

계통 부하량과 풍력발전량의 확률적 관계를 고려한 발전량 적정성 평가 연구

(A Study on Generation Adequacy Assessment Considering Probabilistic Relation
Between System Load and Wind-Power)

김광원* · 현승호

(Gwang-Won Kim · Seung-Ho Hyun)

요 약

본 논문에서는 발전량 적정성 평가를 위한 풍력발전 모형의 제안하였다. 풍력 발전량과 계통 부하량은 일 년을 주기로 하는 주기함수 형태이므로, 둘 중 하나의 물리량이 주어지면 다른 물리량의 발생 확률을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 가상의 데이터를 바탕으로 두 물리량을 k-means 클러스터링 알고리즘으로 단계화하였고, 각 단계간의 확률적인 관계를 계산하였다. 제안하는 풍력발전 모형은 상태샘플링(state sampling)에 기반을 둔 몬테카를로 모의로써 발전량 적정성을 평가하는데 적합하다.

Abstract

This paper presents the wind-power model for generation adequacy assessment. Both wind-power and system load depend on time of a year and show their periodic nature with similar periods. Therefore, the two quantities have some probabilistic relations, and if one of them is given, the other can be decided with some probability. In this paper, the two quantities are quantized by k-means clustering algorithm and related probabilities among the cluster centers are calculated using sequential wind-power and system load data. The proposed model is highly expected to be applied for generation adequacy assessment by Monte-Carlo simulation with state sampling method.

Key Words : Generation Adequacy, Wind-Power, Monte Carlo, Reliability

1. 서 론

최근 경제적인 관점에서뿐만 아니라 환경적인 요구에 기인하여 재생에너지에 대한 관심이 증대되고 있으며, 특히 풍력발전은 독일과 덴마크를 필두로 세계 각국에서 유망한 대체 에너지원으로 각광받고 있다. 그러나 풍력발전은 바람의 세기에 따라서 발

* 주저자 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수

Tel : 052-259-2186, Fax : 052-259-1686

E-mail : kim66@ieee.org

접수일자 : 2007년 7월 2일

1차심사 : 2007년 7월 10일

심사완료 : 2007년 8월 27일

전력이 변화하므로 발전량을 제어할 수 있는 화력이나 원자력 발전만을 고려한 기존의 전력시스템 신뢰도평가 기법을 그대로 사용할 수는 없다. 전력시스템의 신뢰도는 경쟁적 전력시장의 개념이 도입되면서 시스템의 운영, 계획 등에서 그 중요성이 부각되고 있으므로, 풍력발전을 포함한 전력시스템의 효율적이고 정확한 신뢰도평가 기법의 개발이 요구된다.

풍력발전을 포함하여 재생에너지원을 고려한 신뢰도 평가기법에 대한 연구는 이미 20여년의 역사를 가지고 있으며, 풍력발전 변환시스템의 확률모델을 개발하고 풍력발전과 기존발전이 혼합된 경우의 신뢰도 평가에 적용한 연구를 시작으로[1], 전력시스템의 발전기를 기존의 발전기 그룹과 발전량이 유동적인 발전기 그룹으로 나누어 후자를 확률변수로 다루는 방법을 제안하기도 하였으며[2], 순차적 몬테카를로 모의으로써 풍력발전단지를 포함한 발전시스템의 신뢰도를 평가하는 방법도 발표되었다[3].

