 (趙 鍾 萬)

1959년 7월 27일생. 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1999년 경상대 대학원 전기공학과 졸업. 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 전력거래소 계통운영처 부장.

Tel : 02-3456-6811

E-mail : jongman@kpx.or.kr



김 진 오 (金 鎭 吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업 (공학). 현재 한양대 전기공학과 정교수

Tel : 02-2220-0347

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr



장 경 (張 京)

1955년 9월 25일생. 1978년 서울대 산업공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 산업공학과 졸업. 1990년 Texas A&M Univ. 통계학과 졸업 (이박). 현재 단국대 공학부 산업공학 전공 정교수

Tel : 041-550-3574

E-mail : kchang@dankook.ac.kr