

풍력발전과 전기자동차가 전력계통의 신뢰도에 미치는 영향 평가

Impact Analysis of Wind Power on Power System Reliability with Electric Vehicles

김 담* · 박 현 곤* · 권 현 규* · 박 종 근*

(Dam Kim · Hyeongon Park · Hungyu Kwon · Jong-Keun Park)

Abstract - An increasing number of electric vehicles (EVs) in power system affects its reliability in various aspects. Especially under high EV penetration level, new generating units are required to satisfy system's adequacy criterion. Wind power generation is expected to take the major portion of the new units due to environmental and economic issues. In this paper, the system reliability is analyzed using Loss of Load Expectation (LOLE) and Expected Energy Not Served (EENS) under each and both cases of increasing wind power generation and EVs. A probabilistic multi-state modeling method of wind turbine generator under various power output for adequate reliability evaluation is presented as well. EVs are modeled as loads under charging algorithm with Time-Of-Use (TOU) rates in order to incorporate EVs into hour-to-hour yearly load curve. With the expected load curve, the impact of EVs on the system adequacy is analyzed. Simulations show the reliability evaluation of increasing wind power capacity and number of EVs. With this method, system operator becomes capable of measuring appropriate wind power capacity to meet system reliability standard.

Key Words : Wind power, Electric vehicle, Reliability

1. 서 론

끊임없이 변동하는 유가와 더불어 CO2 배출 감소의 의무 및 화석연료의 고갈로 인한 친환경에너지원의 개발과 보급을 장려하는 것도 이미 최근의 일은 아니다. 또한 국가적인 차원의 에너지 안보 측면에서도 친환경에너지원의 중요성은 지속적으로 증가하고 있다. 한편, 2011년 일본 후쿠시마 원전사고로 인한 원자력 발전의 안전성 문제와 이에 따른 방사능에 대한 불안감은 여전히 중요한 이슈로 남아있다. 그 결과 독일과 스위스, 벨기에는 탈 원전을 선언했고 사고의 당사국인 일본에서는 원전 존속에 대한 논의가 여전히 진행 중이다[1]. 원자력 에너지를 포기한 나라들은 물론이고 발전력의 많은 부분을 원자력으로 충당하고 있는 나라들도 마찬가지로 신재생에너지에 대한 투자와 유인이 증가했기 때문에 신재생에너지를 이용한 발전기들의 계획과 설치가 꾸준히 시행되고 있다.

풍력발전은 태양광발전, 수력발전과 더불어 신재생발전원의 큰 부분을 차지하고 있다. 특히 풍력발전은 발전단지의 대형화가 가능하고 발전단가가 화석에너지의 발전단가와 균형점을 이루는 그리드패리티에 점차 근접해간다고 알려져 있기 때문에 풍력발전은

화석발전을 대체할 중요한 에너지원으로 인정받는다. 따라서 풍력발전에 대한 다양한 연구가 진행 중이며 보급이 점차 활성화되고 있다. 현재 영국에서는 총 생산 전기에너지의 20% 정도를 신재생에너지원이 차지하고 있으며, 이 중의 50%를 풍력발전이 담당하고 있다. 또한 유럽에서는 2050년까지 총 전기에너지의 50%를 풍력으로 생산하는 것을 목표로 하고 있을 만큼 풍력발전의 중요성은 크다[2, 3]. 이와 같은 풍력발전의 증가는 환경의 측면에서는 긍정적이지만 전력계통 신뢰도의 관점에서는 부정적인 요소일 수 있다. 기존의 발전기와는 다르게 풍력발전은 변동성을 크게 지니고 있으므로 안정적인 전력공급이 가능하지 않고 이는 전력계통의 신뢰도에 악영향을 준다. 따라서 풍력발전이 신뢰도에 얼마만큼이나 영향을 주는지 정량적으로 분석할 필요가 있다 [4, 5]. 본 논문에서는 이러한 영향을 전력계통의 신뢰도 관점에서 분석한다.

신재생에너지원과 마찬가지로 환경적인 이유들로 전기자동차의 필요성 및 요구가 증대함에 따라 전기자동차에 대한 막대한 투자가 이루어졌고 이에 따른 기술적 발전 덕분에 다양한 종류의 전기자동차가 개발 및 판매되고 있다. 전기자동차 판매량은 지속적인 증가세를 보이고 있으며 더욱 가속화될 전망이다. 전 세계 전기자동차의 누적량은 2014년 말까지 약 665,000대이며 전체 자동차의 0.08%를 차지한다. 2012년 말 180,000대 정도였던 전기자동차는 2년 사이 약 4배에 가까이 증가했다. 2020년 전기자동차는 2000만대에 육박할 것으로 예측하고 있으며, 이는 2014년 말까지의 전기자동차 누적량에 30배를 상회하는 정도로 가히 폭발적인 상승세라고 할 수 있다[6]. 전기자동차는 배터리를 사용하기 때문에 전력시스템으로부터 지속적인 충전이 필요하다. 위

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Korea

E-mail : parkjk@snu.ac.kr

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Korea

Received : May 3, 2015; Accepted : October 7, 2015

의 예측과 같은 전기자동차의 대수라면 상당량의 충전을 요구할 것이고 이러한 충전량은 전력수요의 패턴과 최대수요의 변화를 초래한다. 결과적으로 전기자동차의 증가는 계통의 신뢰도에 영향을 준다고 추론할 수 있고 이를 본 논문에서 분석한다.

