



기술 특성치 스크리닝을 통한 최적 에너지저장 기술 선정 방법

제갈성¹⁾ · 이지현^{2)*} · 김현실²⁾ · 신제석³⁾ · 임지훈²⁾

Technology Selection Method for Optimal Energy Storage

Seong Jegarl¹⁾ · Ji Hyun Lee^{2)*} · Hyunshil Kim²⁾ · Jeseok Shin³⁾ · Jihun Lim²⁾

Received 27 December 2022 Revised 20 January 2023 Accepted 25 January 2023 Published online 24 February 2023

ABSTRACT The expanding significance of energy storage (ES) technology is increasing the acceptability of power systems by augmenting renewable energy supply. To deploy such ES technologies, we must select the optimal technology that meets the requirements of the system and confirm the technical and economic feasibility of the business model based on it. Herein, we propose a method and tool for selecting the optimal ES technology suitable for meeting the requirements of the system, based on its performance characteristics. The method described in this study can be used to discover and apply various ES technologies and develop business models with excellent economic feasibility.

Key words Energy storage system(에너지저장시스템), Valuation(가치평가), Technology selection(기술선정), Algorithm(알고리즘)

Subscript

FTM : front of the meter

BTM : behind the meter

1) Chief Researcher, New & Renewable Energy Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

2) Principal Researcher, New & Renewable Energy Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

3) Senior Researcher, New & Renewable Energy Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

*Corresponding author: jihyun.lee@kepco.co.kr

Tel: +82-42-865-5350

Fax: +82-42-865-5390

1. 서론

기후위기 대응을 위한 온실가스 감축과 기업의 사용전력 100%를 재생에너지만으로 소비하는 RE100(Renewable Energy 100%) 등 친환경 에너지로의 전환이 가속화되면서 국내외 전력산업 환경은 급변하고 있다. 관련하여 지난 '22년 8월 정부는 제10차 전력수급기본계획의 실무안을 공개한 바 있다. 주요 내용으로 원전 비중 확대와 합리적 재생에너지 보급목표의 수립을 통해 실현 가능하고 균형 잡힌 전원믹스를 정립하고, 석탄발전의 추가 감축을 통한 2030 국가 온실가스 감축목표 달성 방안을 제시하고 있다. 세부 내용을 살펴보면 '36년 최대 전력수요(목표 수요)는 117.3 GW로 전망하고 '36년 피크기여도를 감안한 목표설비(143.1 GW) 확보 시, 전원별 설치 비중은 원전, LNG,

신재생은 증가, 석탄은 감소 추세를 보일 것으로 예측하였다. 또한 2030 NDC 목표 달성을 위한 '30년 전원별 발전량 비중은 원전 32.8%, 신재생 21.5%, 석탄 21.2% 등으로 전망하였다^[1]. 특히 이중 신재생에너지의 설비용량은 '22년 28.9 GW에서 '30년 71.5 GW, '36년 107.4 GW(총 설비의 45.3%)로 큰 폭의 확대가 필요함을 확인할 수 있다.

제시된 바와 같이 향후 재생에너지의 수용성 확대를 위한 다양한 ESS 기술의 보급 확대 및 기술개발 투자가 필요한 상황이다. 그러나 현재의 전력 시장하에서 ESS가 제공하는 서비스에 대한 보상은 충분하지 않아 사업추진에 따른 수익률이 낮고 이와 함께 인허가의 어려움, 기술에 대한 낮은 이해 및 타당성 평가 틀의 부족 등 다양한 문제로 대규모 ESS 프로젝트의 보급은 지연되고 있다^[2]. 상기 계약에도 불구하고 국내에서도 재생에너지 증가에 따른 전력계통 운영의 경제성을 확보하고 시간대별 적절한 유연성 제공을 위한 최적의 저장믹스 계획수립과 기술·경제적 타당성이 확인된 대규모 ESS 프로젝트의 발굴 및 기획의 중요성이 부각되고 있다. 특히 최근에는 저장믹스를 위한 재생에너지 및 수소·암모니아 연계 섹터 커플링 기술 등이 활발히 제안되고 있어 전력-전력의 단일 경제조건이 아닌 다양한 에너지전환과 타 산업간의 연계 등 시스템 복잡성도 증가하고 있다^[3]. 이러한 움직임에 따라 기술·경제적 타당성이 높은 ESS 사업의 발굴 및 빠른 투자 의사 결정을 위한 전주기 ESS 가치평가 기반 통합 시스템의 개발이 요구되는 상황이다. 해외의 경우 이러한 통합 시스템 분석을 바탕으로 ESS 활용에 따른 가치평가를 수행하는 연구들이 이루어지고 있다.

ESS가 전력계통에 제공하는 편익은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다. a. 전력생산 비용 감소 b. 천연가스 발전 등 첨두부하 발전비용 감소 c. 재생에너지 출력제한 감소 d. 송배전 건설지연 e. 무효전력 안정화 비용 감소 f. 자체 기동 비용 감소 등이다^[4]. 그리고 이러한 ESS가 제공하는 편익에 대한 연구는 지역별 서로 다른 전력시장이 존재하는 미국을 중심으로 활발히 진행 중이다. 관련하여 Patrick *et al.*은 미국 내 주요 ESS 프로젝트의 편익에 대한 연구를 취합하여 보고하였다. 상기 논문의 주요 내용으로 ESS가 전력계통에 제공하는 서비스의 가치가 매우 높으며 서비스 별, 그리고 미국 내 서로 다른 전력시장별로 차이가 있음

제시한다^[5](Fig. 1 참조).

