

시계열 기상 모델을 이용한 동적 송전 용량의 예측

김동민\*, 배인수\*, 김진오\*, 장경\*\*  
 \*한양대학교 전기공학과, \*\*단국대학교 산업공학과

Prediction of Dynamic Line Rating by Time Series Weather Models

Dong-Min Kim\*, In-Su Bae\*, Jin-O Kim\*, Kyung Chang\*\*  
 \*Dept. of EE. Hanyang University, \*\*Dept. of IE. Dankook University

**Abstract** - This paper suggests the method that forecast Dynamic Line Rating (DLR). Thermal Overload Risk (TOR) of next time is forecasted based on current weather condition and DLR value by Monte Carlo Simulation (MCS). To model weather element of transmission line for MCS, we will propose the use of weather forecast system and statistical models that time series law is applied. Also, through case study, forecasted TOR probability confirmed can utilize by standard that decide DLR of next time. In short, proposed method may be used usefully to keep safety of transmission line and reliability of supply of electric power by forecasting transmission capacity of next time.

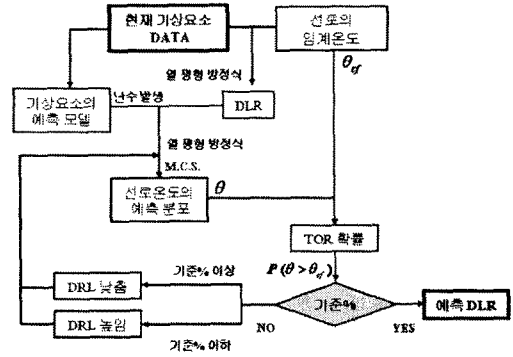


그림1. 예측 DLR Process

1. 서 론

가공 송전선의 송전용량은 도체의 최고 허용온도로부터 얻어지는 최대 허용전류로 정의한다[1]. 대부분의 전력 회사들은 이 허용전류 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. 즉 DLR은 현재 기상상태에서 송전이 허용할 수 있는 최대전류를 의미한다.

DLR을 구하는 것은, 현재 선로의 허용전류를 모니터하여 운전자에게 도체의 전력수급에 대한 정보를 제공함으로써, 첫째 최대한 선로 이용률을 높이고, 둘째 피크 부하의 시기나 비상 상태의 경우 전력공급 조절을 위해 실시간 감시의 기준으로 활용할 수 있다. 따라서 다음 시간의 DLR을 예측할 수 있다면, 선로 운영자가 대응하여 예비동작을 취하는 시간을 확보해 줌으로써 후자의 목적을 좀 더 보완할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 선로 온도 분포의 예측을 위한 기상요소의 모델링 방법을 제안하고, 모델링한 예측 기상요소에서부터 얻어진 다음시간의 열적 과부하 위험(Thermal Overload Risk : TOR)을 기준으로 다음시간의 DLR을 결정하는 방법에 관하여 논의할 것이다.

2. 본 론

본 논문에서 제안하는 예측 DLR의 Process는 그림 1과 같다.

1. 현재 기상요소를 이용하여 DLR값과 기상요소의 예측 모델 완성.
2. 기상요소의 예측 모델로부터 몬테카를로 모의(MCS) 과정으로 선로 온도의 예측 분포 계산.
3. 선로 온도의 예측 분포로부터 계산된 TOR 확률을 기준으로 예측 DLR 결정.

2.1 기상요소의 예측 모델

예측 선로 온도의 분포 계산을 위해 기상 요소들의 예측 모델을 만든다. DLR에 가장 민감하게 영향을 주는 풍속과[2] 그에 곱하여 사용되는 풍향은[1] 시계열 추론법을 이용한 통계적 모델로 이전 관측 치와의 상관관계를 포함 하도록 하여 비교적 정확히 예측할 수 있었다. 또한 기온은 기상예보 시스템을, 일사량은 태양의 고도와 방위각을 활용하여 결정론적으로 계산하였다.

2.1.1 풍향 모델

일반적으로 풍향 모델은 Von Miles 분포로 모델링되며, 본 논문에서는 1차 자동 회귀 Bayesian 시계열 모델을 사용한다.[3]

Von Miles 풍향 모델에 시계열의 개념을 도입하여, 우도 함수(likelihood function)를 구하면, 다음과 같다.

