

풍력발전을 포함한 시스템의 발전량 적정성 평가를 위한 비순차 샘플링 방법

(A Random Sampling Method for Generation Adequacy Assessment Including
Wind-Power)

김광원*

(Gwang Won Kim)

Abstract

This paper presents a novel random sampling method for generation adequacy assessment including wind-power. Although a time sequential sampling has advantages than a random sampling in its assessment results, it takes long assessment time. Therefore, an effective random sampling method for generation adequacy assessment is highly recommended to get specific reliability indices quickly. The proposed method is based on the Monte-Carlo simulation with state sampling and it can be applied to generation adequacy assessment with other intermittent power sources.

Key Words : Wind-Power, Random Sampling, Monte-Carlo Simulation, Generation Adequacy

1. 서 론

전력시스템에서 총 발전가능량은 언제나 총 부하량보다 커야 한다. 어느 시점이라도 발전 가능한 전력이 필요한 전력보다 작게 되면 부하를 차단해야 하므로 정전지역이 발생하게 되어 시스템의 신뢰도가 떨어지게 된다. 발전량 적정성 평가(Generation Adequacy Assessment)는 대상 전력시스템의 총 발전가능량과 총 부하량의 크기를 비교하여 정전확률을 파악하는데 목적이 있으며, 대표적인 신뢰도 지수로는 총 정전 시

간과 관련된 LOLD(Loss of Load Duration)와 정전 빈도와 관련된 LOLF(Loss of Load Frequency)가 있다. 이러한 신뢰도 지수는 전력시스템의 공급신뢰도를 평가하는 주요지표로서 의미가 있다.

발전기의 설비용량이 연간 최대 부하량보다 크더라도 각 발전기는 주기적으로 보수(Maintenance)를 하여야 하며, 또 언제나 고장 날 가능성이 있으므로 어느 순간에는 총 발전가능량이 부하량보다 작아질 수 있다. 따라서 발전량 적정성을 평가하려면 연중 시간대별 부하량 및 각 발전기의 보수계획과 고장율(Forced Outage Rate)을 알아야 하며, 아울러 고장 발생 발전기의 재투입 시점을 결정하려면 수리율(Repair Rate) 정보도 알아야 한다. 한편 원자력이나 화력발전소로 구성된 시스템에서는 각 발전기의 발전량을 일정하게 유지할 수 있는데 비하여, 풍력발전단지를 포함하는

* 주저자 : 울산대학교 전기공학부 교수
Tel : 052-259-2186, Fax : 052-259-1686
E-mail : gwangwon@gmail.com
접수일자 : 2011년 1월 17일
1차심사 : 2011년 1월 20일
심사완료 : 2011년 2월 24일

시스템에서는 풍력발전량이 풍속에 따라서 시시각각 변하므로 총 발전가능량이 시간대 별로 변하여 발전량 적정성 평가가 상대적으로 복잡해진다.

발전량 적정성 평가를 위한 방법은 크게 해석적인 방법과 확률적 모의방법으로 구별할 수 있는데, 발전기가 투입되어 고장이 발생할 때까지의 시간인 TTF (Time To Failure)와 수리가 완료될 때까지의 시간인 TTR(Time To Repair)을 비지수분포(Non-Exponential Distribution)를 포함한 일반적인 확률모형으로 모델링하려면 확률적 모의방법을 사용하여야 한다. 확률적 모의로서 발전량 적정성을 평가하려면 발전가능량과 부하량을 각각의 모형에 맞추어 반복적으로 가정하여야 하는데(샘플링), 샘플링은 크게 시간적으로 연속된 물리량을 가정하는 순차 샘플링(Sequential Sampling)과 시간적 선후관계가 없는 비순차 샘플링(Random Sampling)으로 구별한다.

풍력발전단지를 포함한 시스템에서는 풍력발전량과 부하량이 시시각각 변하므로 순차 샘플링으로 동일 시간대의 풍력발전량과 부하량 샘플을 얻어서 발전량 적정성을 평가하는 순차 모의(Sequential Simulation)에 대한 연구가 많이 진행되어 왔으나[1-4], 모델링 및 모의 방법이 간단하고 계산시간 측면에서도 상대적으로 유리한 비순차 모의에 대한 연구 또한 꾸준히 진행되고 있다[5-6]. 본 논문의 주제인 비순차 모의에서는 풍력발전량과 부하량을 각각의 확률모형에 맞추어 샘플링하여야 하는데, 기존의 연구에서는 풍력발전량 또는 풍속(Wind Speed)과 부하량의 상호 독립적인 확률모형을 구성하여 발전량 적정성을 평가하였다[5-6].

본 논문에서는 비순차 모의를 위한 샘플링에서 풍력발전량과 부하량의 확률모형을 상호 독립적으로 구성하는 기존의 방법에 비하여 과거의 데이터에 잠재해 있는 상호연관성을 반영하여 확률모형을 구성함으로써 보다 우수한 발전량 적정성 평가 결과를 기대할 수 있음을 보이고자 한다.

