

풍력발전단지간 풍속의 연관관계를 반영한 확률적 풍속 샘플링 방법

(A Probabilistic Sampling Method for Wind-Speed Considering the Wind-Speed Correlation between Wind-farms)

김광원* · 현승호

(Gwang Won Kim · Seung-Ho Hyun)

Abstract

The wind-speeds among geographically close wind-farms have high correlations seasonally. This paper presents a novel wind-speed sampling method which sincerely reflects the correlation among wind-speeds of different wind-farms. In the proposed method, the wind-speed samples are generated through the statistical data analysis of the measured past wind-speed data and are adequate to be applied to generation adequacy assessment based on random sampling. In the proposed method, the specific probability distribution need not to be assumed and sufficiently accurate wind-speed samples can be generated based only on the measured past data. The proposed method is applied to the two wind-farm problem to show its applicability.

Key Words : Wind-Speed, Correlation Matrix, Random Sampling, Generation Adequacy

1. 서 론

풍력발전에 대한 관심은 지속적으로 증가하여서 2010년 기준으로, 중국은 45GW의 풍력발전설비를 갖추어 미국을 넘어서는 세계 제일 규모의 풍력발전국가 가 되었고[1], 독일과 스페인은 26GW, 20GW의 풍력발전설비를 갖추었는데 이는 각각 해당 국가 연간 침투부하의 33%, 44%에 해당한다[2]. 또한, 향후에도 풍력발

전설비의 증설은 가파르게 증가할 것으로 예상된다.

풍력발전의 경우에는 생산 전력이 바람의 세기(풍속)에 따라 변하므로 원자력발전이나 화력발전과 같이 원하는 시기에 정격출력을 낼 수가 없어서, 시스템의 발전량 적정성 평가(generation adequacy assessment)를 할 때, 풍력발전의 이러한 특성을 반영할 수 있는 적절한 방법을 사용하여야 한다[3-8].

풍속은 풍력발전의 발전량에 직접적인 영향을 미치므로 풍력 발전을 포함한 시스템의 발전량 적정성 평가를 하려면 합리적으로 풍속을 결정하는 방법이 꼭 필요하다. 특히, 다수의 풍력발전단지를 포함하는 시스템에서는, 각 풍력단지의 풍속을 독립적으로 결정할 수 없고, 과거의 풍속 데이터를 분석하여 풍속간 연관관계를 파악하고 이를 바탕으로 풍속을 결정하여야

* 주(교신)저자 : 울산대학교 전기공학부 교수
* Main(Corresponding) author : Professor in the School of EE of Univ. of Ulsan
Tel : 052-259-2186, Fax : 052-259-1686
E-mail : gwangwon@gmail.com
접수일자 : 2013년 4월 16일
1차심사 : 2013년 4월 23일, 2차심사 : 2013년 6월 18일
심사완료 : 2013년 6월 21일

한다.

풍속을 결정하는 방법으로는, ARMA(auto-regressive moving average) 모델로 각 풍속을 모델링 하는 방법이 있으나[3-5], 이는 순차 샘플링(sequential sampling)을 이용한 발전량 적정성 평가에는 적합하지만 비순차 샘플링(random sampling)을 이용한 평가에 이용하기에는 문제가 있다. 일반적으로 비순차 샘플링 문제에는 상호연관계수행렬(correlation coefficient matrix)을 이용한 방법을 적용하여 왔는데 [8], 보편적으로 사용하고 있는 기존의 방법은 풍속을 정규분포의 확률변수로 가정하여 풍속을 결정하므로 풍속의 특징이 비정규분포인 경우에는 무시하지 못할 오차를 초래할 수 있다.

이 문제를 극복하고자 Z. Qin[8]은 풍속이 비정규분포인 경우에도 상호연관계수행렬을 적용할 수 있는 방법을 제시하였는데, 변환 절차가 다소 복잡하고 또한 풍속을 표현하는 확률변수의 누적확률분포함수(cdf)의 역함수를 알아야만 적용할 수 있다는 제약이 따른다.