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

여기서  $0 \leq \phi_t \leq 2\pi$ ,  $0 \leq \mu_t \leq \infty$ 이며,  $I_0(k)$ 는 정규화 상수(normalizing constant)이다. 이제  $\kappa$ 를 상수로 가정하면, 위치 모수  $\mu_t$ , 즉  $\phi_t$ 의 기대 값은 그 이전시간의 관측치  $\phi_{t-1}$ 의 함수로 표현되며, 새로운 모수  $\alpha_0, \alpha_1, \kappa$ 는 다음과 같다.

$$E(\phi_t) = \mu_t = g(\alpha_1 g^{-1}(\phi_{t-1}) + \alpha_0) = 2 \tan^{-1} \left( \alpha_1 \tan \left( \frac{\phi_{t-1}}{2} \right) + \alpha_0 \right) \quad (2)$$

$$\alpha_0 \sim Norm(0, 10^4), \alpha_1 \sim Norm(0, 10^4), k \sim Gam(1, 10^{-3})$$

식(2)를 이용하여 사후분포를 유도 함수와 사전분포의 곱으로 표현하고 다음과 같이 각 모수마다 Log 스케일로 변환한다. 이제 식 (3)에 Gibbs Sampler를 적용하여, 각 모수를 추정한다.

$$\log [P(\alpha_0 | \alpha_1, \kappa, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)] \quad (3)$$

$$\propto \sum_{l=2}^n [\kappa \cos [\Phi_l - 2 \tan^{-1}(\alpha_1 \tan \frac{\Phi_{l-1}}{2} + \alpha_0)]] - 0.5 \alpha_0^2 10^{-4}$$

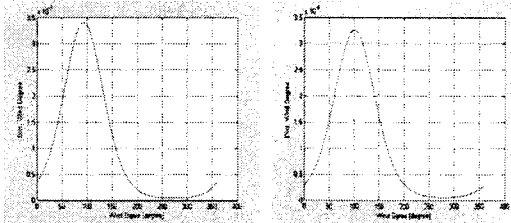
$$\log [P(\alpha_1 | \alpha_0, \kappa, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)]$$

$$\propto \sum_{l=2}^n [\kappa \cos [\Phi_l - 2 \tan^{-1}(\alpha_1 \tan \frac{\Phi_{l-1}}{2} + \alpha_0)]] - 0.5 \alpha_1^2 10^{-4}$$

$$\log [P(\kappa | \alpha_0, \alpha_1, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)]$$

$$\propto \sum_{l=2}^n [\kappa \cos [\Phi_l - 2 \tan^{-1}(\alpha_1 \tan \frac{\Phi_{l-1}}{2} + \alpha_0)]] - n \log(I_0(\kappa)) - \kappa 10^{-3}$$

그림2는 이전시간의 관측치  $\phi_{l-1}$ 에 따라 다음시간의 예측 분포의 모양을 결정하는 모수  $\alpha_0, \alpha_1, \kappa$ 가 결정되므로 시간에 따라 다른 분포가 그려짐을 보이고 있다.



(a) 2002년 6월 9일 오전 7시 (오전 8시의 풍향 예측)  $\mu_t = 92.95^\circ, \kappa = 2.17$   
 (b) 2002년 6월 30일 오후 2시 (오후 3시의 풍향 예측)  $\mu_t = 100.86^\circ, \kappa = 2.02$   
 그림2. 천안 지역 풍향의 예측분포[6]

### 2.1.2 풍속 모델

풍속은 오차를 보상한 승법 계절 시계열 모델(Multiplicative Seasonal Time Series Model)을 제안한다. 풍속의 예측 식은 다음과 같다.

$$\hat{V}_t = (1 - \beta_3 B - \beta_1 B^2) \cdot (1 - \beta_1 B^{24} - \beta_2 B^{48}) V_{t-1} \quad (4)$$

여기서  $B$ 는 후진 연산자(backward operator)이다.

식 (4)에 의해 예측된 풍속 값은 다음과 같이 과거 기상이력을 이용하여 실측값과의 오차를 보상함으로써 분포로 모델링한다.

$$V_t = \hat{V}_t + \epsilon \quad (5)$$

여기서  $\epsilon$ 는 Normal 분포로 근사 화하였다.

그림 3과4는 천안 관측소의 11년간의 실제 풍속 관측치와 본 논문에서 제안한 모델링 방법에 의해 예측한 풍속의 분포를 비교한 것이다.

그림 3은 풍속 예측 값만으로 저 풍속을 정확히 추정하지 못함을 보여주며, Normal 분포로 근사 화한 오차를 보상하여 그림4의 결과를 얻었다. 그림4는 본 논문에서 제안한 오차 보상 승법 시계열 모델은 DLR에 가장 민감하게 영향을 주는 저 풍속 영역을 [2] 상당히 정확히 추정하고 있음을 확인할 수 있다.

