

## 수요예측의 오차를 고려한 신뢰도 지수 산정에 관한 연구

송길영 김용하 차준 오광해  
고려대학교 전기공학과

### A STUDY ON THE GENERATING SYSTEM RELIABILITY INDEX EVALUATION WITH CONSIDERING THE LOAD FORECASTING UNCERTAINTY

K.Y. SONG Y.H. KIM J.M. CHA K.H. OH  
Department of Electrical Engineering Korea University

#### ABSTRACT

This paper represents a new method for computing reliability indices by using Large Deviation method which is one of the probabilistic production cost simulations.

The reliability measures are based on the models used for the loads and for the generating unit failure states. In computing these measures it has been tacitly assumed that the values of all parameters in the models are precisely known. In fact, however, some of these values must often be chosen with a considerable degree of uncertainty involved. This is particularly true for the forecast peak loads in the load model, where there is an inherent uncertainty in the method of forecasting, which are frequently based on insufficient statistics. In this paper, the effect of load forecasting uncertainty on the LOLP (Loss of Load Probability), is investigated.

By applying the Large Deviation method to the IEEE Reliability Test System, it is verified that the proposed method is generally very accurate and very fast for computing system reliability indices.

#### 1. 서론

Large Deviation 방법은 1983년 M.Mazumdar 등에 의해 Cumulant법의 정확도를 개선시키기 위하여 제안되었다. (1) Cumulant법은 그 방법 자체가 정규분포를 가정하고 있으므로 이와같은 가정이 성립하기 위해서는 표본(Sample)을 구성하는 자료의 갯수가 충분히 커야한다. 그러나 발전시뮬레이션에 있어서 이와 같은 가정이 충분히 만족되지 못하는 경우도 있으므로 계통의 상태에 따라서는 중앙극한정리(中心極限定理)에 기대지 못하기 때문에 분포의 끝부분에서는 정확히 분포를 표현할 수 없게 되어 부정확한 결과가 얻어지는 경우도 있다. (2) 그러므로 Large Deviation 방법은 분포의 끝부분에서 계산이 이루어지는 경우 분포를 이동시켜 이의 계산을 분포의 중심부분에서 행하도록 함으로써 그 정확도를 개선하고자 한 방법이다.

이제까지의 발전계통의 신뢰도 지수 계산시에는 예측된 부하에 대해서 그 예측의 오차를 고려하지 않고 결정론적으로 신뢰도 지수를 계산하였다. 그러나, 수요예측은 과거의 경험과 자료를 바탕으로 미래의 부하를 예측하는 것이므로 어느 정도의 오차는 부득이하게 발생할 수 밖에 없다.

이러한 수요예측의 불확실성을 고려하여 기존의 공급지장 확률방법에 적용시킨 방법이 제시되어 있기는 하지만 공급지장 확률방법은 발생가능한 사고용량과 그 발생확률을 모두 계산해야 하기 때문에 많은 계산소요시간과 기억용량이 필요하다. (3) 그러므로 본 연구에서는 확률론적인 발전시뮬레이션에 있어서 신뢰도지수 계산에 특히 우수한 방법으로 알려진 Large Deviation 방법으로 부하예측의 불확실성을 고려하여 확률론적 공급신뢰도지수를 구할 수 있는 새로운 방법을 제시하고 이를 IEEE 신뢰도 시험 계통(IEEE-RTS)에 적용하여 종래의 사고용량 누적확률법과 비교함으로써 그 결과의 유용성을 검증하였다.

