

풍력발전 출력 예측오차 완화를 위한 출력제한운전과 ESS운전의 경제성 비교

Economic Comparison of Wind Power Curtailment and ESS Operation for Mitigating Wind Power Forecasting Error

위 영 민* · 조 형 철** · 이 재 희†
(Young-Min Wi · Hyung-Chul Jo · Jaehee Lee)

Abstract - Wind power forecast is critical for efficient power system operation. However, wind power has high forecasting errors due to uncertainty caused by the climate change. These forecasting errors can have an adverse impact on the power system operation. In order to mitigate the issues caused by the wind power forecasting error, wind power curtailment and energy storage system (ESS) can be introduced in the power system. These methods can affect the economics of wind power resources. Therefore, it is necessary to evaluate the economics of the methods for mitigating the wind power forecasting error. This paper attempts to analyze the economics of wind power curtailment and ESS operation for mitigating wind power forecasting error. Numerical simulation results are presented to show the economic impact of wind power curtailment and ESS operation.

Key Words : Wind power curtailment, Energy storage system, Wind power forecasting error

1. 서 론

온실가스 배출규제와 화석연료의 고갈로 인해 세계적으로 신재생 에너지 도입이 증가하고 있다. 신재생에너지 중 풍력에너지는 발전단지의 대용화가 가능하고 비교적 낮은 설비비용으로 인해 잠재적으로 화력발전을 대체할 주요한 에너지원으로 인식되고 있다. 그러나 풍속 및 풍향 등의 자연조건에 따라 출력이 시간각으로 변동하고, 그 발전량을 정확히 예측하기 어렵기 때문에 대규모 풍력발전의 계통연계는 안정적 전력수급에 악영향을 미칠 수 있다[1].

풍력발전을 연계한 해외 전력계통의 일반적인 일일 발전기 기동정지계획 방법에서는 예측된 풍력발전을 최대한 수용하고, 풍력발전의 예측오차는 일반발전기가 제공하는 운영예비력으로 보정하게 된다. 그러나 풍력발전용량이 증가할수록 그 불확실성도 증가하여, 충분한 증·감발 용량을 확보하기 위해 심야시간에 가스터빈발전기를 기동하거나, 풍력발전의 과소예측에 대비해 기저발전기의 일시적인 정지가 필요할 수도 있다. 이 같은 상황에서는 저단가의 풍력에너지를 이용하기 위해 오히려 더 많은 추가비용이 부담될 수 있어 풍력발전 출력을 그대로 수용하는 것은 비

효율적인 운영방법이 될 수 있다.

대규모 풍력발전이 연계된 국외의 계통에서는 풍력발전의 불확실성을 완화하기 위해 풍력발전단지에 여러 가지 의무를 부과하고 있다. 그 중 하나가 급전지시와 이에 대한 허용오차 [2]의 적용이다. 이 제도에서 풍력발전사업자는 중앙급전지시에 대한 급전이행 의무가 주어지며, 일정범위의 허용오차를 벗어난 발전은 페널티가 부과되게 된다. 보통 급전지시량은 사업자가 신고하는 발전 가능량(예측값)이 적용된다. 이에 대해 풍력발전사업자는 일정 범위의 허용오차를 준수하기 위해(예측오차를 감소시키기 위해) 발전량의 제어가 필요하게 된다.

풍력발전의 예측오차 완화 방안으로는 출력에 상한을 두는 출력제한운전 [2]-[4]과 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System) [5]-[7]를 이용하는 방법이 있다. 출력제한운전의 경우 출력에 한계를 설정하여 풍력발전의 출력범위를 감소시킴으로써, 풍력발전의 예측오차와 변동성을 완화시킬 수 있게 된다. 이에 따라 풍력발전의 불확실성에 대비하기 위한 운전예비력과 그 증·감발 능력의 요구량을 감소시킬 수 있다. 그러나 풍력발전 출력을 제한하는 것은 풍력발전의 불확실성을 완화하는 반면 저단가의 풍력 발전량 또한 감소시키는 문제점이 있다. 출력제한운전 외에도 에너지저장장치를 이용하여 풍력발전 출력을 제어함으로써 풍력발전 예측오차를 완화할 수도 있다. 풍력발전 출력이 예측값에서 크게 벗어나는 경우에도 에너지저장장치의 충·방전을 통해 예측오차를 완화시키는 것으로 풍력발전의 발전량에는 큰 영향이 없을 것이다. 그러나 출력제한운전과는 달리 고가의 에너지저장장치를 설치·운영해야하는 비용적 부담이 문제가 된다.

† Corresponding Author : Dept. of Information and Electronic Engineering, Mokpo National University, Korea.
E-mail: jaehee@mokpo.ac.kr

* School of Electrical Engineering, Gwangju University, Korea.
** BK21 Plus Humanware Information Technology Division, Korea University, Korea.

