

100% 신재생 발전 가정 하에서 에너지 저장 장치의 적정 설비 용량

추현웅, 김동우*

한양대학교

choohw718@hanyang.ac.kr, *dkim@hanyang.ac.kr

Energy Storage Requirements for 100% Renewable Generation in Power Sector

Hyunwoong Choo, Dongwoo Kim*

Hanyang University

요약

‘2050 탄소중립 시나리오’에는 2050년 탄소중립을 이행하는 데 있어 핵심적인 에너지원들과 발전원별 발전량 전망이 제시되어 있다. 원자력이 기저 발전원으로서 역할을 지속하고, 수소는 대부분을 해외 수입으로 충당하는 것으로 계획되어 있다. 본 논문에서는 원자력과 해외 수입 수소를 제외한 100% Renewable 전력 시스템을 가정하여 안전하고 지속가능한 탄소중립을 달성하기 위한 설비 규모를 산정하였다. 태양광과 풍력은 기상에 의해 운영이 결정되므로 재난 기간을 정의하여 이에 대해 분석을 진행하였다. 2021년 기상 패턴을 기반으로 2050년 전력 수요를 충족하기 위해서는 태양광 1,228.4 GW, 육상풍력 195 GW, 해상풍력 177.8 GW, BES 저장소는 3,286.2 GWh, 컨버터는 486.6 GW 필요하다. 재난 기간이 8배 연장되면 BES 저장소는 3116.7 GWh, 컨버터는 313.4 GW, 수전해 설비는 1.1 GW, 수소 저장소는 329.9 GWh, 수소 가스 터빈은 7.6 GW 필요한 것으로 도출되었다.

I. 서론

우리나라 정부는 2021년 10월 ‘2050 탄소중립 시나리오’를 통해 2050년 탄소중립을 위한 부문별 에너지(전력) 수요 및 발전량 전망을 발표하였다. 2050년 전력 수요는 1,257.7 TWh로 예상되며, 신재생에너지가 70.7%(889.8 TWh)를 담당할 만큼 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다 [1]. 수소를 이용한 발전(연료 전지, 수소 가스 터빈) 또한 22.8%(287.1 TWh)를 담당함으로써 신재생에너지와 더불어 핵심 발전원으로 자리매김할 것이다. 본 논문에서는 전력부문 탄소중립을 달성할 수 있는 설비 계획의 방향성을 태양광, 풍력, ESS로 구성된 100% Renewable 전력 시스템으로 제시하였다. 태양광과 풍력은 기상에 의존하기 때문에 예상치 못한 일사량이나 풍속의 감소가 발생하면 전력 공급에 상당한 어려움을 겪게 된다. 본 논문에서는 이러한 상황까지 부담할 수 있는 강건한 100% Renewable 전력 시스템을 구축하기 위해 태양광과 풍력 발전량이 줄어드는 재난 기간을 정의하여 재난 기간의 길이에 따른 설비 구성 결과 또한 제시하였다.

II. 실험 방법

본 논문은 2050년 전력 수요를 만족하는 100% Renewable 전력 시스템 구성을 위해 1시간의 시간 해상도를 갖는 비용 최소화 혼합정수계획 모델을 구성하였다. 비용 최소화 혼합정수계획 모델은 2019년의 시간별 전력 수요 패턴을 기반으로 한 2050년 전력 수요를 만족하는 태양광, 풍력, BES, HESS의 설비 용량과 충·방전량을 결정하고, 특히 HESS의 경우 수소 가스 터빈의 운영을 결정하기 위한 이진 변수(binary variable)가 포함되어있다.

본 논문에서는 2021년 시간별 기상 데이터를 확보하였고, 기상 데이터를 입력하면 발전량을 출력하는 기상에 대한 함수로 모델링된 태양광 및 풍력 발전 모델을 사용하였다. 이를 통해 시간별 발전량을 계산하고 이를 태양광 및 풍력의 설비 용량에 대한 발전량의 비율인 시간별 CF(Capacity factor)로 산정 및 보정하여 전력 최적화 모델 내에서 태양광과 풍력 발전량을 계산하는 데 적용하였다. 시간별 기상 데이터는 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 제공하는 MERRA-2 재해석 데이터셋을 사용하였다. 태양광 발전 모델은 [3], 풍력 발전 모델은 [4]를 참고하였다. 2034년 태양광과 풍력의 설비 용량 전망과 발전량 전망[2]을 이용해 CF 전망을 구하고 태양광과 풍력의 연간

평균 CF가 이 전망치와 같도록 보정하였다.