이에, 본 논문에서는 비순차 모의를 위한 간단하면서도 효과적인 풍속의 결정 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 관측 데이터를 통계적으로 분석하여 풍력 발전단지 풍속간의 연관관계를 수치적으로 결정함으로써 복잡한 계산 절차가 불필요하고, 풍속이 특정 함수로 표현하기 어려운 확률분포를 가지는 경우에도 쉽게 적용할 수 있다.

2. 정규분포를 가정한 풍속 결정법

n 개의 풍력발전단지가 있고, 각 단지에서의 풍속이 정규분포를 이루면서 서로 연관되어 있을 때, 주어진 확률적 연관관계를 유지하면서 정규분포를 이루는 각 단지의 풍속은 다음과 같이 샘플링할 수 있다.

$$H=LG+B \tag{1}$$

- 여기서 H : 각 단지의 풍속 샘플 ($n \times 1$)
- L : 식 (2)를 만족하는 하삼각행렬 ($n \times n$)
- G : 평균이 0인 임의의 정규분포 ($n \times 1$)

B : 각 단지의 평균풍속 ($n \times 1$)

위에서, 행렬 L 은 식 (2)와 같이 풍속의 단지간 상호연관계수행렬 C 를 출레스키 분할(Cholesky factorization)하여 구한다.

$$C=LL^T \tag{2}$$

식 (1)을 보면 L 과 B 는 상수이므로, 지정한 정규분포를 따르는 m 개의 G 를 구하여 식 (1)에 반복적으로 대입하면 단지간 연관관계를 따르는 m 개의 풍속 샘플을 얻을 수 있다.

이 방법은 매우 간단하여 적용이 용이하지만 모든 단지에서의 풍속이 정규분포를 이루는 경우에만 확률적으로 의미있는 샘플링을 할 수 있다.

3. 비정규분포를 가정한 풍속 결정법

Z. Qin 등이 최근에 발표한 방법으로[8], 풍속이 정규분포가 아닌 경우에도 적용할 수 있는 방법이다.

본 방법은 비정규 확률분포 X 를 정규분포 확률분포 Z 에 대응시키고, Z 를 대상으로 2절에서 다룬 방법으로 샘플을 구한 후, 이로부터 다시금 확률분포 X 를 따르는 샘플을 구하는 방법으로, 대체적인 절차는 다음과 같다.

1. 풍속의 단지간 상호연관계수행렬 C_X 를 이용하여 이에 대응되는 정규분포의 상호연관계수행렬 C_Z 를 구한다.
2. 2절에서의 방법으로 풍속샘플 Z_s 를 구한다.
3. 풍속샘플 Z_s 로부터 비정규분포 풍속샘플 X_s 를 구한다.

위의 방법은 상호연관관계를 가지며 비정규 확률분포인 풍속의 샘플을 만드는데 효과적이지만, 해당하는 비정규분포의 누적확률분포함수(cdf)의 역함수를 알아야만하고, 아울러 과정 1에서는 다소 복잡한 수치적 분 및 탐색을 수행해야 한다. 특히, 주어진 풍속 데이터를 정확하게 표현하는 확률분포를 정하기 어려운 경우에는 위의 방법을 이용하여도 원하는 샘플을 얻을 수 없다.

4. 제안하는 방법

제안하는 방법은 기존의 방법과 같이 특정 확률분포를 가정하여 해석적으로 풍속샘플을 구하는 것이 아니라, 관측한 풍속데이터를 통계적으로 분석하여 이에 부합하는 풍속샘플을 생성하는 방법으로 관측한 풍속데이터가 어떠한 분포를 가지더라도 동일한 절차를 통해 관측데이터와 동일한 연관관계와 분포를 갖는 풍속샘플을 생성할 수 있다.

그 절차는 다음과 같은데, 이해를 돕고자 두 군데 가상 풍력발전단지를 가정하고 1,000개의 시간대별 풍속을 가정하여 예를 들었다.

첫째, 각 풍력단지별로 clustering 알고리즘을 이용하여 풍속 수준을 적절한 개수의 클러스터로 단계화(quantized)한다. 예에서는 10개로 clustering하였고, 각 클러스터 중심은 표 1과 같다.