풍력발전단지의 발전량은 풍속의 함수이고 풍속은 시간에 따라 변화하므로, 이러한 풍력발전량의 시간적 특징의 적절한 반영여부가 정확한 신뢰도 지수 산정에서 중요하다. 이에 순차적 몬테카를로 모의에 적합하도록 풍속의 시간적 변화를 ARMA (Auto-regressive Moving Average) 등의 시계열 모형으로 표현하는 논문이 최근에 비교적 많이 발표되었다[4-6]. 그 외에도 과거에 Markov chain을 이용하여 풍속의 확률분포를 구하는 기법이 제안된 바도 있으며[7], 보편적인 풍속의 확률분포모형을 제안하기도 하였다[8]. 한편 [2]에서는 동일 시간대의 계통 부하량과 풍력발전량을 하나의 벡터로 묶어서 모든 시간대별 벡터를 대상으로 클러스터링 알고리즘을 적용하여, 대표벡터로써 부하량과 풍력발전량을 연관짓는 풍력발전모형을 제안하였으나, 동일한 부하량에 대한 다수 풍력발전량의 존재 가능성을 배제함으로써 몬테카를로법과 같은 확률론적 모의에서 이용하기에는 다소 미흡하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 몬테카를로 기법중 하나인 상태샘플링(state sampling)법에 적용하기에 적합한 풍력발전량 모형을 제안하고 있으며, 제안하는 방법에서는 계통 부하량과 풍력발전량이 공히 연중 시간대의 함수라는 점으로부터 서로의 확률적 연계성을 이용

하여 계통 부하량으로부터 해당 풍력발전량을 확률적으로 결정하여 발전량 적정성 평가에 효과적으로 사용할 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제시하는 방법은 풍속이 계통 부하량에 영향을 미친다거나 풍속과 계통 부하량에 동시에 영향을 미치는 공통 요인이 존재한다는 가정에서 출발한 것이 아니며, 단지 계통 부하량과 풍속이 공히 연중 시간대의 함수이므로 확률적 모의로써 신뢰도 지수를 산정할 때 계통 부하량에 대한 풍력발전량을 임의로 정할 수는 없다는 가정에서 출발하였다. 간단한 예로 어떤 지역의 여름철 풍속이 겨울철에 비하여 작은 반면에 여름철 전력수요가 겨울철에 비하여 크다고 가정하면, 신뢰도 평가과정에서 가정된 계통 부하량이 크다면 풍력발전량은 작은 값으로 설정될 확률이 큰 값으로 설정될 확률보다 높아야 한다. 그리고 이 경우에 풍속과 부하량을 상호 연계시키는 요인의 유무는 중요하지 않다.

본 논문은 상태샘플링법의 정리와 제안하는 풍력발전량모형의 소개로 구성되어 있으며 사례연구에서는 IEEE RTS에 25[MW]의 풍력발전 단지를 추가로 가정하여 제안하는 모형을 검증하였다.

2. 상태샘플링(State Sampling)법

일반적으로 많이 사용되는 몬테카를로 모의는 그 샘플링 방법에 따라서 상태구간샘플링(state duration sampling), 시스템상태전이샘플링(system state transition sampling), 상태샘플링(state sampling)법으로 구분할 수 있다[9]. 이 중에서 앞의 두 방법은 순차적 모의방법으로 분류되며 전력시스템의 신뢰도 평가에 있어서는 빈도와 관련된 신뢰도 지수를 산정할 수 있고, 신뢰도 지수의 확률분포까지도 얻을 수 있다는 장점이 있다. 반면에, 상태샘플링법은 빈도와 관련된 신뢰도 지수를 산정할 수는 없으나 LOLE(Loss Of Load Expectation), LOEE (Loss Of Energy Expectation), EDNS (Expected Demand Not Supplied)와 같은 중요한 신뢰도 지수를 산정할 수 있으면서 다음의 장점을 지니고 있다.

- 계산이 빠르고 컴퓨터 메모리를 적게 사용하므로 큰 규모의 시스템 평가에 적합하다.

계통 부하량과 풍력발전량의 확률적 관계를 고려한 발전량 적정성 평가 연구

· 간단한 기본 신뢰도 정보만으로 신뢰도 평가가 가능하다.

발전기 상태를 운전 및 비운전 상태만으로 구분하는 경우에 각 발전기의 상태는 0과 1사이의 난수 U_i 로써 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$S_i = \begin{cases} 1, & U_i > FOR_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

위에서 S_i 가 '1'이면 발전기가 운전상태임을 의미하며, FOR_i 는 i 발전기의 고장정지율(forced outage rate)이다. 만약 보수유지기간을 고려하려면 (1)에서 고장정지율에 보수유지율을 더하여 사용하여야 한다.

k 번째 샘플에서 계통 부하량을 D_k , i 발전기의 운전상태를 S_{ik} 라고 하면, 공급지장에너지(demand not served) DNS_k 는 (2)와 같이 표현 할수 있다.

$$DNS_k = \max \left\{ 0, D_k - \sum_{i=1}^m (G_i \times S_{ik}) \right\} [MWh] \quad (2)$$

여기서 m 은 전체 발전기의 수이고, G_i 는 i 발전기의 정격용량이다.

전체 샘플의 수가 N 개이고 각 샘플의 지속시간을 1시간이라고 하면, LOEE와 LOLE는 각각 (3)과 (4)로 계산할 수 있다.

$$LOEE = \frac{\sum_{k=1}^N DNS_k}{N} \times 8760 [MWh/yr] \quad (3)$$

$$LOLE = \frac{\sum_{k=1}^N I_k(DNS_k)}{N} \times 8760 [hr/yr] \quad (4)$$

$$I_k(x) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

상태샘플링에 의한 모의에서 샘플의 수 N 은 신뢰도지수의 수렴여부로서 결정하며, 일반적으로 반복에 따른 신뢰도지수의 집합 X 에 대하여 다음을 만족하면 모의를 종료한다.

$$\frac{\text{variance}(X)}{\text{mean}(X)} < \varepsilon \quad (5)$$

한편 (2)에서 발전량을 (1)로써 확률적으로 결정하였듯이 부하량 또한 확률적으로 결정하여야 하는데, 부하량은 매우 다양한 값을 가질 수 있으므로 부하량을 단계화(quantized)하여 지정된 수준(level)의 부하량만을 대상으로 확률적으로 부하량을 결정하는 것이 현실적이다. 예를 들어 본 논문 사례연구의 시스템은 대략적으로 1000~2800[MW]에서 다양한 부하량을 가질 수 있는데, k-means 알고리즘과 같은 클러스터링기법을 이용하면 8,760개의 연간 시간별 부하량을 지정한 개수의 수준으로 분류할 수 있고, 각 수준에 속하는 부하량의 갯수로부터 각 부하수준의 발생 확률을 계산할 수 있다. 본 논문의 사례연구에서는 k-means 알고리즘을 이용하여 부하를 단계화하였으며, 표 1은 10단계로 단계화 한 경우의 부하수준과 각각의 발생 확률이다.

표 1. 단계화한 부하수준의 예
Table 1. Example of quantized load level

단계	부하수준[MW]	발생확률[%]
1	2,570.2	3.03
2	2,378.8	7.23
3	2,224.0	8.73
4	2,068.4	9.58
5	1,913.0	11.91
6	1,764.8	13.74
7	1,603.7	11.88
8	1,445.1	14.59
9	1,297.9	11.60
10	1,133.3	7.72

그림 1에 사례연구에서 사용된 연간 시간별 부하량데이터의 첫 3일 변화추이와 이를 표 1의 부하수준으로 단계화한 변화추이를 함께 나타내었다(실선이 단계화한 부하수준이다). 그림 1에서는 실제값과 단계화한 값 사이에 다소의 차이가 있지만 사례연구에서는 200개의 부하수준으로 단계화하였으므로, 실제값과 단계화한 수준사이의 차이가 신뢰도 평가에 미치는 영향이 그리 크지 않으리라고 생각된다.