ESS 기술로는 배터리 에너지 저장 장치(BES)와 수소 저장 장치(HESS)를 가정하였다. HESS의 경우 본 논문에서는 연료전지와 수소 가스 터빈 모두 설치하는 것으로 가정하였다. 수소 가스 터빈은 현재 LNG 발전소가 수소 발전소로 전환되는 형태로 도입되는 것으로 가정하고[5], [6]에 명시된 2036년 LNG 발전소의 전망 용량(63.5 GW)만큼만 설치되도록 제한하였으며, 증감발량 제약, 최소 가동/정지 시간 등 현재 LNG 발전소가 가지고 있는 특성들을 그대로 적용하였다. 설비별 기술적, 경제적 특성은 [7], [8], [9], [10]을 참고하여 적용하였다.

실험은 2021년 시간별 기상 데이터를 적용하여 진행하였고 예상치 못한 기상 악화(예상보다 일사량이 적거나 풍속이 작은 상황)에 대비하기 위하여 연도별로 태양광 발전량이 가장 작은 7일을 일사 재난 기간, 풍력 발전량이 가장 작은 7일을 풍속 재난 기간으로 가정하고 두 재난 기간을 동시에 2-8배 연장했을 때(재난 기간 시나리오는 xPW2, xPW3, xPW4, xPW5, xPW6, xPW7, xPW8로 표기) 필요한 BES, HESS 설비 용량을 결정하였다. 이때 태양광과 풍력 설비 용량은 재난 기간을 연장하지 않은 원래의 기상 데이터를 기반으로 했을 때 결과를 유지하였다. 이는 재난 기간의 연장은 예상치 못한 기후 변화이므로 예상보다 태양광과 풍력의 발전량이 감소했을 때 ESS의 운영 및 설비 계획을 관찰하기 위함이다.

III. 실험 결과

표 1은 2021년 기상 패턴에 대한 주요 실험 결과를 정리한 것이다. 2021년 기상 패턴을 기반으로 2050년 전력 수요를 충족하기 위해서는 태양광 1,228.4 GW, 육상풍력 195 GW, 해상풍력 177.8 GW, BES 저장소는 3,286.2 GWh, 컨버터는 486.6 GW 필요하다. 이때 필요한 총 비용은 420.2조원이다. 발전 설비는 비용, CF, 전력 수요와의 관계 등에 의해 결정된다. 전력 수요와의 관계는 상관계수로 표현하였다. 태양광이 발전 설비 중에서 가장 저렴하기 때문에 우선적으로 설치된다. 풍력은 낮과 밤 각각의 기상에 따라 결정된다. 밤에는 태양광이 발전하지 못하므로 풍력이 전력 수요를 감당해야 하는데, 밤 시간대에 바람이 많이 불고 전력 수요를 잘 따라간다면 상대적으로 적은 설비 용량으로 전력 수요를 만족시킬 수 있다. 2021년의 경우, 육상풍력의 낮 평균 CF는 0.1961, 낮 상관계수는 0.0084이고 밤 평균 CF는 0.2023, 밤 상관계수는 0.0754이다. 해상 풍력의 낮 평균 CF는 0.2705, 낮 상관계수는 0.0111이고 밤 평균 CF는

0.2831, 밤 상관계수는 0.0785이다. 풍력은 대체적으로 낮보다 밤에 전력 수요를 충족시키기 좋다고 볼 수 있다. ESS는 풍력과 함께 밤 시간대의 전력 수요를 감당하는 역할을 주로 수행하는데, 경제적으로 비용이 덜 필요한 방향으로 ESS와 풍력의 용량이 결정된다. Curtailment는 신재생 설비의 발전량 중 사용되지 않는 전력량을 의미한다. ‘사용되지 않는 전력량’은 전력 수요를 만족시키고 ESS에 충전하고도 남는 전력량을 의미한다. Curtailment는 총 발전량의 39.5% 수준이다.

표 1. 2021년 기상 패턴에 대한 주요 실험 결과

연도	2021
태양광 용량 (GW)	1228.4
육상풍력 용량 (GW)	195
해상풍력 용량 (GW)	177.8
BES 저장소 용량 (GWh)	3286.2
BES 컨버터 용량 (GW)	486.6
총 발전량 (TWh)	2559.1
ESS 충전량 (TWh)	309.5
Curtailment (TWh)	1010.9
총 비용 (1조원)	420.2

표 2는 재난 기간이 연장됨에 따라 ESS의 용량 산정 결과를 정리한 것이다. 재난 기간이 연장되면 실험 모델은 태양광과 풍력 용량이 결정된 상황에서 기존의 BES 용량으로 변경된 기상 패턴을 감당할 수 있는지 판단한다. 감당할 수 있다면 기존의 BES 용량이 유지되고, 감당할 수 없다면 ESS를 추가하여 전력 부족을 해결해야 한다. 이때 BES와 HESS 중에서 어떤 것을 설치할지 결정해야 하는데, 경제적으로 유리한 쪽을 선택한다. 2021년의 경우 재난 기간이 연장됨에 따라 BES를 추가하는 것보다 HESS를 추가하는 것이 더 경제적인 기상 패턴이다. 재난 기간이 연장되면 ESS가 기존 용량에서 단순히 더 추가되는 것이 아니라 길어진 재난 기간과 그 주변 기상에 따라 ESS의 용량과 운영이 결정된다. xPW4와 xPW5에서는 HESS를 도입함에 따라 BES는 줄어들지만 xPW6에서 다시 HESS의 용량을 감소시키고 BES를 증가시킨다. 수소가스 터빈이 기술적 제약은 있지만 연료전지보다 저렴하기 때문에 수소가스 터빈을 우선적으로 도입하는 것을 알 수 있다.

표 2. 2021년 재난 기간 연장에 따른 ESS 용량 산정 결과

	BES 저장소 (GWh)	BES 컨버터 (GW)	HESS 수전해 (GW)	HESS 저장소 (GWh)	HESS 연료 전지 (GW)	HESS 수소 가스 터빈 (GW)
xPW2	3286.2	486.52	-	-	-	-
xPW3	3286.2	486.52	-	-	-	-
xPW4	3126.0	313.42	1.03	311.91	-	7.09
xPW5	3114.	313.41	1.10	334.41	-	7.70
xPW6	3118.3	313.55	1.07	325.24	-	7.65
xPW7	3125.8	313.55	1.03	310.84	-	7.23
xPW8	3116.7	313.41	1.09	329.85	-	7.57

IV. 결론

본 논문에서는 2021년 기상 패턴을 기반으로 2050년 전력 수요를 만족하는 재난 기간을 정의하여 예기치 못한 기상 악화를 감당할 수 있는 ESS 용량도 산정하여 우리나라에서 100% Renewable을 실현하기 위한 설비 용량을 제시하였다. 향후 연구에서는 복수 연도의 기상에 대해 실험하여 보다 강건한 100% Renewable 전력 시스템을 도출할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출(2022003560010)되었고, 이 논문은 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2021R1F1A1063812)입니다.

참 고 문 헌

- [1] 2050탄소중립녹색성장위원회(2021). 2050 탄소중립 시나리오. URL: <https://2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>, accessed on 2022.12.09.
- [2] 산업통상자원부(2020). 제9차 전력수급기본계획. URL: http://www.motie.go.kr/motie/py/td/energeitem/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=210325&bbs_cd_n=72¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=4&dept_v=&search_val_v=, accessed on 2022.03.21.
- [3] Wan, C., Zhao, J., Song, Y., Xu, Z., Lin, J., & Hu, Z. (2015). Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 1(4), 38-46.
- [4] Diyoke, C. (2019). A new approximate capacity factor method for matching wind turbines to a site: case study of Humber region, UK. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 10(4), 451-462.
- [5] 산업통상자원부 (2021). 제1차 수소경제 이행 기본계획. URL: http://www.motie.go.kr/motie/ms/nt/announce2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=67130&bbs_cd_n=6, accessed on 2022.12.07.
- [6] 산업통상자원부 (2022). 제10차 전력수급기본계획 실무안. URL: <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156523169>, accessed on 2022.12.09.
- [7] 이근대 & 임덕오 (2021). 재생에너지 공급확대를 위한 중장기 발전단가(LCOE) 전망 시스템 구축 및 운영(2/5). 에너지경제연구원. URL: <https://www.keei.re.kr/main.nsf/index.html>, accessed on 2022.12.10.
- [8] IRENA (2022). Renewable power generation costs. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>, accessed on 2022.12.10.
- [9] United States Department of Energy (2022). 2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment.
- [10] Kebede, A. A., Kalogiannis, T., Van Mierlo, J., & Berecibar, M. (2022). A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 159, 112213.