표 1. 단지별 풍속의 클러스터 중심
Table 1. Cluster center for each wind-farm

번호	단지1	단지2
1	2.54	2.64
2	4.00	4.35
3	5.21	5.65
4	6.35	6.81
5	7.35	7.86
6	8.33	8.92
7	9.45	10.06
8	10.85	11.35
9	12.53	13.03
10	15.14	15.15

둘째, 동일 시간대에서 두 단지의 풍속이 속하는 클러스터 번호를 짝짓고, 모든 짝의 빈도를 세어 표 2와 같은 상호연관빈도행렬을 만든다. 예를 들어, 표 2의 2행 3열의 원소는 29인데, 이는 단지 1에서의 풍속이 3번 클러스터 중심인 5.21m/s일 때, 단지 2에서의 풍속이 2번 클러스터 중심인 4.35m/s인 경우가 전체 1,000번 중에서 29번이었음을 의미한다. 이로써, 풍속데이터의 통계적 분석은 마무리되었고 다음 단계부터는

풍속 샘플을 생성하는 과정이다.

표 2. 상호연관빈도행렬
Table 2. Correlation frequency matrix

단지1 \ 단지2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20	17	16	4	2	0	0	0	0	0
2	23	38	29	14	11	2	1	0	0	0
3	14	42	35	26	15	5	4	1	1	0
4	10	32	40	40	26	14	7	1	0	0
5	1	10	22	31	27	25	6	7	0	0
6	2	8	17	28	33	17	23	11	2	0
7	0	3	6	14	25	19	28	12	6	0
8	0	0	3	4	4	13	18	13	8	3
9	0	0	0	2	4	8	9	8	15	2
10	0	0	0	0	0	0	2	1	5	5
합	70	150	168	163	147	103	98	54	37	10

셋째, 상호연관빈도행렬의 각 열의 원소를 합하면 단지1의 각 풍속 클러스터의 빈도가 되며 표 1의 마지막 행에 추가하였다. 이를 빈도의 전체 합으로 나누면 (여기서는 1,000) 각 클러스터의 발생 확률이 된다. 이 발생확률에 따라 풍력단지1의 풍속을 결정한다. 그림 1은 표 2의 마지막 행으로부터 구한 풍력단지1의 풍속 확률분포이다.

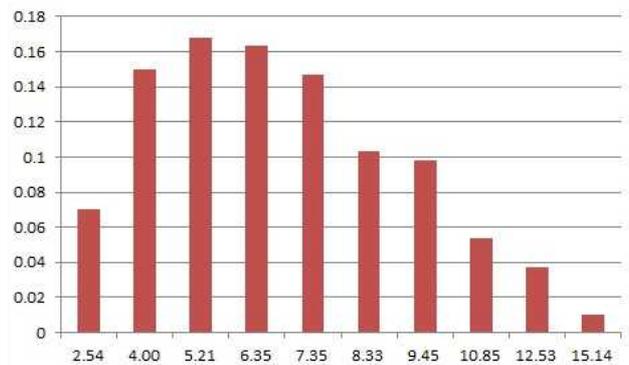
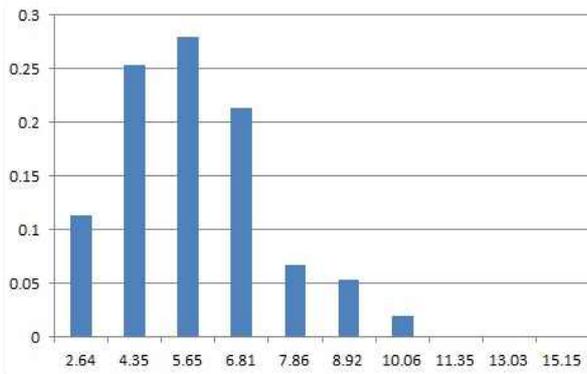
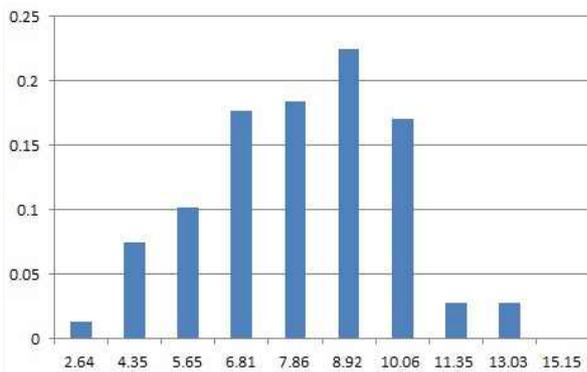


그림 1. 풍력단지 1의 풍속 확률분포
Fig. 1. Wind-speed probability distribution of wind-farm 1

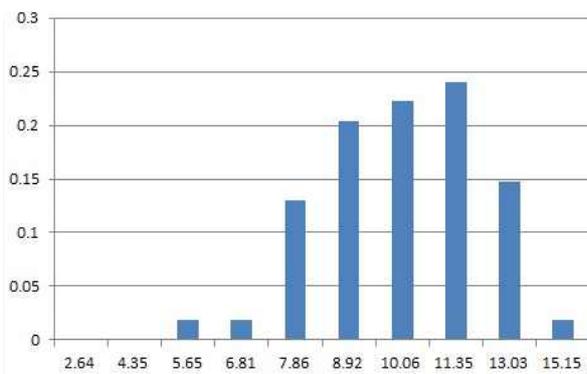
넷째, 위의 단계에서 구한 풍력단지1의 풍속에 따른



(a) 풍력단지1의 풍속이 2번 클러스터인 경우
(a) When the cluster center 2 is wind-speed of wind-farm 1



(b) 풍력단지1의 풍속이 5번 클러스터인 경우
(b) When the cluster center 5 is wind-speed of wind-farm 1



(c) 풍력단지1의 풍속이 8번 클러스터인 경우
(c) When the cluster center 8 is wind-speed of wind-farm 1

그림 2. 풍력단지 1의 풍속에 따른 풍력단지 2 풍속의 확률분포

Fig. 2. Wind-speed probability distribution of wind-farm 2 according to the wind-speed of wind-farm 1

풍력단지2의 풍속을 결정한다. 예를 들어, 위의 단계에서 2번 클러스터가 풍력단지1의 풍속이면 풍력단지2의 풍속은 표 1의 두 번째 열에 해당하는 확률분포에 따라 결정하여야 한다. 그림 2는 풍력단지1의 풍속이 각각 2번, 5번, 8번 클러스터인 경우의 풍력단지2의 풍속 클러스터를 결정하는데 사용되는 확률분포이며, 각각 표 1의 2열, 5열, 8열로부터 구성하였다.

위의 셋째, 넷째 단계를 반복적으로 수행하면 원하는 개수의 풍속 샘플을 얻을 수 있다. 한편, 풍력단지가 n 개인 경우에는 $n-1$ 개의 상호연관빈도행렬을 만들어야 하는데, 각 단지의 풍속간 상호연관계수 (correlation coefficient)가 가장 큰 단지간의 상호연관빈도행렬을 만드는 것이 바람직하다.

제안한 방법은 관측한 데이터에 내재되어 있는 확률변수간의 통계적인 연관성만을 이용하여 동일한 연관성을 갖는 샘플을 생성하므로 확률변수가 어떠한 형태의 확률분포를 갖더라도 동일한 절차에 따라 샘플을 생성할 수 있다.

5. 사례연구

본 사례연구에서는 2절에서 소개한 ‘정규분포를 가정한 샘플링 방법’과 제안하는 방법을 비교하였다.

3절에서 소개한 방법은 잘 적용하면 샘플링 결과의 정확도가 제안한 방법과 비슷하지만, 3절의 방법을 잘 적용하려면 관측데이터의 특징을 잘 표현하는 확률분포를 찾아야 하는 어려움이 있다. 결론적으로, 잘 적용한다고 가정하면 샘플링 결과의 만족도가 제안하는 방법과 비슷하므로 정량적인 비교에서는 제외하였다.

본 사례연구에서는 두 개의 풍력단지를 가정하였는데, 각 풍력단지의 모든 풍력발전기의 정격 발전량의 합은 공히 80MW로 하였고, 컷인(cut-in), 정격, 컷아웃(cut-out) 풍속은 각각 4m/s, 11m/s, 20m/s로 가정하였다. 또한, 컷인풍속과 정격풍속 사이의 풍력발전량은 일반적으로 사용하는 3차 다항식으로 모델링하였다.

두 풍력단지의 가상 관측풍속은 각각 1,000개씩 가정하였고, 제안한 방법에서는 이를 각각 100개의 클러스터로 clustering 하였으며, 2절에서 소개한 방법(기

존방법) 및 제안한 방법을 적용하여 각각 10,000개의 샘플을 생성하여 결과를 비교하였다. 즉, 가상 관측풍속에 따른 두 풍력단지의 발전량의 합을 참값이라고 하고, 가상 관측풍속을 이용하여 기존 방법 및 제안한 방법으로 풍속모델을 만들고 각 모델에서 생성한 풍속샘플에 따른 두 풍력단지의 발전량의 합을 ‘기존’ 및 ‘제안’한 방법의 결과라고 하여 참값과 비교하였다.

1,000개의 가상 관측풍속을 생성하는 방법은 다음과 같다. 일단, 두 풍력발전단지의 공통 기본 풍속을 기본 확률변수로 생성하고, 이어서 풍력단지별로 서로 다른 확률변수를 더하여 각 단지별 풍속을 생성한다. 그림 3~그림 6에서 사용한 기본 확률변수와 더한 확률변수는 각각 표 3과 같다.

표 3 에서, m 과 σ 는 정규분포의 평균과 표준편차이고, α 와 β 는 와이블분포의 scale 파라메타와 shape 파라메타이다.

개별 단지의 풍속의 확률분포뿐만 아니라 두 발전단지간 풍속의 연관관계도 잘 반영하였는지를 가늠하기 위하여, 결과 비교에서 두 풍력발전단지의 발전량 합을 비교하였다. 즉, 1,000개의 가상 풍속에 따른 전체 발전량의 확률분포와 10,000개의 샘플 풍속에 따른 전체 발전량의 확률분포를 비교하였다.

표 3. 가상 풍속의 확률분포
Table 3. Assumed wind-speed probability distribution

그림번호	기본확률변수	더한 확률변수
그림 3	정규분포 $m = 5, \sigma = 2$	정규분포 $m = 2.5, \sigma = 1$
그림 4	와이블 분포 $\alpha = 5, \beta = 2$	와이블 분포 $\alpha = 3, \beta = 2$
그림 5	uniform 분포 구간 [2, 7]	uniform 분포 구간 [1, 5]
그림 6	와이블 분포 $\alpha = 5, \beta = 2$	uniform 분포 구간 [1, 5]

그림 3~그림 6은 위의 3가지 확률분포를 비교하는 그래프이다. 그림에서 수평축은 발전량인데, 두 풍력단지의 발전량의 합은 0~160MW이고 이를 12개의 구

간으로 구분하여 각 구간의 확률을 그래프에 막대로 나타내었다. 그래프에서 첫 막대는 1,000개의 가상 관측풍속에 따른 발전량 분포이고(참값), 밝은 색으로 표시한 두 번째 막대는 2절에서 설명한 기존방법, 세 번째 막대는 제안한 방법으로 생성한 샘플에 따른 발전량 분포이다.

그림은 살펴보면, 제안한 방법은 모든 경우에서 기존의 방법보다 참값(가상 관측풍속에 따른 발전량의 확률분포)에 더 가까운 결과를 보였다.

제안한 방법은 확률변수에 관계없이 고른 성과를 보였는데, 특히 그림 6의 경우에는 가상 풍속데이터에 서로 다른 확률분포가 섞여있음에도 원래의 발전량 분포와 거의 유사한 결과를 보였다. 이는, 제안한 방법이 특정 확률변수를 가정하지 않고 자료에 내재되어 있는 통계적 관계를 따르는 샘플을 생성하였기 때문이다.

표 4에는 본 사례연구의 결과를 보다 정밀하게 비교하기 위하여 기존방법과 제안하는 방법의 예측 오차를 수록하였다. 표 4는 그림 3~그림 6의 결과로부터 만들었으며 기존 방법은 오차범위가 9.1~12.6% 인데 비하여 제안하는 방법은 2.6~5.0% 으로 오차가 절반 이하임을 알 수 있다.