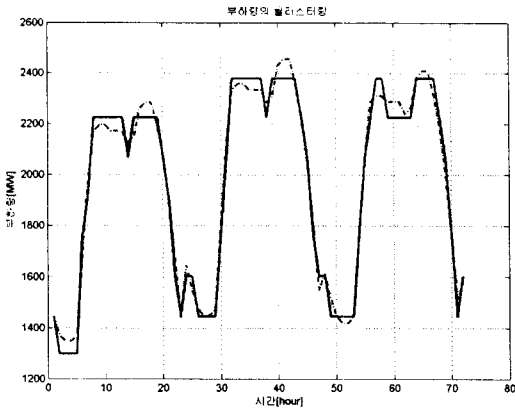


그림 1. 부하량의 단계화
Fig. 1. Quantization of system load

3. 풍력발전량모형

3.1 풍력발전량의 결정

풍력발전량은 풍속과 매우 밀접한 관계가 있으며 풍력발전량과 풍속의 관계는 타 논문에서 자세히 언급하고 있으므로[7], 본 논문에서도 같은 형태인 그림 2의 관계를 이용하여 풍속으로부터 풍력발전량을 결정할 수 있다고 가정하였다. 사례연구의 풍력발전단지의 경우에는 발전량의 범위가 0~25[MW]이지만, 풍속의 범위를 고려하면 실제 발전량의 범위는 대략 15~25[MW]이다. 표 2는 상태샘플링에 이용하고자 k-means 알고리즘으로 풍력발전량을 다섯 수준으로 단계화한 결과이다.

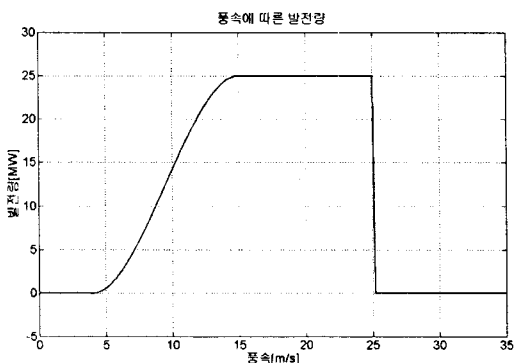


그림 2. 풍속에 따른 발전량 특성 곡선
Fig. 2. Wind-power vs. wind-speed characteristic

부하수준과 마찬가지로 표 2를 이용하여 풍력발전수준을 확률적으로 결정하여 상태샘플링에 이용한다면, 풍력발전수준을 부하수준과 무관하게 독립적으로 결정한 것이 되며, 이는 부하수준과 풍력발전수준의 상호연관관계를 제대로 반영하지 못하였다는 것을 의미한다. 즉 풍력발전단지에서 풍속은 계절별로 시간별로 변화하지만 대체적으로는 하루를 주기로 하는 주기함수 형태이며 이는 계통부하인 경우에도 마찬가지이므로, 부하의 수준이 결정되면 시기적 연계성을 고려하여 풍력발전수준을 결정할 수 있다. 이에 본 논문에서는 부하량과 풍속간의 시간적 연관관계를 고려한 부하수준과 풍력발전수준간의 상관확률행렬(probabilistic co-relation matrix)을 도입하여 문제를 해결하였다.

표 2. 단계화한 풍력발전량의 예
Table 2. Example of quantized wind-power level

단계	풍력발전수준[MW]	발생확률[%]
1	24.834	32.85
2	23.686	22.80
3	22.356	17.90
4	20.921	14.78
5	18.277	11.67

상관확률행렬은 $l \times w$ 의 행렬로써 l 은 부하수준의 단계 수이고 w 는 풍력발전수준의 단계 수이다. 상관확률행렬의 i 행, j 열 원소는 부하수준이 i 번째 단계인 경우에 풍력발전수준이 j 번째 단계일 확률로써, 각 행의 합은 '1'이어야 한다. 사례연구의 시스템을 대상으로 표 1, 2의 부하수준과 풍력발전수준으로 구한 상관확률행렬의 예가 표 3에 수록되어 있다. 표 3의 4행 3열 원소인 0.1538은 계통의 부하가 2,068.4[MW]일 때, 풍력발전량이 22.356[MW]일 확률이 15.38[%]라는 것을 의미한다.

표 3과 같은 상관확률행렬은 연간 8,760개의 동일 시간대 부하수준과 풍력발전수준을 통계적으로 정리하여 구할 수 있는데, 예를 들어 표 3의 1행은 부하수준이 2,570.2[MW]인 시간대의 풍력발전수준을 모두 찾아서 이의 확률분포를 풍력발전수준별로 정리함으로써 얻을 수 있다.