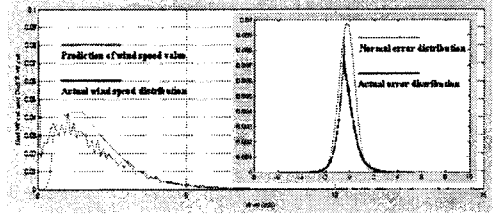


그림3. 예측 풍속 값과 오차의 분포

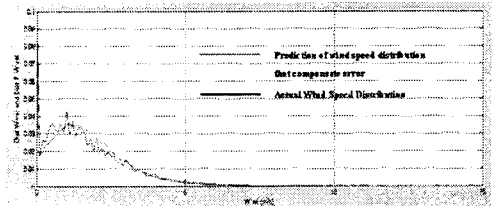


그림4. 천안 지역의 실측 풍속 데이터와 오차를 보상한 예측 풍속 모델의 비교[6]

### 2.1.3 기온과 일사량

현재 기상청에서는 3시간 단위로 기상예보를 제공하고 있다. 그 중 기온은 수치 정보로 제공되며, 실제 기상 관측 값과 큰 편차 없이 비교적 정확한 값으로 주어진다. 예보기온과 실측기온 사이의 상관계수(Correlation Coefficient)는 0.91~0.99로 신뢰도가 매우 높기 때문에 [5] 기온의 모델링은 이 예보기온을 직접 사용하였다.

일사량은 태양의 고도와 방위각에 비례하며, 맑음의 정도를 나타내는 값인 일조량을 곱하여 계산된다. [6] 상세한 구름 데이터를 확률 통계적인 방법으로 모델링하는 것은 매우 어려우며, 다행스럽게도 DLR은 일사량에 아주 민감하지 않다. 따라서 본 논문은 항상 맑은 날씨로 가정하고, 태양의 고도와 방위각을 계산하는 프로그램을 만들어 결정론적인 방법으로 일사량을 계산하였다.

그림5는 프로그램을 이용하여 계산한 천안 관측소의 7 일간의 태양의 고도와 방위각의 그래프이다.

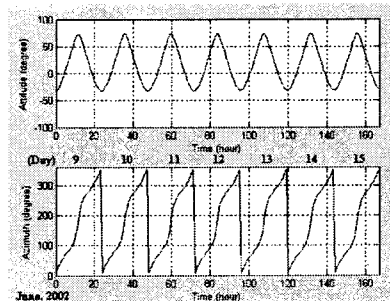


그림5. 천안(위도 36.47도)관측소의 태양의 고도와 방위각[6]

### 2.2 DLR의 예측

앞서 구한 기상 예측 모델과 현재 DLR값을 이용하여 선로의 온도 분포를 얻는다. 선로 온도 예측 분포로부터 TOR 확률을 구하고 이를 기준으로 DLR을 예측한다.

#### 2.2.1 DLR

IEEE STD.748에서 제공하는 송전 열용량 산정을 위한 열평형 방정식은 다음과 같다. [1]

$$I^2R(\theta) + Q_s = Q_r(\theta, \theta_a) + Q_c(\theta, \theta_a, u) \quad (6)$$

여기서  $\theta, \theta_a, u$ 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.

SLR은 식 (6)의 평형상태에서 최악으로 규정한 기상 조건 및 선로의 한계 허용온도를 통해 계산되지만, 일반적인 기상 조건에서도 이 방정식은 항상 성립한다. 따라서 DLR은 식 (6)에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$I = \sqrt{\frac{Q_r(\theta, \theta_a) + Q_c(\theta, \theta_a, u) - Q_s}{R(\theta)}} \quad (7)$$

다시 말해 DLR은 선로 주변의 기상요소 즉, 기온, 풍속, 풍향 및 일사량이 4가지에 주로 의존하므로, 이 기상요소들을 실시간으로 모니터링하여 DLR을 계산하면, 현재 선로의 허용용량을 알 수 있다.

### 2.2.2 선로 온도의 예측 분포

가공 송전선의 온도는 기온, 풍향, 풍속, 태양 복사 이 4가지의 기상요소와 전류에 의존한다[1]. 따라서 다음시점까지 현재의 DLR을 유지할 때 예상되는 선로의 온도는 그림6과 같이 MCS를 이용하여 분포로 나타낼 수 있다.

