

국가적 관점에서 신재생에너지용 ESS설비의 적정용량산정을 위한 운전 수리모델 수립에 대한 연구

윤석민, 이유석, 이홍관, 김정훈
홍익대학교

A study on establishing operation mathematical model for optimum capacity estimation of the ESS facility for renewable energy in the national perspective

Seok-Min Youn, You-Seok Lee, Hong-Kwan Lee, Jung-Hoon Kim
Hongik University

Abstract - 세계기후변화협약에서 발효한 탄소세 등 각종 규제에 의해 국가입장에서 큰 비용부담이 되기 때문에 이에 대한 대비 중 하나로 신재생에너지가 떠오르고 있다. 신재생에너지 중 보급이 빠른 태양광과 풍력은 출력이 불안정하기 때문에 이를 완화시키는 것 중 하나로 에너지저장장치(ESS : Energy Storage System)를 도입하고 있다. 본 논문에서는 신재생에너지용 ESS 도입 시 계통에서 확보해야하는 예비력과 첩두부하가 삭감되어 나타나는 회피비용을 연료비, 무부하비, 기동·정지비, 발전설비회피비용으로 고려한다. 그리고 국가적 관점에서 필요한 적정용량을 산정하기 위하여 비용관점에서 한계운전비와 한계투자비를 비교하는 방법론을 제안한다. 그 중 본 논문의 대상인 한계 운전비를 구하기 위해 운전 수리모델을 수립한다.

1. 서 론

세계적으로 온실가스 배출로 인한 지구온난화 등 지구환경과피가 문제가 되고 있다. 온실가스를 저감하기 위해 1992년 브라질 리우에서 세계기후변화협약을 채택하였고, 이후 1997년 교토의정서에 의해 탄소세를 도입하고 점차 늘려가고 있다. 탄소세는 국가입장에서 부담이 크기 때문에 온실가스를 내지 않는 신재생에너지를 장려하고 있다.[1]

우리나라에서는 신재생에너지 보급정책으로 2001년 발전차액제도를 시작으로 2006년 신재생공급협약을 거쳐 2012년부터 공급의무화제도를 시행하여 신재생에너지 발전소를 확대시키고 있다.[2] 이러한 정책으로 인해 국내 신재생에너지의 연간발전량이 2002년 203,287MWh에서 2013년 현재 21,437,822MWh로 매년 증가하고 있는 추세이다.[3]

하지만 신재생에너지 발전소는 기존의 화석연료 발전소와 달리 출력이 제어가 되지 않고 환경과 날씨에 따라 간헐적인 출력으로 불안정하기 때문에 기존 발전기 출력의 급격한 변동을 조래하고[4] 출력변동만큼 대기대체예비력(운전상태)을 추가적으로 확보해야한다. 이러한 불안정한 출력을 안정화시키기 위한 대표적 방법으로 풍력발전의 Pitch제어와 ESS의 도입이 있다. Pitch제어방식은 초기비용이 적게 들지만 출력손실이 크기 때문에 점차 ESS를 도입하는 방법으로 바뀌고 있다.

신재생에너지용 ESS의 세계현황으로는 미국 웨스트버지니아 주의 풍력단지(100MW)에 32MW ESS를 실증하고 있고 일본에서는 메가솔라 프로젝트로 인한 태양광의 증가로 2023년까지 21.8GW급 ESS를 도입할 것으로 예상하고 있다.[5] 국내에서는 해상풍력(9MW)의 출력안정화를 위해 4MW ESS를 조천변전소에 설치하여 실증하고 있다.[6]

그러나 ESS는 초기 투자비용이 1MW당 9'12억[7]으로 비싸고 신재생 발전설비에 따라 경제성이 있는 적정 ESS 용량이 정해져있기 때문에 무한정공급은 국가적 낭비이므로 신재생에너지용 ESS의 적정용량산정은 필수불가결하다. 현재 신재생에너지용 ESS 적정용량산정 연구[6],[8]는 활발히 진행되고 있지만 현재 국가적 관점에서 신재생에너지용 ESS의 적정용량 산정에 대한 연구는 되어 있지 않다.