Received : September 27, 2017; Accepted : January 11, 2018

풍력발전 예측오차 완화의 적절한 방안을 선택하기 위해서 각 방안별 발전량 저하 및 추가설비비용의 관점에서의 경제적 효과 비교가 필요할 것이다. 본 논문은 풍력발전의 예측오차 완화를 위한 출력제한운전과 ESS운영 방법에 대해 고찰하고, 각 방안에 대한 경제적 효과를 비교분석하였다.

2. 풍력발전출력 예측오차 완화

2.1 풍력발전 예측오차와 예측오차 제한

풍력발전 출력 예측은 본질적으로 오차가 발생하게 된다. 예측 오차의 정의는 예측값에 대한 실제출력의 차이를 의미하며, 이는 아래 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_t = p_{w,t} - p_{f,t} \quad (1)$$

여기서 ϵ_t , $p_{w,t}$, $p_{f,t}$ 는 t시간의 풍력발전 예측오차, 실제출력, 출력 예측값을 의미한다. 가장 간단한 실시간예측은 예측시점의 풍력출력이 향후 몇 분 또는 몇 시간까지 동일하게 나타나는 것을 가정하는 것이다. 이와 같은 풍력출력의 예측오차는 수요예측 오차와 더해져 일반발전기의 주파수조정예비력 증가를 야기하게 된다.

전력계통의 주파수조정예비력 증가에 따른 부담을 완화하기 위해, 풍력발전 출력의 예측오차를 제한하고 허용범위를 벗어나는 경우 풍력발전사업자에게 페널티를 부과하는 방안을 고려할 수 있을 것이다. 해외 일부 지역[2]에서는 급전지시량의 92%~108%(±8%)를 벗어난 발전이 일정 횟수 이상 연속적으로 발생 시 페널티 부과하는 규칙을 적용하고 있다. 일반적으로 풍력발전 예측량이 급전지시량으로 결정되므로, 풍력발전 예측오차의 제한은 일반발전기의 급전지시 허용오차 적용과 동일한 역할을 하게 된다. 이와 예측오차의 제한을 수식으로 표현하면 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$pr(p_{f,t} - \epsilon_{\max} \leq p_{w,t} \leq p_{f,t} + \epsilon_{\max}) \geq \alpha \quad (2)$$

여기서 ϵ_{\max} 는 풍력발전 출력 제한범위를 의미하며, 예측오차는

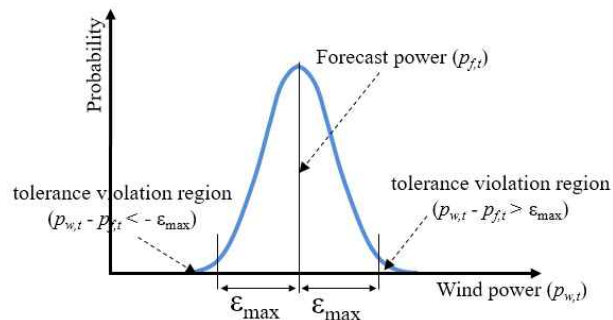


그림 1 풍력발전 예측오차 분포 및 예측오차 허용 범위
Fig. 1 Distribution of wind power forecasting error

이 범위 내에 있을 확률이 α 이상이 되어야 함을 의미한다. 일반적인 풍력발전 예측오차는 그림 1과 같이 정규분포에 가까운 확률분포로 표현할 수 있다.

풍력발전사업자는 이와 같은 급전지시량 허용오차를 최소화하기 위해, 1) 예측값보다 낮은 예측값을 제출하여 전략적으로 낮은 급전지시량을 지시받아 하방 예측오차를 감소시키고, 출력제한운전으로 상방 예측오차를 감소할 수 있을 것이다. 또는 2) 출력 예측값에서 크게 벗어나는 경우 에너지저장장치의 충·방전을 통해 예측오차를 완화시켜 페널티를 회피할 수 있을 것이다.

2.2 풍력발전 출력제한을 통한 예측오차 완화

풍력발전 출력제한운전은 출력 최대치에 한계를 설정[2]하는 것으로 상방으로의 예측오차(과소예측)를 감소시키는 역할을 기대할 수 있다. 출력상한이 제한되는 풍력발전 출력을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$p_{w,t} = \min\{p_{aw,t}, \hat{p}_{l,t}\} \quad (3)$$

여기서 $p_{aw,t}$ 는 t시간 발전 가능한 출력을 의미하고, $\hat{p}_{l,t}$ 은 t시간 풍력발전 출력제한운전을 위한 출력상한제한 설정값을 의미한다.