계통 부하량과 풍력발전량의 확률적 관계를 고려한 발전량 적정성 평가 연구

결론적으로, 표 1의 부하수준별 발생확률을 이용하여 부하수준을 확률적으로 정하고, 상관확률행렬을 이용하여 풍력발전수준을 확률적으로 결정할 수 있고, 이렇게 구한 부하수준과 풍력발전수준은 상호 간 연관특성을 반영하게 된다.

표 3. 상관확률행렬의 예
Table 3. Example of probabilistic co-relation matrix

0.7736	0.2226	0.0038	0	0
0.6303	0.3081	0.0553	0.0063	0
0.4863	0.3111	0.1294	0.0732	0
0.4076	0.2181	0.1538	0.1907	0.0298
0.3183	0.1755	0.1994	0.1630	0.1438
0.3414	0.2143	0.1836	0.1138	0.1470
0.3564	0.2421	0.1671	0.1518	0.0826
0.2144	0.2762	0.2144	0.1721	0.1228
0.1339	0.1949	0.2254	0.2323	0.2136
0.0533	0.1154	0.2929	0.2278	0.3107

3.2 상태샘플링을 이용한 모의절차

이상의 내용을 반영하여 상태샘플링으로써 풍력발전단지를 포함한 계통의 발전량 적정성을 평가하는 절차는 다음과 같다.

- 1) 그림 6의 관계를 이용하여 연간 시간별 평균풍속으로부터 연간 시간별 풍력발전량을 계산한다.
- 2) 연간 시간별 부하량과 풍력발전량을 클러스터링(k-means 알고리즘 등 이용)하여 단계화한다.
- 3) 부하수준과 풍력발전수준간의 상관확률행렬 구성한다.
- 4) 신뢰도 지수가 충분히 수렴할 때까지 다음 과정을 반복한다.
 - 4-1) 계통 부하수준을 확률적으로 결정
 - 4-2) 상관확률행렬로부터 풍력발전수준을 확률적으로 결정
 - 4-3) 식 (1)을 이용하여 각 발전기의 고장여부를 확률적으로 결정
 - 4-4) 식 (2)를 이용하여 공급지장에너지 계산(풍력발전량 고려)
 - 4-5) 식 (3), (4)를 이용하여 신뢰도 지수 계산
 - 4-6) 식 (5)로써 수렴 여부 판별

4. 사례연구

IEEE RTS[9]에 가상의 풍력발전단지를 가정하여 제시한 방법으로 발전량 적정성을 평가하였다. IEEE RTS의 연간 첨두부하는 2,850[MW]이며, 연중 시간별 첨두부하의 그래프는 그림 3과 같다.

IEEE RTS는 모두 32기의 발전기로 구성되어 있으며 전체 설비용량은 3,405[MW]이다. 표 4에는 각 발전기의 기본 신뢰도 데이터가 수록되어 있다.

본 사례연구에서는 표 4의 발전기 외에 정격발전량이 25[MW]인 풍력발전단지를 RTS에 추가하였으며, 발전단지의 시간별 평균 풍속은 그림 4와 같다고 가정하였고, 최대 풍속은 18[m/s]이다. 그림 3과 4를 비교하면 부하곡선과 풍속곡선이 대체적으로 비슷한 양상인데, 이는 본 논문의 사례연구를 위하여 저자가 가정한 것이며, 풍속곡선이 부하곡선과 전혀 다른 경향을 보이더라도 제시한 방법을 적용하는데는 문제가 없다.