본 논문은 제안하는 방법을 효과적으로 전달하고자 일반적인 학술 논문과 그 구성을 달리하였다. 즉 본 논문에서는 구체적인 예를 통하여 제안하고자 하는 방법의 절차를 설명하였다. 2절에서는 발전량 적정성을 평가할 시스템에 대하여 설명하였고, 3절에서는 평

가 시스템의 LOLD의 참값을 구하였는데, 과거 5년간의 시간대별 풍속과 부하량을 시간대 별로 모두 비교하여 계산하였다. 즉 3절에서 구한 LOLD가 주어진 데이터로부터 얻을 수 있는 가장 정확한 값이어서 참값이라고 가정하였다. 4절에서는 4가지의 서로 다른 비순차 샘플링 방법으로 대상 시스템의 연간 LOLD를 추정하였는데, 방법1에서는 기존의 연구에서와 같이 풍력발전량과 부하량을 상호독립적으로 결정하였다. 방법2~방법4는 본 논문에서 제시하는 방법이며 풍력발전량과 부하량간의 연관관계를 신뢰도 평가에 반영하였다. 그 중에서 방법4는 풍력발전량과 부하량간의 연관관계를 가장 잘 반영함으로써 가장 바람직한 방법이라 할 수 있다. 이에, 5절에서는 4절에서의 방법4를 근간으로 본 논문에서 제안하는 비순차 샘플링 방법을 체계적으로 정리하였다.

2. 발전량 적정성 평가대상 시스템

발전량 적정성을 평가하려면 발전관련 데이터와 부하관련 데이터가 필요하다. 일반적으로 부하관련 데이터로는 발전량 적정성을 평가하고자 하는 미래 시점의 시간대별 연간 수요예측 결과가 필요하며, 발전관련 데이터로는 평가 시점의 시스템에 연결되어 있는 발전기의 발전량, 고장율 및 수리율 등의 데이터가 필요하다.

본 논문 평가대상 시스템의 부하데이터로는 IEEE RTS(Reliability Test System)의 연간 시간대별 부하 변동패턴을 이용하였는데[7], 본 논문의 목적이 부하량 및 풍력발전량의 샘플링 방법을 제안하는 것이므로, 샘플링 방법외의 요소가 연간 LOLD에 미치는 효과를 최소화하기 위하여 다음과 같이 문제를 간략화하였다.

- 사례시스템에는 설비용량 400[MW]의 기력발전소가 있으며, 기력발전소의 고장은 고려하지 않는다.
- 사례시스템에는 설비용량 100[MW]의 풍력발전단지가 있으며, 풍력발전기의 고장은 고려하지 않는다.

- 풍력발전단지의 풍속은 제주도 고산지역의 2004년부터 2008년까지 5년간의 시간대별 풍속을 가정한다.
- 부하(load)는 IEEE RTS의 시간대별 부하비율을 따르며 최대부하량은 450[MW]이다.
- 선로에서의 유효전력 손실은 고려하지 않는다.

위와 같이 가정하면, (1)을 만족하는 시간대에는 부하량이 발전량을 초과하므로 부하의 손실(Loss of Load)이 발생한다. 다수의 ‘부하량-풍력발전량’ 샘플을 대상으로 (1)의 만족 여부를 가린 후, (2)로써 연간 LOLD를 통계적으로 추정할 수 있다.

$$\text{풍력발전단지 발전량[MW]} + 400\text{[MW]} < \text{부하량[MW]} \quad (1)$$

$$\text{LOLD[hr/year]} = ((1)\text{을 만족하는 샘플 수} \div \text{전체 샘플 수}) \times 8,760 \quad (2)$$

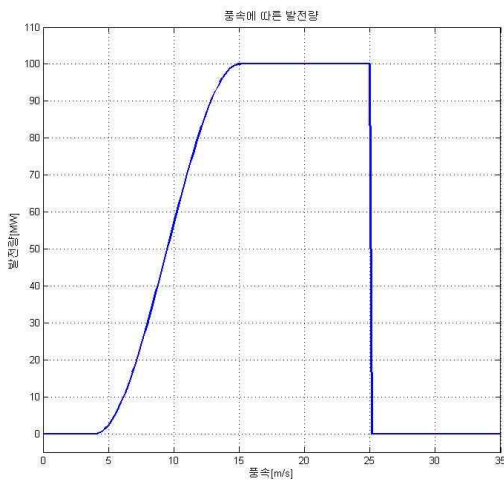


그림 1. 풍속에 따른 발전량 특성 곡선
Fig. 1. Wind-power vs. wind-speed characteristic

한편 풍속자료와 풍력발전기의 풍속-풍력발전량 특성 곡선을 이용하면(그림 1) 풍속에 따른 풍력발전단지의 발전량을 얻을 수 있는데, 기상청에서 구한 제주도 고산지역의 풍속을 분석한 결과, 풍속이 cut-in 속도에 못 미쳐서 발전량이 '0'인 시간대가 다수 존재하

였다. 이에 본 논문에서는 합리적인 풍력발전량을 가정하기 위하여 모든 시간대에서 고산지역의 풍속에 2[m/s]의 풍속을 더하여 시간대별 풍속으로 사용하였다. 한편 cut-in, cut-out, 정격 풍속은 그림 1과 같이 각각 4[m/s], 25[m/s], 15[m/s]로 가정하였다.