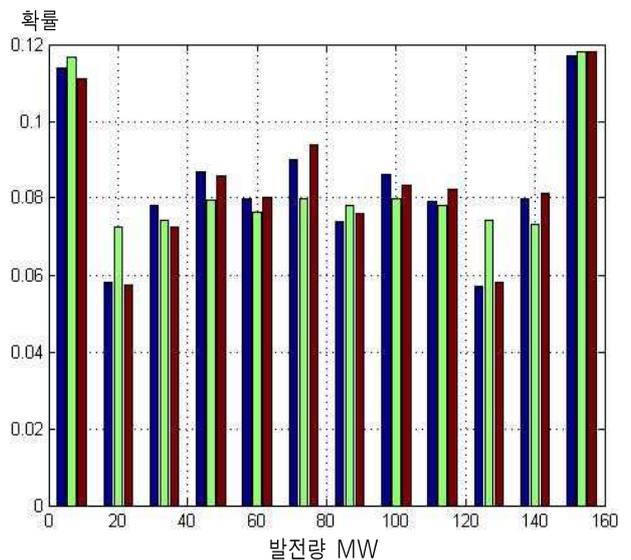


그림 3. 사례연구 결과 1
Fig. 3. Result 1 of the case study

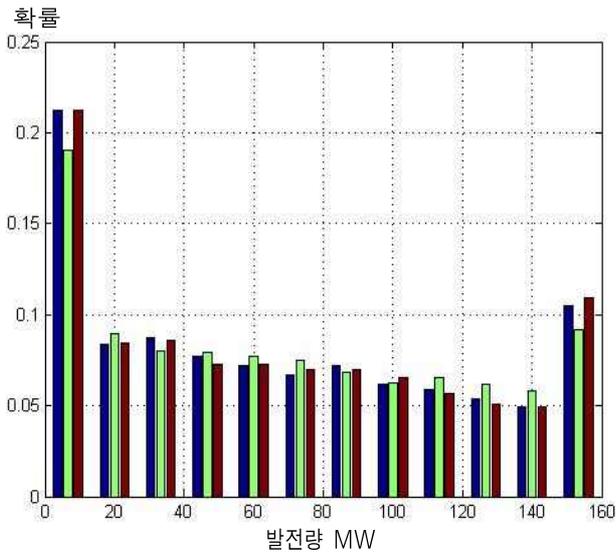


그림 4. 사례연구 결과 2
Fig. 4. Result 2 of the case study

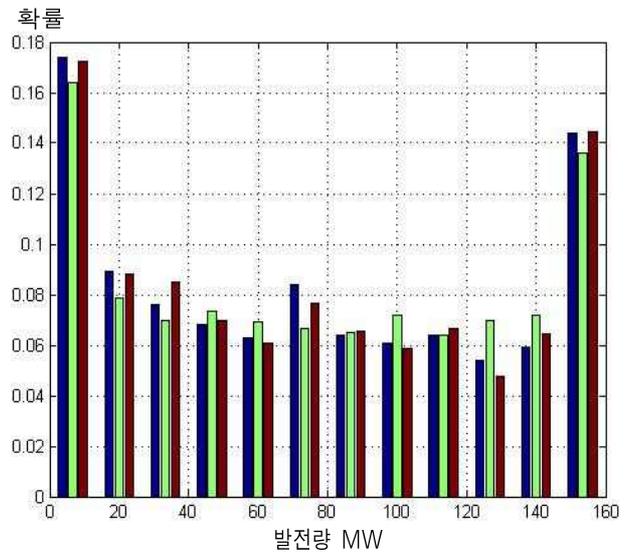


그림 6. 사례연구 결과 4
Fig. 6. Result 4 of the case study

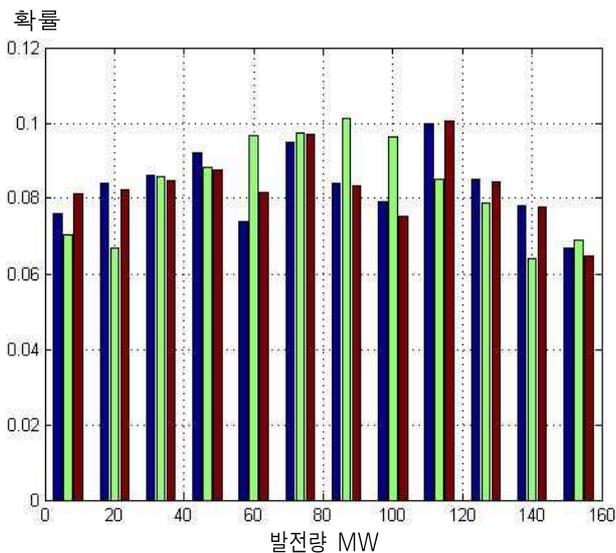


그림 5. 사례연구 결과 3
Fig. 5. Result 3 of the case study

본 사례연구에서는 클러스터의 개수를 풍속데이터의 10%정도로 하였는데, 이는 클러스터의 개수가 너무 적으면 샘플로 발생시킨 풍속이 가질 수 있는 값의 종류가 너무 적어지게 되어 이를 방지하고자 100개 정도의 클러스터를 둔 것이고, 관측한 풍속데이터가 증가하더라도 클러스터의 개수를 이에 비례하여 증가시킬 필요는 없다.

표 4. 기존방법과 제안한 방법의 오차비교(%)
Table 4. Error comparison between the conventional and proposed method(%)

발전량 MW	사례검토1		사례검토2		사례검토3		사례검토4	
	기존	제안	기존	제안	기존	제안	기존	제안
6.7	2.4	2.5	10.1	0.3	7.2	6.8	5.9	0.9
20.0	24.7	1.0	6.4	0.7	20.2	2.1	11.8	1.0
33.3	4.9	7.3	7.6	1.6	0.4	1.4	7.9	11.7
46.7	8.5	1.5	3.4	5.2	3.9	4.9	8.2	2.2
60.0	4.8	0.3	7.1	1.3	30.5	10.1	9.7	3.2
73.3	11.3	4.4	11.6	3.7	2.3	2.0	21.0	8.8
86.7	5.3	2.6	5.1	2.8	20.6	0.8	1.9	2.7
100.0	7.3	2.9	1.0	5.8	22.0	4.7	17.5	3.8
113.3	1.3	4.3	11.0	4.6	14.9	0.6	0.3	4.2
126.7	30.0	2.1	14.8	6.3	7.4	0.6	29.3	12.0
140.0	8.4	1.6	18.6	1.4	18.0	0.5	21.4	9.0