표 4. 발전기 신뢰도 데이터
Table 4. Generating unit reliability data

설비용량 [MW]	발전기 수	FOR	MTTF [hr]	MTTR [hr]
12	5	0.02	2940	60
20	4	0.10	450	50
50	6	0.01	1980	20
76	4	0.02	1960	40
100	3	0.04	1200	50
155	4	0.04	960	40
197	3	0.05	950	50
350	1	0.08	1150	100
400	2	0.12	1100	150

* MTTF: Mean Time To Failure

* MTTR: Mean Time To Repair

사례연구 시스템에서 첫 3일간의 부하곡선과 풍속곡선을 그림 5에 함께 나타내었는데(점선이 풍속임), 그림에서 알 수 있듯이 부하곡선과 풍속곡선은 시간에 따른 주기적 특성을 보이므로 - 일년간의 시간별 풍속곡선 데이터를 함수로 구현하고자 이와 같이 가정하였으며, 실제 풍속데이터는 일별로 다소 불규칙

하다. 그러나 이 또한 제시한 방법을 적용하는 데는 문제가 되지 않는다. - 상태샘플링에서 부하량과 풍속의 연관관계를 고려하여야 한다. 그림 6에는 풍속과 이에 의한 풍력발전량을 함께 도시하였는데(접선이 풍속임), 풍력발전의 정격출력은 25[MW]로 가정하였으며, cut-in, cut-out, 정격 풍속은 각각 4[m/s], 25[m/s], 15[m/s]로 가정하였고, cut-in 풍속과 정격 풍속 사이에서의 발전량은 그림 2의 특성곡선을 가정하여 결정하였다.

계통 부하의 변동폭이 풍력발전량의 변동폭에 비하여 매우 크므로 본 사례연구에서는 k-means 알고리즘을 이용하여 계통 부하량은 200개의 수준으로 풍력발전량은 10개의 수준으로 클러스터링 하였고,

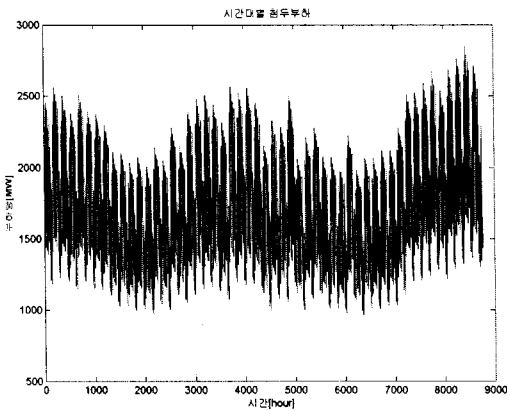


그림 3. 시간대별 첨두부하
Fig. 3. Hourly peak load

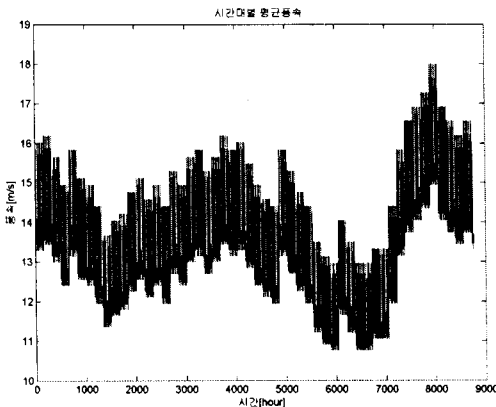


그림 4. 시간대별 평균풍속
Fig. 4. Hourly average wind speed

부하량에 따른 풍력발전량을 결정하기 위한 200×10의 상관확률행렬을 계산하였다.

다음의 세 가지 경우로 구분하여 발전량 적정성을 평가하였으며, 표 5는 계통 최대부하가 2,850[MW]인 경우에 대한 평가 결과이고, 표 6은 최대부하를 3,000[MW]로 증가시킨 경우의 평가 결과이다.