#### 2. Large Deviation 방법의 정식화(4)

##### ① 부하의 표현

계통부하 L의 평균이  $\mu$ 이고, 평균으로부터 부하의 편차를 Y라 하면  $L = \mu + Y$ 이며 이때 계통부하 L이 평균  $\mu$ 와 분산  $\sigma^2$ 을 갖는 정규분포라고 가정하면 Y의 Moment 발생함수(Moment Generating Function)는 식(2.1)로 정의된다.

$$Y^*(t) = e^{t^2\sigma^2/2} \quad (2.1)$$

##### ② 발전기의 표현

발전기의 운전모형을 2계상태로 모델링한 경우 발전기 사고용량확률분포의 Moment 발생함수는 식(2.2)이다.

$$g_i^*(t) = e^{c_i t} P_i + (1 - P_i) \quad (2.2)$$

단,  $c_i$  : i번째 발전기의 용량  
 $P_i$  : i번째 발전기의 고장률

##### ③ 등가부하지속곡선의 표현

그러므로 이들을 상승적분한 계통의 등가부하지속곡선을 Edgeworth Expansion으로 근사화시키면 식(2.3)으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_n^*(x) &= Pr \{ x_1 + x_2 + \dots + x_n + Y > z \} \\ &\approx g^*(t) e^{-t^2 T''(t) \cdot (z - T'(t))^2 / 2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y^2/2}}{\sqrt{2\pi}} dy \\ &\quad \cdot \left\{ 1 - t^3 T'''(t) / 6 \right\} + g^*(t) e^{-t^2 T''(t) \cdot (z - T'(t))^2 / 2} \\ &\quad \cdot \left\{ t^2 T''(t) - 1 \right\} / \sqrt{6 \sqrt{2\pi}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\text{단, } (X - \mu)/\sigma = t\sigma^2 + \sum_{i=1}^n \frac{P_i C_i}{P_i + (1-P_i)e^{-tC_i}}$$

$$g^*(t) = e^{t^2\sigma^2/2} \prod_{i=1}^n [ e^{tC_i} P_i + (1-P_i) ]$$

$$T(t) = \ln g^*(t) = \frac{t^2\sigma^2}{2} + \sum_{i=1}^n \ln [ e^{tC_i} P_i + (1-P_i) ]$$

$$T'(t) = t\sigma^2 + \sum_{i=1}^n \frac{P_i C_i}{P_i + (1-P_i)e^{-tC_i}}$$

$$T''(t) = \sigma^2 + \sum_{i=1}^n \frac{P_i C_i^2 (1-P_i) e^{-tC_i}}{[ P_i + (1-P_i)e^{-tC_i} ]^2}$$

$$T'''(t) = \sum_{i=1}^n \frac{C_i^3 P_i (1-P_i) e^{-tC_i} [-P_i + (1-P_i)e^{-tC_i}]}{[ P_i + (1-P_i)e^{-tC_i} ]^3}$$

$$V = \frac{T'''(t)}{[ T''(t) ]^{3/2}}$$

3. 수요예측의 불확실성을 고려한 경우 LOLP 계산 열거리듬

수요예측의 오차를 신뢰도지수 계산에 적용시키기 위해서는 과거의 충분한 데이터로부터 예측의 오차를 나타낼 수 있는 오차의 분포함수를 결정하여야 하는데 일반적으로 이러한 분포는 정규분포를 따르는 것으로 알려져 있다[5]. 그러므로 예측된 부하 L[MW]는 평균이  $\mu$ [MW] 이고, 분산이 수요예측의 오차인 식(3.1)과 같은 확률밀도함수 P(X)를 갖는 정규분포로 표현된다.

$$P(X) = \exp \left( -\frac{(L - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) / \sqrt{2\pi}\sigma \quad (3.1)$$

이와같이 수요예측의 오차를 고려한 경우의 부하모형을 발전시물레이션에 반영하기 위하여 P(X)는 이산화되어야 한다. 여기서 계급의 구간을  $\pm 3\sigma$ 까지 고려하여 확률값을 99.7%의 정확도를 유지하도록 한 경우, P(X)를 7개의 부분으로 이산화시킨 각 부분에 대한 발생확률은 P(X)를 구간별로 적분하여 구할 수 있다. 그림 1은 이의 계산결과를 보인것이다.