풍력발전의 출력상한제한과 함께 출력 예측값을 하향 조정한다면 하방으로의 예측오차도 함께 감소하게 될 것이다. 허용오차 범위내의 풍력발전 출력을 위해 출력상한제한은 다음 수식을 만족하는 값으로 설정할 수 있을 것이다.

$$\hat{p}_{l,t} = \max p_{l,t} \quad (4a)$$

$$s.t. \quad pr(p_{l,t} - 2 \cdot \epsilon_{\max} \leq p_{w,t}) \geq \alpha \quad (4b)$$

여기서 $p_{l,t}$ 는 출력상한을 의미한다. 풍력발전의 출력제한은 값싼 풍력발전량을 버리는 것이기 때문에 가능한 높은 $p_{l,t}$ 을 설정하는 것이 필요하다. 따라서 $p_{l,t}$ 는 풍력발전의 출력이 $p_{l,t}$ 와 $p_{l,t} - 2 \cdot \epsilon_{\max}$ 사이에 발생할 가능성이 α 보다 높게 만들 수 있는 값 중에 가장 높은 값을 취하게 된다. 이와 함께 출력 예측값이 수식 (5)와 같이 $p_{l,t}$ 와 $p_{l,t} - 2 \cdot \epsilon_{\max}$ 의 중간값으로 조정된다면 수식 (2)의 예측

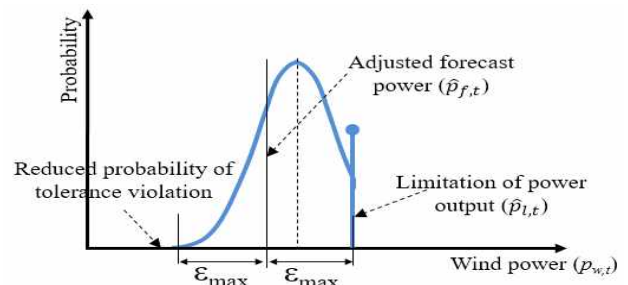


그림 2 풍력발전 출력제한운전 시 예측오차 분포
Fig. 2 Distribution of wind power forecasting error with curtailment

오차 허용 범위를 만족할 수 있게 된다.

$$\hat{p}_{f,t} = p_{f,t} - \epsilon_{\max} \quad (5)$$

그림 2는 풍력발전 출력제한운전을 통한 예측오차 완화의 개념을 보이고 있다. 출력제한상한 설정값 $\hat{p}_{f,t}$ 이상으로 발전이 불가하기 때문에 과소예측이 예측오차제한범위를 벗어나는 경우는 발생하지 않을 것이다. 또한 예측값의 하향조정에 따라 과소예측이 제한범위를 벗어나는 확률도 감소시킬 수 있을 것이다.

2.3 ESS 충·방전을 이용한 풍력발전 예측오차 완화

풍력발전 출력에 허용오차가 적용될 경우, ESS를 이용하여 예측오차를 완화할 수 있을 것이다. 풍력 출력이 허용오차를 벗어나는 경우 ESS를 충전 또는 방전함으로써 허용오차 내의 발전량으로 조정하는 것이다. 이때의 ESS 충방전량은 아래 수식과 같이 결정할 수 있다.

$$p_{ess,t}^c = \begin{cases} p_{w,t} - p_{f,t} - \epsilon_{\max}, & \epsilon_t > \epsilon_{\max} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

$$p_{ess,t}^d = \begin{cases} p_{f,t} - p_{w,t} + \epsilon_{\max}, & \epsilon_t < -\epsilon_{\max} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $p_{ess,t}^c$ 와 $p_{ess,t}^d$ 는 각각 t 시간 ESS의 충전량과 방전량을 의미한다. 풍력발전이 허용오차 내에서 출력되면, ESS의 충·방전량은 0이 되어야 할 것이다. 본 논문에서는 수식 (6), (7)에 기반한 ESS의 운전에 의해 예측오차 허용범위 (2)를 만족시킬 수 있는 ESS의 충·방전 출력용량을 아래 수식 (8)을 통해 산정하였다.

$$\hat{c}_{pcs} = \min c_{pcs} \quad (8a)$$

$$\text{s.t. } pr(p_{f,t} - c_{pcs} - \epsilon_{\max} \leq p_{w,t}, p_{w,t} \leq p_{f,t} + c_{pcs} + \epsilon_{\max}) \geq \alpha \quad (8b)$$

여기서 c_{pcs} 는 ESS의 충·방전 출력용량을 의미한다.

