

신뢰도비용을 고려한 풍력발전에 연계된 배터리의 최적 용량에 관한 연구

논문
60-2-7

A Study on Optimal Battery Capacity with Windfarm Considering Reliability Cost

김 옥 원* · 김 성 열** · 김 규 호*** · 김 진 오†
 (Wook-Won Kim · Sung-Yul Kim · Kyu-Ho Kim · Jin-O Kim)

Abstract - By introducing RPS(Renewable Portfolio Standard) for reduction of greenhouse gas, Renewable energy has becoming widespread gradually. Due to a large number of advantages, wind power, which is one of Renewable energy, has standing in the spot-light rather than other Renewable energy. Wind power, however, is difficult to control output and because of severe output fluctuation, it would cause some problems when it is connected with system. Using battery as a solution for these problems has been researched all over the world. In this paper, the reliability modeling of windfarm connected battery and reliability evaluation of system are executed. Also the optimum battery capacity is selected through evaluating reliability cost.

Key Words : Optimal capacity, Wind turbine, Battery, Reliability cost

1. 서 론

온실가스 저감을 위한 RPS(Renewable Portfolio Standard) 제도의 도입예정으로서 인하여 신재생 에너지의 보급이 가속화 되고 있는 실정이다. 현재까지 신재생에너지원으로 가장 주목받는 것은 풍력발전이다. 하지만 날씨에 종속적인 발전으로 출력 제어가 어렵다. 이로 인해 날씨가 변함에 따라 출력이 변하며 계통과 연계되었을 때 전압변동, 주파수변동 등 여러 가지 문제점이 발생한다[1][2]. 이를 해결하기 위한 방안중 하나가 저장장치를 연계하여 출력을 안정시키는 방법이다. 저장장치는 여러 가지가 있지만 풍력의 용량과 출력안정의 목적을 고려해 보면 반응성이 빠르고, 용량을 쉽게 조절할 수 있는 2차 전지가 주목 받고 있다. 풍력발전을 안정시키기 위한 2차 전지의 용량은 크면 클수록 좋으나 용량 대비 높은 단가로 인하여 원하는 만큼의 용량을 연계하기는 어려운 실정이다. 이에 본 논문에서는 풍력발전을 중심으로 배터리가 연계된 계통에 관한 신뢰도 모델링을 제안하고 이것을 통한 신뢰도 비용을 평가한다. 이를 통해 최적의 배터리용량을 산정한다.

2. 풍력발전의 신뢰도 모델링

2.1 풍력발전 출력 예측

풍력발전은 보통 그림 1과 같은 출력특성을 가진다.[3]

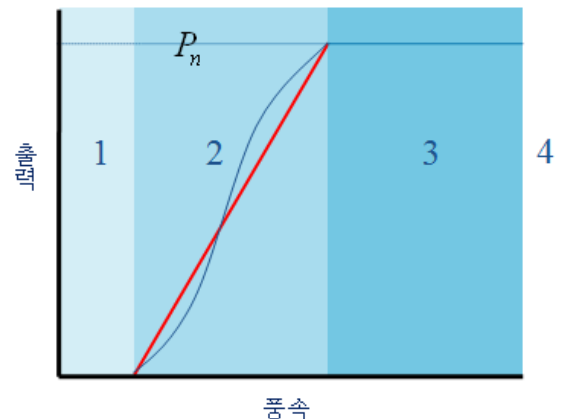


그림 1 풍력발전기의 출력특성
 Fig. 1 The output characteristic of wind turbine

1번 구간은 풍속이 약해 출력이 0인 cut-in구간이고 2번은 출력이 증가하는 구간 3번은 정출력구간 4번은 고풍속으로 인해 풍력발전기를 보호하기 위해 발전을 정지하는 cut-out구간이다. 풍속에 따른 출력 특성을 나타내면 식(1)과 같이 근사화 할 수 있다. 본 논문에서는 다수의 풍력발전기가 설치된 wind farm에 대한 식으로 모델링한다.