한편 IEEE RTS의 부하자료로부터 1년에 해당하는 8,760시간의 부하수준을 얻을 수 있으나 - 실제 IEEE RTS에는 52주 데이터만 있으므로 8,736시간 - 매년 같은 부하패턴을 가정하는 것은 불합리하므로 본 논문에서는 IEEE RTS의 부하수준에 ±5%의 난수를 더하여 5년간의 부하수준을 결정하였다.

3. LOLD 참값 계산

본 절에서는 5년간의 시간대별 부하량과 풍력발전량을 직접 비교하여 LOLD를 계산하였다. 즉 5×365×24=43,800개의 전체 시간대별 데이터(2월 29일 제외)를 대상으로 LOLD를 산출하였으므로 그 결과가 본 사례시스템 연간 LOLD의 참값이고 이를 4절에서 구한 연간 LOLD의 정확성을 가늠하는 기준으로 사용하였다.

(3)으로 계산한 LOLD의 참값은 40.6[hr/year]였다.

$$\text{LOLD} = ((1)\text{을 만족하는 시간대의 수} \div 43,800) \times 8,760 \quad (3)$$

한편 순차 샘플링(Time Sequential Sampling)으로 LOLD를 추정하려면, 상기한 5년간의 과거데이터로부터 부하량과 풍력발전량의 ‘연간 순차모델’을 만든 후, 확률적 모의를 수행하여야 한다. 그러나 본 논문의 연구주제는 효과적인 비순차 모델의 제안이므로, 시간적 순차모델에 대한 비교는 수행하지 않았다.

4. 비순차 샘플링에 의한 LOLD 계산

4절에서는 서로 다른 4가지 방법으로 대상시스템의 발전량 적정성을 평가하였다. 방법1은 풍력발전량과

부하량을 상호독립적으로 결정한 기존 방법에 해당하며, 방법2와 방법3에서는 풍력발전량과 부하량간의 연관관계를 약하게 반영하였고, 방법4에서는 보다 정밀하게 연관관계를 반영하였다. 방법4가 다른 방법에 비하여 좋은 결과를 보일 것임은 예상할 수 있으나, 그 개선 정도가 미미하면 종합적으로는 절차가 간단한 방법2나 방법3이 더 좋은 방법이 될 수도 있다.

4.1 방법1

방법1에서는 확률적으로 가정한 부하수준-풍력발전량 샘플을 (1)에 대입하여 LOLD를 계산하였다. 구체적 설명하면, K-means clustering 알고리즘을 이용하여 5년간의 부하데이터와 풍력발전량데이터를 각각 10개 및 12개의 수준으로 단계화하여(Quantized) 표 1, 2를 얻었고, 다음의 절차에 따라 LOLD를 계산하였다.

- 절차1-1) 표 1의 부하수준 발생확률분포에 따라서 부하수준을 확률적으로 결정
- 절차1-2) 표 2의 풍력발전량 발생확률분포에 따라서 풍력발전량수준을 확률적으로 결정
- 절차1-3) 절차1-1, 절차1-2에서의 부하수준과 풍력발전량수준으로 (1)의 만족 여부 판별
- 절차1-4) 절차1-1~절차1-3을 샘플 수만큼 반복수행 후, (2)로써 LOLD 계산

샘플링에 의한 확률적 모의로는 근사값만을 얻을 수 있으며 모의할 때마다 각기 다른 결과를 얻는다. 또한 샘플의 수가 충분하지 않으면 결과의 신뢰도가 낮아진다. 본 방법1에서는 해가 충분히 수렴하도록, 서로 다른 1,000,000개의 샘플로 3회 반복 모의하여 LOLD의 근사값 58.8[hr/year]를 얻었다. 이를 3절에서 구한 참값과 비교하면 오차가 약 45[%]로써 매우 크다.

이에 단계화 개수(Quantized Level)가 부족하여 큰 오차가 발생했는지 알아보려고 부하데이터와 풍력발전량데이터를 각각 20개 및 24개의 수준으로 늘려서 동일한 절차를 수행하였다. 결과를 보면 LOLD가 65.6[hr/year]로서 오차가 오히려 증가하여 단계화의

개수가 부족하여 큰 오차가 발생한 것은 아님을 알 수 있다.