ESS는 충·방전을 거듭할수록 저장된 에너지가 누적된다. 이를 수식으로 표현하면 아래 수식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_t = E_{t-1} + \eta p_{ess,t}^c - \frac{1}{\eta} p_{ess,t}^d \quad (9)$$

여기서 E_t 는 t 시간 ESS의 SOC(State of Charge)를 나타내며, η 는 ESS의 충전 및 방전 효율을 의미한다. 이 같은 누적된 저장 에너지를 고려하여 배터리의 용량이 설치되어야 할 것이다. 일정 기간의 풍력발전실적과 예측값이 주어진다면, 상기 수식 (6), (7)의 충·방전 모의를 통해 수식 (8)의 적정 출력용량을 결정할 수 있으며, 수식 (9)로 산정되는 저장에너지의 최대값을 저장장치의 용량으로 결정할 수 있다.

3. 풍력발전 예측오차 완화방법의 경제성 비교

풍력발전 출력제한 방법과 ESS 충·방전 방법 모두 급전지시 허용오차 내로 발전량을 조정할 수 있을 것이다. 물론 낮은 확률로 오차를 벗어난 불가피한 상황도 일부 있을 수 있다. 두 방법의 차이는 풍력발전의 이용률에 있다. 풍력발전 출력제한은 출력의 일부를 쓰지 않고 버리는 것으로 풍력발전의 이용률 감소를 일으킨다. 반면, ESS를 이용한 조정은 이와 같은 단점은 나타나지 않지만 ESS 설비비용이 필요하다. 풍력발전사업자의 입장에서는 두 가지 옵션에 대한 경제적인 분석이 필요하게 되는 것이다. 각 방안에 대한 경제적인 분석을 위해 필요한 풍력발전사업자가 기대할 수 있는 발전수입은 평균발전량을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있을 것이다.

$$r_w = \sum_{t=1}^T \{ \rho_{E,t} \cdot p_{w,t} + \beta \cdot \rho_{REC,t} \cdot p_{w,t} \} \quad (10)$$

여기서 $\rho_{E,t}$ 는 시간별 계통한계가격을 의미하고, $\rho_{REC,t}$ 는 REC(Renewable Energy Certificate) 단가를, β 는 REC 가중치를 각각 의미한다.

ESS를 구축하기 위한 설비비용은 다음과 같이 PCS(Power Conversion System)의 kW당 설비비용과 배터리의 kWh당 설비비용으로 구분되어 산정될 수 있다[9].

$$IC_{ESS,0} = IC_{pcs} \cdot \hat{c}_{pcs} + IC_{str} \cdot \hat{c}_{str} \quad (11)$$

여기서 $IC_{ESS,0}$ 는 ESS 설치에 대한 투자비용을 의미하며, IC_{pcs} 및 IC_{str} 는 각각 PCS의 kW당 설비비용과 배터리의 kWh당 설비비용을 각각 의미한다. 또한 \hat{c}_{pcs} 는 수식 (8)로 결정된 ESS의 충·방전 출력용량을 의미하며, \hat{c}_{str} 는 수식 (9)의 저장에너지 중 최대값을 이용해 결정된 저장용량을 의미한다.

본 논문에서는 상기와 같이 풍력발전 예측오차가 제한되는 경우를 가정해, 풍력발전사업자의 두 가지 예측오차 완화방안의 수입/비용 모델을 제시하였으며, 이를 바탕으로 아래 수식 (12)와 같은 증분내부수익률법(IIRR, Incremental Internal Rate of Return) [10]을 이용해 풍력발전 출력제한 방안과 ESS 설치 방안의 경제성을 비교하였다. IIRR은 두 가지 방안 중 투자비용이

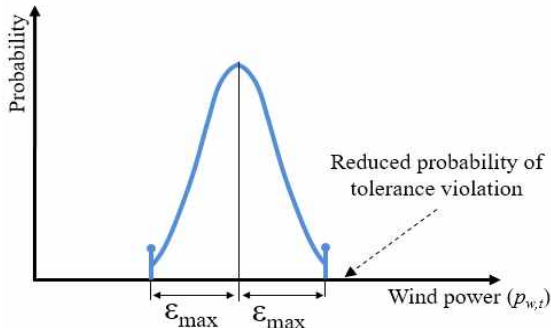


그림 3 ESS 충·방전 운전 시 풍력발전 예측오차 분포

Fig. 3 Distribution of wind power forecasting error with ESS operation

높은 방안에 대해 다른 방안에 대비한 추가적인 수익율을 추정할 때 사용된다.

$$\sum_{y=1}^Y \frac{r_{ess,y} - r_{wc,y}}{(1 + IRR)^y} = IC_{ESS,0} - IC_{wc,0} \quad (12)$$

여기서 $r_{wc,y}$ 와 $r_{ess,y}$ 은 출력제한 및 ESS 충·방전으로 보정된 풍력발전 출력에 의해 추정되는 풍력사업자의 연간 수입을 의미하고, $IC_{wc,0}$ 은 출력제한에 대한 초기투자비를 의미하는 것으로, 본 논문에서는 0으로 가정하였다. 일반적으로 IRR이 MARR (minimum acceptable rate of return)보다 높은 경우 고비용의 투자방안이 경제성이 있다고 판단할 수 있게 된다.