본 논문은 기존의 계통에 신재생 에너지원의 주된 발전원으로 대표되는 풍력발전기와 기하급수적인 증가가 예상되는 전기자동차가 병입되었을 때의 신뢰도 변화를 살펴보고자 한다. 본문을 통하여 신뢰도 평가를 위한 풍력발전과 전기자동차의 모델링에 대하여 서술하고 각각의 경우를 사례연구를 통하여 구현하고 살펴보는 것을 목표로 한다.

2. 본 론

본론의 구성은 다음과 같다. 2.1에서 계통의 신뢰도 평가의 개념 및 의미와 본 논문에서 활용한 신뢰도 지수에 대해 살펴본다. 본론 2.2와 2.3에서는 신뢰도 평가를 위한 풍력발전기와 전기자동차의 모델링 방법을 차례로 제시한다.

2.1 신뢰도 평가

계통의 신뢰도 평가는 현재의 발전기 구성으로 부하에게 전기를 공급하는 능력이 적절한가를 분석하는 것에서 그 필요성과 의미를 갖는다. 계통의 신뢰도를 판단하는 지수도 다양하게 연구되어 존재하는데 본 논문에서는 공급지장시간기대치(LOLE: Loss of Load Expectation)와 공급지장에너지기대치(EENS: Expected Energy Not Served)를 이용하여 계통의 신뢰도를 평가한다. LOLE는 해당 기간 중에 수요량이 발전력을 초과하여 정전이 일어나는 시간 즉, 정전시간의 기댓값을 산정하여 이를 통해 전력이 부하에 얼마나 잘 공급되는지를 평가하는 지수이다. EENS는 정전이 일어난 경우 단순히 정전의 시간이 아니라 정전 시간동안 전력공급의 부족량을 나타내는 지수이다. 이를 정식화하면 식 (1), (2)와 같으며 문헌 [7]을 통하여 확인할 수 있다.

$$LOLE = \sum_{k \in S} p_k t_k \quad [\text{hours/year}] \quad (1)$$

$$EENS = \sum_{k \in S} p_k A_k \quad [\text{MWh/year}] \quad (2)$$

여기서,

- S : 전력부족과 관련된 모든 계통상태의 집합
- p_k : 계통상태 k 의 출현확률
- t_k : 계통상태 k 의 시간
- A_k : 계통상태 k 에서의 공급지장전력량

계통의 신뢰도를 평가함에 있어 발전과 관계된 가용용량의 확률분포와 수요와 관계된 부하의 확률분포는 필수적인 두 요소이다. 풍력발전기는 발전력으로써 가용용량의 변화를 야기하고 전기자동차는 수요, 즉 부하의 확률분포를 변화시킨다. 먼저 신뢰도 평가를 위한 풍력발전기의 모델링을 소개한다.

2.2 풍력발전기 모델

기존의 원자력, LNG 화력, 석탄화력 등의 발전기들은 단지 정상상태와 사고상태만을 갖는다. 따라서 기존의 발전기들은 2개상태로 모델링하여 신뢰도 평가에 활용했다. 하지만 풍력발전기는 기존의 발전기와 다르게 풍력에 따라 출력이 변화하는 식 (3)과 같은 출력특성을 보인다.

$$P_{wt}(v) = \frac{1}{2} C_p A \rho v^3 \quad (3)$$

여기서,

- P_{wt} : 풍력발전기 출력 [kW]
- C_p : 출력계수(power coefficient)
- A : 블레이드 단면적 [m^2]
- ρ : 공기밀도 [kg/m^3]
- v : 풍속 [m/s]

이와 같은 풍력발전기의 출력에 관한 수식은 널리 알려진 사항이므로 본 논문에서 자세한 설명은 생략한다. 식 (3)을 통해 풍력발전기는 풍속에 따라 다양한 출력상태를 나타낼 수 있다. 그러므로 기존의 발전기에 활용하던 2개상태 모델링 이외에 다개상태(multi-state)로 풍력발전기를 모델링해야 효율적이다. 이러한 풍력발전기의 다개상태 모델링 방법은 문헌 [8, 9]와 같은 선행연구가 진행되어 왔다. 기존의 연구에서는 풍속을 공통풍속모델인(common wind speed model) 정규확률분포로 가정했지만 국제전기기술위원회(IEC)와 이외의 문헌 [10, 11] 등에서는 풍속을 와이블(Weibull) 확률분포로 모델링 할 것을 추천하고 있다. 따라서 본 논문에서는 풍속을 와이블 확률분포로 모델링하였고 이를 식 (4)에 보이고 있다.