표 1. 방법1에서 단계화된 부하수준
Table 1. Quantized load level in Method1

| 단계 | 부하수준[MW] | 발생확률[%] |
|----|----------|---------|
| 1 | 406.58 | 3.6 |
| 2 | 373.8 | 7.7 |
| 3 | 346.9 | 9.7 |
| 4 | 320.8 | 10.4 |
| 5 | 296.5 | 12.3 |
| 6 | 273.7 | 12.6 |
| 7 | 249.1 | 11.7 |
| 8 | 225.5 | 14.1 |
| 9 | 202.0 | 11.4 |
| 10 | 176.2 | 6.6 |

표 2. 방법1에서 단계화된 풍력발전량 수준
Table 2. Quantized wind power level in Method1

| 단계 | 풍력발전량수준[MW] | 발생확률[%] |
|----|-------------|---------|
| 1 | 98.7 | 17.4 |
| 2 | 81.4 | 6.6 |
| 3 | 65.8 | 6.6 |
| 4 | 53.2 | 5.6 |
| 5 | 43.1 | 5.9 |
| 6 | 35.1 | 4.6 |
| 7 | 29.4 | 3.9 |
| 8 | 24.5 | 4.4 |
| 9 | 19.3 | 6.0 |
| 10 | 13.2 | 9.2 |
| 11 | 6.6 | 11.2 |
| 12 | 0.8 | 18.6 |

한편 본 사례와 같은 문제는 확률적 모의없이 단순한 계산만으로도 LOLD를 해석적으로 구할 수 있다. 즉 본 사례에서는 400[MW]의 고장이 없는 기력발전을

가정하였으므로, 표 1에서 부하수준이 406.58[MW]이고 표 2에서 풍력발전량수준이 0.8[MW]인 경우에만 (1)을 만족하여 부하의 손실이 발생한다. 따라서 연간 LOLD는 $0.036 \times 0.186 \times 8760 = 58.7[\text{hr/year}]$ 이고, 이는 모의 결과와 거의 일치한다. 그러나 발전기의 TTF와 TTR을 고려하려면 이렇게 간단한 계산만으로 LOLD를 구할 수는 없으며, 특히 비지수분포(Non-Exponential Distribution)의 TTR을 반영하려면 확률적 모의를 해야만 한다.

4.2 방법2

방법1에서 오차가 크게 발생한 것은 부하수준과 풍력발전량수준의 계절적인 연관성을 고려하지 않고 각 각을 독립적으로 결정하였기 때문이라고 생각하여, 방법2에서는 부하수준과 풍력발전량수준을 월별로 구분하여 월간 LOLD를 계산한 후, 월간 LOLD를 모두 더하여 연간 LOLD를 구하였다.

즉 과거 5년간의 데이터를 월별로 12개의 그룹으로 나누어서 각 그룹별로 부하데이터와 풍력발전량 데이터를 각각 10개 및 12개의 수준으로 단계화하였으며, 그 중 3, 6, 9, 12월의 결과를 표 3, 4에 수록하였다.

표 3. 방법2에서 단계화된 부하수준
Table 3. Quantized load level in Method2

| 단계 | 부하수준[MW] | | | | 발생확률 [%] | | | |
|----|----------|-------|-------|-------|----------|------|------|------|
| | 3월 | 6월 | 9월 | 12월 | 3월 | 6월 | 9월 | 12월 |
| 1 | 325.2 | 398.6 | 341.3 | 433.6 | 5.0 | 6.6 | 2.5 | 5.5 |
| 2 | 307.4 | 375.9 | 318.3 | 411.0 | 9.0 | 11.6 | 7.1 | 10.7 |
| 3 | 292.5 | 358.1 | 301.0 | 390.6 | 12.1 | 11.0 | 11.0 | 12.1 |
| 4 | 277.0 | 341.1 | 285.5 | 369.3 | 12.8 | 9.5 | 11.8 | 9.5 |
| 5 | 259.1 | 318.3 | 269.4 | 341.8 | 7.7 | 5.5 | 10.3 | 8.5 |
| 6 | 237.1 | 291.0 | 249.6 | 313.3 | 8.8 | 10.9 | 8.5 | 9.5 |
| 7 | 221.3 | 270.7 | 227.3 | 289.7 | 12.8 | 10.3 | 14.0 | 11.7 |
| 8 | 205.4 | 246.3 | 209.2 | 267.6 | 12.3 | 11.7 | 13.4 | 13.3 |
| 9 | 187.0 | 221.8 | 190.1 | 245.2 | 11.6 | 13.6 | 12.2 | 11.6 |
| 10 | 165.9 | 193.2 | 167.8 | 215.0 | 7.8 | 9.3 | 9.3 | 7.6 |