4. 사례연구

4.1 풍력발전 예측오차

본 논문에서는 국내 풍력발전단지의 발전실적을 100MW 용량에 맞추어 선형 증가시킨 값을 이용하여 풍력발전 출력제한 및 ESS 충·방전에 따른 출력 예측오차와 경제적 효과를 모의하였다. 급전주기 및 예측주기는 5분으로 가정하였으며, t=0시간부터 5분간의 풍력발전 예측값은 t=0시점의 출력값을 이용하였다. 모의한 풍력발전의 1년간의 예측오차는 다음 그림 4와 같았다.

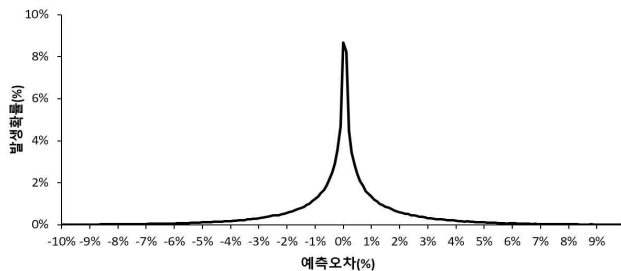


그림 4 풍력발전출력의 예측오차 분포 (base case)
Fig. 4 Distribution of wind power forecasting error

본 연구의 기본 시나리오에서는 예측오차 허용범위를 ±4.0MW로 설정하고, 이 범위를 벗어나는 출력이 1% 이하로 발생하도록 출력제한 운전과 ESS 운전을 적용하였다.

그림 5는 풍력발전 출력에 아무런 제어를 적용하지 않을 경우 (base case) 일부 시간대의 발전출력과 출력예측 결과를 보이고 있다. 예측오차 허용범위(±4.0MW)를 벗어나는 경우가 약 8.3%로 빈번히 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 출력제한 운전 및 ESS 운전 모의 결과

풍력발전 출력의 예측오차가 ±4.0MW 이내로 발생할 확률이 99.0%에 도달하도록 풍력발전 출력제한운전을 실시하였다. 수식

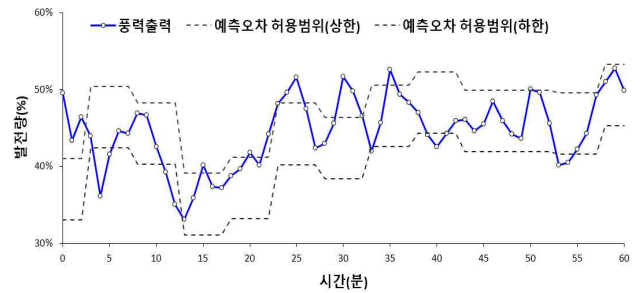


그림 5 풍력발전출력 및 예측오차 허용범위(base case)
Fig. 5 Wind generation and forecasting error tolerance in base case

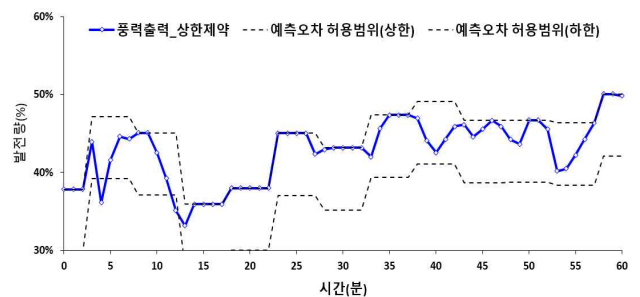


그림 6 풍력발전 출력제한운전 모의결과
Fig. 6 Simulation result of wind power curtailment

(4)의 출력상한을 계산한 결과, 매시간 출력 예측값의 0.8MW 상위값으로 출력상한을 설정하면 예측오차 허용범위를 벗어나는 출력을 1.0% 이하로 감소시킬 수 있다. 또한 예측값은 수식 (5)에 의해 출력상한보다 4MW 낮은 값으로 재설정되었다. 이 때문에 그림5의 예측오차 허용범위 보다 전체적으로 낮아진 허용범위가 설정되어 진다.

그림 6에서 일부시간에서의 출력상한설정 후 풍력발전 출력을 보이고 있다. 대부분의 시간에서 예측오차 허용범위 내에서 발전 출력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 다만 약 1%의 확률로 허용범위 하한값 아래에서 출력이 발생하고 있다.