* 준 회원 : 한양대학교 전기공학과 석사과정
 ** 정 회원 : 한양대학교 전기공학과 박사과정
 *** 시니어회원 : 한경대학교 전기공학과 교수
 † 교신저자, 정회원 : 한양대학교 전기공학과 교수
 E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
 접수일자 : 2010년 9월 15일
 최종완료 : 2010년 12월 14일

$$\begin{aligned}
 P_w &= 0 & 0 < W_s < W_{cut-in}, \text{ and } W_{cut-out} < W_s \\
 P_w &= N \left(\frac{P_n}{W_n - W_{cut-in}} W_s - \frac{P_n}{W_n - W_{cut-in}} W_n \right) & W_{cut-in} < W_s < W_n \\
 P_w &= NP_n & W_n < W_s < W_{cut-out}
 \end{aligned} \tag{1}$$

N 은 wind farm의 출력량을 나타낸다. P_n 은 풍력발전기의 최대 출력을 나타낸다. N 과 W 는 각각 설치된 풍력발전기의 대수 및 풍속을 나타낸다.

2.2 풍속별 고장률 모델링

기존 풍력발전기의 고장률은 평균 고장률을 기준으로 하였다. 하지만 실제 풍력발전기의 경우 바람에 의한 고장이 많은 부분을 차지하며[4] 이에 따라 풍속에 따라 다른 고장률을 적용하는 것이 신뢰도 모델링의 오차를 줄이는데 적합하다. 풍속에 따른 고장률은 그림 2와 같다. 풍속이 0에서 cut-in 까지 λ_L 정출력을 내는 구간까지 λ_M 그리고 cut-out 이상의 풍속일 때 λ_H 라고 정의하였다.

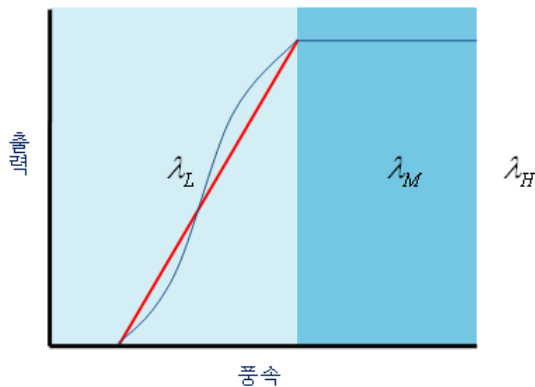


그림 2 풍력발전의 풍속별 고장률
Fig. 2 Failure rate for wind speed of wind turbine

그림 2를 통해 평균고장률 λ_n 이라고 했을 때 풍속의 구간에 따라 고장률을 3가지로 나누면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \lambda_n &= \frac{S_L}{S_L + S_M + S_H} \lambda_L + \frac{S_M}{S_L + S_M + S_H} \lambda_M + \frac{S_H}{S_L + S_M + S_H} \lambda_H \\
 \lambda_L &= \lambda_n \frac{S_L + S_M + S_H}{S_L} (1 - F_M - F_H) \\
 \lambda_M &= \lambda_n \frac{S_L + S_M + S_H}{S_M} F_M \\
 \lambda_H &= \lambda_n \frac{S_L + S_M + S_H}{S_H} F_H
 \end{aligned} \tag{2}$$

s 는 각 풍속이 유지되는 시간을 의미한다. 그리고 F 는 각

풍속에서 고장이 발생하는 확률을 의미하므로 0과 1사이의 값을 가진다.

2.3 풍력발전의 상태 모델링

풍속의 분포는 와이블 분포로 모델링하는 것이 일반적이다. 풍력 발전량은 이러한 풍속 분포와 발전기별 출력특성에 의해 결정된다. 하지만 실제 신뢰도 모델링에는 풍속의 변화에 따른 발전량의 변화뿐만 아니라 발전기의 고장도 고려해 주어야 한다. wind farm에 N 개의 풍력발전기가 있다고 했을 때, 풍력발전기의 상태 모델링은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다[5].