표 4. 방법2에서 단계화된 풍력발전량 수준
Table 4. Quantized wind power level in Method2

| 단계 | 풍력발전량수준[MW] | | | | 발생확률 [%] | | | |
|----|-------------|------|------|------|----------|------|------|------|
| | 3월 | 6월 | 9월 | 12월 | 3월 | 6월 | 9월 | 12월 |
| 1 | 99.7 | 98.2 | 99.5 | 99.5 | 25.0 | 1.3 | 6.9 | 32.5 |
| 2 | 92.9 | 91.6 | 92.0 | 88.1 | 4.1 | 1.2 | 2.4 | 6.7 |
| 3 | 85.7 | 84.8 | 83.0 | 74.9 | 3.0 | 1.4 | 2.8 | 5.3 |
| 4 | 79.7 | 76.9 | 74.0 | 64.5 | 2.8 | 2.1 | 2.9 | 4.6 |
| 5 | 73.7 | 69.4 | 65.8 | 56.7 | 2.2 | 2.7 | 1.7 | 3.2 |
| 6 | 66.2 | 61.5 | 59.7 | 50.1 | 4.7 | 3.3 | 2.2 | 3.7 |
| 7 | 56.7 | 53.1 | 51.7 | 44.1 | 5.1 | 2.7 | 3.8 | 3.3 |
| 8 | 47.0 | 44.4 | 43.0 | 38.1 | 5.2 | 4.9 | 6.1 | 3.6 |
| 9 | 37.2 | 34.5 | 33.1 | 30.0 | 6.5 | 7.5 | 7.6 | 7.0 |
| 10 | 25.8 | 23.1 | 22.5 | 21.0 | 8.3 | 12.1 | 11.1 | 7.2 |
| 11 | 14.1 | 11.7 | 12.3 | 11.4 | 11.1 | 20.1 | 18.0 | 9.8 |
| 12 | 2.2 | 1.7 | 2.2 | 1.7 | 22.0 | 40.8 | 34.5 | 13.3 |

방법2에서 연간 LOLD는 (4)를 이용하여 계산하였으며, 12개의 월간 LOLD는 방법1의 절차1-1~절차1-4로써 구하였다.

$$\text{연간 LOLD}[\text{hr/year}] = \sum_{k=1}^{12} k\text{월의 LOLD}[\text{hr/year}] \quad (4)$$

방법2의 확률적 모의로 얻은 연간 LOLD는 25.7[hr/year]로 오차가 약 37[%]이다. 방법1의 오차인 45[%]보다는 참값에 가까웠으나 여전히 오차가 작지 않으며, 이로써 사례시스템에서 동일한 달 내에서도 부하량과 풍력발전량의 상호 연관관계를 무시할 수 없음을 짐작할 수 있다.

한편 표 3과 4를 보면 본 사례에서 3월, 6월, 9월의 최대 부하수준이 400[MW]보다 작으므로, 월간 LOLD는 '0'임을 알 수 있다. 12월의 월간 LOLD는 (5)와 같이 계산할 수 있으며, 이 결과는 확률적 모의의 결과와 거의 일치하므로 1월~11월의 월간 LOLD는 '0'에 가까운 것으로 보인다.

풍력발전을 포함한 시스템의 발전량 적정성 평가를 위한 비순차 샘플링 방법

‘부하수준이 433.6[MW]일 확률’
 × ‘풍력발전수준이 30.0[MW]이하일 확률’×31×24
 + ‘부하수준이 411.0[MW]일 확률’
 × ‘풍력발전수준이 1.7[MW]일 확률’×31×24
 = 0.055×(0.07+0.072+0.098+0.133)×31×24
 + 0.107×0.133×31×24=25.8[hr/month] (5)

4.3 방법3

부하수준과 풍력발전량수준을 월별로 12개의 그룹으로 구분한 방법2의 결과가 만족스럽지 않았으므로, 방법3에서는 부하수준과 풍력발전량수준을 시간대별로 24개의 그룹으로 구분하여 LOLD를 계산하였다.

과거 5년간의 데이터를 하루의 시간대별로 24개의 그룹으로 나누어서 각 그룹별로 부하데이터와 풍력발전량데이터를 각각 10개 및 12개의 수준으로 단계화하였으며, 그 중 4, 10, 16, 22시의 결과를 표 5, 6에 수록하였다.

방법3에서 연간 LOLD는 (6)을 이용하여 계산하였으며, 24개의 시간대별 LOLD는 방법1의 절차1-1~절차1-4로써 구하였다.

$$\text{연간 LOLD[hr/year]} = \sum_{k=1}^{24} k\text{시간대의 LOLD} \quad (6)$$

표 5. 방법3에서 단계화된 부하수준
 Table 5. Quantized load level in Method3

| 단계 | 부하수준[MW] | | | | 발생확률 [%] | | | |
|----|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| | 4시 | 10시 | 16시 | 22시 | 4시 | 10시 | 16시 | 22시 |
| 1 | 260.5 | 407.4 | 429.0 | 350.1 | 3.12 | 6.19 | 2.58 | 4.82 |
| 2 | 244.0 | 380.9 | 400.8 | 329.5 | 6.68 | 11.34 | 6.30 | 8.55 |
| 3 | 230.7 | 359.5 | 379.0 | 310.3 | 8.98 | 13.70 | 9.15 | 10.03 |
| 4 | 219.4 | 340.1 | 362.1 | 292.4 | 10.14 | 12.66 | 8.44 | 11.34 |
| 5 | 209.3 | 321.7 | 342.8 | 278.4 | 13.26 | 13.59 | 9.37 | 14.90 |
| 6 | 200.0 | 303.6 | 320.3 | 266.2 | 13.75 | 10.08 | 8.66 | 15.34 |
| 7 | 191.9 | 284.8 | 296.3 | 254.1 | 13.48 | 8.49 | 14.58 | 14.36 |
| 8 | 183.1 | 267.0 | 277.2 | 241.6 | 15.12 | 9.04 | 17.92 | 9.15 |
| 9 | 171.0 | 245.9 | 255.2 | 229.7 | 8.77 | 6.96 | 11.62 | 7.12 |
| 10 | 158.4 | 225.4 | 213.8 | 215.4 | 6.68 | 7.94 | 11.40 | 4.38 |