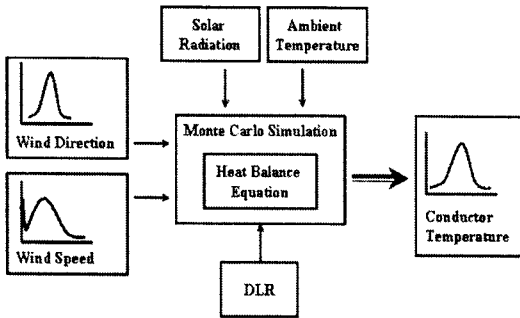


그림6. MCS를 이용하여 선로의 온도 예측 분포

### 2.2.3 TOR 확률 계산을 통한 예측 DLR의 결정

선로의 임계온도를  $\theta_{cf}$ 라 하고 앞서 계산된 선로의 온도를  $\theta_c$ 라 하면 선로의 위험 확률 TOR은 다음과 같이 정의할 수 있다.[3]

$$(8)$$

여기서  $N$ 은 총 모의 회수,  $N_f$ 는 선로온도가 임계온도를 넘어선 회수를 나타내며, 따라서 선로의 위험 확률 TOR은  $\theta_c \geq \theta_{cf}$ 일 확률로 표현한다. 결국, 다음시간에 기상 요소가 변할 때까지, 현재 DLR을 그대로 유지하면 위험한 정도가 이 TOR값으로 계산된다.

정책적으로 또는 운영자의 경험에 의해 임계 TOR의 기준을 정하면, 예측 DLR은, 현재 DLR을 기준으로 더늘려 적용할 수 있을 지, 줄여서 적용해야 할지를 결정하는 지표로 활용될 수 있다.

## 2.3 사례 연구

### 2.3.1 모의 선로

모의 선로로는 예산과 아산 간 154kV 선로를 활용하였다. 모의 선로의 정보는 다음과 같다.

- 길이 14.4 km의 2회선 가공선로
- 선로 방위각 : 60 도
- 기상위치 : 아산
- 천안 관측소 100 % (위도 36도47분)
- 해발 24.9 m
- 선종 : ACSR 410 mm<sup>2</sup>
- 관리처 : 대전전력
- 설치지형 : 평지 76 %, 산악 24 %
- 설치시기 : 1978년 12월

### 2.3.2 결과 [6]

다음은 1000회 MCS의 결과이다.

		2002년 6월 9일		7 시	8 시(실측)
기상 요소	기온[°C]	18	21	20.7	
	풍속 [m/s]	0.4	0.604	0.7	
	풍향 [°]	90	102.16	90	
	일사량	태양 고도 [°]	17.65	29.54	
	태양 방위각 [°]	77.84	86.62		
DLR	MCS 평균값으로 직접계산 [A]	1018.54	802.67	1064.46	
	TOR 활용 (제한한 방법) [A]		1022.96		
TOR확률 (다음시간까지 DLR 유지했을때)					46.3 %

(a)

		2002년 6월 12일		5 시	6 시(실측)
기상 요소	기온[°C]	17.7	17	17.2	
	풍속 [m/s]	1.7	1.567	1.5	
	풍향 [°]	110	118.34	110	
	일사량	태양 고도 [°]	X	6.59	
	태양 방위각 [°]	X	68.91		
DLR	MCS 평균값으로 직접계산 [A]	1471.59	1429.75	1429.75	
	TOR 활용 (제한한 방법) [A]				
TOR확률 (다음시간까지 DLR 유지했을때)					72.4 %

(b)

		2002년 6월 12일		7 시	8 시(실측)
기상 요소	기온[°C]	18.2	20	19.6	
	풍속 [m/s]	1.2	1.229	1.3	
	풍향 [°]	110	184.42	110	
	일사량	태양 고도 [°]	18.08	22.94	
	태양 방위각 [°]	77.16	85.37		
DLR	MCS 평균값으로 직접계산 [A]	1324.96	1318.94	1318.94	
	TOR 활용 (제한한 방법) [A]				
TOR확률 (다음시간까지 DLR 유지했을때)					66.6 %

(c)

		2002년 6월 12일		14시	15시(실측)
기상 요소	기온[°C]	22.6	27	26.8	
	풍속 [m/s]	0.7	0.921	0.7	
	풍향 [°]	90	184.15	180	
	일사량	태양 고도 [°]	64.73	53.77	
	태양 방위각 [°]	236.94	254.32		
DLR	MCS 평균값으로 직접계산 [A]	1008.98	1085.27	1085.27	
	TOR 활용 (제한한 방법) [A]				
TOR확률 (다음시간까지 DLR 유지했을때)					42.3 %

(d)