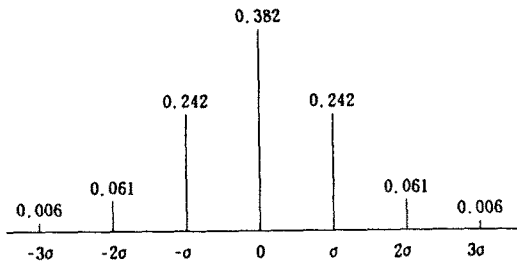


그림 1. 이산화시킨 오차와 그 발생확률

예측부하를 L[MW]로, 부하예측의 불확실성을  $\epsilon$ 라고 한 경우 표준편차  $\sigma$ 는 식(3.2)에 의해 구한다.

$$\sigma = L \times \epsilon / 100 \text{ [MW]} \quad (3.2)$$

그러므로 수요예측의 오차가  $\epsilon$ 인 경우 L[MW] 크기의 부하는 그 크기 및 발생확률이 표 1과 같은 부하로 고려된다.

표 1. 수요예측의 오차가  $\epsilon$ 인 경우 L[MW] 부하의 취급

구간	부하크기	발생확률
1	$L - 3 \cdot 0.01 \cdot \epsilon \cdot L$	0.006
2	$L - 2 \cdot 0.01 \cdot \epsilon \cdot L$	0.061
3	$L - 1 \cdot 0.01 \cdot \epsilon \cdot L$	0.242
4	X	0.382
5	$L + 1 \cdot 0.01 \cdot \epsilon \cdot L$	0.242
6	$L + 2 \cdot 0.01 \cdot \epsilon \cdot L$	0.061
7	$L + 3 \cdot 0.01 \cdot \epsilon \cdot L$	0.006

3.1 사고용량 누적확률방법

수요예측의 오차를 고려한 경우의 LOLP 계산 방법은 R. Billinton 등에 의해 사고용량 누적확률(cumulative probability)법이 제안되었다.[6] 그 방법은 우선 발생가능한 사고용량( $O_k$ )과 그 발생확률( $P_k$ )을 모두 구하고, 그림 2에서처럼 사고용량을 부하지속곡선에 적용시켜 지속시간( $t_k$ )을 구한다.

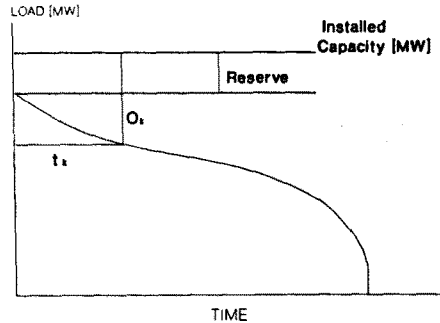


그림 2. 부하지속곡선에서의 사고용량과 지속시간 ( 사고용량 누적확률법 )

LOLP는 식(3.3)에 의해 구한다.

$$LOLP = \sum_{k=1}^n ( P_k \times t_k ) \quad (3.3)$$

- 단,  $O_k$ : 사고용량
- $P_k$ : 사고용량이  $O_k$  일 확률
- $t_k$ : 사고의 지속시간

그러나, 이 방법은 각 부하 단계별로 위의 계산을 반복해야 하기 때문에 정확한 LOLP값을 구할 수 있지만, 엄청난 기억용량과 계산소요시간이 필요하다.[3] 예를 들어 IEEE RTS의 경우 32대의 발전기가 모두 투입된 후의 발생가능한 사고용량의 경우의 수는 0[MW]에서부터 3405[MW]까지 3180개이므로 이들의 각 경우에 대해서 일일이 그 발생확률과 지속시간을 구해 주어야 하기 때문이다.