표 6. 방법3에서 단계화된 풍력발전량 수준
 Table 6. Quantized wind power level in Method3

| 단계 | 풍력발전량수준[MW] | | | | 발생확률 [%] | | | |
|----|-------------|------|------|------|----------|------|------|------|
| | 4시 | 10시 | 16시 | 22시 | 4시 | 10시 | 16시 | 22시 |
| 1 | 99.8 | 99.6 | 99.1 | 99.6 | 15.1 | 14.0 | 18.1 | 14.1 |
| 2 | 93.9 | 93.2 | 84.3 | 91.2 | 2.9 | 3.6 | 6.2 | 3.2 |
| 3 | 85.6 | 85.0 | 71.5 | 80.7 | 2.8 | 3.0 | 5.6 | 3.4 |
| 4 | 78.1 | 77.2 | 60.6 | 69.8 | 2.7 | 3.0 | 5.6 | 4.5 |
| 5 | 70.4 | 67.7 | 51.9 | 57.9 | 2.7 | 4.9 | 4.9 | 4.9 |
| 6 | 63.4 | 56.9 | 45.2 | 45.9 | 2.5 | 6.5 | 3.9 | 8.6 |
| 7 | 56.9 | 44.3 | 39.1 | 33.0 | 2.9 | 8.1 | 5.6 | 7.3 |
| 8 | 49.2 | 33.2 | 32.2 | 21.7 | 5.2 | 7.9 | 6.2 | 9.4 |
| 9 | 38.2 | 24.0 | 24.5 | 14.4 | 5.9 | 7.2 | 5.9 | 7.8 |
| 10 | 27.2 | 16.7 | 16.9 | 9.1 | 10.9 | 6.4 | 8.3 | 8.7 |
| 11 | 14.1 | 9.9 | 9.8 | 5.0 | 17.7 | 9.8 | 10.5 | 7.8 |
| 12 | 2.5 | 1.6 | 1.8 | 0.8 | 28.7 | 25.6 | 19.0 | 20.4 |

방법3의 확률적 모의로 얻은 연간 LOLD는 54.3[hr/year]로서 오차가 약 34[%]이며 여전히 오차가 작지 않다. 이에 부하량과 풍력발전량의 계절적인 연관성을 배제하고 24시간대로 그룹화 하는 것도 문제가 있다고 할 수 있다. 한편 표 5, 6에서 시간대 LOLD에 영향을 미치는 요소를 밑줄로 표시하였으며 이로부터 각 시간대 LOLD를 해석적으로 계산할 수 있으나, 그 방법1, 2에서 확인한 바와 같이 모의의 결과가 해석적인 결과와 매우 비슷하므로 계산식은 생략한다.

4.4 방법4

방법2에서는 부하-풍력발전량간의 계절적 연관성을 반영하고자 12개의 부하-풍력발전량 그룹을 이용하였고, 방법3에서는 부하-풍력발전량간의 일간 시간대별 연관성을 반영하고자 24개의 부하-풍력발전량 그룹을 이용하였으나 모두 LOLD의 오차가 작지 않았다. 만약 부하-풍력발전량 그룹의 수를 극단적으로 늘리면 보다 정확하게 LOLD를 추정할 수 있겠지만, 결과적으로는 순차샘플링을 위한 모델과 비슷하게 되어 - 그룹의 수가 8,760개면 동일한 모델이 됨 - 비순

차샘플링을 위한 효과적인 모델이라고 말할 수 없게 된다.

방법2와 3에서는 부하량과 풍력발전량간을 (1)로 상호 비교할 때, 같은 그룹에 속하는 부하량과 풍력발전량 단계를 상호 독립적으로 결정하므로, 동일 그룹내에서 부하-풍력발전량간에 상호 연관성이 있을 경우에 이를 LOLD에 반영할 수 없게 된다.

이에 방법4에서는 방법1에서와 같이 부하량과 풍력발전량을 각각 독립적으로 단계화(Quantized)하여 정해진 개수의 수준을 정한 후, 과거의 데이터로부터 각 부하수준과 풍력발전량 수준간의 확률적인 연관성을 파악하는 방법을 사용하였다. 여기서 중요한 것은, 이러한 확률적인 연관성에는 부하량과 풍력발전량간의 계절적인 또한 일간 시간대별 연관성이 모두 포함될 수 있다는 점이다. 보다 구체적으로 설명하면, K-means clustering 알고리즘으로 과거 부하데이터로부터 n개의 부하수준을 결정하고, 과거 풍속데이터로부터 m개의 풍력발전수준을 결정한 후, 각 n개의 부하수준에 대한 풍력발전수준의 발생 확률을 계산함으로써(n×m개의 확률값) 부하수준과 풍력발전수준 사이의 상호 연관성을 규정하고자 한다.

