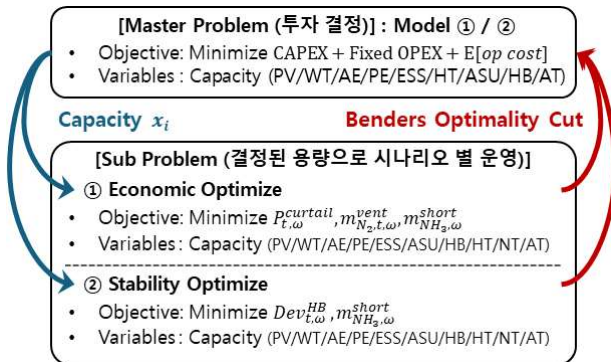


$$c^T x = \sum_{i \in I} CAPEX_i \times (CRF_i + Rate_i^{O\&M}) \times x_i \quad (2)$$

$$f_1(x, \omega) = \sum_{t \in T} (C_{RE}^{curt} P_{t,\omega}^{RE,curt} + C_{N_2}^{vent} m_{t,\omega}^{vent}) + C_{NH_3}^{short} m_{t,\omega}^{NH_3,short} \quad (3)$$

$$f_2(x, \omega) = \sum_{t \in T} (Q^{HB} - P^{HB}) + C_{NH_3}^{short} m_{t,\omega}^{NH_3,short} \quad (4)$$

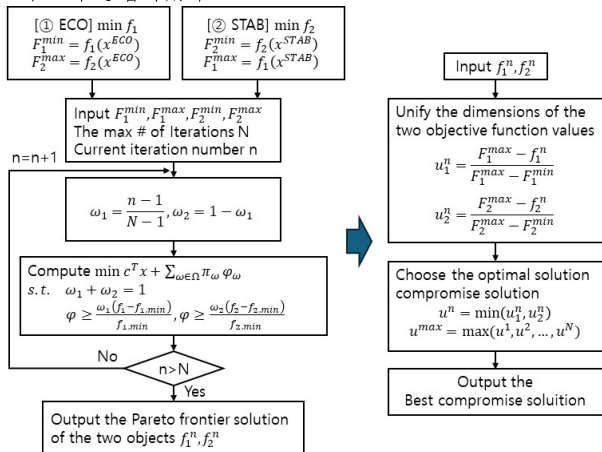
$$Q(x, \omega) \geq \delta_{\omega}^{(\nu)} + \sum_{i \in I} a_{\omega,i}^{(\nu)} (x_i - x_i^{(\nu)}) \quad (5)$$



〈그림 3〉 Stochastic Programming Framework

2.3.2 Compromise Planning

본 연구에서 다루는 최적화 문제는 경제성과 안정성으로, 서로 Trade-off 관계에 있다. 경제성 최적화는 운영 비용을 감소시킬 수 있으나, HB 부하의 정격 운전 이탈을 증가시키며, 안정성 최적화는 HB의 정격 운전을 유도하지만 운영 비용 증가를 초래한다. 따라서 본 연구에서는 두 목적을 고려함에 따라 나타나는 Trade-off 관계를 분석하고, 균형 있는 설계를 위해 각 목적의 이상적 최적값으로부터 가장 편차를 최소화하여 Pareto Front를 생성한다. 이후 두 최적화 목적의 균형적인 해를 선정하기 위하여 다목적 최적화 기법인 Compromise Planning[2]을 SP 구조에 통합하였다.



〈그림 4〉 Compromise Planning Framework

2.4 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션을 위해 시나리오 개수는 200, Compromise Point N은 7, 전체 스케줄 시간 T는 240h, 선박의 수요 D는 13.7kt, 각 시나리오가 발생할 확률 π_{ω} 는 모두 동일하게 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 설비의 투자비 산출을 위한 관련 파라미터는 표 1과 같으며, 각 설비의 효율, Turndown Ratio, Ramp Rate 등 기술적 지표는 통상적인 수치를 사용하였다.

〈표 1〉 경제성 지표 입력 파라미터

Unit	PV	WT	ESS	PE	AE	ASU	HB	HT	NT	AT
CAPEX [\\$]	500	800	400	1,400	600	500	1,500	400	60	2
O&M [%]	1.0	2.0	2.0	5.0	3.0	4.0	4.0	1.0	0.5	0.5
year	25	25	10	10	15	25	25	25	25	25

본 연구에서는 경제성과 안정성 목적의 상대적 중요도를 Compromise Planning의 Iteration Number n 에 따른 주요 지표 요약을 표 2에, 설비의 최적 용량을 표 3에 나타냈다. 우선 주요 지표의 경우, n 이 증가할수록 운영 비용의 기대값 $E[f_1]$ 은 지속적으로 감소하였으나, HB의 정격 운전 이탈량의 기대값 $E[f_2]$ 는 증가하는 Trade-off 경향이 확인된다. 그러나 설비 투자비 Total의 전체 변동 범위가 약 4.8%로 크지 않았는데, 이는 n 의 변화가 전체 설비 투자비 규모를 크게 바꾸기보다는 각 설비의 특성을 고려하여 용량 구성의 재배치를 유도했음을 의미한다.

〈표 2〉 Compromise solution set 주요 지표 요약

n	$E[f_1]$ [M\\$]	$E[f_2]$ [MW]	CAPEX [M\\$]	O&M [M\\$]	Total [M\\$]	u^n
1	9.2	0.5	337.1	66.8	403.8	0.00
2	6.9	0.9	337.1	70.5	407.6	0.31
3	3.1	1.1	345.7	78.7	424.4	0.83
4	2.9	1.3	344.7	78.7	423.4	0.85
5	2.3	2.1	340.3	78.9	419.2	0.68
6	2.1	2.9	336.0	78.4	414.4	0.52
7	1.9	5.4	336.1	78.2	414.3	0.00

〈표 3〉 Compromise solution set 설비 최적 용량

n	PV [MW]	WT [MW]	ESS [MWh]	PE [MW]	AE [MW]	ASU [MW]	HB [MW]	HT [t]	NT [t]	AT [kt]
1	1,150	2,498	532	50	550	5.9	36.2	76.6	0.0	14.5
2	1,247	2,204	446	200	450	6.4	39.2	33.6	0.0	15.7
3	1,448	1,624	314	500	250	6.5	40.0	107.4	3.4	16.0
4	1,408	1,622	329	500	250	6.6	40.5	105.7	0.0	16.2
5	1,450	1,478	282	550	200	6.7	41.0	122.9	0.0	16.4
6	1,379	1,471	286	550	200	6.8	41.8	96.6	11.3	16.7
7	1,275	1,422	399	550	200	6.9	42.3	120.4	12.2	16.7

표 3에 나타난 것과 같이, n 이 증가할수록 설비 구성은 전반적으로 WT 및 AE 중심 구성에서 벗어나, WT 의존도 감소 및 PE 중심 구성으로 변화하였다. 또한 ASU 및 HB와 AT 용량은 증가하는 반면, ESS 용량은 전반적으로 감소하였다. 이는 경제성 중심 설계가 재생에너지 및 저장 설비를 충분히 확보하여 HB의 정격 운전을 최대한 유지하는 방식보다는, 상대적으로 유연한 특성을 가진 설비와 부하 변동의 증가를 통해 운영 비용을 낮출 수 있는 방향으로 용량이 최적화됨을 보여준다.

Compromise Planning 결과, 경제성과 HB 운전 안정성의 만족도를 동시에 고려한 Best Compromise Solution은 $n=4$ 에서 도출되었다. 해당 해는 비용 최적해 대비 $E[f_1]$ 은 증가하지만, $E[f_2]$ 를 개선하여 경제성과 안정성 사이의 균형적인 설계 용량으로 선정되었다.

3. 결 론

본 연구는 재생에너지 발전량의 변동성이라는 불확실성 하에서 Off-grid 그린 암모니아 플랜트의 확률론적 최적 용량 설계 프레임워크를 제시하였다. 특히 Haber-Bosch 공정과 같이 운전 유연성이 제한적인 경직성 부하가 포함된 시스템에서, 경제성과 공정 안정성 사이의 Trade-off 관계를 Compromise Planning을 통해 정량적으로 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 비용 최적화와 동시에 공정 이탈을 최소화하는 균형 잡힌 설비 용량 구성을 도출하였다. 이는 향후 유연성이 낮은 대규모 화학 공정 설비를 재생에너지와 연계할 때, 전력 수급 균형과 공정 안정성을 동시에 고려한 최적 설계 가이드라인으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Xiao, P, et al. "Optimal operation strategy for a risk-averse wind/PV-powered electrolytic hydrogen production and storage system in the electricity, hydrogen, and green certificate markets", Energy Conversion and Management, 357, 2026.
- [2] Pei, M, et al. "Optimal emission management of photovoltaic and wind generation based energy hub system using compromise programming", J. Clean. Prod, 281, 2020.