$$f(v) = \begin{cases} 0 & v < 0 \\ \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} & v \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서,

- c : 척도계수(scale parameter)
- k : 형상계수(shape parameter)

위 식의 와이블 확률 밀도 함수의 파라미터인 척도계수와 형상계수는 문헌 [12]을 참고하여 모멘트법(Moment method)으로 계산한다. 이는 (5), (6)과 같이 수식화 한다.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (5)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (6)$$

여기서,

- \bar{v} : 풍속의 평균
- σ : 풍속의 표준편차

풍력발전기의 출력곡선과 풍속의 확률분포를 이용하여 풍력발전의 다개상태 모델링이 가능하다. 풍력발전기의 다개상태 모델링의 모식도를 그림 1에 나타냈다.

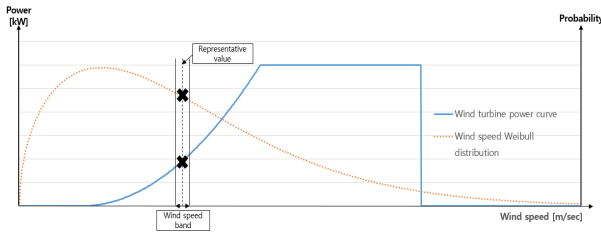


그림 1 풍력발전의 다개상태 모델링 개념도
 Fig. 1 Illustration of multi-state modeling for wind power

그림 1에서 보듯 풍속을 일정한 간격으로 나누어 그 간격의 중심에 해당하는 풍속을 대푯값으로 산정한다. 그 대푯값에 해당하는 풍력발전기의 출력값과 풍속의 확률을 구하고, 이를 대푯값이 나타내는 풍속에서의 출력 및 확률로 산정한다. 다음과 같은 방법으로 풍속의 전체 구간을 일정 간격으로 나누고 이에 대한 결과로 연속적이었던 풍력발전기의 출력과 그의 확률을 일정 간격 개수만큼의 이산적인 값으로 표현함으로써 풍력발전기의 다개상태 모델링이 완성된다.

2.3 전기자동차 모델

전기자동차의 동력원은 전기자동차 내의 배터리다. 전기자동차의 운영을 위해서는 배터리를 충전해야만 하고, 배터리의 충전은 계통으로부터 이루어진다. 따라서 전기자동차의 급속한 증가는 전기수요의 증가를 초래한다. 또한, 전기자동차는 기존에 존재하던 부하와는 다른 전기소비형태를 가질 것이기 때문에 총 전기수요형태의 변화를 야기한다. 증가하고 변화하는 전기의 소비는 신뢰도의 변화를 일으키므로 신뢰도 평가가 필요하고 부하의 시간별 분포를 통하여 신뢰도 평가가 가능하다. 따라서 계통의 신뢰도 평가 시 전기자동차로 말미암은 변화하는 시간별 부하 분포의 모델링을 제시한다.

전기자동차가 수요에 미치는 영향을 분석한 연구는 문헌 [13] 등에서 확인할 수 있고 본 논문에서는 저자가 수행했던 선행연구 [14]에 기반을 두고 전기자동차의 모델링을 수행한다. 한편, 전기자동차의 V2G(Vehicle-To-Grid) 활용에 따른 계통에 연계된 배터리로의 사용방안 연구도 다양하게 진행되고 있지만 V2G 쓰임은 본 논문에서 고려하지 않는다. 그 이유는 V2G의 쓰임은 주파수 추종 등의 실시간 활용에 더욱 유용하고[15] V2G로 활용하더라도 최종적인 순수충전용량은 전기자동차의 운행거리에만 비례하기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 전기자동차의 부하로서의 성질에 집중하여 분석하였다.

전기자동차의 부하 모델링을 위해서는 먼저 시간대별 전기자동차의 충전용량을 유추하는 과정이 필요하다. 현재 우리나라에서 운행되고 있는 자동차의 시간대별 교통량은 그림 2와 같다[16].

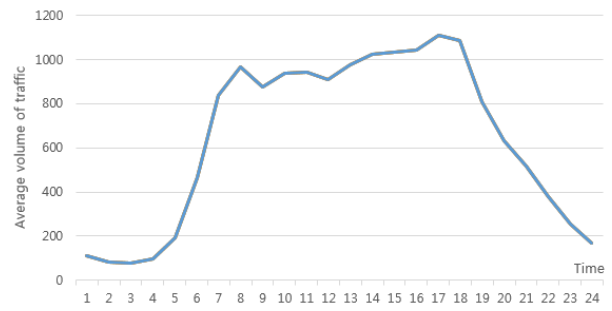


그림 2 시간대별 교통량
 Fig. 2 Traffic volume by hour

전기자동차도 현재 운행되고 있는 내연기관 자동차와 마찬가지로 대부분의 교통량이 출퇴근 시간에 집중되어있는 유사한 운행패턴을 보일 것이다. 전기자동차는 운행하지 않을 때 충전을 할 수 있으므로 이러한 운행 패턴을 통하여 교통량이 적은 때는 오히려 전기자동차의 충전 부하가 집중 될 것임을 유추할 수 있다. 따라서 시간대별 교통량을 바탕으로 시간대별 전기자동차의 충전량 계산을 할 수 있으며 시간대별로 변화하는 부하로써 전기

표 1 전기자동차 충전전력 전기요금

Table 1 Charging electricity rate for electric vehicle

시간대	전력량요금 (원/kWh)		
	여름철	봄/가을철	겨울철
경부하	51.20	52.10	71.70
중간부하	129.10	62.60	113.80
최대부하	206.50	67.90	169.50
계절별	여름철	봄/ 가을철	겨울철
	7월 1일 ~ 8월 31일	3월 1일 ~ 6월 30일	11월 1일 ~ 익년 2월 말일
시간대별	경부하	23:00 ~ 09:00	23:00 ~ 09:00
	중간부하	9:00 ~ 11:00	09:00 ~ 11:00
시간대	12:00 ~ 13:00	12:00 ~ 13:00	12:00 ~ 17:00
	17:00 ~ 23:00	17:00 ~ 23:00	20:00 ~ 22:00
최대부하	11:00 ~ 12:00	11:00 ~ 12:00	10:00 ~ 12:00
	13:00 ~ 17:00	13:00 ~ 17:00	17:00 ~ 20:00
시간대			22:00 ~ 23:00

자동차의 모델링이 가능하다. 더불어 보다 정확하고 합리적인 전기자동차의 시간대별 충전량을 유추하기 위해서는 현재 시행되고 있는 전기자동차 충전전력 전기요금을 고려해야한다. 이는 계절, 시간대별로 충전 전기요금이 상이하게 부과되는 TOU(Time of Use) 요금제다.

표 1은 전기자동차의 TOU 요금제의 한 예로써 국내에서 시행 중인 요금제를 나타낸 것이다. 계절별로 요금을 다르게 책정한다. 여름과 겨울은 봄, 가을 보다는 상대적으로 높은 전기요금을 부과한다. 또한 계절과 시간대별로 상이한 요금체계를 가지고 부하가 많이 집중되는 최대부하 시간대도 계절별로 다르게 설정하여 전기요금을 각각 다르게 부과한다. 평균적으로 부하가 많이 집중되는 시간대에 높은 요금을 부과함으로써 전기자동차의 충전 수요를 분산시키는 효과를 볼 수 있다.

전기자동차는 운행시간을 제외하고는 계통에 병입되어 있다고 가정했을 때, 전기자동차는 충전에 필요한 시간보다 더 오랫동안 계통과 접속한다. 따라서 합리적인 소비자 또는 시간별로 변화하는 요금을 인지하고 있는 자동화된 기기라면 계통과 접속되어 있는 시간 중 최대한 요금이 저렴한 시간대에 충전을 하고 요금이 저렴하지 않은 시간대에는 충전을 지양할 것이다. 결과적으로 전기자동차의 충전부하는 TOU 요금제에 따라 분산될 것이고 분산된 충전부하는 식 (7)~(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min \sum_i \sum_t R_t P_{t,i}^{EV} \quad (7)$$

$$\text{단, } \sum_t P_t^{EV} = P_{total}^{EV} \quad \forall i \quad (8)$$

$$0 \leq P_{t,i}^{EV} \leq P_{Max}^{charger} \quad (9)$$

여기서,

- i : 전기자동차 번호
- t : 해당 시간
- R_t : 시간별 충전요금
- P_t^{EV} : 시간별 전기자동차 충전량
- P_{total}^{EV} : 전기자동차 총 소비량
- $P_{Max}^{charger}$: 시간당 충전기 최대 충전량

위 식을 통하여 TOU 요금제를 적용함에 따라 기존의 전기자동차의 시간대별 충전부하에서 변화한 시간대별 충전부하를 유추할 수 있다. 본 논문에서는 TOU 요금제로 인하여 변화된 전기자동차의 충전부하를 고려한다.

3. 사례 연구

본 논문에서 제안하는 풍력발전기와 전기자동차의 신뢰도 평가 모델을 이용하여 연도별 각각의 증가하는 비율에 따른 계통의 신뢰도 변화를 신뢰도 지수를 통해 분석한다. 본 논문에서는 사례 연구를 계통모델 IEEE Reliability Test System - 1996의 One Area에 적용한다. 이에 해당하는 계통도는 그림 3과 같다.