다시 설명하면 과거의 부하데이터와 풍속데이터는 모두 연중 시간대별 데이터이므로 1년간의 데이터에는 부하량과 풍력발전량간 8,760개의 연관관계 정보가 있고, 5년간의 데이터에는 43,800개의 정보가 있다. 이러한 관계를 n×m개의 확률값으로 대표하고자 하는 것이 방법4의 기본 착상이다.

방법4에서는 방법1에서 구한 표 1, 2를 그대로 이용하고, 다음의 절차에 따라 부하량과 풍력발전량간의 120개 연관관계를 구한다 (n=10, m=12).

- 절차4-1) 43,800개의 5년간의 데이터를 표 1에 있는 부하수준별로 10개의 그룹으로 분류
- 절차4-2) 절차4-1에서 분류된 10개의 각 그룹별로, 표 2에 있는 풍력발전량수준별로 12개의 그룹으로 세분
- 절차4-3) 절차4-2의 결과를 이용하여 각 부하수준에 대한 풍력발전량수준의 발생확률 계산

본 사례에서 절차4-3의 결과는 표 7과 같다. 예를 들어 부하수준이 373.8[MW]일 때 풍력발전량수준이 98.7[MW]일 확률은 20.4[%]로 추정된다. 표 7에서 (1)을 만족하여 LOLD의 증가에 영향을 미치는 것은 부하수준이 406.58[MW]이고 풍력발전량수준이 0.8[MW]인 경우뿐이며, 그 확률은 14.3[%]이다. 한편 표 1로부터 부하수준이 406.58[MW]일 확률은 3.6[%]이므로 연간 LOLD는 $0.036 \times 0.143 \times 8760 = 45.1$ [hr/year]로 추정된다.

한편 다음의 절차를 따르면 본 방법4에서 모의를 통하여 연간 LOLD를 계산할 수 있다.

- 절차4-4) 표 1의 부하수준 발생확률분포에 따라서 부하수준을 확률적으로 결정
- 절차4-5) 표 7에서 절차4-4의 부하수준에 해당하는 열(column)의 확률분포에 따라서 풍력발전량수준을 확률적으로 결정
- 절차4-6) 절차4-4, 절차4-5에서의 부하수준과 풍력발전량수준으로 (1)의 만족 여부 판별
- 절차4-7) 절차4-4~절차4-6을 샘플 수만큼 반복수행 후, (2)로써 LOLD 계산

표 7. 방법4에서 부하수준별 단계화된 풍력발전수준 [%]
Table 7. Quantized wind power level for each load levels in Method4 [%]

| 부하 발전 | 406.6 | 373.8 | 346.9 | 320.8 | 296.5 | 273.7 | 249.1 | 225.5 | 202.0 | 176.2 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 98.7 | 28.5 | 20.4 | 19.3 | 17.1 | 17.5 | 17.4 | 17.9 | 15.5 | 14.9 | 13.4 |
| 81.4 | 8.6 | 7.6 | 6.9 | 6.7 | 6.1 | 6.6 | 7.3 | 6.8 | 5.6 | 4.9 |
| 65.8 | 7.6 | 7.2 | 6.3 | 6.7 | 6.4 | 7.0 | 6.8 | 6.3 | 6.5 | 5.5 |
| 53.2 | 5.6 | 5.1 | 5.3 | 6.0 | 5.7 | 5.8 | 5.6 | 5.5 | 5.7 | 5.1 |
| 43.1 | 5.2 | 5.9 | 5.6 | 6.0 | 6.8 | 6.4 | 6.0 | 5.6 | 5.9 | 4.4 |
| 35.1 | 3.9 | 4.7 | 5.3 | 4.5 | 4.7 | 4.9 | 4.5 | 4.7 | 4.4 | 3.6 |
| 29.5 | 2.8 | 4.1 | 3.8 | 3.9 | 4.1 | 4.2 | 3.5 | 3.9 | 4.1 | 4.1 |
| 24.5 | 4.5 | 4.5 | 4.7 | 4.4 | 4.6 | 4.5 | 4.0 | 4.1 | 4.1 | 5.0 |
| 19.3 | 4.9 | 5.6 | 5.3 | 5.9 | 6.3 | 6.1 | 6.1 | 6.1 | 6.5 | 6.2 |
| 13.2 | 6.4 | 8.8 | 9.4 | 8.9 | 8.6 | 8.5 | 9.0 | 10.0 | 9.6 | 10.6 |
| 6.6 | 7.7 | 10.3 | 11.2 | 10.8 | 11.0 | 10.3 | 10.8 | 11.9 | 11.8 | 14.8 |
| 0.8 | 14.3 | 15.7 | 16.9 | 19.2 | 18.1 | 18.2 | 18.6 | 19.4 | 20.8 | 22.4 |

위의 절차에 따라 구한 연간 LOLD의 근사값은 45.5[hr/year]로 앞서 해석적으로 계산한 결과와 거의 일치한다. 이 때 참값에 대한 오차는 약 12[%]로서 방법2, 3과 비교할 때 방법4는 부하량과 풍력발전량간의 계절적, 시간적 연관성을 비교적 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