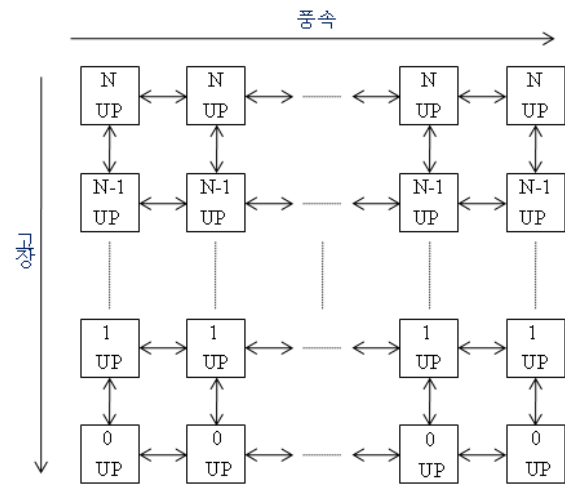


그림 3 wind farm의 상태 모델링
Fig. 3 state modeling of wind farm

가로축은 풍속의 변화에 따른 출력의 변화이고 세로축은 고장에 따른 상태변화이다. 이때 wind farm의 풍력발전기는 모두 동일하다고 가정하였다. 세로로 천이하는 고장률과 수리율은 각각 통계에 의해 정해진다. 풍속별 천이율은 식(3)과 같이 정의 된다.

$$\lambda_{ij} = \frac{n_{ij}}{T_i} \tag{3}$$

n 은 i 에서 j 까지의 천이 횟수 이고 T 는 i 상태에 머문 총 시간을 나타낸다. 그림 3의 모델링을 실제로 적용하기에는 너무 복잡하기 때문에 용량이 비슷한 상태들은 병합을 통해 그림 과 같이 간단하게 만들 수 있다. 이는 필요에 따라 상태의 개수를 조정할 수 있으며 많은 상태를 가질수록 계산은 복잡해지지만 더 정밀하게 계산할 수 있다. 용량이 비슷한 상태끼리 병합할 때에는 식 (4)~(8)을 이용하여 병합할 수 있다[6].

$$C_k B C_1 B C_2 B \dots B C_i \tag{4}$$

$$p_k = \sum p_i \tag{5}$$

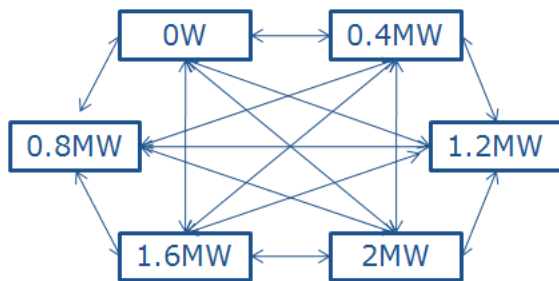
$$f_{+k} = \sum p_i \lambda_{+i} - \sum_{(x,y) \in A_k} p_x \lambda_{xy}$$

$$f_{-k} = \sum p_i \lambda_{-i} - \sum_{(x,y) \in A_k} p_y \lambda_{yx}$$
(6)

$$\lambda_{\pm k} = \frac{f_{\pm k}}{p_k}$$
(7)

$$f_k = p_k (\lambda_{+k} + \lambda_{-k})$$
(8)

C, p, f는 각각 상태 i에 대한 용량, 확률, 빈도수를 나타낸다. 첨자 k는 새로 병합될 상태를 나타내며, +k, -k는 k상태에서 상위 상태 혹은 하위 상태로의 전이 빈도를 나타낸다. 비슷하게 λ_+ , λ_- 는 상위 상태 혹은 하위 상태로의 전이율을 나타낸다. 그림 4는 6state 모델로 나타내었을 때 개념도 이다.



6 state model

그림 4 windfarm 상태 모델링(6state)
Fig. 4 windfarm state modeling(6state)

3. 풍력과 배터리의 연계

3.1 배터리 충방전 시나리오

전력저장 장치를 이용한 출력의 제어 방식에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 정밀한 부하 예측을 통한 출력을 예측하여 계획 발전량을 공급하는 방식이다. 이 방식은 고도의 발전 예측 기술, 계획 발전 기술과 출력 제어 기술이 요구된다. 또한 출력 변동 제어도 동시에 요구된다. 두 번째는 출력변동제어로서 주로 전압, 주파수 변동을 완화시키는 것을 주목적으로 한다. 즉, 먼저 합성 출력목표를 선정 하고 실제 발전량과 차이만큼 충 방전을 하는 방식이다. 본 논문에서는 출력변동제어 방식을 적용하였다.