ESS 프로젝트의 기획 및 개발을 포함하는 프로세스와 관련, 미국 전력연구소(EPRI)에서는 전주기 단계를 프로젝트 계획수립, 조달, 배치 및 통합, 운영 및 유지보수, 폐지의 5단계로 구분하고 각각의 단계에서 이해기관별 핵심 업무를 아래의 Fig. 2와 같이 제시하고 있다^[6].

Fig. 2에서 제시된 바와 같이 ESS 프로젝트 개발 전주기 프로세스에 있어서 핵심 단계는 전력계통의 요구사항에 대응하여 이를 만족시킬 수 있는 최적 ESS 기술을 선정하고 사업의 타당성을 빠르게 평가하는 프로젝트 계획수립

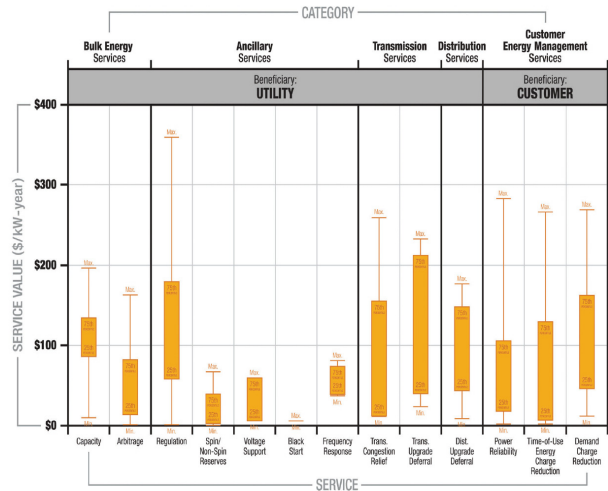


Fig. 1. Statistics on ESS valuation by service

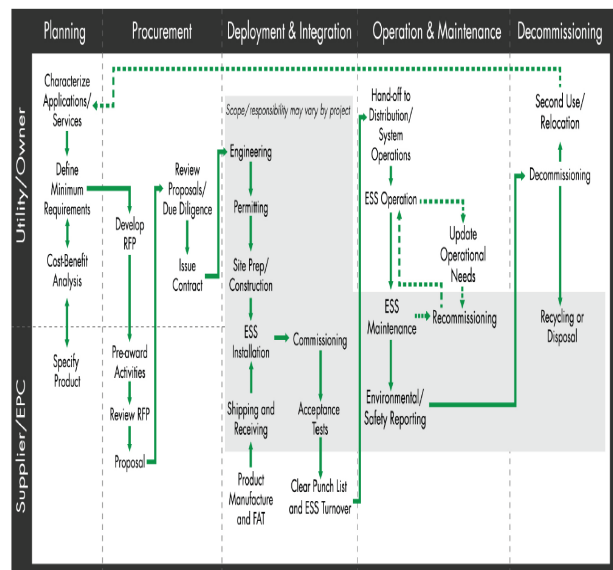


Fig. 2. ESS project life cycle process

단계라고 할 수 있다. 그러나 국내에서는 ESS 프로젝트 계획수립과 관련한 방법론이 정립되어 있지 않고 가치평가에 대한 가이드 라인이 부족하여 관련 연구가 충분하지 않은 상황이다. 관련하여 국제재생에너지기구(IRENA)는 대규모 ESS 기술 보급 지연의 핵심 원인으로 ESS 기술이 제공하는 편익에 대한 가치평가가 제대로 진행되지 못하여 예상 편익이 실제 프로젝트를 실행하기에 충분치 않은 것으로 받아들여지기 때문으로 지적하고 있다^[4]. 따라서 향후 수요 증가가 예상되는 ESS 기술의 보급 확대를 위해서는 체계화된 ESS 가치평가 방법론에 따른 최적 ESS 기술의 선정 및 가치평가를 통해 기술·경제적으로 타당성이 뛰어난 사업모델의 발굴이 중요하다고 할 수 있다. 관련하여 본 논문에서는 송배전망 및 수용가 등 다양한 그리드의 요구조건에 따른 ESS 기술에 대한 포괄적인 성능 분석을 기반으로 ESS 프로젝트의 기술성 및 경제성을 종합적으로 분석하고 이를 통해 최적 ESS 기술을 선정하는 방법 및 사례연구를 제시한다.

2. 최적 ESS 기술선정 방법

ESS 프로젝트의 전주기 가치평가를 위한 첫 단계는 전력계통의 요구조건에 맞는 최적 ESS 기술을 선정하는 것이다. 이러한 최적 ESS 기술의 선정은 ESS 프로젝트 계획수립 이후 본격적인 사업 진행을 위한 모든 기술, 경제적 항목에 영향을 미치므로 성공적인 Biz. 모델 개발을 위한 가장 중요한 시작점이라고 할 수 있다.