3.2 Large Deviation법에 의한 신뢰도 산정 방법

실계통에서 부하는 최대부하 하나로 주어지는 것이 아니고 다수개의 부하와 그 지속시간으로 주어지므로 부하지속곡선을  $\mathcal{L}(x)$ 라 한다면 정규분포함수를 도입하여 수요예측의 오차를 고려한 경우의 부하지속곡선을 그림 3과 같이 모델링할 수 있다. 이와 같은 모형에 대하여 다시 이를 그림 4와 같이  $\mathcal{L}(x)-3\sigma$ ,  $\mathcal{L}(x)-2\sigma$ ,  $\mathcal{L}(x)-\sigma$ ,  $\mathcal{L}(x)$ ,  $\mathcal{L}(x)+\sigma$ ,  $\mathcal{L}(x)+2\sigma$ ,  $\mathcal{L}(x)+3\sigma$ 의 7개 부하지속곡선으로 이산화시켜 각각에 대한 LOLP를 구한 뒤 그에 해당하는 발생확률을 곱함으로써 수요예측의 오차를 고려한 경우의 LOLP의 기대치를 식(3.4)에 의해 구할 수 있다.

$$LOLP = \sum_{k=1}^N \{ LOLP(k) \times P(k) \} \quad (3.4)$$

단, LOLP(k) : k번째 계급값으로 부하가 발생할 경우의 LOLP값

P(k) : k번째 계급값의 발생확률

N : 구간의 갯수

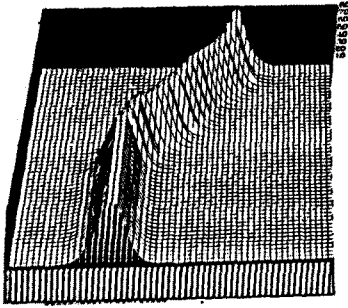


그림 3. 수요예측의 오차를 고려한 경우 부하의 확률 모형

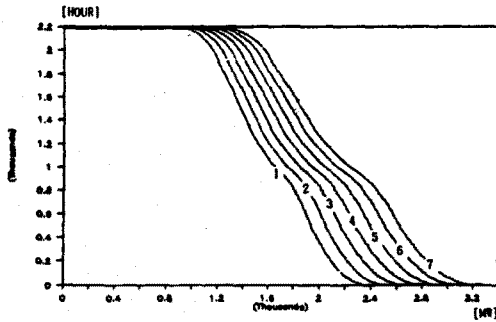


그림 4. 수요예측의 오차를 고려한 경우 이산화된 7개의 부하지속곡선

4. 사례연구

4.1 적용계통

앞 장에서 설명한 수요예측의 불확실성을 고려한 경우의 Large Deviation방법에 의한 신뢰도 지수 산정 방법(L-D법)을 IEEE 신뢰도시험계통(IEEE-RTS)에 적용시켰다. 모델 계통의 특성은 표 2와 같다.

표 2. IEEE-RTS의 특성

발전기		
용량 [MW]	대수	FOR
12	5	0.02
20	4	0.10
50	6	0.01
76	4	0.02
100	3	0.04
155	4	0.04
197	3	0.05
350	1	0.08
400	2	0.12

3405 [MW]      32 대

부하

최소부하 : 1485 [MW]  
 최대부하 : 2850 [MW]  
 지속시간 : 364 [DAY]

4.2 LOLP 계산 결과

우선 L-D법의 정확성 및 신속성을 검증하기 위하여 수요예측의 오차를 고려하지 않은 경우의 LOLP값 및 계산소요시간을 기존의 방법(Billinton의 사고용량 누적확률법)과 비교한 결과를 표 3에 적었다.

표 3. 수요예측의 오차를 고려하지 않은 경우의 LOLP값 및 계산소요시간 비교

	LOLP	계산소요시간
사고용량 누적확률법	0.0038	1.0*
L-D 법	0.0040	0.04

(\* : 계산시간의 기준)

표 3에서의 같이 LOLP값은 사고용량 누적확률법과 L-D법이 거의 같은 정확성을 갖는 반면(약 5% 오차), 계산속도에

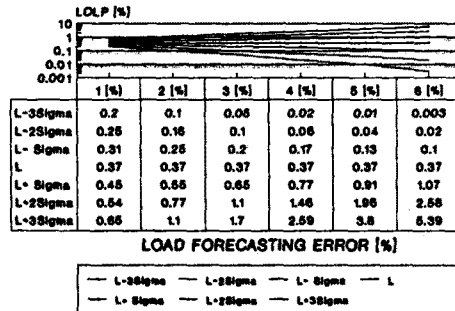


그림 5. 수요예측의 오차를 고려한 경우 각 부하별 LOLP

있어서는 L-D법이 사고용량누적확률법에 비해 약 1/25 정도로 신속함을 알 수 있다. 한편 그림 5는 수요예측의 오차를 1%에서 6%까지 고려한 경우 7개의 부분으로 이산화시킨 각 부분부하에 대한 신뢰도지수값을 보인 것이며 그림 6은 식(3.4)에 의한 LOLP의 계산 결과를 기존의 사고용량누적확률법과 비교한 것이다.

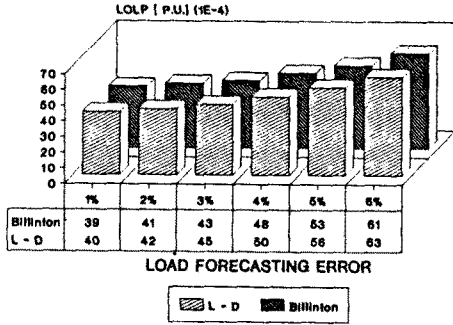


그림 6. 수요예측의 오차를 고려한 경우의 LOLP값의 변화

그림 5 및 그림 6을 보면 수요예측의 오차를 크게 잡을수록 LOLP의 예상치도 함께 증가함을 알 수 있다. 이때 각 구간부하의 LOLP 값은 부하의 크기가 평균치보다 작아지는 구간에서는 예측의 오차가 커질수록 LOLP 값은 작아지며 반면에 부하의 크기가 평균치보다 커지는 구간에서는 예측의 오차가 커질수록 LOLP 값은 커지고 있음을 알 수 있다. 그러나 LOLP 값의 증가량이 감소량보다 크기가 월등히 크므로 전체의 LOLP 값은 증가하게 된다.

사고용량누적확률법과 약간의 차이(약 5 \* 정도)는 발생하지만 L-D법을 이용하여 수요 예측의 오차를 고려한 경우의 LOLP값을 계산하는 것이 계산소요시간과 기억용량면에서 많은 절감을 가져다 줄 수 있다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서 제안한 수요 예측의 오차를 고려한 경우 Large Deviation법에 의한 신뢰도지수 산정방법의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Large Deviation법이 신뢰도지수 산정에 있어서 매우 정확하고 신속한 방법임을 증명하였다.
- (2) 수요 예측의 오차를 고려하여 신뢰도 지수를 산정할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.
- (3) 제안한 방법을 IEEE-RTS에 적용시켜 기존의 사고용량누적확률법의 결과와 비교함으로써 그 정확성과 신속성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] M. Mazumdar ; 'Comparison of Algorithms for Computing Generating-System Reliability Indexes', EPRI EL-2874, Contract TPS 81-822, Feb. 1983.
- [2] J.P. Stremel, N.S. Rau ; " The Cumulant Method of Calculating LOLP", IEEE paper A79 506-7, 1979 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, British Columbia, Canada, 1979.
- [3] R.N. Allan, R. Billinton and N.M.K. Abdel-Gawad ; 'The IEEE Reliability Test Systems-Extensions to and Evaluation of the Generating System', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRs-1, NO. 4, November 1986.
- [4] 송길영, 차준민, 김용하, 오광해 ; '효율적인 Large Deviation 방법에 의한 발전시뮬레이션에 관한 연구', 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.244-246, 1990.
- [5] H.D. Limmer ; 'Determination of Reserve and Interconnection Requirements', AIEE Transactions of the Engineering Institute of Canada, Volume 10, No. C-5, October 1967.
- [6] R. Billinton ; 'Power System Reliability Evaluation', Gordon and Breach, Science Publishers, pp. 92-109.