

풍력을 포함한 마이크로그리드의 이윤극대 급전계획 연구

조벽근, 한종훈, 장길수  
고려대

A Probabilistic Analysis for Profit Maximization in a Microgrid Including Wind Power

Byuk-keun Jo, Jong-Hoon Han, Gilsoo Jang  
Korea University

**Abstract** - Due to integration of wind power, its unpredictable uncertainty can be a very lethal factor in generation dispatch problem. To handle such uncertainty of wind power output, a profit maximization problem is formulated and random wind speed is modeled by Weibull distribution in this paper. A case study is calculated through profit maximization approach with random wind speed. The effect of case study results is evaluated on how the uncertain wind power integration into the power system affects on the generation dispatch.

1. 서 론

세계적인 에너지 및 환경문제로 인해 에너지 소비구조와 신재생에너지 개발에 대한 요구는 지속적으로 높아지고 있다[1]. 특히 풍력은 다양한 신재생에너지 가운데 가장 가치적인 성과로 인해 많은 투자 및 개발과 넓은 보급이 계속되고 있다[2]. 그러나 풍력의 높은 변동성과 불확실성이 계통으로 유입되게 되면 계통의 급전계획과 운영에 영향을 끼치게 된다. 따라서 운영자는 풍력의 불확실성과 높은 변동성을 급전계획 단계에서 사전에 고려해야 할 필요가 있다.

경제급전문제는 등식 제약 및 부등식 제약아래 발전비용을 최소화 하는 것을 목적함수로 한다. 하지만 상위 계통과 연계하여 운전하는 마이크로그리드 시스템의 경우 연계 점을 통하여 전력을 공급 받는 것 뿐 아니라 내부 잉여전력을 외부로 판매하는 것도 가능하게 됨으로써 전력 판매 수익 또한 기대할 수 있게 되었다[3]-[5].

본 논문에서는 전력의 자가자족이 가능한 마이크로그리드 시스템이 내부 부하를 공급한 이후 여력의 발전력을 가지고 외부 계통과의 연계로 이루어지는 전력거래를 통한 수익발생을 위해 전력을 초과로 발전하여 최적의 이윤을 추구하는 것을 모의하였다. 또한 풍력발전기 출력의 불확실성을 모의하여 이것이 이윤극대 급전모델에 미치는 영향을 평가 하였다. 이를 위하여 와이불 분포를 통해 풍속을 모델링하고 풍력발전기의 비선형 출력을 선형화하였으며 이윤극대화 급전 문제를 정식화 하였다.

2. 본 론

2.1 풍력 발전 출력 추정

2.1.1 풍속 분포

풍속의 변동성은 와이불 분포를 통해 모델링될 수 있다[6]. 형태계수 'k' 및 비례계수 'c'를 갖는 풍속의 와이불 분포의 PDF함수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_V(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-(v/c)^k} \quad (1)$$

where

- V : wind speed random variable
- v : wind speed
- k : shape parameter
- c : scale parameter

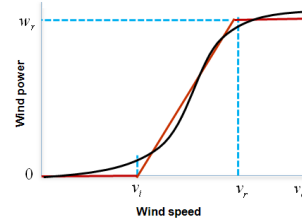
2.1.2 풍력 발전 출력

풍속에 대해 비선형 관계를 갖는 풍력발전기의 출력은 그림 1과 같이 선형화하여 나타낼 수 있다[7]. 와이불 분포로 모델링된 풍속의 불확실성은 풍력발전기의 출력에도 반영되며 풍속에 대한 풍력발전기의 선형화된 출력은 다음과 같다.

$$W = \begin{cases} 0, & (V < v_i \text{ or } V \geq v_o) \\ w_r \frac{(V - v_i)}{(v_r - v_i)}, & (v_i \leq V \leq v_r) \\ w_r, & (v_r \leq V < v_o) \end{cases} \quad (2)$$

where

- w<sub>r</sub> : rated output of wind power
- V : wind speed (m/s)
- v<sub>i</sub> : cut in speed of wind (m/s)
- v<sub>r</sub> : rated speed of wind (m/s)
- v<sub>o</sub> : cut out speed of wind (m/s)



<그림 1> Speed-output relation

2.2 이윤 극대화

시스템의 수익은 내부의 부하를 공급하고 남은 전력을 외부로 판매할 때 발생한다[4]. 따라서 내부 부하를 공급하는 동안에는 수익 없이 비용만 발생하며 전 부하 공급 이후 추가 발전하여 상위계통에 판매하는 전력에 대해 상위계통과의 약속된 가격에 의거한 수익이 발생한다. 통상적으로 내부부하 공급에 필요한 발전비용이 추가발전전력 판매수익보다 크므로, 판매 시에 발생하는 수익은 부하 공급에 필요한 발전 비용에 차감되어 총 발전비용을 절감한다. 잉여전력의 판매수익이 내부부하 충족 발전비용보다 클 경우 운영상의 순수한 이윤이 발생했다고 할 수 있다. 이윤의 극대화를 위한 추가발전은 단위전력의 증분 비용과 증분 수입이 같아지는 시점까지 이루어진다[8].

2.2.1 정식화

계통한계가격(SMP)을 갖는 상위계통의 전력시장에 참여하여 이윤을 극대화하는 내부 발전량의 결정은 다음과 같이 정식화 된다.

Objective:  
 $\max(\pi) = \max(\text{Revenue} - \text{Cost}) \quad (3)$

where

$$\text{Revenue} = \text{SMP} \times k_1 P_E$$

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + \text{SMP} \times k_2 P_E + \sum_{i=1}^M C_w(w_i) + \sum_{i=1}^M C_p(W_i^{av} - w_i) + \sum_{i=1}^M C_r(w_i - W_i^{av})$$

C<sub>i</sub> : cost function of conventional generator i

C<sub>w</sub> : cost function of wind power generator i

C<sub>p</sub> : penalty cost function of compensation for not using wind power within its availability

$C_r$  : reserve cost for wind power variation  
 $P_i$  : generation output of conventional generator  $i$   
 $P_E$  : real power exchange with external network  
 $w_i$  : scheduled wind power of wind power generator  $i$   
 $W_i^{av}$  : available wind power of wind power generator  $i$   
 $k_1 = \frac{\mu}{2}(\mu-1)$   
 $k_2 = \frac{\mu}{2}(\mu+1)$   
 $\mu$  : real power transfer status  
 $\mu = -1$ , selling  
 $\mu = 1$ , purchasing  
 $\mu = 0$ , isolated  
 $N$  : the number of thermal generators  
 $M$  : the number of wind power generators  
 $i$  : index number of generation units

subject to:

$$\sum_{i=1}^N P_i + \mu P_E + \sum_{i=1}^M W_i = P_D$$

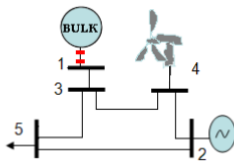
$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$$

$$|P_E| \leq P_E^{\max}$$

where

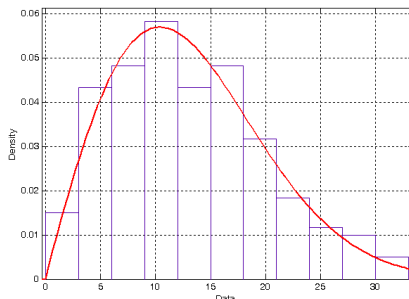
$P_i^{\max}$  : upper limit of conventional generator  $i$   
 $P_i^{\min}$  : lower limit of conventional generator  $i$   
 $P_E^{\max}$  : capacity limit of system from/to external network  
 $P_D$  : real power load demand  
 $W_i$  : real power output of wind power generator  $i$

### 2.3 모의 시뮬레이션



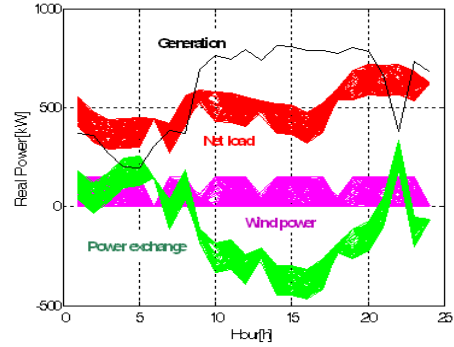
〈그림 2〉 예제계통

그림 2와 같이 풍력을 포함한 외부계통과 연계된 마이크로그리드 예제계통을 구성하여 불확실성을 갖는 풍력의 변동성이 이윤추구 급전계획에 미치는 영향을 평가하였다. 상위계통과의 전력거래는 SMP 가격에 기초하고 풍력발전에 대한 발전차액보상은 없는 것으로 가정하였으며 시스템은 외부계통과의 연계를 통한 전력거래로 수익을 발생시킬 수 있다. 이윤 극대화 모델에 따른 급전계획을 계산하고 풍력의 불확실성 및 상위계통과의 전력거래를 통한 수익발생을 고려하지 않은 비용최소 경제급전 방식의 결과와 비교하였다.



〈그림 3〉 풍속 분포

풍속의 'c=16', 'k=2'의 와이불 분포는 그림 3과 같이 나타난다. 풍속은 이 분포 내에서 랜덤하게 선택되도록 하였다. 그림 4는 급전결과를 나타낸다. 풍속의 변동 폭이 좁게 선택된 구간에서 넷-로드 및 전력 거래량의 변동 폭도 좁게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이윤극대 모델에서의 내부 분산전원의 급전결과는 상위계통 smp에 관계하므로 풍력의 변동성에 영향을 받지 않았다.



〈그림 4〉 급전결과

표 1은 급전결과에 따른 발전비용으로 외부계통과의 전력거래를 통해 이윤을 추구한 이윤극대 모델과 외부계통으로부터 전력구입만 가능한 비용최소 모델의 결과를 비교해 놓았다. 이윤극대 모델에서의 수익이 총 발전비용에서 차감되어 전체 운영비용을 절감하여 풍속의 불확실성을 반영하여도 보다 경제적인 것을 확인할 수 있다.

〈표 1〉 운전비용

|               | Purchase only | Exchange with main grid |
|---------------|---------------|-------------------------|
| 부하공급 비용①      | 528,967       | 528,967                 |
| 추가발전 비용②      | -             | 289,539                 |
| 판매 수익③        | -             | 309,708                 |
| 판매 이익(③-②)    | -             | 20,169                  |
| 총 발전비용(①+②)   | 528,967       | 818,506                 |
| 전체운영비용(①+②-③) | 528,967       | 508,798                 |

### 3. 결 론

본 논문에서는 풍력을 포함한 마이크로그리드 시스템이 외부계통과의 전력거래를 통한 이윤추구로 전체 운영비용의 절감을 꾀할 수 있음을 보이고 이를 정식화 하였다. 또한 와이불 분포를 통해 풍속의 랜덤 분포를 모델링하고 풍속의 불확실성이 급전결과에 미치는 영향을 나타내었다. 랜덤한 풍력의 변동성은 분산전원의 급전결과에는 영향을 미치지 않았지만 외부계통과의 거래량에 반영되어 거래전력량 및 운영가격에 영향을 미쳤다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.  
(No. 20101020300580).

### [참 고 문 헌]

[1] Dai Huizhu, Wang Weisheng, and Chi Yongning, "Recent wind power integration study in China", Power System Technology, vol 31, pp. 16 - 23, April 2007.  
 [2] Lei Ya zhou, "Studies on Wind Farm Integration into Power System", Automation of Electric Power System, vol 27, pp. 84 - 89, May 2003.  
 [3] A. Tsikalakis, N. Hatziairgyriou, "Economic scheduling functions of a microgrid participating in energy markets", CIGRE Symposium, Athens, 13-16 April, 2005.  
 [4] G. Celli, F. Pilo, G. Pisano, and G. G. Soma, "Optimal participation of a microgrid to the energy market with an intelligent EMS," in Proc. 7th Int. Power Engineering Conf., 2005, vol. 2, pp. 663 - 668.  
 [5] N. M. Muhamad Razali, A. H. Hashim, "Profit-based optimal generation scheduling of a microgrid", PEOCO2010, 23-24 June 2010  
 [6] M. R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.  
 [7] S. Roy, "Market constrained optimal planning for wind energy conversion systems over multiple installation sites," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 17, no. 1, pp. 124 - 129, Mar. 2002  
 [8] Daniel S. Kirschen, Goran Strbac, "Fundamentals of power system economics", ISBN 0-470-84572-4, 2004