		2002년 6월 30일		14시	15시(실측)
기상 요소	기온[°C]	26.7	27	27	
	풍속 [m/s]	0.3	0.567	0.4	
	풍향 [°]	90	113.29	90	
	일사량	태양 고도 [°]	65.26	29.54	
	태양 방위각 [°]	238.27	255.41		
DLR	MCS 평균값으로 직접계산 [A]	831.617	874.32	874.32	
	TOR 활용 (제한한 방법) [A]				
TOR확률 (다음시간까지 DLR 유지했을때)					13.3%

(e)

표1. 예측 값과 실제 값의 비교

표1의 풍속과 풍향의 예측 값은 MCS에 이용된 1000개의 난수 평균값을 기입하였으며, 이 평균값으로 계산된 예측 DLR과 TOR 확률 50%를 기준으로 예측한 DLR, 그리고 그 시점의 실측 DLR값을 비교해 보았다.

1. 표 1을 분석해 보면, MCS 평균값으로 계산한 방법과 TOR기준을 활용한 방법은 대부분 100A 이내의 오차로 DLR을 예측하고 있다. 그러나 표1의 (e)와 같은 저풍속의 경우는 DLR값이 너무 민감하게 변화하여 정확한 DLR 값의 예측에는 한계가 있었다.

2. 예측 DLR의 목적이 선로 운영자가 비상상태에 대응하여 예비동작을 취하는 시간을 확보해 주는데 있다는 관점에서, 다음 두 CASE는 본 논문에서 제안하는 TOR 기준 활용 방법이 유용함을 보여준다.

CASE I. - (a)

실제 예측시점에 DLR이 상승 (TOR=46.3%)  
 - TOR기준 활용 ; 허용용량을 늘려야함을 판단  
 MCS 평균값으로 계산 ; 줄여야할 것으로 잘못 판단

CASE II. -(b)

실제 예측시점에 DLR 하락 (TOR=72.4%)  
 - TOR기준 활용 ; 허용용량을 줄여야함을 판단  
 MCS 평균값으로 계산 ; 늘려야할 것으로 잘못 판단

그림6은 2002년 6월12일 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 위 Case II.의 경우로, MCS 평균값으로 계산한 예측 DLR은 선로 운영자의 의사 결정에 문제가 있음을 확인할 수 있었다.

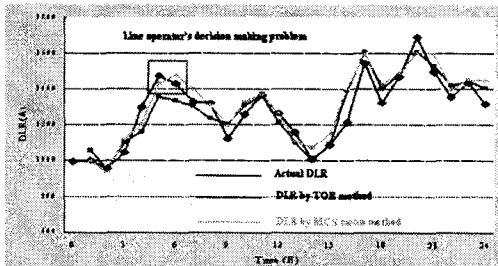


그림6. 실측 DLR과 예측 DLR의 비교 (2002년 6월 12일)

3. 결 론

본 논문에서는 다음시간의 열적 과부하 위험(TOR) 확률을 기준으로 DLR을 예측하는 방법을 제안하였다. 또한 TOR 확률을 정의하기 위해 선로의 온도를 결정하는 기상요소의 모델을 제시하였다. 이들 중 DLR에 큰 영향을 주는 풍향과 풍속은 시계열 통계 모델을 통해 실측치와 상당히 근접한 예측 분포를 만들 수 있었고, 기온과 일사량은 예보 기온과 태양의 고도와 방위각을 활용하여 결정론적인 방법을 적용하였다. 마지막으로 모의선로 사례연구를 통해, 제시한 방법의 유용성을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 다음시간의 송전용량의 증감 예측함으로써 송전선로의 안전과 전력 공급의 신뢰도를 유지하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(R01-2005-000-11214-0).

[참 고 문 헌]

[1] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Standard P738 1993.  
 [2] D.Douglass, "Wind Speed for Line Ratings Variation with Time, Sheltering & Instrumentation", IEEE PES Meeting, Denver June 8, 2004.  
 [3] Jun Zhang, Jian Pu, McCalley J.D., Stern H. and Gallus W.A. Jr. "A Bayesian approach for short-term transmission line thermal overload risk assessment", Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 17, Issue 3, P 770-778, July 2002.  
 [4] N. Fisher, "Statistical Analysis of Circular Data." Cambridge, U.K. Cambridge Univ. Press, 1993.  
 [5] 서영경, 김근현, 나득관, "동적선형모형을 이용한 3시간 기온예보 모델의 운영", 2002년 한국 기상학회지 불 학술발표논문집, 2002.  
 [6] 1992년~2002년 기상관측소 및 AWS 기상관측 DB 자료