5. 제안하는 비순차 샘플링 방법

풍력발전을 포함한 발전량 적정성 평가에서, 순차 샘플링은 비순차 샘플링보다 다양한 신뢰도 정보를 제공할 수 있는 장점이 있는 반면에 계산시간 면에서는 비순차 샘플링이 유리하다. 순차 샘플링에서는 부하량과 풍력발전량 모델이 시간을 매개로 엮여 있으므로 계절적, 일간 시간대별 연관성을 쉽게 반영할 수 있으나, 비순차 샘플링에서의 부하량과 풍력발전량 모델에는 시간정보가 없으므로 부하량과 풍력발전량간의 시간적 연관성을 잘 반영하여야만 정확한 신뢰도 평가를 기대할 수 있다.

4절에서의 결과를 종합해보면 방법1~방법4에서 평가한 연간 LOLD의 상대오차가 각각 45[%], 37[%], 34[%], 12[%]로서, 방법4는 부하량과 풍력발전량간의 관계를 반영하지 않은 방법1에 비하여 약 4배, 관계를 약하게 반영한 방법2, 방법3보다는 약 3배의 정확도를 보였다. 이에 본 논문에서는 가장 바람직한 샘플링 방법으로 방법4를 제안한다. 본 논문에서 제안하는 샘플링 방법을 정리하면 다음과 같다.

- 준비1) clustering 알고리즘을 이용하여 시간대별 부하데이터를 n개의 수준으로 단계화
- 준비2) clustering 알고리즘을 이용하여 시간대별 풍력발전량데이터를 m개의 수준으로 단계화
- 준비3) 준비1의 n개의 수준에 속한 시간대를 기준으로 시간대별 풍력발전량데이터를 n개의 그룹으로 분류
- 준비4) 준비3의 n개의 풍력발전량데이터 그룹마다, 준비2의 cluster 구분에 따라 m개의 그룹으로 세분
- 준비5) 준비4의 결과를 이용하여 각 부하수준에 대

한 풍력발전량수준의 발생확률 계산

- 모의1) 준비1의 부하수준 발생확률분포에 따라 부하수준을 확률적으로 결정
- 모의2) 모의1의 부하수준에 대해 준비5에서의 확률분포에 따라 풍력발전량수준을 확률적으로 결정
- 모의3) 모의1, 2에서의 부하수준과 풍력발전량수준으로 (1)의 만족 여부 판별
- 모의4) 모의1~모의3을 샘플 수만큼 반복수행 후, (2)로써 LOLD 계산

6. 결 론

본 논문에서는 상태샘플링(State Sampling)법을 기반으로 풍력발전량과 시스템 부하간의 확률적인 연관관계를 고려하여 풍력발전단지를 포함한 전력시스템의 발전량적정성을 평가하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 풍력발전량과 시스템 부하간의 상관관계를 효과적으로 반영하고자 각 데이터를 몇 가지 기준으로 구분하여 사례연구를 한 결과, clustering 알고리즘으로 풍력발전량과 시스템 부하를 몇 개의 그룹으로 분류하고 각 그룹간의 확률적 연관관계를 파악하여 샘플링에 반영하는 것이 모델의 간편함과 정확성을 동시에 감안할 때 가장 효과적임을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 IEEE RTS(Reliability Test System)의 부하패턴을 인용하였고 연간 풍속데이터로는 제주도 고산지역의 5년간 풍속데이터를 사용하였으며, 신뢰도 지수로는 LOLD(Loss of Load Duration)를 사용하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 풍력발전 외에도 발전량이 시간적으로 주기성을 가지는 전원을 포함한 전력시스템의 발전량 적정성 평가에도 적용할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] R. Billinton, H. Chen, and R. Chajar, "A Sequential Simulation Technique for Adequacy Evaluation of Generating Systems Including Wind Energy", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.11, No.4, pp.728-734, December 1996.
- [2] R. Billinton and G. Bai, "Generating Capacity Adequacy Associated With Wind Energy", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.19, No.3, pp.641-646, September 2004.
- [3] R. Billinton and W. Wangdee, "Reliability-Based Transmission Reinforcement Planning Associate With Large-Scale Wind Farms", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.22, No.1, pp.34-41, February 2007.
- [4] N. B. Negra, B. Bak-Jensen, and P. Sorensen, "Aspects of Relevance in Offshore Wind Farm Reliability Assessment", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.22, No.1, pp.159-166, March 2007.
- [5] R. Karki, P. Hu, and R. Billinton, "A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.21, No.2, pp.533-540, June 2006.
- [6] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Reliability Evaluation for Distribution System With Renewable Distributed Generation During Islanded Mode of Operation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.24, No.2, pp.572-581, May 2009.
- [7] R. Billinton and W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press, New York, 1994.

◇ 저자소개 ◇



김광원(金光源)

1966년 5월 14일생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 울산대학교 전기공학부 교수.