153.3	1.0	0.8	12.8	4.4	3.1	3.6	5.4	0.4
평균	9.2	2.6	9.1	3.2	12.6	3.2	11.7	5.0

6. 결 론

본 논문에서는 풍력발전단지간 풍속의 연관관계를 고려하여 풍속의 샘플을 발생시키는 새로운 방법을

제안하였다. 제안한 방법은 풍속을 표현할 확률변수의 분포 형태를 가정할 필요도 없고, 복잡한 수학적 연산도 필요로 하지 않으며 단지 과거에 관측한 풍속데이터만을 대상으로, 데이터 내에 내재되어 있는 연관관계를 통계적으로 추출하여 샘플을 생성한다.

사례연구에서는 두 개의 풍력발전단지를 포함하는 전력시스템의 풍력발전량 산정에 제안한 방법과 기존의 방법을 적용하여, 제안한 방법의 효용성을 검증하였다.

References

- [1] L. Jiang, et. al., "Wind Energy in China", IEEE Power and Energy, Vol.9, No.6, pp.36-46, November 2011.
- [2] H. Holttinen, et. al., "Currents of Change", IEEE Power and Energy, Vol.9, No.6, pp.47-59, November 2011.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Gwang Won kim, "A Random Sampling Method for Generation Adequacy Assessment Including Wind-Power", Journal of KIIE, Vol.25, no.5, pp.45-53, May 2011.
- [8] Z. Qin and W. Li, "Generation System Reliability Evaluation Incorporating Correlations of Wind Speeds With Different Distributions", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.28, No.1, pp.551-558, February 2013.

◇ 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.



현승호 (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 전기공학부 부교수.