본 논문에서는 신재생에너지용 ESS 도입으로 불안정한 출력을 안정화 시킬 뿐만 아니라 기존 발전기의 대기대체예비력(운전상태)과 첩두부하가 삭감되어 발생하는 회피비용을 연료비, 무부하비, 기동·정지비, 발전설비회피비용으로 고려한다. 그리고 국가에서 지출하는 비용을 최소화 하는 비용관점으로 한계운전비와 한계투자비를 비교하여 신재생에너지용 ESS 적정용량을 산정하는 방법론을 제안한다. 그 중 본 논문의 대상인 한계 운전비를 구하기 위해 운전 수리모델을 수립한다.

2. 신재생에너지용 ESS의 운전 수리모델 및 한계운전비

2.1 신재생에너지 특징

신재생에너지 중 전력을 생산하면서 출력을 제어할 수 없기 때문에 ESS를 이용하여 제어가 필요한 태양광과 풍력을 대상으로 하였다.

태양광발전은 계절과 시간에 따른 태양고도 변화에 따라 조사량이 다르기 때문에 출력이 다르게 나타난다. 또한 흐린 날이나 비가 올 때는

발전을 하지 못하고 맑은 날에도 구름의 위치에 따라 출력이 심하게 변동한다. 또한 풍력발전은 계절, 시간에 따라 풍속변화가 심하기 때문에 출력이 크게 변한다.[9] 그 예로 행원풍력은 최대 66%(6.66MW), 한경풍력은 14.69MW(70%), 성산 10.45MW(87%) 만큼 출력이 변동한다.[8]

이러한 출력변동에 대비하기 위해서 대기대체예비력(운전상태)를 더 확보해야 한다. 예비력은 발전기의 무부하 운전상태로 대기하는 것이기 때문에 국가적 손해이다. 따라서 국가적 손해를 줄이기 위해서 신재생에너지용 ESS를 도입하여야 한다.

2.2 신재생에너지용 ESS의 충·방전 제어방법

신재생에너지용 ESS 제어방법은 크게 초단위로 충·방전하는 출력안정화 제어방법과 하루단위로 충·방전하는 부하평준화 제어방법이 있다. 두 가지 방법 중 현재 풍력단지에 사용하고 있는 출력안정화 제어방법을 대상으로 하였다.

ESS의 충·방전 전력은 신재생에너지 출력과 기준출력의 차이에 의해 결정되고 기준출력은 직전시간대의 기준출력과 SOC, 신재생에너지 출력에 의해 산정된다. 기존의 연구[8]에서 사용한 기준출력 산정법을 사용하여 <그림 1>과 식 (1)에 나타내었다.



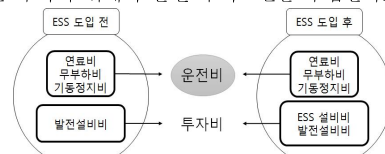
<그림 1> SOC와 신재생 출력에 따른 기준출력 값 설정방법

$$P_{r,wind,i}^{sd} = \begin{cases} P_{r,wind,i}^{sd(t-1)} + \Delta P_{r,wind,i} \cdot P_{r,wind,i}^{sd} - P_{r,wind,i}^{sd(t-1)} \geq P_{n,ESS,wind,i} \\ P_{r,wind,i}^{sd(t-1)} - \Delta P_{r,wind,i} \cdot P_{r,wind,i}^{sd} - P_{r,wind,i}^{sd(t-1)} < P_{n,ESS,wind,i} \end{cases} \quad (1)$$

2.3 신재생에너지용 ESS 도입 시 비용요소

신재생에너지용 ESS 적정용량을 산정하기 위해서는 <그림 2>에 있는 비용요소(운전비, 투자비)의 합을 최소화시켜야 한다. 그러기 위해서는 ESS의 용량제약이 없다면 한계 운전비와 한계 투자비가 같아질 때 ESS용량이 적정용량이 된다.

ESS 도입 시 확보해야 하는 대기대체예비력(운전상태)과 첩두부하가 삭감되기 때문에 가장 비싼 연료비의 발전기를 사용하지 않을 수 있다. 따라서 발전기를 정지시킬 수 있기 때문에 연료비, 무부하비, 기동·정지비 회피비용이 발생하고 정지시킨 발전기가 다시 기동할 필요가 없을 경우 그 발전기를 투자하지 않아도 되기 때문에 발전설비회피비용이 발생한다. 이 중 연료비 및 무부하비, 기동·정지비는 운전비로 고려하였고 투자비는 ESS설비에 대한 비용과 발전설비비로 나누어 고려해야 하지만 본 논문의 대상이 아니기 때문에 추후연구에서 다룬다. 따라서 먼저 한계 운전비를 구하기 위해서 운전 수리모델을 수립한다.