그림 7에서 풍력발전 출력제한운전을 적용할 경우의 예측오차 분포를 보이고 있다. 매시간 출력 예측값의 0.8MW 상위값으로 설정되었기 때문에 그 이상의 예측오차는 발생하지 않게 된다. 허용범위를 벗어나는 출력이 발생할 확률은 1.0%로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

풍력발전 출력의 예측오차가 ±4.0MW 이내로 발생할 확률이 99.0%에 도달하도록 ESS 운전을 실시하였다. ESS의 충·방전 용량(PCS)은 수식 (8)로부터 5.45MW로 설정되었으며, 배터리의 저장용량은 수식 (9)로부터 1.0MWh로 설정되었다. 이 때 배터리의 SOC는 24시간마다 50%로 재설정 되는 것으로 가정하였다. 그림 8은 이와 같은 ESS를 이용하여 예측오차 허용범위를 벗어나는 풍력발전 출력에 대한 보정운전 결과를 보이고 있다. 거의 대부분의 시간에서 허용범위내의 출력이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

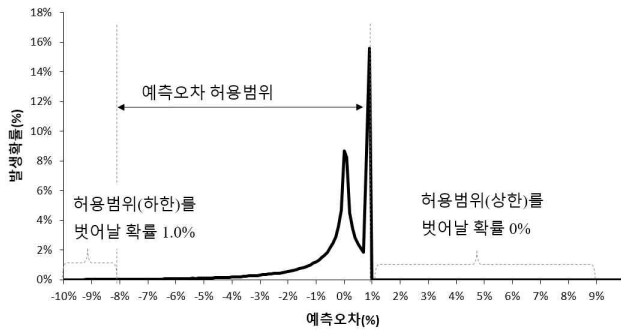


그림 7 출력제한운전시 풍력발전 예측오차 분포 결과
 Fig. 7 Simulation result of wind power forecasting error in case with power curtailment

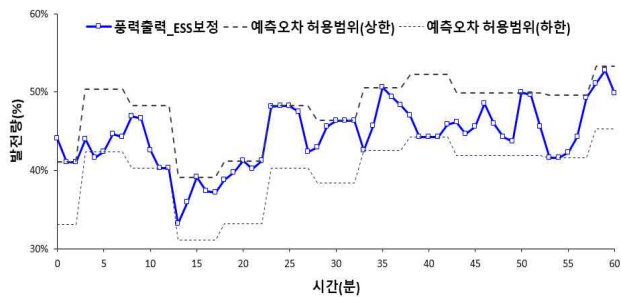


그림 8 ESS 충·방전을 이용한 풍력발전 예측오차 완화 모의 결과
 Fig. 8 Simulation result of wind power forecasting error in case with ESS operation

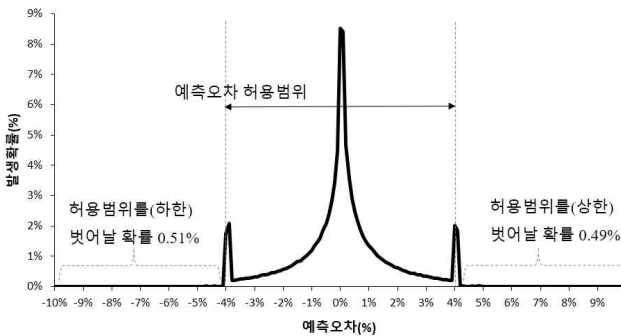


그림 9 ESS 운전 시 풍력발전 예측오차 분포 결과
 Fig. 9 Simulation result of wind power forecasting error in case with ESS operation

그림 9에서 ESS 운영을 이용하는 경우 풍력발전 예측오차가 감소하는 결과를 보이고 있다. 허용범위를 벗어날 확률이 발생할 확률은 1.0%로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

출력제한운전 및 ESS 운영을 이용하는 경우 모두 허용범위에서 발전하는 것에 효과가 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 10은 예측오차 허용범위 변화에 따른 풍력발전 출력의 평균예측오차를 보이고 있다.

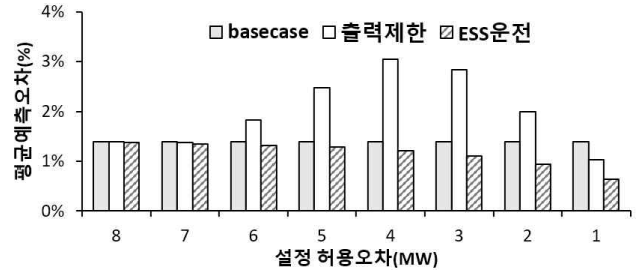


그림 10 허용오차 별 풍력발전 출력의 평균예측오차
 Fig. 10 Average forecasting error of wind power with different tolerance