그림 3과 같은 계통은 24개 모선, 총 설비용량 3,405 MW인

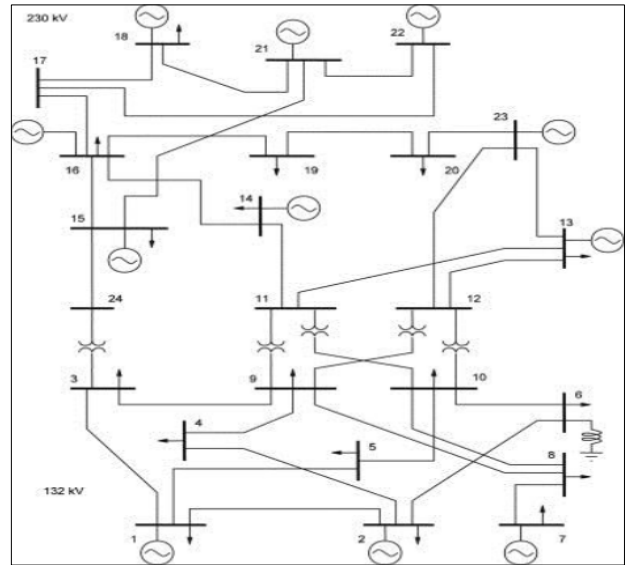


그림 3 IEEE RTS 1996 계통도

Fig. 3 Topology for IEEE one area RTS 1996

32개의 발전기로 구성되어 있으며 최대수요는 2,850 MW이다. 그 외 사례연구를 위해 필요한 데이터는 문헌 [17]에서 찾을 수 있다. 여기에 미국의 풍력발전의 증가량 및 전기자동차의 변화량은 예측값을 적용하여 사례연구를 진행한다. 문헌 [18]에 따르면 2012년 미국의 풍력발전기의 설비용량은 59.01 GW이며 전체 발전기 설비용량 996 GW의 5.92 %를 차지하고 있다. 풍력발전기는 평균적으로 매년 2 %씩 증가할 것으로 예측하며 2040년에는 약 87 GW가 될 것이라고 예상한다. 또한 문헌 [6]을 통하여 미국의 전기자동차 예측량을 알 수 있다. 2010년 미국에 전기자동차는 약 2만대였으며 2035년에는 3천만대를 상회 할 것으로 예측하고 있다. 기존의 전기 수요들이 특히 선진국에서는 새로운 기기들의 더욱 강화된 표준들과 에너지 효율성의 증대 때문에 증가량이 크지 않을 것이라고 추측하는 것에 반하여 전기자동차의 수요는 전기자동차의 수요 자체만으로도 굉장한 증가를 보이지만 상대적으로도 상당량의 전기수요 증가를 유발한다고 할 수 있다. 이와 같은 데이터를 바탕으로 IEEE RTS의 발전량과 부하량에 적합하도록 실제 계통의 전체 발전량 대비 풍력발전의 비율과 전체 전기수요 대비 전기자동차가 차지하는 수요의 비율을 동일하게 축소하여 시뮬레이션에 적용한다. 실제로 존재하는 전력계통의 데이터가 아니더라도 실제 데이터와 예측값을 바탕으로 추론한 데이터를 이용함으로써 실제 계통에서 향후 일어날 수 있는 변화를 예측해볼 수 있다. 사례연구는 상용프로그램인 Matlab 2012를 기반으로 Monte-Carlo simulation 및 선형계획법(LP)을 활용해 확률론적 신뢰도 평가를 진행했다.

3.1 발전력의 변화

시뮬레이션에 적용하는 풍력발전기는 표 2와 같은 풍속 환경 하에서 동일한 발전기로 가정한다. 이를 앞장에 제시했던 방법으

표 2 풍속과 풍력 발전기 정보

Table 2 Wind speed and wind turbine information

Wind speed		Wind turbine	
range	0 ~ 35 m/s	model	Vestas V90
		rated power	3,000 kW
mean	4.0 m/s	cut-in wind speed	3.5 m/s
		rated wind speed	15 m/s
standard deviation	7.0 m/s	cut-out wind speed	25 m/s

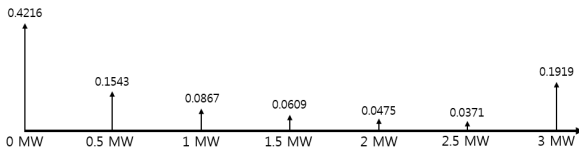


그림 4 풍력발전기의 다개상태 발전용량 확률분포

Fig. 4 Multi-state probability distribution of wind turbine generating capacity

로 모델링하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 풍속의 간격을 0.5 m/s로 나누었고, 출력은 0.5 MW의 간격으로 7개의 상태를 가지도록 각 구간에 해당하는 값들을 선형 분할하였다. 이러한 과정은 문헌 [7]을 참고했다. 이와 같은 방법을 통하여 풍력발전기의 다양한 상태를 확률적으로 모델링할 수 있다. 따라서 2개상태로 모델링했던 기존발전기와 더불어 풍력발전기를 다개상태로 모델링하여 모든 발전원의 발전용량별 확률 분포를 산정할 수 있으며 이를 풍력발전이 포함된 계통의 신뢰도 분석에 활용한다.

위와 같이 풍력발전을 다개상태로 모델링한 후 IEEE RTS 1996

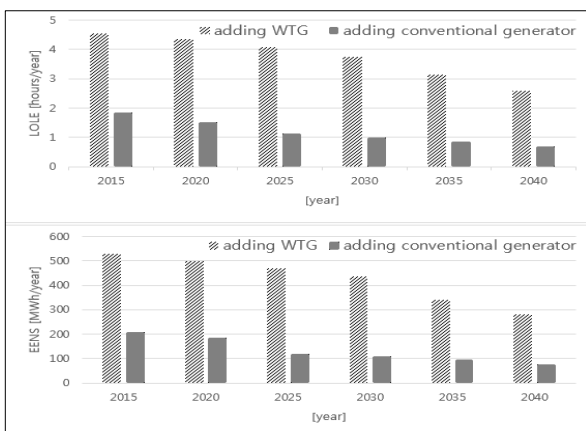


그림 5 발전기 증가에 따른 신뢰도 지수

Fig. 5 Reliability indices according to increasing generator

계통에 연도마다 증가하는 풍력발전량을 고려하여 신뢰도 평가를 수행한 결과는 그림 5와 같다. 풍력발전이 현재의 계획만큼 증가했을 때 신뢰도 지수의 변화를 나타냈다. 또한 풍력발전 대신 IEEE RTS 1996 계통에서 원자력 발전기를 제외한 발전기중 최대 용량을 차지하고 있는 사고확률 0.04의 석탄화력 발전기를 풍력발전기 대신 설치했을 때의 신뢰도 지수 변화도 나타냈다. 이를 통하여 기존의 발전기 대비 풍력발전기가 계통의 신뢰도에 미치는 영향을 비교해 볼 수 있다.

연도별로 풍력발전기가 증가함에 따라 신뢰도 지수는 작아진다. LOLE와 EENS는 크기가 작을수록 계통이 신뢰할 만한 상태를 의미하므로 신뢰도가 상승함 나타낸다. 하지만 같은 용량의 출력이 비교적 안정적인 기존 발전기 보다는 풍력발전기를 포함했을 때 계통 신뢰도의 상승 폭이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

3.2 수요의 변화

앞서 언급한 것과 같이 기존의 전기 수요들의 증가는 크지 않으므로 일반 부하의 증가는 제외하고 전기자동차 수요의 증가만을 고려하도록 한다.

표 3 전기자동차 가정

Table 3 Assumptions of electric vehicle

model	Tesla S
mileage	5 km/kWh
charger capacity	~ 6 kW
average daily travel distance	60 km

표 3은 시뮬레이션을 위한 전기자동차의 가정들이다. 현재 시판되고 있는 전기자동차는 종류가 다양하고 각각의 특징들도 상이하지만 본 논문에서는 위와 같은 특징을 가지는 전기자동차로 한정하여 사례연구를 진행한다. 전기자동차 최대 업체인 테슬라의 전기자동차 사양을 고려했고[19], 자동차의 일평균 이동거리와 시간별 교통량은 미국의 데이터[20]를 참고했으며 TOU 요금제는 미국 PG&E의 요금제를 참고했다. 기존의 RTS 1996 모델의 부하에 연도별로 증가하는 전기자동차를 고려하여 변화하는

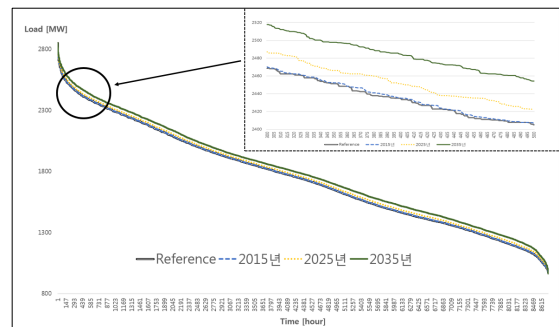


그림 6 전기자동차 증가에 따른 시간별 부하지속곡선

Fig. 6 Hourly load duration curve according to increasing electric vehicle

부하의 패턴을 유추할 수 있다. 시간별, 계절별로 가격이 다른 TOU 요금제에 따라 반응하는 전기자동차의 총전량을 기존의 부하에 더하여 시간별로 변화하는 부하곡선을 구한다. 이를 부하의 크기 순서로 정렬한 시간별 부하지속곡선을 그림 6에 나타냈다. 전기자동차가 포함되지 않은 기존의 부하와 전기자동차가 증가함에 따라 변화하는 부하의 시간별 부하지속곡선을 함께 나타냈다.

위의 그림에서 보이듯 전기자동차로 인한 최대부하의 증가는 없다. 이는 부하가 집중되는 시간에 비싼 요금을 부과하여 최대 부하의 상승을 방지하려는 TOU 요금제의 적용 때문이다. 하지만 최대부하는 아니더라도 비교적 크기가 큰 부하의 증가가 일어나므로 전기자동차에 따른 이러한 변화가 계통의 신뢰도에 미치는 영향을 평가한다.

3.3 계통의 신뢰도 변화

시뮬레이션을 수행하는 대상 계통에서 발전력 측면의 풍력발전기가 증가했을 때와 부하 측면의 전기자동차가 증가했을 때 각각의 신뢰도 변화를 분석하고 함께 포함할 때의 변화 또한 분석하여 나타냈다.

표 4 신뢰도 분석 결과

Table 4 Reliability evaluation result

year	adding WTG only		adding EV only		adding WTG and EV	
	LOLE [hours /year]	EENS [MWh /year]	LOLE [hours /year]	EENS [MWh /year]	LOLE [hours /year]	EENS [MWh /year]
2015	4.5374	529.3279	9.6126	1177.7886	4.8351	588.3464
2020	4.3528	500.6361	10.212	1287.5158	4.6639	559.4387
2025	4.0764	470.3982	10.8842	1412.5640	4.6256	545.9949
2030	3.7413	437.5026	11.8409	1469.3481	4.6503	549.9603
2035	3.1504	340.1814	13.1507	1673.0276	4.5754	516.4241

표 4는 신뢰도 분석 결과를 담고 있다. 풍력발전기와 전기자동차가 포함되지 않은 RTS 1996 모델의 LOLE는 8.9847, EENS가 1106.894 임을 기준으로 계통의 신뢰도 변화 양상을 신뢰도 지수를 통하여 분석한다. 현재 미국에서 예측하는 값들을 적용했을 때 풍력발전기만 증가한다면 LOLE와 EENS가 줄어든다. 즉 계통의 신뢰도가 향상되는 것을 알 수 있다. 또한 전기자동차의 증가에 따른 계통의 신뢰도는 하락하는 것을 확인할 수 있다. 풍력발전의 계획량과 전기자동차의 예측량을 함께 고려한 경우에는 계통 신뢰도가 두 가지 경우의 사이에 위치하지만, 풍력발전기만 존재할 때의 신뢰도에 더욱 가까운 것을 알 수 있다. 또한 신뢰

도의 수준이 큰 폭으로 변화하지는 않지만 신뢰도 지수가 작아지는 경향으로 볼 때 계통의 신뢰도에 악영향은 아님을 파악할 수 있고 이를 통하여 전기자동차가 증가하는 부분만큼은 계획된 풍력발전의 용량으로 충당이 가능함을 분석할 수 있다.

4. 결 론

전력계통의 신뢰도를 분석하는 것은 해당시점의 발전력과 수요를 통하여 계통의 신뢰성을 판단하는 점에서 중요한 의미를 갖는다. 어떠한 발전원의 건설을 계획함에 있어서 새로운 발전원을 계통에 추가함에 따라 변화하는 계통의 신뢰도를 분석하는 과정은 필수적이다. 또한 어떠한 부하가 증가됨에 따라 변화하는 신뢰도를 계산하는 과정 역시 선행되어야 한다. 이와 같은 과정에서 일반적인 발전기와 다르게 다양한 출력을 내는 신재생에너지원이 추가된다면 기존의 신뢰도 분석 기법과는 다른 방법이 필요하다. 전기자동차와 같이 급격한 증가가 예상되고 기존의 부하의 사용 패턴과 상이하며 계통에 직접적인 영향을 줄 수 있는 부하를 분석하는 새로운 방법 역시 필요하다. 본 논문은 이러한 방법을 제시하고 사례연구를 통하여 신뢰도의 변화를 살펴보았다.

본 논문에서는 풍력발전의 출력곡선과 풍속의 확률분포를 통하여 풍력발전기를 다개상태로 모델링했고 풍력발전의 증가에 따른 계통의 신뢰도 변화를 살펴보았다. 또한 전기자동차의 운행패턴을 통하여 전기자동차가 계통에 병입되어 충전부하로 작용하는 시간 및 총전량을 계산했으며, TOU 요금제를 적용함에 따라 변화하는 충전부하를 추론하여 모델링했다. 이를 적용하여 전기자동차가 계통에 병입될 때의 신뢰도 변화를 살펴보았다. 하지만 이러한 결과는 풍력발전 이외의 다른 발전원의 추가 건설 및 노후화 등으로 인한 폐쇄 같은 요소들을 고려하지 않았고 매년 0.9%씩 증가하는 일반부하도 포함하지 않았다. 그럼에도 불구하고 풍력발전의 증가가 계통의 신뢰도를 상승시키는 정도를 확인했으며, 그 결과 풍력발전은 친환경적이라는 이점이 있는 반면 같은 용량의 기존의 발전기에 비해 신뢰도에 기여하는 부분은 다소 미흡하다는 것을 보였다. 또한 전기자동차가 계통에 미치는 영향을 평가하는 부분에서는 TOU 요금제를 이용하여 전기자동차 충전부하의 적절한 분산을 유도했음에도 계통의 신뢰도가 하락하는 것을 확인했다. 이를 통하여 전기자동차의 요금제를 활용하더라도 전기자동차가 계통에 미치는 영향을 간과할 수 없다는 것을 확인할 수 있고 그 정도 또한 신뢰도지수를 통하여 분석했다.

본 논문은 발전원 가운데 가장 급격한 증가가 예상되는 풍력발전과 비약적인 상승세를 보이고 있는 수요인 전기자동차를 고려하여 계통의 신뢰도를 평가했다. 더욱 실제적인 연구를 위하여 풍력발전 및 전기자동차 이외의 다양한 신재생 발전원들과 새로운 부하들이 포함된 계통에서의 신뢰도 평가를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010-0028509)

References

- [1] Ministry of Education and Science Technology, "Trend analysis of nuclear policy direction in various countries after the Fukushima nuclear disaster," Jan. 2013. [Online]. Available: http://attfile.konetic.or.kr/konetic/xml/THEMA_INFO/T2A5A1320559.pdf
- [2] UK Wind Energy Database (UKWED), [Online]. Available: <http://www.renewableuk.com/>
- [3] A. Zervos, C. Lins and J. Muth, "RE-thinking 2050: a 100% renewable energy vision for the European Union," EREC, 2010.
- [4] J.G. Slootweg and W.L. Kling, "The impact of large scale wind power generation on power system oscillation," Electric Power Systems Research, vol.67, no. 1, pp. 9-20, Oct. 2003.
- [5] B. Parsons, M. Milligan, B. Zavadil, D. Brooks, B. Kirby, K. Dragoon and J. Caldwell, "Grid Impacts of Wind Power: A Summary of Recent Studies in the United States," Wind Energy, vol. 7, no.2, pp. 87-108, Jun. 2004.
- [6] Electric Vehicles Initiative and International Energy Agency, "Global EV Outlook 2015"
- [7] Jaeseok Chio, "Power System Reliability Evaluation Engineering," pp. 149-151, 403-421, 2012.
- [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, Jun. 2006.
- [9] L. Wu, J. Park, J. Choi, A.A. El-Keib, M. Shahidepour and R. Billinton, "Probabilistic Reliability Evaluation of Power Systems Including Wind Turbine Generators Using a Simplified Multi-State Model: A Case Study," IEEE PES conf., Calgary, Canada, Jul. 2009
- [10] K. Conradsen, L. B. Nielsen and L.P. Prahm, "Review of Weibull Statistic for Estimation of Wind Speed Distributions," Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 23, no. 8, Aug. 1984.
- [11] J. V. Seguro and T. W. Lambert, "Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol, 85, no. 1, pp. 75-84, Mar. 2000.
- [12] Ji-Seon Byun, Byung-Gul Lee, Sang-Yeol Park, "A Study on Weibull Probability Density Function for Wind Speed Application in Dea-Jung, Jeju Island," Korean Society for Geospatial Information System Conf., pp. 199-202, 2014. 5.
- [13] K. Clement-Nyns, E. Haesen and J. Driesen, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, Feb. 2010.
- [14] D. Kim, T.H. Yoo, D.H. Kwon, K.B. Kwon and J.K. Park, "Evaluation of the Impact of Time-of-Use Rates on Load Curve with Electric Vehicles Penetration in Korea," ISGC&E conf., Jeju, Korea. Jul. 2013.
- [15] W. Kempton and J. Tomic, "Vehicle-to-grid fundamentals: Calculating capacity and net revenue," Journal of Power Sources, vol. 14, no. 1, pp. 268-279, Jun. 2005.
- [16] Traffic Monitoring System, Korea Institute of Construction Technology (KICT), [Online]. Available: <http://www.road.re.kr/>
- [17] C. Grigg and P. Wong, "The IEEE Reliability Test System - 1996," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, no. 3, August 1999.
- [18] U. S. Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 2014 with projections to 2040," April 2014.
- [19] Tesla Model S specs, [Online]. Available: <http://www.teslamotors.com/models/spec>
- [20] National Highway Traffic Safety Administration, Traffic Records, [Online]. Available: <http://www.nhtsa.gov/>

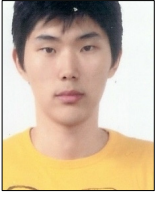
저 자 소 개

**김 담 (Dam Kim)**

1986년 10월 24일 생. 2011년 성균관대학교 전기전자공학부 졸업. 2012~현재 서울대학교 전기공학부 석·박사 통합과정
Tel : 02-880-7258
E-mail : kimdam@snu.ac.kr

**박 현 곤 (Hyeongon Park)**

1986년 7월 25일 생. 2011년 연세대학교 전기전자공학부 졸업. 2011~현재 서울대학교 전기공학부 석·박사 통합과정
Tel : 02-880-7258
E-mail : hyeongon@snu.ac.kr



권 헌 규 (Hungyu Kwon)

1985년 9월 7일 생. 2010년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2012년 동대학원 졸업 (공학석사). 2012년~현재 동대학원 전기 공학부 박사과정

Tel : 02-880-7258

E-mail : khiro37@naver.com



박 종 근 (Jong-Keun Park)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1979년 일본 동경대학교 공학계대학원 졸업(공학석사). 1982년 동대학원 졸업(공학박사). 1983년~현재 서울대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-880-7247

Fax : 02-878-1452

E-mail : parkjk@snu.ac.kr