ESS 기술은 앞서 제시된 바와 같이 다양한 활용목적에 따라 기술의 내용과 시스템 구성안이 상이하며 기술별 고유한 기술 성능/특성에 따라 주요 성능 요소별 장단점을 갖기 때문에 활용목적에 맞는 최적의 ESS 기술 선정을 위해서는 체계화된 ESS 기술 선정기준과 방법론이 요구된다. 이에 따라, 본 연구에서는 미국 Sandia 국립연구소에서 개발된 분산형 전원 가치평가 툴(QuEST)의 ESS Technology Selection Module을 바탕으로^[7] ESS 기술 특성치 및 전력계통 요구사항을 반영한 최적 ESS 기술 선정 알고리즘 및 방법론을 제시한다. 본 최적 ESS 기술 선정 알고리즘의 상세 내용은 다음과 같다.

2.1 ESS 기술 선정 알고리즘

후보 ESS 기술의 우선순위 및 최적기술 선정 방법은 전력계통 최소 요구조건과 ESS 기술 특성치 DB를 바탕으로 2단계에 걸친 후보 기술 선별 및 이후 선별된 기술을 대상으로 한 점수화를 통해 진행된다(Fig. 3 참조). 단계별 세부 내용은 다음과 같다.

최적 ESS 기술 선정을 위한 전력계통 최소 요구조건 항목은 크게 그리드 위치, ESS 서비스 특성, ESS 설비용량 및 방전 지속시간을 들 수 있으며 각각의 항목에 대한 요구조건에 대해 이를 만족시킬 수 있는 ESS 기술을 탐색하여 후보 기술로 분류한다. 이때 그리드 위치는 FTM(전기공급자) 측에 해당하는 송전단, 배전단, 그리고 BTM(소비자측) 측의 주거용, 산업용의 4개 범주로 구분한다.

1차 스크리닝 단계로, 신규 ESS 설비가 설치될 그리드 위치를 기준으로 현재 전력계통 요구조건에 적합한 ESS 기술을 식별한다. 예를 들면 BTM_주거용 ESS의 경우 상대적으로 입지 선택이 자유로운 리튬배터리, 납축전지 기술 등은 적용이 가능하나 대규모 부지가 요구되는 압축공기저장, 양수발전 기술은 지리적 제약이 있으므로 해당 그리드 위치에서의 적용을 위한 후보 기술에서 제외된다. 그리드 위치를 기준으로 한 ESS 기술 1차 기술 선별 후 ESS 기술의 핵심 성능 데이터를 바탕으로 2차 기술 선별을 진행한다. 이를 위한 기술적 평가항목은 ESS 기술의 활용목적에 고려하여 방전 지속시간, 반응시간 및 출력 형태를 들 수 있다.

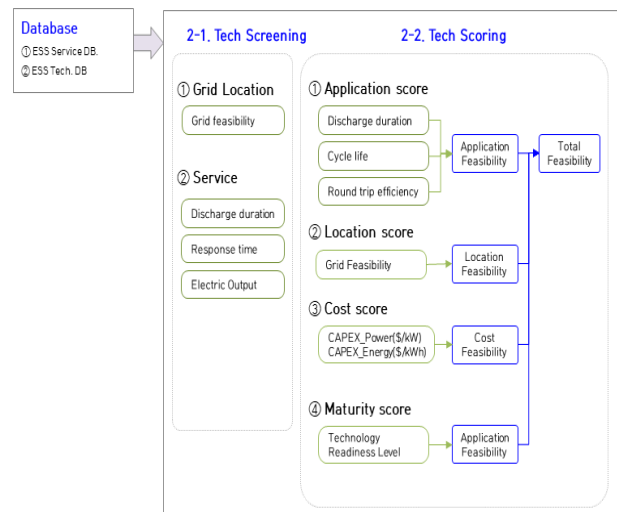


Fig. 3. ES technology selection algorithm

기술 선별 방법은 상기 제시된 DB화된 기술별 고유특성 항목치와 전력계통 최소 요구조건을 상호 비교하여 최종 ESS 후보 기술 선별을 위한 기준으로 활용한다. 예를 들어 방전 지속시간의 경우 검토 대상 ESS 기술의 방전시간이 전력계통 최소 요구조건 보다 크거나 같은 경우 해당 서비스에 적용 가능한 기술로 분류 될 수 있다. 응답시간의 경우에는 기술의 특성상 계통 최소 요구조건보다 ESS 기술이 제공할 수 있는 응답시간이 짧은 경우, 해당 서비스에 적용 가능한 기술로 고려된다. 상기 방법을 통해 그리드 위치 조건 및 ESS 서비스 요구 사항을 만족하는 ESS 기술을 평가하여 계통 최소 요구조건을 만족할 수 있는 후보 ESS 기술을 선별한다. 참고로 본 단계에서는 기술별 타당성에 대한 정량적 평가 없이 해당 서비스에 적합한 후보 ESS 기술군을 선별한다(Table 1 참조).

