

풍력단지 연계 Power-to-Gas 시스템의 강건 최적화 기반 운영 전략

손영건*, 석기혁**, 김성열**

계명대*, 한양대**

Optimal Operation of Power to Gas Systems based on Robust Optimization

Yeong-Geon Son*, Gi-Hyeok Seok**, Sung-Yul Kim**

Keimyung University*, Hanyang University**

Abstract - 한국은 명확한 탄소중립 목표에 따라 재생에너지 비중을 빠르게 확대하고 있다. 그러나 재생에너지 설비가 서남부 지역에 집중된 반면, 수도권에 인구와 전력수요가 집중되고 송전 인프라가 부족하여 심각한 지역 간 전력 불균형이 발생하고 있다. 이러한 구조적 제약에도 불구하고 정부는 서남부 지역 중심의 대규모 해상풍력 개발을 지속적으로 추진하고 있다. 본 연구는 Power-to-Gas(P2G) 기술을 활용하여 이러한 전력 불균형을 완화할 수 있는 방안을 체계적으로 분석한다. 특히 풍력의 변동성을 고려하여 강건 최적화 기반 모델을 적용하고, 최악 조건에서도 경제성과 운영 효율이 개선됨을 확인하였다.

1. 서 론

전 세계적으로 전력 수요 증가와 탄소배출 문제로 인해 재생에너지 확대의 필요성이 커지고 있으며, 주요 국가들은 탄소중립 목표 달성을 위해 정책적으로 이를 적극 추진하고 있다[1]. 한국 또한 2050 탄소중립 달성을 위해 재생에너지 보급을 핵심 전략으로 설정하였으나, 태양광과 풍력의 높은 변동성으로 인해 출력 제어, 출력 제한, 계통 운영 불안정 등 다양한 기술적 문제가 발생하고 있다[2].

특히 국내 재생에너지는 서남부 지역에 집중되어 있는 반면, 전력 수요는 수도권에 편중되어 있어 지역 간 전력 불균형과 송전 혼잡 문제가 심화되고 있다[3]. 정부는 이러한 구조적 한계에도 불구하고 대규모 해상풍력 확대를 추진하고 있으나, 이는 잉여전력 증가와 계통 부담을 더욱 가중시킬 가능성이 있다. 기존의 HVDC나 ESS 기반 해결 방안은 기술적·경제적 제약으로 인해 한계가 존재한다.

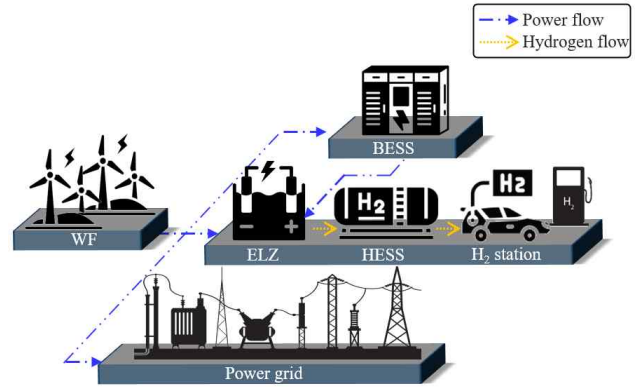
이에 본 연구는 재생에너지 잉여전력을 수소로 전환·저장하는 Power-to-Gas(P2G) 기술을 활용하여 전력 불균형 문제를 완화하는 방안을 제안한다. 또한 풍력의 출력 불확실성을 고려하기 위해 강건 최적화 기법을 적용하여 보수적인 운영 전략을 도출하고, 최악 조건에서도 경제성과 운영 효율이 개선됨을 분석함으로써 향후 에너지 시스템에서 P2G의 활용 가능성을 제시한다.

2. Power to Gas 시스템 구조

2.1 시스템 토폴로지

아래 그림은 본 논문에서 활용된 P2G 시스템의 설비 구성을 포함한 토폴로지를 보여준다. 시스템은 풍력단지(WF)와 수소 생산 시스템으로 구분하여 나타낸다. WF에는 DRO를 적용하였으며, 최적 운영 대상 설비는 전해조(ELZ), 배터리 에너지 저장장치(BESS), 수소 에너지 저장장치(HESS)로 구성된다.

WF에서 생산된 전력은 전력계통에 직접 공급될 수 있으며, 최적 운영 결과에 따라 ELZ로 공급되거나 일부는 BESS에 저장될 수 있다. ELZ는 주로 WF로부터 전력을 공급받아 수소를 생산하며, 풍력 출력 변동이 큰 경우에는 BESS로부터 전력을 공급받아 안정적인 운전을 유지한다. 생산된 수소는 HESS에 저장되며, 이후 수소 충전소 등에 판매될 수 있다.



〈그림 1〉 P2G 시스템 토폴로지

2.2 설비 모델링

그림 1에서 보이는 바와 같이 P2G 시스템의 토폴로지에는 WF, ELZ, BESS, HESS가 포함되므로 최적화 프레임워크 내에서 동작할 수 있도록 각 설비들의 동작 특성을 수학적으로 정식화 한다. 아래 수식 (1-2), (3-5), (6-12), (13-16)은 각각 WF, ELZ, BESS, HESS의 설비 모델을 의미한다.

$$P_{WT,t} = \frac{1}{2} \rho \eta_{WT} A v_t^3 \begin{cases} v_t = 0, & \text{if } v_t \leq v_{cutin} \text{ or } v_t > v_{cutoff} \\ v_t = v_t, & \text{if } v_{cutin} < v_t \leq v_{rate} \\ v_t = v_{rate}, & \text{if } v_t > v_{rate} \end{cases}, \forall t \quad (1)$$

$$P_{WF,t} = \sum_{W \in \mathcal{W}} P_{WT,W,t}, \forall \mathcal{W} \quad (2)$$

$$H_{ELZ,t} = P_{ELZ,t} \eta_{ELZ} / HHV_{H_2}, \forall t \quad (3)$$

$$b_{ELZ,t} \leq H_{ELZ,t} \leq b_{ELZ,t} M, \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{\forall t} |b_{ELZ,t} - b_{ELZ,t-1}| \leq \varepsilon T, \forall t \quad (5)$$

$$SOC_{S,t} = SOC_{S,t-1} + E_{S,t}^{ch} \eta_S - \frac{E_{S,t}^{dch}}{\eta_S}, \forall S, \forall t \quad (6)$$

$$SOC_S \leq SOC_{S,t} \leq \overline{SOC}_S, \forall S, \forall t \quad (7)$$

$$E_{S,t}^{ch} \leq A_S S_S, \forall S, \forall t \quad (8)$$

$$E_{S,t}^{dch} \leq A_S S_S, \forall S, \forall t \quad (9)$$

$$b_{S,t}^{ch} \leq E_{S,t}^{ch} \leq b_{S,t}^{ch} M, \forall S, \forall t \quad (10)$$

$$b_{S,t}^{dch} \leq E_{S,t}^{dch} \leq b_{S,t}^{dch} M, \forall S, \forall t \quad (11)$$

$$b_{S,t}^{ch} + b_{S,t}^{dch} \leq 1, \forall S, \forall t \quad (12)$$

$$SOC_{HESS,t} = \sum_{H \in \mathcal{H}} SOC_{HESS,H,t}, \forall t \quad (13)$$

$$E_{HESS,t}^{ch} = \sum_{H \in \mathcal{H}} E_{HESS,H,t}^{ch}, \forall t \quad (14)$$

$$E_{HESS,t}^{dch} = \sum_{\forall \mathcal{H}} E_{HESS,\mathcal{H},t}^{dch}, \forall t \quad (15)$$

$$b_{HESS,\mathcal{H},t}^{ch} + b_{HESS,\mathcal{H},t}^{dch} \leq 1, \forall t, \forall \mathcal{H} \quad (16)$$

수식 (1)과 (2)는 풍력 발전기 개별 출력과 풍력 단지의 출력을 의미한다. 수식 (3-5)는 수전해 설비의 출력 특성에 대한 모델을 설명하며, 각각 출력 효율과 스위치제약조건을 의미한다. 수식 (6-12)는 BESS와 HESS의 공동된 모델식을 의미하며, State of Charge (SOC)의 충방전 로직과 충전 및 방전의 동시 불가 제약조건을 설명한다. 단, HESS의 경우 ELZ를 통해 수소를 충전하고 필요 시 충전 되어 있던 다른 HESS를 통해 방전할 수 있으므로 복수의 HESS를 모델링하여 충전과 방전이 동시에 운영될 수 있도록 수식을 정식화 한다. 이는 수식 (14-16)을 통해 설명된다.

2.3 목적함수와 강건 최적화

본 연구의 목적함수는 WF연계형 P2G 시스템의 전체 benefit를 최대화하는 것으로 설정되었으며, 수식 (17)과 같이 정식화된다.

$$f = \max_{P_{WF,t}^{grid}, H_{ELZ,t}} \left[\sum_t \left(P_{WF,t}^{grid} (C_t^{rec} + C_t^{smp}) + H_{ELZ,t} C^{h2} \right) \right] \quad (17)$$

수식은 WF의 편익 구조인 REC와 SMP 기반의 경제성 목적함수와 P2G 시스템을 통해 판매되는 수소 판매 정산금을 더하여 나타낸다.

본 연구에서는 WF의 출력 불확실성을 고려하기 위해 Robust Optimization (RO)을 활용하였으며, 선형으로 조합된 단일 불확실성 변수를 고려함에 따라 쉽게 쌍대문제를 도출하고 최적화를 수행한다. 최종적인 쌍대 문제의 구성은 수식 (18)과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} f &= \min_{\forall x, \mu, \lambda} f(x) + b^T \mu + d^T \lambda \\ s.t. \\ h(x) &= 0, g(x) \leq 0, \\ A^T \mu &\geq 0, E^T \lambda = c \\ \mu &\geq 0, \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

상기 정식화로부터 도출된 최적화 결과는 정의된 불확실성 집합 내에서의 최악의 실현값을 반영한다. 따라서 도출된 해는 최악의 상황에서도 제안된 접근법이 높은 수준의 경제성을 유지함을 보여준다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 시나리오별 시뮬레이션 결과 분석

본 논문의 시나리오는 풍력발전량이 높거나 낮음에 따라 달라질 수 있는 경제성을 평가하기 위해 계절별 P2G 연계 시스템의 결과 분석으로 구성된다. 아래 표 1 과 2는 각 계절별 P2G 시스템의 연계 여부에 따른 결과를 설명한다.

〈표 1〉 시뮬레이션 결과: Non P2G linked WF

	겨울	봄	여름	가을
Curtailed energy [MWh]	27,013	87,643	34,078	76,010
Total benefit [\$ × 10 ³ /day]	9,982	14,868	17,927	18,629

〈표 2〉 시뮬레이션 결과: P2G linked WF

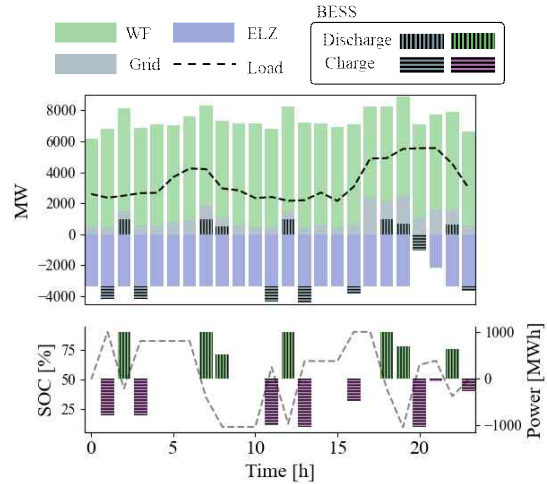
	겨울	봄	여름	가을
Curtailed energy [MWh]	285	14,353	2,069	11,469
Total benefit [\$ × 10 ³ /day]	13,341	25,154	21,064	22,235

P2G 시스템의 적용 여부에 따른 비교를 통해, 제안된 접근법의 핵심 장점은 출력 제한되는 재생에너지를 경제적 가치가 있는 수소로 전환할 수 있다는 점임을 확인할 수 있다. P2G가 없는 경우, 잉여 풍력 발전은 특히 재생에너지 출력이 높고 수요

가 낮은 계절에 그대로 에너지 손실로 이어진다. 반면 P2G를 도입하면 이러한 잉여 전력을 효과적으로 제배분할 수 있어 전체 시스템 효율이 크게 향상된다.

운영 측면에서 P2G의 효과는 재생에너지 비중이 높은 봄·가을과 같은 기간에서 더욱 두드러진다. 이 시기에는 발전 용량보다 수요 제약이 지배적인 경우가 많으며, P2G는 유연한 수요처로 작용하여 이러한 불일치를 완화한다. 그 결과, 기존에는 출력 제한되던 재생에너지가 적극적으로 활용되며, 경제성 또한 크게 개선된다.

아래 그림은 여름의 대표일을 대상으로 한 시스템의 24시간 최적 운영 결과를 보여준다.



〈그림 2〉 P2G 연계형 WF의 최적 운영 (여름 기준)

4. 결 론

본 논문에서는 대규모 풍력단지의 계통 연계에 따라 발생하는 에너지 손실을 저감하고 풍력 수용성을 향상시키기 위해 Power-to-Gas(P2G) 기술의 최적 운영 전략을 제안하였다. 시뮬레이션 결과는 경제성을 기준으로 한 최악 조건을 가정하여 도출되었으며, 이를 통해 출력 제한 감소와 경제성 측면에서 유의미한 개선 효과를 확인하였다. 다만 동일한 시스템 및 설비 용량에서도 계절에 따라 성능 차이가 크게 나타나, 단순 운영 수준을 넘어 설계 및 계획 단계에서의 종합적인 효과 분석이 필요함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. G. Son, S. Y. Kim Optimal planning and operation of integrated energy systems in South Korea: Introducing a Novel ambiguity set based distributionally robust optimization. Energy 2024;307:132503.
- [2] Y. G. Son, S. Y. Kim, M. A. Acquah, Optimal hierarchical modeling of power to?X?stations through a chance constrained Two-Stage stochastic programming, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 161, 2024, 110169.
- [3] Y. G. Son and S. -Y. Kim, "MCS-Based Small Signal Analysis of PMSG Wind Turbines: A Sensitivity Matrix Approach," in IEEE Access, vol. 14, pp. 58091-58102, 2026.