3.2 배터리의 신뢰도 모델링

풍력발전의 출력을 안정시키기 위한 배터리의 용량은 크면 클수록 좋다. 하지만 현실적으로 어려운 점이 많기 때문에 풍력발전의 출력을 완전하게 안정시키기는 어렵다. 이런 용량의 제한으로 인하여 충전완료 혹은 방전완료시 대기 상태가 생기게 된다. 이를 상태 모델링으로 나타내면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

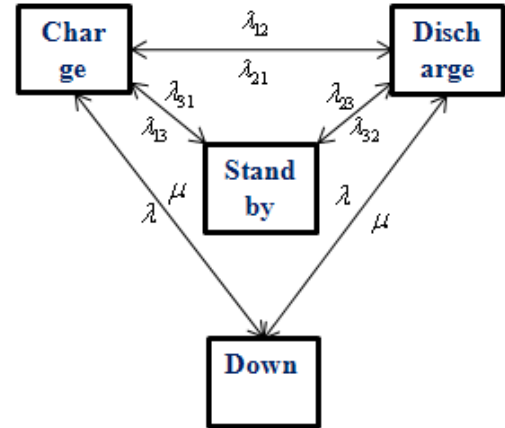


그림 5 배터리의 상태모델링
Fig. 5 state modeling of battery

λ 는 각 상태간의 전이율을 나타내고 μ 는 수리율을 나타낸다. 충전 시나리오에 의해 충, 방전 상태를 천이하게 되며 배터리의 용량 제한으로 인하여 충전 완료, 혹은 방전 완료시 대기 상태로 들어가게 된다. 배터리 고장 시에는 down 상태로 천이한다.

4. 신뢰도 비용 평가

그림 3, 4, 5의 windfarm과 배터리 모델링을 통하여 풍속과 고장에 의한 출력변동에 따른 각 출력의 발생 확률을 구할 수 있다. 이와 함께 부하곡선을 이용하여 식 (9)와 같이 계통의 EENS(Expected Energy Not Supplied)를 구할 수 있다. 신뢰도 비용은 IEAR(Interrupted Energy Assessment Rate)을 이용하여 산출한다.[7]

$$EENS = \sum_i^N p_i E_i$$
(9)

5. 사례연구

5.1 배터리가 연계된 풍력발전의 신뢰도 평가

사례연구에 사용된 풍력발전기와 배터리의 데이터는 표 1과 같다.

표 1 풍력발전기와 배터리 데이터
Table 1 Data of wind turbine and battery

	풍력	배터리
출력	400KW	가변
cut-in speed	4m/s	.
rated speed	15m/s	.
cut-out speed	25m/s	.
평균 고장률	0.01f/year	0.01f/year
수리율	0.1f/year	0.1f/year

풍력 발전기의 평균 고장률을 0.01f/year라고 가정하였다. (2)를 통해 풍속별 고장률을 계산하면 표 2와 같이 나타난다. 사례연구에 사용된 풍속 데이터를 이용하였을 때 s는 각각 7140분, 2280분, 60분이고, F는 각각 10%, 60%, 30%라고 가정하였다.

표 2 풍력발전기의 풍속별 고장률
Table 2 Failure rate according to wind speed

풍속(m/s)	고장률(f/year)
0-15	0.0013
15-25	0.0249
25이상	0.474

풍속의 물리적인 영향으로 고출력 부분의 고장률이 높아지기 때문에 결과적으로 신뢰도는 낮아질 것이다. 하지만 날씨효과에 따른 고장률을 반영함으로써 좀 더 실제에 가까운 값을 구할 수 있을 것이다.

사례연구에 사용된 배터리데이터는 NaS를 기본으로 하였다. 배터리는 wind farm 최대 발전량대비 0%부터 44%까지 변화시키면서 EENS를 측정하였다.

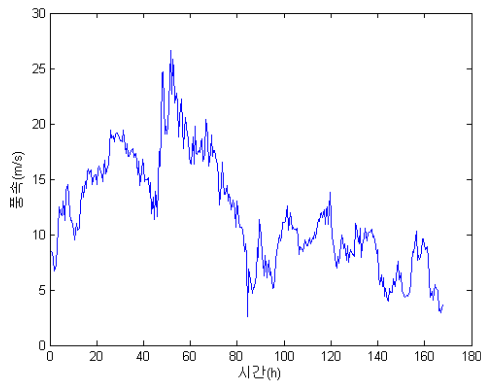


그림 6 풍속 데이터
Fig. 6 wind speed data

그림 6은 제주도 고산 기상대 2010년 1월4일부터 1주일간의 풍속이다. 30분 간격으로 측정된 자료와 식(1)을 이용하여 산출한 출력량은 그림 7과 같다.