Table 1. ES technology screening algorithms

Parts	Component	Score
Service	<ul style="list-style-type: none"> Application feasibility Discharge duration, cycle life, round trip efficiency 	0~1.0
Location	<ul style="list-style-type: none"> Grid application feasibility 	
Cost	<ul style="list-style-type: none"> Capital cost Power service (\$/kW) Energy service (\$/kWh) 	
Maturity	<ul style="list-style-type: none"> Technology Readiness level 	

상기 방법을 통해 그리드 / ESS 서비스 최소 요구조건을 만족하는 ESS 기술을 선별 후, 이어 후보 ESS 기술별 적합도 우선순위를 정량적으로 평가한다. 최종 후보 ESS 기술별 적합도는 ESS 서비스 적합성(Service), 설치타당성(Location), 투자비 타당성(Cost) 및 기술 성숙도(Maturity)의 4가지 항목으로 구분하여 평가한다. 이때 비용관련 평가 항목은 설비 투자비를 기준으로 한다. 통상 ESS 기술의 경제성 평가는 LCOS (Levelized Cost of Storage, 균등화 저장비용)의 분석을 통해 이루어지나 해당 분석은 ESS 기술 활용방법이 결정된 이후 설치입지 및 세부 시스템 설계에 따른 다양한 비용을 고려하여 산출되는 자료로, 본 논문에서 제시하는 최적 기술 선정 및 활용방법을 고려한 시스템 구성 후 분석이 진행된다. 상기 평가항목에 대해 Table 2에 제시된 바와 같이 0에서 1.0 범위 내에서 정량

Table 2. ES technology scoring algorithms

Parts	Component	Results
Grid location	<ul style="list-style-type: none"> Location feasibility 	True or False
ESS Service requirement	<ul style="list-style-type: none"> Discharge duration time (DDC) - $DDC_DB \geq DDC_User$ 	
	<ul style="list-style-type: none"> Response time (RT) - $RT_DB \leq RT_User$ 	
	<ul style="list-style-type: none"> Electricity output (Power or Energy) 	

화 후 이를 바탕으로 최종 점수를 산정하여 ESS 서비스에 적합한 기술별 우선순위를 제시한다.

2.2 Database 구성 : ESS Tech. & ESS Service

상기 최적 ESS 기술 선정을 위한 핵심 DB는 앞선 Fig. 3에 제시된 바와 같이 ESS 기술특성치를 포함하는 DB(이하 ESS Tech. DB)와 ESS 서비스 요구조건을 포함하는 DB(이하 ESS Service DB)로 구분하여 볼 수 있다. 상기 2개의 DB는 이후 최적 ESS 기술의 선정을 위한 핵심 자료로 활용된다. 관련하여 해당 DB와 관련한 세부 사항은 다음과 같다.

2.2.1 ESS Service DB

Sandia 국립연구소의 보고서에 따르면 ESS 서비스는 크게 1. 대용량 서비스 2. 보조서비스 3. 송전망 서비스 4. 배전망 서비스 5. 수용가 에너지관리 서비스로 구분되며 각각에 대한 특성을 고려하여 총 18개 서비스로 구분하여 볼 수 있다^[7]. 다만 서비스별 편익에 대한 세부 설명은 본 논문의 범위를 벗어나므로 생략한다.

본 연구에서 ESS Service DB는 ESS가 전력계통에 제공할 수 있는 다양한 서비스에 있어 그리드 위치, 최소 반응시간 및 ESS 설비의 최종 출력 형태 데이터를 포함한다. 관련하여, 본 연구에서 분석을 위해 활용된 ESS Service DB는 다음의 Table 3과 같이 에너지 차익거래 및 피크요금 저감 등 총 18개에 해당한다. 해당 DB는 Sandia 국립연구소에서 개발하여 공개한 QuEST의 기본자료를 참조하였으며 세부 데이터는 국내 전력계통에서 요구하는 조건과 유사함을 확인하였다. 본 DB는 추후 국내 전력시장 환경변화를 고려하여 지속적인 업데이트가 필요하다.

Table 3. ESS service requirement

Application name	Grid location				min, response time
	Residential	Industrial	Distribution	Transmission	
1. Bulk Energy Services					
Energy arbitrage (electricity markets)	X	X	O	O	hrs
Electric supply capacity	X	X	O	O	hrs
2. Ancillary Services					
Regulation	X	X	O	O	sec
Operating reserve (Spinning)	X	X	O	O	sec
Operating reserve (Non-Spinning)	X	X	O	O	sec
Operating reserve (supplementary)	X	X	O	O	sec
Voltage support	X	X	O	X	sec
Black start	X	X	O	O	min
Other Related Uses	O	O	O	O	sec~hrs
3. Transmission Infrastructure Services					
Transmission upgrade deferral	X	X	O	O	min
Transmission congestion relief	X	X	O	O	min
4. Distribution Infrastructure Services					
Distribution upgrade deferral	X	X	O	X	min
Voltage support	X	X	O	X	sec
5. Customer Energy Management Services					
Power quality	O	O	O	X	ms
Power Reliability	X	X	O	O	sec
Retail TOU energy charges	O	O	X	X	min
Demand charge management	O	O	X	X	min