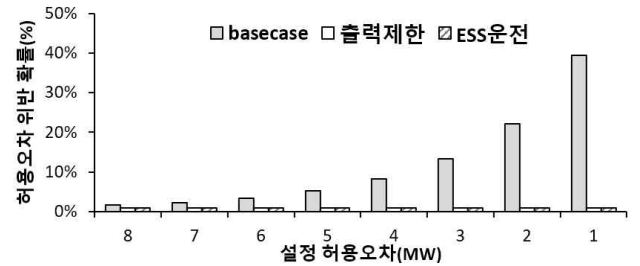


그림 11 예측오차 허용범위를 벗어날 확률
 Fig. 11 Probability of violating forecasting error tolerance

그림 11은 풍력발전 출력이 허용오차를 벗어나는 확률을 보이고 있다. 만약 풍력발전 출력에 아무런 제어를 적용하지 않고 허용오차를 ± 1.0 MW로 설정할 경우 약 39%는 이 오차 범위를 벗어난 출력이 나타되며, 허용범위가 크면 클수록 허용범위를 벗어날 확률은 감소하게 될 것이다.

4.3 예측오차 완화 운전에 의한 경제적 영향

풍력발전 출력상한제약을 설정하면서 필연적으로 이용률의 하락이 발생하게 된다. base case의 연평균 이용률은 23.6%로 나타나는 것을 감안하면 출력제한운전의 경우 약 0.44%의 이용률 하락이 발생하였다. 반면 ESS운전에서는 충·방전 손실에 의한 0.009%의 미미한 하락을 보였다. 연간 평균 이용률과 함께 풍력발전사업자의 수입변화를 표 1에서 보이고 있다. 이 때 SMP (System Marginal Price)는 76.91원/kWh[11]로 가정하고, REC 가격은 2017년 7월 현물 및 계약시장 평균가격인 9.5만원[11]을 적용하였다. 또한 ESS의 충전효율 및 방전효율을 각각 95%로 가정하였다.

출력제한운전의 경우 이용률의 하락에 의해 전력판매수입 및 REC수입의 총수입의 하락이 발생하게 되는데, 이는 설정한 예측오차의 범위가 좁을수록 큰 수입 감소로 이어지게 된다. 반면, ESS운전의 경우 수입의 감소가 상대적으로 크지 않으며 설정 예측오차의 범위에 큰 영향이 없었다. 그러나 예측오차의 범위가 좁을수록 더 큰 용량의 ESS가 요구되게 된다. 그림 12는 설정된 허용오차에 따른 총수입의 변화를 보이고 있다.

표 1 신재생발전사업자 수입 변화 모의 결과

Table 1 Revenue results in case with wind power curtailment and ESS operation

운영방안	case1 (출력제한운전)	case2 (ESS운전)
Δ이용율	- 0.4400%	- 0.0090%
Δ전력판매수입	- 3,654 천원	- 72 천원
ΔREC수입	- 2,958 천원	- 58 천원
Δ총수입	- 6,612 천원	- 131 천원

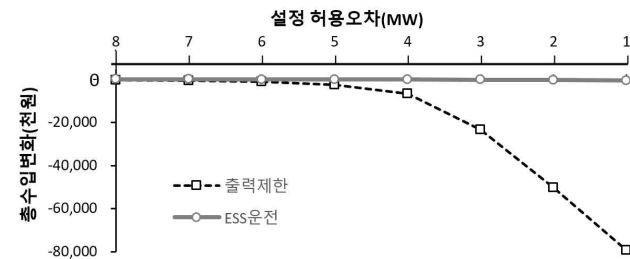


그림 12 허용오차별 총수입변화 모의 결과

Fig. 12 Results of revenue change with different tolerance

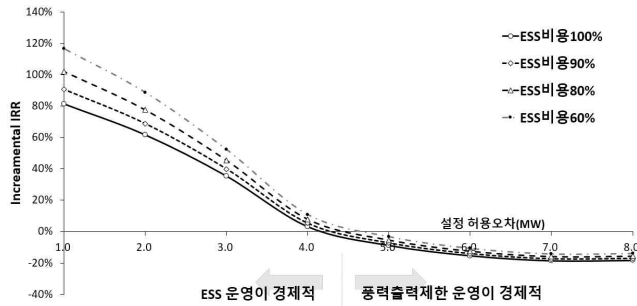


그림 13 예측오차 완화방안의 IIRR 산정 결과

Fig. 13 Results of IIRR in terms of different tolerance level

ESS의 설치에 있어 단위 PCS의 비용을 400천원/kW으로, 단위 저장용량 당 비용을 600천원/kWh로 가정하였다.[7] 이 같은 ESS 설치비용의 가정과 함께 허용오차에 따른 ESS 운전의 증분 내부수익률 결과를 그림 13에서 보이고 있다. 그림 13에서 허용오차의 감소할수록 증분내부수익률이 증가하고 있다. 증분내부수익률이 양수로 나타는 영역에서는 ESS 운전이 출력제한에 비해 경제성이 높은 것을 의미하고, 증분내부수익률이 음수로 나타는 영역은 출력제한운전이 상대적으로 경제성이 높음을 의미한다. 그림 13의 결과로 볼 때 계통운영기관의 예측오차 허용범위가 높은 영역에서는 풍력발전 출력제한운전이 더 경제적인 방법이며, 허용범위의 규제가 강화되면서 ESS의 운전이 상대적으로 예측오차 완화를 위한 경제적인 방법임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 풍력발전의 출력제한운전 및 ESS 운전을 통해 풍력발전 예측오차가 완화됨으로써 발생하는 풍력발전사업자의 수입/비용 모델을 제시하였으며, 이를 바탕으로 풍력발전 예측오차 완화방안의 경제적 효과를 비교 분석하였다. 두 가지의 풍력발전 예측오차 완화방안의 경제적 효과를 비교 분석하기 위해서 증분내부수익률법이 사용되었으며, 국내 풍력발전단지의 발전실적을 이용하여 사례연구를 수행하였다. 사례연구를 통해 풍력발전 출력의 허용오차 범위의 변화가 풍력발전 예측오차 완화방안의 경제성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 미래 풍력발전 예측오차 완화를 위한 최적의 방안을 선택하는데 기여할 수 있을 것이다. 향후에는 풍력발전설비의 단독 운전이 아닌 여타 신재생에너지와 함께 가상발전소의 형식으로 운전되는 환경 하에서의 예측오차 완화를 위한 출력제한운전 및 ESS 운전의 경제성 평가를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 2016학년도 목포대학교 교내연구과제 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] K. Dragoon, Valuing Wind Generation on Integrated Power Systems, Norwich: William Andrew, 2010, Chapter 5.
- [2] M. Tsili and S. Papathanassiou, "A Review of Grid Code Technical Requirements for Wind Farms," IET Renew. Power Gen., vol. 3, no. 3, Mar. 2009.
- [3] S. Fink, C. Mudd, K. Porter, and B. Morgenstern, "Wind Energy Curtailment Case Studies: May 2008 – May 2009," National Renewable Energy Laboratory, Oct. 2009.
- [4] Y. Gu and L. Xie, "Fast Sensitivity Analysis Approach to Assessing Congestion Induced Wind Curtailment," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 1, Jan. 2014.
- [5] MISO, Dispatchable Intermittent Resources, available at: <https://www.misoenergy.org>.
- [6] H. Bludszuweit, J. A. Dominguez-Navarro, and A. Llombart, "Statistical Analysis of Wind Power Forecast Error," IEEE Trans. on Power Syst., vol. 23, no. 3, Aug. 2008.
- [7] H. Bludszuweit and J. A. Dominguez-Navarro, "A Probabilistic Method for Energy Storage Sizing Based on Wind Power Forecast Uncertainty," IEEE Trans. on Power Syst., vol. 26, no. 3, Dec. 2010.
- [8] F. Zhang, K. Meng, Z. Xu, Z. Dong, L. Zhang, C. Wan, and J.

- Liang, "Battery ESS Planning for Wind Smoothing via Variable-Interval Reference Modulation and Self-Adaptive SOC Control Strategy," IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 8, no. 2, Oct, 2016.
- [9] S. Schoenung, "Energy Storage Systems Cost Update - A Study for the DOE Energy Storage Systems Program," Snadia Report, Apr. 2011.
- [10] C. A. Collier, Engineering Economic and Cost Analysis, Melon Park, CA: Addison Wesley Longman, 1998.
- [11] Korea Power Exchange, Electric Power System Information System (EPSIS), available at: <https://www.kpx.or.kr>.

저 자 소 개



위 영 민 (Young-Min Wi)

1980년 4월 7일생. 2013년 고려대학교 전기 전자전파공학과 졸업(박사). 2013~2014년 한국전기연구원 근무. 2014년~현재 광주대학교 전기공학부 조교수.

E-mail : ymwi@gwangju.ac.kr



조 형 철 (Hyung-Chul Jo)

1987년 7월 13일생. 2017년 고려대학교 전기 전자전파공학과 졸업(박사). 2017년~현재 고려대학교 BK21플러스 휴먼웨어 정보기술사업단 연구교수.

E-mail : linge2002@korea.ac.kr



이 재 희 (Jaehee Lee)

1981년 12월 12일생. 2014년 고려대학교 전기 전자전파공학과 졸업(박사). 2013~2015년 한전 경제경영연구원 선임연구원. 현재 목포대학교 정보 전자공학과 조교수.

E-mail : jaehee@mokpo.ac.kr