- 경우1: IEEE RTS
- 경우2: IEEE RTS에 최대발전량 25[MW]인 풍력발전포함
- 경우3: IEEE RTS에 최대발전량 25[MW]의 고정발전포함

사례연구의 결과를 보면 풍력발전의 경우에는 고정된 발전량을 유지할 수 없으므로 기본 RTS에 비해서는 우수한 신뢰도를 보이지만 동일한 정격의 고정발전의 경우보다는 다소 못한 발전량 적정성을 보

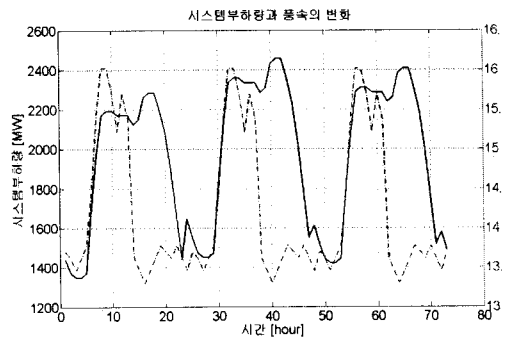


그림 5. 첫 3일간 계통부하량과 풍속
Fig. 5. System load and wind speed for first 3 days

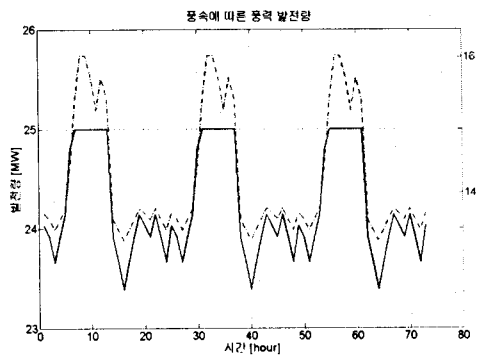


그림 6. 첫 3일간 풍속과 풍력발전량
Fig. 6. Wind-speed and wind-power for first 3 days

임을 알 수 있으며, 본 논문에서 제안한 방법으로 타당성 있는 결과를 얻었다고 평가할 수 있다.

표 5. 최대부하 2,850(MW)인 경우의 발전 적정성
Table 5. Generating adequacy indices for maximal 2,850(MW) load case

경 우	LOLE [hr/yr]	LOEE [MWh/yr]
RTS	8.954	1,102.6
RTS+25[MW] 풍력발전	7.560	894.1
RTS+25[MW] 고정발전	7.208	869.4

표 6. 최대부하 3,000(MW)인 경우의 발전 적정성
Table 6. Generating adequacy indices for maximal 3,000(MW) load case

경 우	LOLE [hr/yr]	LOEE [MWh/yr]
RTS	22.290	2,978.1
RTS+25[MW] 풍력발전	18.997	2,524.1
RTS+25[MW] 고정발전	18.687	2,498.6

5. 결 론

- 본 논문에서는 상태샘플링(state sampling)법으로써 풍력발전단지를 포함하는 전력시스템의 발전량 적정성 해석을 하기 위한 풍력발전량모형을 제안하였다.
- 본 논문에서는 계통 부하량과 풍속이 비슷한 주기를 갖는 시간의 함수임에 착안하여 계통 부하량과 풍력발전량간의 상관확률행렬을 만들고, 이를 이용하여 계통 부하량에 부합하는 풍력발전량을 확률적으로 결정할 수 있도록 하였다.
- 본 논문에서는 제안한 방법을 IEEE RTS의 발전량 적정성 평가에 적용하여 타당성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] R. G. Deshmukh and R. Ramakumar, "Reliability Analysis of Combined Wind-Electric and Conventional Generation Systems", Sol. Energy, Vol.28, No.4, pp.345-352, 1982.
- [2] C. Singh and Y. Kim, "An Efficient Technique for Reliability Analysis of Power Systems Including Time Dependent Sources", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.3, pp.1090-1096, August 1988.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Andrea P. Leite, Carmen L. T. Borges, and Djalma M. Falcao, "Probabilistic Wind Farms Generation Model for Reliability Studies Applied to Brazilian Sites", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.21, No.4, pp.1493-1501, November 2006.
- [8] 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.
- [9] 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 전기전자정보시스템공학부 교수.

연승호 (玄升鎬)

1962년 10월 30일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2002년 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 시스템개발팀장. 2002~2004년 명지대학교 전기공학과 차세대 전력기술연구센터 연구교수. 2004년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 조교수.