2.2.2 ESS Tech DB

상기 ESS Service DB와 함께 본 연구의 검토 대상인 ESS 후보 기술의 Tech. DB는 Table 4와 같다. 본 DB가 포함하는 대상 ESS 기술은 리튬이온 배터리, 압축공기저장, 플라이휠 등 기계·화학방식 총 12개의 기술을 포함하며 특히 동일한 ESS 기술에서 서로 다른 방전 지속시간 별 고유 특성값이 제시된다. 또한 해당 ESS Tech. DB는 필요에 따라 세부 ESS 기술의 추가 및 삭제, 기술 성능치 변경이 가능하도록 구성한다. 본 DB에 포함된 ESS 주요 기술 항목으로, ESS 서비스 타당성 분석을 위한 방전 지속시간 (Discharge duration time), 사이클 수명(Cycle life), Round trip 효율(Round trip efficiency)이 포함된다. 그리고 그리드 활용 타당성 분석을 위해 대상 그리드의 위치를 주거용, 산업용, 배전망, 송전망의 4개로 구분하고 각각

의 ESS 기술의 활용 타당성 및 기술성속도 항목은 0~1.0 범위에서 점수를 부여한다.

3. 사례 분석

상기 제시된 알고리즘 및 ESS Tech./Service DB를 바탕으로, 다양한 ESS 서비스(활용)별 적정기술맵을 분석하였다.

3.1 사례 : 태양광 +ESS 융합 전기차 충전스테이션

대표적인 사례로 태양광 + ESS 융합 전기차 충전스테이션 적용을 위한 최적 ESS 기술을 선정하고자 하였다. 이를 위한 계통 최소 요구조건은 제주 에너지공사가 2022년 제

Table 4. ES technology DB

Storage technology	Discharge duration (hours)	Cost at 100 kW (\$/kW)	Round-trip efficiency (%)	Cycle life (# of cycles)	Calendar life (yrs)	Depth of discharge (%)	Response time to full power	Output in electric form	Tech readiness	Feasibility score			
										Residential	Industrial	Distribution	Transmission
Lithium-ion nickel-manganese-cobalt	2	1060	86	2000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	4	1838	86	2000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	6	2608	86	2000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	8	3372	86	2000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	10	4132	86	2000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
Lithium-ion	0,5	699,45	82	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	1	755,2	82	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	2	1438,8	86	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	3	2038,5	86	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	4	2638,4	86	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	5	3238	86	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	6	3837,6	86	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
	7	4435,2	86	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1
8	5036,8	86	3000	10	80	ms	Yes	1	1	1	1	1	
Lead-acid	2	1065	77	862	12	58	ms	Yes	1	0,8	0,8	0,5	0,1
	4	1808	79	739	12	67	ms	Yes	1	0,8	0,8	0,5	0,1
	6	2552	82	675	12	73	ms	Yes	1	0,8	0,8	0,5	0,1
	8	3296	83,5	635	12	78	ms	Yes	1	0,8	0,8	0,5	0,1
	10	4040	85	599	12	82	ms	Yes	1	0,8	0,8	0,5	0,1
Vanadium redox flow	2	1693	68	5201	15	100	ms	Yes	0,6	0	0,5	0,6	0,3
	4	3452	68	5201	15	100	ms	Yes	0,6	0	0,5	0,6	0,3
	6	4587	68	5201	15	100	ms	Yes	0,6	0	0,5	0,6	0,3
	8	4961,6	68	5201	15	100	ms	Yes	0,6	0	0,5	0,6	0,3
	10	4568	68	5201	15	100	ms	Yes	0,6	0	0,5	0,6	0,3
Flow battery	3	1429,5	70	1500	20	100	ms	Yes	0,6	0,2	0,5	0,6	0,1
	4	2521,2	70	1500	20	100	ms	Yes	0,6	0,2	0,5	0,6	0,1
	5	2469,5	70	1500	20	100	ms	Yes	0,6	0,2	0,5	0,6	0,1
	6	2915,4	70	1500	20	100	ms	Yes	0,6	0,2	0,5	0,6	0,1
Flow battery - Iron	4	2020,4	70	1500	20	100	ms	Yes	0,6	0,2	0,5	0,6	0,1
	8	3507,2	70	1500	20	100	ms	Yes	0,6	0,2	0,5	0,6	0,1
Compressed-air energy storage	4	na	52	10403	40	100	ms	Yes	0,8	0	0	0,3	1
	10	na	52	10403	40	100	ms	Yes	0,8	0	0	0,3	1
Pumped hydro storage	4	na	80	13870	40	100	min	Yes	1	0	0	0	1
	10	na	80	13870	40	100	min	Yes	1	0	0	0	1
Flywheel - Long duration	4	3421,2	80	na	20	100	ms	Yes	0,5	0	0,4	0,9	0,8
Flywheel - Short duration	0,5	1250	80	na	20	100	ms	Yes	0,8	0	0,4	0,9	0,8
Sodium	6	2639,4	75	5000	15	80	ms	Yes	0,8	0	1	1	0,9

주도 일도에 구축한 “신재생에너지 융복합 EV 충전스테이션”의 주요 규격 조건을 참조하였다^[8].

상기 분석을 위해, ESS 그리드 위치는 BTM/산업용, 목표 ESS 서비스는 전력피크 요금 저감, ESS 설치 용량은 100 kW급, 방전 지속시간은 4시간 이상으로 설정하였다. 해당 조건에 대해, 본 연구의 알고리즘 및 방법론을 활용한 주요 분석결과 예시는 Table 5와 같다. 제시된 바와 같이 본 사례의 경우 ESS의 그리드 위치 및 ESS 서비스의 적합성 측면에서 선별된 기술은 초기 12개 대상 기술 중에서 CAES(공기압축저장), LAES(액화공기저장) 등이 제외된

9개 기술이다. 상기 선별된 후보 ESS 기술을 바탕으로 선정된 타당성 점수 분석결과 제주도 『태양광+ESS 융합 전기차 충전스테이션』을 위한 적정 ESS 기술은 리튬 배터리, 소듐이온 배터리, 납축전지 기술 순으로 분석되었다(Fig. 4~5 참조). 특히 리튬 배터리 기술 중 인산 철 배터리는 기술 활용도 및 그리드 위치 타당성, 기술 성숙도 측면에서 타 기술 대비 높은 점수를 얻었으며, 소듐이온 배터리 기술은 서비스 적합도 및 설치 타당성은 우수하나 기술 성숙도가 리튬 배터리 대비 다소 떨어지는 것으로 분석되었다. 반면 납축전지 기술의 경우 기술의 성숙도는 높으나 서비스 적합성 및 그리드 위치 타당성 측면에서 점수가 낮았다. 본 분석을 통해 소듐이온 배터리의 경우 기술의 성숙도가 향상되면 타 후보 기술 대비 경쟁력 확보 가능성을 기대할 수 있다.

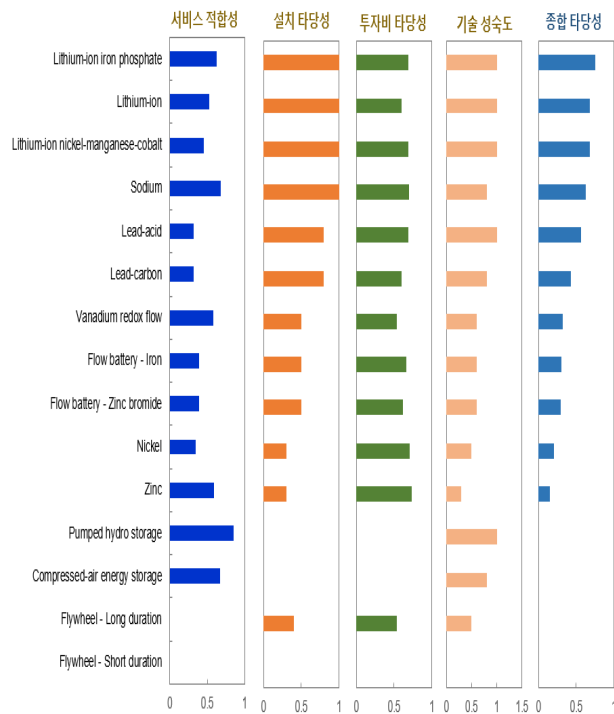


Fig. 4. ES technology feasibility

3.2 사례 : FTM Service 분석

상기 내용을 바탕으로 FTM / 송전단 및 배전단에서의

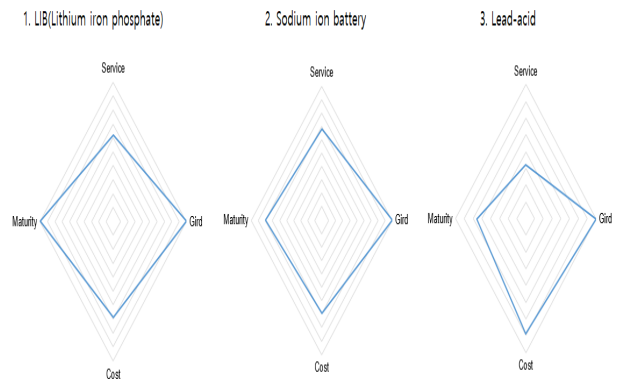


Fig. 5. Detailed analysis of case study

Table 5. Case study of ES technology selection

ESS Service	Candidates	Tech. Screening	Scoring	Tech. Priority
BTM/ Residential	① Mechanical ESS : 4 cases - CAES, LAES, Flywheel, Pumped Hydro	√ LIB, Sodium ion, VRFB, Etc(9)	Tech Scoring (9 Technologies)	1. LIB (Iron-phosphate) 2. LIB 3. LIB (NMC) 4. Sodium ion battery 5. Lead-acid battery
	② Chemical ESS : 8 cases - LIB, LIB (NMC), LIB (Iron phosphate), Lead-acid, VRFB, Flow battery (Iron)	X CAES, LAES, Flywheel(3)		

대표적인 서비스에 대한 분석을 수행하였다. 상기 분석을 위한 주요 시스템 설비용량 및 방전 지속시간 요구 조건은 한국 전력거래소 전력시장운영규칙을 참조하여 설정하였으며^[9] 세부 조건은 다음의 Table 6과 같다.

Table 6. Key conditions

Case	Grid location	ESS Service	System size	Discharge duration (hrs)
#1	Transmission	Energy arbitrage	100 MW	4
#2	Transmission	Frequency Regulation	100 MW	up to 0,5
#3	Distribution	Distribution Upgrade deferral	1 MW	4

상기 조건 하에서 대표적인 송전단의 서비스에 대한 적합 기술 분석 결과(Case #1, #2), 에너지차익거래, 주파수조정 사례의 경우 모두 양수발전, 리튬배터리(인산철), 리튬 배터리, 리튬 배터리(NMC) 및 CAES 순으로 분석되었다(Fig. 6 참조).

이와 유사하게 Table 6에 제시된 조건 하에서, 배전단 서비스 적용을 위한 적절한 ESS 기술로는 다음의 Fig. 7 과 같이 리튬 배터리(인산철), 리튬 배터리, 리튬 배터리(NMC), 소듐이온 배터리 순으로 분석되었다.

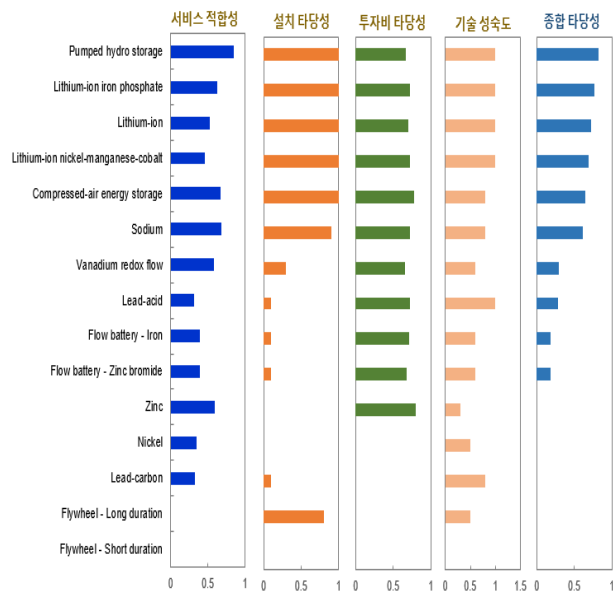


Fig. 6. ES technology feasibility: transmission case

상기 분석된 주요 내용은 미국 DOE에서 운영하는 ESS database(DOE Global Energy Storage Database, 2022)에서 제시하는 통계치와 유사한 경향성을 갖는다. Fig. 8에 제시된 바와 같이 전 세계 주요 ESS 프로젝트 중, 서비스 별 적용된 기술에 대한 통계 분석결과 송전단 혼잡 해소

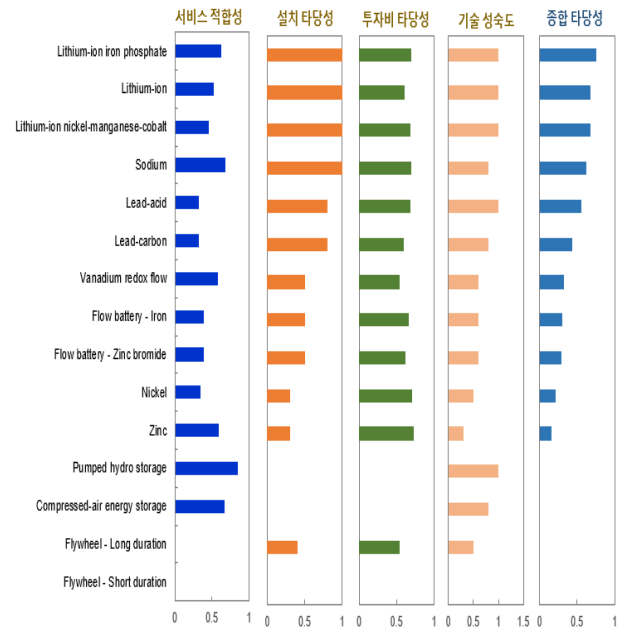


Fig. 7. ES technology feasibility: distribution case

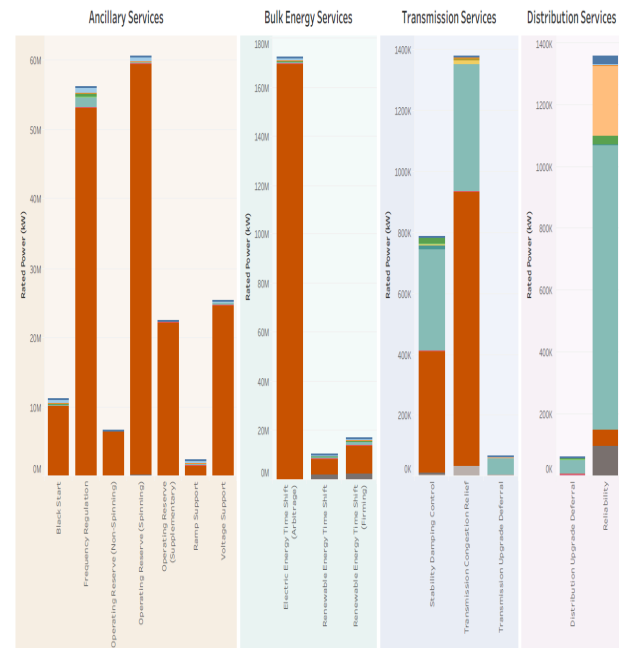


Fig. 8. Rated power of ESS installations by service^[8]

를 목적으로 적용된 ESS 기술은 양수발전 및 리튬배터리 순으로 분석되었으며 배전단의 경우 리튬배터리, 플로 배터리 순으로 제시되었다^[10].

4. 결론

본 연구는 ESS의 설계 및 전력시스템 연계 실증과 관련하여 보조서비스, 송배전망 및 수용가 등 다양한 그리드의 요구조건에 따른 ESS 기술에 대한 포괄적인 성능 분석을 기반으로 하여 ESS 프로젝트의 기술성, 경제성을 종합적으로 제시함으로써 최적 ESS 기술을 선정할 수 있는 방안을 제시한다. 본 논문에서 소개하는 최적 ESS 기술선정 알고리즘은 다양한 ESS 기술의 발굴 및 보급에 활용하여 사업의 경제성 향상 측면에서 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 시사점

2023년 제주를 시작으로 신재생에너지 변동성 대응을 위한 재생에너지 입찰제도 도입이 시범적으로 시행됨에 따라 ESS와 연계된 재생에너지 시스템의 가치평가 및 최적 설계를 위해 논문에서 제시하는 최적 ESS 기술 선정 방법 및 톨의 활용성이 증가될 것으로 기대한다. 다만 상기 활용성 제고를 위해서는 본 논문의 핵심 DB인 ESS 기술 성능 특성값 및 서비스 요구조건에 대한 최신 DB 확보의 수립이 무엇보다 중요하므로 이에 대한 확보방안이 요구된다.

또한 본 논문에서 제시된 평가 항목에 있어 최근의 기술 환경 변화를 고려한 일부 개선이 요구된다. 예를 들어 배터리 기반의 ESS 설비 설치시, 옥내/옥외형에 따라 화재안전 기준 등에 따른 설치규정^[11,12]이 상이하며 이는 결국 해당 기술의 적합성 판단에 중요한 인자로 고려될 수 있다.

이에, 본 연구진은 후속 연구로서 국내에서 운영 중인 ESS 연계 재생에너지시스템의 사례 분석을 통해 본 연구에서 제시한 최적 기술 선정 및 ESS가 제공하는 편익에 대한 가치평가를 포함하는 전주기 평가방법론을 제시하고 이의 타당성을 분석하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 2022년도 한국전력공사의 지원을 받아 수행한 연구과제 성과물입니다(과제 번호: R22EA10).

References

- [1] Ministry of Trade Industry, and Energy, 2022, "10th Basic plan for electricity supply and demand", https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=165956&file_seq_n=1.
- [2] Akhil, A.A., Huff, G., Currier, A.B., Kaun, B.C., Rastler, D.M., Chen, S.B., Cotter, A.L., Bradshaw, D.T., and Gaunt, W.D., 2013, "DOE/EPRI 2013 Electricity storage handbook in collaboration with NRECA", Sandia National Laboratories.
- [3] Haas, J., Cebulla, F., Cao, K., Nowak, W., Palma-Behnke, R., Rahmann, C., and Mancarella, P., 2017, "Challenges and trends of energy storage expansion planning for flexibility provision in low-carbon power systems - a review", *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, **80**, 603-619.
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA) Report, 2020, "Electricity storage valuation framework", https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_storage_valuation_2020.pdf?rev=6f01e9ba6d1f40aeba0044ad747ed03d.
- [5] Balducci, P.J., Alam, M.J.E., Hardy, T.D., and Wu, D., 2018, "Assigning value to energy storage systems at multiple points in an electrical grid", *Energy Environ. Sci.*, **11**(8), 1926-1944.
- [6] Electric Power Research Institute (EPRI) Technical report, 2021, "ESIC Energy storage implementation guide", 3002021706, <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002010896/0/Product>.
- [7] SANDIA National Laboratories, "ES-Select - An Energy Storage Selection Tool", https://www.sandia.gov/ess-ssl/ESSelectUpdates/ES-Select_Documentation_and_User_Manual-VER_2-2013.pdf.
- [8] Jeju Energy Corporation, 2020, "Request for proposal of new and renewable energy convergence EV charging

- station (secondary)”, [https://www.jejuenergy.or.kr/index.php/board?act=down&seq=2021&serial=5&bd_bcid=bidding&page=.](https://www.jejuenergy.or.kr/index.php/board?act=down&seq=2021&serial=5&bd_bcid=bidding&page=)
- [9] Korea Power Exchange (KPX), 2021, “Power market operation rules”, https://new.kpx.or.kr/board.es?mid=a10205010000&bid=0030&act=view&list_no=65906&tag=&nPage=1.
- [10] DOE Global Energy Storage Database, 2022, Accessed 5 January 2023, <https://www.energystorageexchange.org>.
- [11] Ministry of Trade, Industry and Energy, “Partial revision (amendment) of the Korean electric facilities regulations administrative notice”, Announcement No. 2022-811, [https://www.motie.go.kr/motie/ms/nt/announce3/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=68017&bbs_cd_n=6¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=&biz_anc_yn_c=.](https://www.motie.go.kr/motie/ms/nt/announce3/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=68017&bbs_cd_n=6¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=&biz_anc_yn_c=)
- [12] National Fire Agency, 2022, “Fire safety standards for electric storage facilities (NFSC 607)”, Notice No. 2022-1.