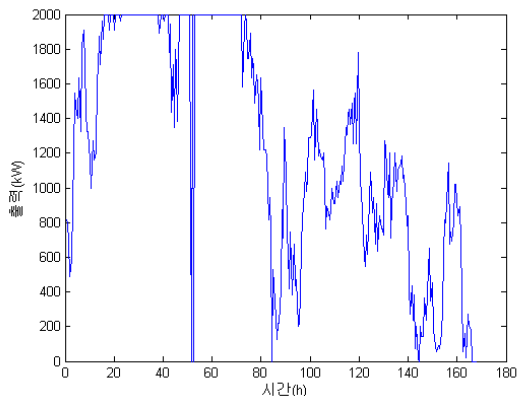


그림 7 풍력발전기의 출력 그래프
Fig. 7 The output graph of Wind turbine

배터리가 연계된 출력변동제어를 위하여 출력 목표치를 6시간 출력 예측 평균치로 설정하였다. 배터리의 용량을 0%에서 44%까지 증가시키면 출력의 변화는 그림 8과 같은 형식으로 나타난다. 이는 최대 풍력출력 대비 8%용량의 배터리를 연계했을 때 이다. 이때의 배터리 충방전 그래프는 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

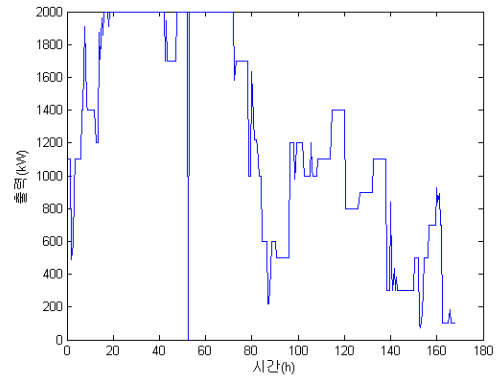


그림 8 배터리가 연계된 풍력발전의 출력 그래프(8%)
Fig. 8 The output graph of Wind turbine with battery(8%)

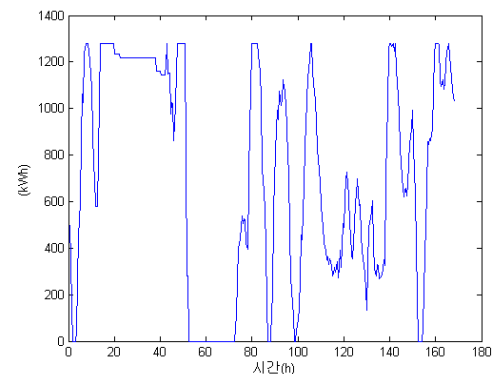


그림 9 배터리의 상태 그래프(8%)
Fig. 9 The state graph of battery(8%)

배터리와 풍력을 연계함으로써 풍력의 출력변동을 배터리의 용량에 따라 그림 8과 같이 안정시킬 수 있다. 이는 전력품질의 향상을 가져올 것이다. 그림 8을 통해 앞에서 언급된 풍력발전의 신뢰도 모델링을 적용하면 windfarm의 각 상태의 확률을 구할 수 있다. 마찬가지로 그림 9를 통해 배터리의 각 상태에 대한 확률을 구할 수 있을 것이다. EENS를 구하기 위하여 부하는 출력 목표치의 80%로 설정하였다. 배터리의 용량을 0에서 44%까지 4%단위로 변화 시키면서 EENS를 측정하였고 표 3에 나타내었다. 표 3을 보면 배터리 용량이 증가할수록 EENS가 감소하고 결과적으로 신뢰도는 향상함을 알 수 있다.

5.2 비용 평가

신뢰도 비용은 IEAR을 이용하여 구한다. 배터리 용량의 증가에 따른 EENS에 IEAR을 적용하였다. 배터리의 고정

비용은 700원/Wh, IEAR=4180원/kWh라고 가정 하였다. ECOST (Expected interruption Cost)와 고정비, 총비용을 표 3에 나타내었다.

표 3 배터리연계에 따른 비용변화

Table 3 Cost according to battery capacity

	EENS (kWh/year)	ECOST (천원/year)	고정비 (천원/year)	총비용 (천원/year)
0%	306,944	1,283,024	0	1,283,024
4%	245,423	1,025,866	224,000	1,249,866
8%	200,850	839,554	448,000	1,287,554
12%	166,847	697,422	672,000	1,369,422
16%	101,522	424,362	986,000	1,320,362
20%	69,135	288,985	1,120,000	1,408,985
24%	50,007	209,027	1,344,000	1,553,027
28%	226	943	1,568,000	1,568,943
32%	27	301	1,792,000	1,792,301

이를 그래프로 나타내면 그림 10과 같다.