<그림 2> 신재생에너지용 ESS 도입 전·후 비용요소

2.4 운전 수리모델

신재생에너지용 ESS의 운전 수리모델을 수립하기 위해서 발전기의 연료비 함수는 부분 선형화하였고 전력시스템의 송·배전손실은 무시하였다. 그리고 투자비 계산을 연초에 1년 단위로 하기 때문에 운전비와 비교하기 위해서 계산기간을 똑같이 맞추어 연간 운전비를 산정한다. 연간 운전비 계산 시 부하는 계획예방정비를 하는 주기인 계절별로, 기동·정지계획을 하는 일주일 주기로 일정하게 반복한다고 가정하였다.

2.4.1 목적함수

신재생에너지용 ESS 도입 시 연간 운전비를 구하기 위해서 변수인 각 발전군의 출력과 ESS 정격용량에 대한 연간 운전비의 최소값을 구하는 수리모델을 식 (2),(3),(4),(5)와 같이 수립하였다.

$$\text{Min } O.C_{ESS} = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{d=1}^{N_d} (C_{fuel,ESS}^{sd} + C_{no,ESS}^{sd} + C_{start,ESS}^{sd}) \quad (2)$$

$$C_{fuel,ESS}^{sd} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{l=1}^{N_l} C_{fuel,ESS,i}^{sd} (P_{G,i}^{sd}) \cdot \Delta T^d \quad (3)$$

$$C_{no,ESS}^{sd} = \sum_{l=1}^{N_l} [C_{no,ESS,l}^{sd} \cdot \sum_{i=1}^{N_i} u(t-t_{up,ESS,l}^{sd}) - \sum_{m=1}^{N_m} u(t-t_{down,ESS,m}^{sd})] \cdot \Delta T^d \quad (4)$$

$$C_{start,ESS}^{sd} = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{i=1}^{N_i} C_{start,ESS,i}^{sd} \cdot \sum_{i=1}^{N_i} [u(t-t_{up,ESS,i}^{sd}) - u(t-t_{up,ESS,i}^{sd}-1)] \quad (5)$$

2.4.2 제약조건

신재생에너지용 ESS 도입 시 연간 운전비 제약조건은 다음과 같다.

i) 수급조건

$$P_{L1}^{sd} = \sum_{i=1}^{N_i} P_{G,i}^{sd} + \sum_{j=1}^{N_j} P_{r,wind,j}^{sd} + \sum_{k=1}^{N_k} P_{r,PV,k}^{sd} \quad (6)$$

$$P_{L2}^{sd} = P_{L1}^{sd} - \left(\sum_{j=1}^{N_j} \Delta P_{wind,j}^{sd} + \sum_{k=1}^{N_k} \Delta P_{PV,k}^{sd} \right) \quad (7)$$

신재생에너지 발전소는 출력이 무조건 나와서 연료비가 0이기 때문에 기저발전소가 되어 부하를 삭감한다.

ii) 예기치 못한 신재생에너지 출력 변동량

$$\Delta P_{wind,j}^{sd} = P_{wind,j}^{sd} - P_{r,wind,j}^{sd} (P_{n,ESS,wind,j} SOC) \quad (8)$$

$$\Delta P_{PV,k}^{sd} = P_{PV,k}^{sd} - P_{r,PV,k}^{sd} (P_{n,ESS,PV,k} SOC) \quad (9)$$

신재생에너지 기준출력은 <그림1>과 식 (1)을 사용한다.

iii) ESS 충·방전 전력

$$P_{ESS,wind,j}^{sd} = \begin{cases} \Delta P_{wind,j}^{sd} & , \Delta P_{wind,j}^{sd} < P_{n,ESS,wind,j} \\ P_{n,ESS,wind,j} & , \Delta P_{wind,j}^{sd} > P_{n,ESS,wind,j} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{ESS,PV,k}^{sd} = \begin{cases} \Delta P_{PV,k}^{sd} & , \Delta P_{PV,k}^{sd} < P_{n,ESS,PV,k} \\ P_{n,ESS,PV,k} & , \Delta P_{PV,k}^{sd} > P_{n,ESS,PV,k} \end{cases} \quad (11)$$

iv) 풍력단지의 ESS설비용량 제약조건

$$P_{n,ESS,wind,j} \geq 10\% \cdot P_{c,wind,j} \quad (12)$$

v) 신재생에너지 계통연계를 위한 1분 출력변동을 제한

$$-10\% \leq \frac{P_{r,wind,j}^{sd} - P_{r,wind,j}^{sd(-1분)}}{P_{c,wind,j}} \leq 10\% \quad (13)$$

$$-10\% \leq \frac{P_{r,PV,k}^{sd} - P_{r,PV,k}^{sd(-1분)}}{P_{c,PV,k}} \leq 10\% \quad (14)$$

vi) 대기대체예비력(운전상태) 최소조건

$$\sum_{i=1}^{N_i} (P_{G,i,max} - P_{G,i}^{sd}) \cdot \sum_{l=1}^{N_l} u(t-t_{up,ESS,l}^{sd}) - \sum_{m=1}^{N_m} u(t-t_{down,ESS,m}^{sd}) \geq R_0^s \quad (15)$$

vii) ESS 정격용량

$$\sum_{j=1}^{N_j} P_{n,ESS,wind,j} + \sum_{k=1}^{N_k} P_{n,ESS,PV,k} = P_{n,ESS} \quad (16)$$

2.5 한계 운전비

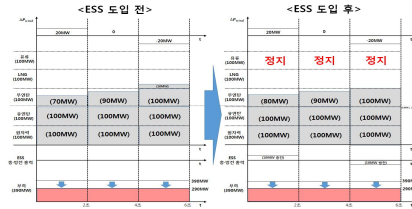
한계 운전비는 신재생에너지용 ESS의 정격용량이 한 단위[1MW] 증가하였을 때 발생하는 연간 운전비의 증분비용을 말하는 것으로 ESS 설비의 투자결정에 있어 중요한 지표가 된다. 한계운전비(λ)가 한계투자비(μ)보다 크면 경제적 이득이 있으므로 ESS 정격용량을 더 증가시키고, λ 가 μ 보다 작으면 손해가 발생하므로 ESS 정격용량을 줄여야 한다. 즉, $\lambda = \mu$ 일 때 최적상태가 된다.

$$\frac{\partial O.C_{ESS}}{\partial P_{n,ESS}} = \lambda, \quad \frac{\partial J_{ESS}}{\partial P_{n,ESS}} = \mu \quad (17)$$

3. 사례 연구

사례연구로 부하가 390MW이고 발전소 상태가 <그림3>과 같은 계통에 정격용량이 10MW인 신재생에너지용 ESS를 도입되었을 때에 대하여 수행하였다. 연간 운전비를 산정해야 하지만 계산을 단순화하기 위해서 풍력 발전군 출력을 기준출력(100MW)보다 클 때(120MW), 같을 때, 작을 때(80MW)의 3구간을 각각 2초로 가정하여 6초 동안 운전한 총 운전비와 한계운전비를 산출하였다. 각 발전군 출력은 우선순위에 의해서 결정하였고 ESS 도입 후에 예비력조건을 만족하여 무부하 운전하던 유류 발전군이 정지한다고 가정하였다. ESS 도입 전 연료비는 15,068원, 무부하비는 7,567원으로 운전비는 22,635원에서 ESS 도입 후 연료비는

14,793원, 무부하비는 3,375원으로 운전비는 18,168원으로 산정되어 도입 전과 달라졌다. 따라서 평균한계운전비는 -447원/MW로 산출되었다.



<그림 3> 신재생에너지용 ESS도입 전·후 각 주체별 상태

또한 ESS 운전 시 침투부하를 삭감하는 경우는 유류 발전군이 다시 기동하지 않아도 되기 때문에 발전설비회전회피비용이 발생하고 침투부하를 삭감하지 않는 경우는 유류 발전군이 다시 기동해야 하기 때문에 발전설비회전회피비용이 발생하지 않는데 이것은 투자 수리모델에서 다룬다.

4. 결론

본 논문에서는 신재생에너지용 ESS 도입 시 예비력과 침투부하가 삭감되어 발생하는 회피비용을 본 논문에서는 연료비, 무부하비, 기동·정지비, 발전설비회전회피비용으로 고려하였다. 또한 국가에서 지출하는 비용을 최소화하는 비용관점으로 한계운전비와 한계투자비를 비교하기 위해 연간 운전비를 구하기 위해 주파수조정용 및 부하평준화용 ESS와 달리 새로운 제약조건들을 적용하여 운전 수리모델을 수립하였다.

향후 연구에서는 신재생에너지용 ESS의 적정용량 산정을 하기 위하여 투자비인 발전설비비와 ESS 설비투자비를 모두 반영해야 하기 때문에 이를 고려한 투자 수리모델의 수립이 필요하다.

본 논문은 2014년도 한국전력공사 전력산업 기초연구과제(NO. R14XA02-44)의 지원을 받아 수행된 연구임.

[참고 문헌]

- [1] 김정훈, “기후변화협약 및 국제표준화를 대비한 국내 주요전기기의 효율기준 마련을 위한 기초연구”, KESRI 보고서, 2008.12
- [2] 한국전기연구원, “RPS제도 및 운영시스템”, 2013.5
- [3] 전력거래소 전력통계정보시스템 사이트, <https://epsis.kpx.or.kr>
- [4] 전력거래소 스마트그리드 팀, “Smart Grid 활성화 및 전력수급 안정을 위한 BESS 도입방안 연구”, 2013.02
- [5] 산업경제리서치, “국내의 에너지저장장치(ESS) 산업 현황과 비즈니스 전략”, 2014.1.6.
- [6] 장병훈, “전력저장시스템(Energy Storage System) 개발 및 실증 현황”, 전기의 세계, Vol.63 No.10, 2014
- [7] KEPRI, “2015 전력기술 R&D 성과 한마당”, 2015.5.7
- [8] 최준영, “풍력발전의 출력안정화를 위한 에너지저장시스템의 SOC 피드백제어에 관한 연구”, 명지대학교, 박사학위논문, 2015.2
- [9] Leon Freris, David Infield, “Renewable Energy in Power System”, WILEY, 2011

[기호 일람]

- $O.C_{ESS}$: 연간운전비 s : 계열(1,2,..., N_s) d : 일형(1,2,..., N_d) t : 시간대(1,2,..., N_t)
- $C_{fuel,ESS}^{sd}$: ESS도입시 계열 d 일형 s 연료비 $C_{fuel,ESS,i}^{sd}$: ESS도입시 계열 d 일형 i 발전군 연료비
- $C_{no,ESS}^{sd}$: ESS도입시 계열 d 일형 무부하비 $C_{no,ESS}^{sd}$: ESS도입시 계열 d 일형 i 발전군 무부하비
- $C_{start,ESS}^{sd}$: ESS도입시 계열 d 일형 기동정지비
- $C_{fuel,ESS}^{sd}$: ESS도입시 계열 d 일형 i 발전군 기동정지비
- $t_{up,ESS,i}^{sd}$: ESS도입시 계열 s 일형 i 발전군 기동시간 l : 기동순서(1,2,..., N_l)
- $t_{down,ESS,m}^{sd}$: ESS도입시 계열 s 일형 m 발전군 정지시간 m : 정지순서(1,2,..., N_m)
- P_{L1}^{sd} : 계열 d 일형 t 시간대부하 P_{L2}^{sd} : 계열 d 일형 t 시간대 신재생에너지발전군 삭감부하
- $P_{G,i}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 i 발전군 출력 i : 기준발전군(1,2,..., N_i)
- $P_{r,wind,j}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 j 풍력발전군 기준출력 j : 풍력발전군(1,2,..., N_j)
- $P_{r,PV,k}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 k 태양광발전군 기준출력 k : 태양광발전군(1,2,..., N_k)
- $\Delta P_{wind,j}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 j 풍력발전군 변동출력
- $\Delta P_{PV,k}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 k 태양광발전군 변동출력
- $P_{wind,j}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 j 풍력발전군 출력
- $P_{PV,k}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 k 태양광발전군 출력
- $P_{ESS,wind,j}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 j 풍력발전군에 대한 ESS충방전 전력
- $P_{ESS,PV,k}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 k 태양광발전군에 대한 ESS충방전 전력
- $P_{n,ESS,wind,j}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 j 풍력발전군에 대한 ESS정격용량
- $P_{n,ESS,PV,k}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 k 태양광발전군에 대한 ESS정격용량 $P_{n,ESS}$: 총 ESS정격용량
- $P_{c,wind,j}$: j 풍력발전군 발전설비비용량 $P_{c,PV,k}$: k 태양광발전군 발전설비비용량
- $P_{G,i}^{sd}$: 계열 d 일형 t 시간대 i 발전군 최대출력 R_0^s : 최소 대기대체예비력(운전상태)