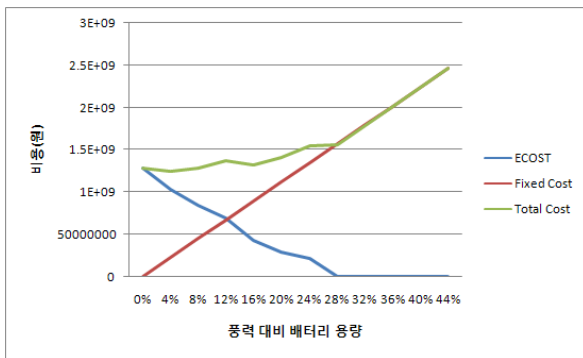


그림 10 총비용 그래프

Fig. 10 The graph of total cost

위의 그래프를 보면 최소 비용을 가지는 4% 지점이 신뢰도 비용을 고려한 최적 지점이라고 할 수 있다. 고정비를 고려하지 않고 단순히 신뢰도의 향상만을 고려하더라도, 28% 이상 투자하는 것은 의미가 없어 보인다. 풍력발전량만을 고려했기 때문에 신뢰도 더 나쁘게 나올 것을 예상하더라도 아직까지는 높은 배터리 단가로 인하여 대용량의 배터리 뱅크의 설치는 경제적으로 이득이 크지 않음을 알 수 있다. 하지만 배터리의 단가는 점차 감소하는 추세이기 때문에 가까운 미래에 배터리는 풍력출력변동 제어를 통해 풍력발전의 전기 가치는 높이는 유용한 수단이 될 것이라 사료된다.

6. 결 론

본 논문에서는 풍력발전의 출력을 안정화하기 위하여 배터리와 연계했을 때 이에 대한 신뢰도 모델링과 신뢰도 비용 평가를 통한 최적의 용량을 산정하는 기법에 대해 제안

하였다. 신뢰도 모델링에는 날씨 효과 및 고장확률을 모두 고려 할 수 있게 하였다. 사례연구에서 배터리의 용량을 증가시키면서 신뢰도 평가를 하였고 이를 통해 신뢰도 비용을 산출하였다. 이와 함께 배터리 고정비용을 고려해 최소의 비용을 가지는 지점을 최적설치 용량으로 선정하였다. 본 논문에서 제안된 기법은 배터리 설치비용과의 저장장치를 이용한 출력변동제어를 통하여 풍력발전단지의 전력가치를 향상시키기 위한 배터리의 용량선정에 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2008-38) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, 1st ed. New York:Wiley, 2005.
- [2] S. Kennedy, "Wind power planning: Assessing long term costs and benefits," Energy Policy, volume. 33, pp. 1661-1675, 2005.
- [3] Xu Liu, Islam, S., Chowdhury, A.A., Koval, D.O., "Reliability evaluation of a wind-diesel-battery hybrid power system" ,Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, pp. 1 - 8, 2008.
- [4] 고정남, 강문중, 허종철 "행원 풍력발전단지에서 풍력발전시스템의 운전특성", 한국태양에너지학회논문집 제27권 제1호 pp.1-9, 2007년 3월.
- [5] Dobakhshari, A.S., Fotuhi-Firuzabad, M., "A Reliability Model of Large Wind Farms for Power System Adequacy Studies" Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume: 24 , Issue: 3, pp. 792-801, 2009.
- [6] Roy Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems", Plenum Press, 1992.
- [7] Roy Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1996.

저 자 소 개



김 옥 원 (金 旭 源)

1981년 6월 6일생. 2008년 8월 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 현재 동대학원 전기공학과 석사과정 재학중.
E-mail : neocruser@hanyang.ac.kr



김 성 열 (金 成 烈)

1980년 3월 23일생. 2007년 2월 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2009년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학중

E-mail : psl@hanyang.ac.kr



김 규 호 (金 圭 浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년 안산공과대학 전기과 부교수, 2010년 현재 국립환경대학교 전기공학과 교수

E-mail : kyuhoh@hknu.ac.kr



김 진 오 (金 鎭 吾)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전기제어생체공학부 교수.

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr