

# 제주지역 전력계통에 설치되는 에너지 저장장치의 경제성 분석

(Economic Analysis of Energy Storage System for power system in Jeju)

최준영\* · 이종현 · 안종욱 · 고원석 · 홍준희

(Joon-Young Choi · Jong-Hyun Lee · Jong-Wook Ahn · Won-Suk Ko · Jun-Hee Hong)

## 요 약

본 논문에서는, 제주지역 전력계통에 설치되는 에너지 저장장치의 경제성을 분석하였다. 본 논문에서 검토한 내용은, 현재 운영 중인 제주지역 내 발전소의 고정비와 변동비를 기준으로 에너지 저장장치의 고정비와 변동비를 비교한 것이다. 비교분석결과를 통해 에너지저장장치가 경제성 측면에서 이점이 있다는 것을 보여주었다. 에너지저장장치는 유리한 경제성과 함께 신뢰도 측면에서도 좋은 역할을 할 것으로 기대된다.

## Abstract

In this paper, economic analysis of Energy Storage System for power system is performed. Economic analysis is performed to show the benefits of Energy Storage System. Results illustrate the advantages of Energy Storage System not only acting as an alternative generation resource but also giving a better reliability and stability in power system.

Key Words : Energy Storage, Power System, Economic Analysis, Battery System

## 1. 서 론

생산과 동시에 소비되어야 하는 전기의 특성상 시간별, 일별, 계절별로 변화하는 전력수요의 변동 및 사고에 대한 대비는 전력계통에서 중요한 문제이다. 전력계통의 안정성 및 신뢰도 확보를 위해 부하증가를 예측하여 발전 및 송배전망의 건설에 대한 중장기 계획이 수립되어야 한다. 이러한 발전 및 송배전

망의 건설에는 막대한 자금과 시간이 동반된다.

에너지 저장장치는 고정된 발전자원 및 송배전설비에 유연성을 가지게 하며 부하변동 및 계통의 신뢰도 확보에 도움을 줄 수 있다. 현재 사용 중인 에너지 저장장치의 대표적인 예로서 양수 발전을 들 수 있다. 양수 발전은 전기 수요가 낮을 때 전기 에너지를 이용하여 물을 높은 곳으로 끌어 올리고 전기 수요가 높을 때 저장한 물을 흘려 위치 에너지를 전기 에너지로 변환한다. 이는 최근까지 많은 양의 에너지를 저장하는 가장 실용적인 방법이었으나 환경적인 제약으로 인하여 새로운 양수 발전소의 건설은 앞으로 어려움에 직면할 것으로 예상된다[1].

본 논문에서는 에너지저장장치를 전력계통에 설

\* 주저자 : 전주대학교 전기전자공학부 교수  
Tel : 063-220-2657, Fax : 063-220-2056  
E-mail : joon@jj.ac.kr  
접수일자 : 2009년 5월 25일  
1차심사 : 2009년 6월 1일  
심사완료 : 2009년 6월 11일

치하는 경우 발전원가를 계산하여 경제성 비교를 수행하였다. 전력계통에 에너지 저장장치를 투입한 사례와 장점을 소개하였고, 운영되고 있는 발전소의 발전원가와 이 논문에서 제시한 에너지 저장장치의 발전원가의 비용 비교평가를 수행하였다.

## 2. 본 문

### 2.1 사례조사

전력공급회사인 골든밸리전기연합(Golden Valley Electric Association)은 알래스카, 페어뱅크지역에서 약 90,000명에게 전력을 공급하고 있다. 골든밸리전기연합계통은 독립계통으로서 앵커리지지역으로부터 400[km] 남쪽으로 연계되어 있다. 대부분의 발전은 화력으로서, 석탄과 기름이 주 발전원이다. 골든밸리전기연합계통은 순동예비력을 최소화하는 노력을 통하여, 비용절감 노력을 지속적으로 수행해왔으며, 앵커리지로부터 저가의 전력을 송전받고 있다. 하지만, 순동예비력 기준 만족을 위한 비용이 증대됨에 따라, 축전지 에너지 저장장치(Battery Energy

Storage System) 적용을 고려하였고 현재 가동 중에 있다. 장치는 2001년 10월 ABB와 Saft의 콘소시움에 의해 설치되었으며, 2003년 8월 정식으로 운전이 시작되었다. 축전지 에너지 저장장치는 2003년 11월 처음으로 가동되었다. 사용된 축전지 에너지 저장장치의 구조도 및 설치현황을 그림 1에 보였다. 사용된 축전지는 3,440개의 니켈-카드뮴 셀(type SBH920) 4쌍이 병렬로 연결된 것이며, 필터와 컨버터를 통해 계통에 연결하였다. 필터는 직류연결전압, 전압리플감소, 병렬공진을 조정하는 기능을 수행한다. 축전지 에너지 저장장치는 작동을 시작한 첫해인 2003년에 55회 작동하였고, 이를 통해 289,000명 이상의 고객들을 대상으로 서비스하였으며 현재도 작동되고 있다.

### 2.2 에너지 저장장치의 장점

에너지 저장장치는 전력설비의 전체 건설비용을 감소시킬 수 있으며 전력설비의 효율성을 증대시키고 전력설비 인프라의 투자 위험성을 감소시키는 장점을 가지고 있다. 에너지 저장장치는 용도에 따라 저장장치의 용량, 지속방전시간, 설치위치를 고려하여 계통에 적용시켜야 하며 전력계통에서 다음과 같은 역할이 가능하다.

표 1. 중앙급전발전기 공급가능용량에 따른 조치사항 목록(2)

Table 1. List of Actions based on the supply capacity of main generator(2)

공급가능용량 ([MW])	필요 조치 사항
3,000~4,000	비상전력수급대책 기구 구성 준비 추가 공급가능용량 확보
2,000~3,000 미만	비상전력수급대책 기구 구성 운영 수요조절 준비 추가 공급가능용량 확보
1,000~2,000 미만	수요조절 시행 계획된 발전정지계획 변경 및 공급 가능용량 유지 또는 향상
0~1,000미만	긴급 부하조정

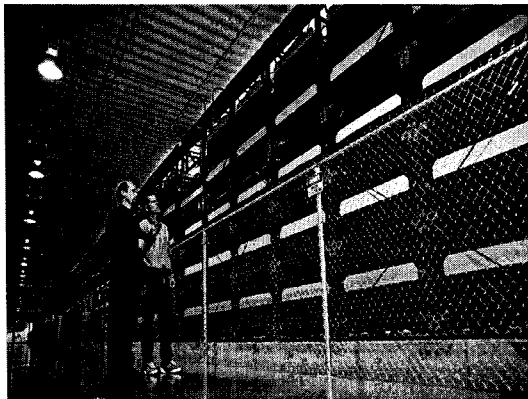
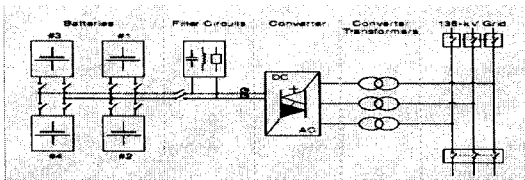


그림 1. 골든밸리전기연합의 축전지 에너지 저장장치  
Fig. 1. Battery Energy Storage in Golden-valley electric association

## 제주지역 전력계통에 설치되는 에너지 저장장치의 경제성 분석

### 1) 발전 용량 확보

에너지 저장장치는 발전 자원에 대한 피크 부하의 증가로 인한 추가 발전 설비 건설에 대한 투자 부담을 줄일 수 있다. 이는 예비력 확보를 위하여 투자되는 발전기들을 대체함으로써 전력수요가 낮을 때 전기에너지를 저장하고 전력수요가 높을 때에 전기에너지를 방출하여 전력공급가능용량의 안정성확보가 가능하다. 전력계통에서는 예비력이 표 1에서 볼 수 있듯이 해당 수준에 도달할 경우 전력수급안정을 위한 조치를 이행하게 된다. 에너지 저장장치를 사용할 경우 전력수요가 높을 경우 전기에너지를 방출하여 공급가능용량의 예비력을 높이고 피크삭감이 가능하여 발전자원의 낭비 및 수요예측의 실패로 인한 수급의 불안정성을 막을 수 있다.

### 2) 계통운영보조서비스

계통운영보조서비스는 전력계통의 신뢰성, 안정성을 유지하고, 전기품질을 유지하며, 전력거래를 원활하게 하기 위하여 전기사업자가 제공하는 주파수 조정, 예비력, 무효전력 및 자체기동 등의 서비스를 말한다[2]. 빠른 응답성과 출력을 가진 에너지 저장장치를 사용함으로써 계통의 신뢰성, 안정성 유지가 가능하다[3].

### 3) 송배전망 지원

에너지 저장장치는 송배전망에서 전기에너지를 흡수하고 방출함으로써 최대수요시 발생하는 혼잡도를 감소시키며 송배전 용량을 높여줌으로 계통의 안정도 및 신뢰도 향상을 돕는다. 이렇게 송배전망의 안정운전을 도와주면 지역한계비용(Location Marginal Pricing, LMP)의 값이 낮아질 수 있을 뿐만 아니라 송배전망의 투자비가 적어지고, 전력 품질(Power Quality, PQ)도 향상될 수 있다.

## 2.3 에너지 저장장치의 경제성

### 2.3.1 고정비

고정비는 건설비와 반복 고정비로 구성된다. 건설비는 전지전력저장 설비와 건축용지로 구성되며, 반

복고정비는 고정운전유지비, 전지 교체비, 및 세금, 보험료 등으로 구성된다[4].

표 2. 전지 및 주변기기 설치비용(5)  
Table 2. Installation cost of batteries and peripheral

기술	연료비용 (\$/kWh)	용량비용 (\$/kW)	주변기기비용 (\$/kWh)
납축전지	150	175	50
황화나트륨	250	150	30
V 레독스	350	175	30
리튬이온	500	175	30

### 1) 건설비

건설비는 전지전력저장 설비와 건축용지를 더하여 구할 수 있다.

#### ① 전지전력저장 설비

전지전력저장 설비의 비용은 크게 연료비용, 용량비용, 주변기기비용의 3가지로 구성되는데, Sandia 보고서의 데이터를 기초로 작성하였다[5].

#### ② 에너지저장장치의 건축용지비용

용지비용은 현재 한전기준을 적용하여 도시와 지방에 건설할 경우 각각 총 투자비의 5~8[%]로 가정하였으며 아래 표와 같다.

표 3. 건축용지비용  
Table 3. Cost of Construction area

	도시	지방
용지비용	총 투자비의 8[%]	총 투자비의 5[%]

#### ③ 에너지저장장치의 총 설치비용 및 단위용량(kW)당 건설단가

에너지저장장치의 단위용량당 건설단가는 에너지저장장치의 비용에 연계비용과 총 투자비의 5~8[%]의 용지비용을 더함으로써 구할 수 있으며 아래 표 4와 같이 구할 수 있다.

표 4. ESS의 총 설치비용 및 단위용량당 건설단가  
Table 4. Total installation cost of ESS and construction price per unit

	ESS 비용 ((\$/kW))	연계 비용 ((\$/kW))	용지비용 ((\$/kW))		[kW]당 건설단가	
			도시	지방	도시	지방
납축전지	325	50	26	16.25	401	391.2
황화나트륨	400	30	32	20	462	450
V 레독스	525	30	42	26.25	597	581.2
리튬이온	675	30	54	33.75	759	738.7

2) 반복고정비

반복고정비는 고정운전유지비와 전지교체비로 구성된다[4].

① 고정운전유지비

고정운전유지비에는 인건비, 소모성 물품 및 장비, 사고보험, 외부지원 서비스 등에 대한 비용들이 포함된다.

② 전지교체비

전지수명은 충방전 횟수(Cycle)와 방전심도(DOD, Depth of Discharge)로 나타낼 수 있는데, 아래 표와 같이 가정하였으며, 나머지 시스템의 설비는 반영구적으로 가정하였다.

2.3.2 에너지저장장치의 변동비

에너지저장장치의 변동비는 전력저장에 필요한 발전비용과 운전유지비로 구성된다. 하지만 운전유지비는 발전비용에 비하여 값이 미미하기 때문에 발전비용만을 고려하였다[4].

표 5. 배터리 특성에 따른 예상수명  
Table 5. Battery life expectancy based on the characteristics

	Cycle/년	방전심도	방전시간	예상수명
납축전지	250	70[%]	4시간	10년
황화나트륨	365	70[%]	4시간	10년
V 레독스	365	70[%]	4시간	10년
리튬이온	365	70[%]	4시간	10년

표 6. 배터리 종류에 따른 발전원가  
Table 6. The generation cost for the type of battery

배터리종류	변동비원가 ((\$/kWh))	발전원가 ((\$/kWh))	변동비/ 발전원가(%)
납축전지	0.0331	0.07334	45.13
황화나트륨	0.0331	0.07642	43.31
V 레독스	0.0331	0.07895	41.92
리튬이온	0.0331	0.08652	38.25

1) 저장용 전원 발전 원가

에너지저장장치의 주목적은 심야 기저부하시에 전력을 저장하였다가, 피크부하시간에 전력을 공급하는 데에 있다. 따라서 발전원가는 기저부하인 원자력발전의 단가(24.75원/[kWh])를 적용하는 것이 바람직하나 고립된 제주도의 특성과, 제주도에 기저부하를 공급하는 HVDC의 송전 손실 등을 고려하여 2007년 육지계통 평균연료비인 46원/[kWh][6]를 적용하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

2.3.3 에너지저장장치의 평준화 발전원가

에너지저장장치에 대한 총 발전비용은 고정비 및 변동비의 합으로 표현된다. 평준화 발전원가는 = 고정비 + 변동비 원가로 나타낼 수 있으며 각각의 값은 아래와 같다.

$$\text{고정비} = \frac{\text{건설단가} \times \text{고정비용}}{\text{연운전시간} \times (1 - \text{용량감소율})}$$

$$\text{변동비원가} = \frac{\text{저장용전원발전원가}}{(1 - \text{송전손실율} \times \text{배전손실율}) \times \text{저장효율}}$$

위와 같은 수식을 통하여 각각의 배터리 종류에 따른 변동비원가 및 발전원가를 아래 표 6과 같이 구하였다.

2.3.4 기존 발전소와 발전원가 비교

1) 제주도 및 내륙 발전소들의 발전 원가

제주도의 발전소에 따른 연료비와 고정비는 아래 표 7과 같으며 내륙과 제주 발전소의 연료비 및 발전원가를 구하면 표 8과 같다. 데이터에 의하면 제주도

제주지역 전력계통에 설치되는 에너지 저장장치의 경제성 분석

의 발전원가가 내륙지방의 발전원가와 비교하여 상당히 높음을 알 수 있다. 그 이유는 제주도의 전력부하가 적어 효율이 좋지 않은 소규모 발전 설비가 대부분이기 때문이다. 2007년 12월 기준으로 최대 단위 용량이 105[MW][7]에 불과하며, 사용연료 또한 중유, 경유와 같은 고가의 에너지를 사용하고 있다.

표 7. 제주도 발전기의 연료비 및 고정비 ('07년도 기준)(6)

Table 7. Fuel costs and fixed costs of generators in Jeju

구분	북제주	북제주	북제주	북제주
	화력#1	화력#2,3	G/T	내연
연료비	143.33	239.49	123.53	135.94
고정비	9,783,809	1,321,215	0	840,798
구분	남제주	남제주	한림	신규
	화력	내연	복합	LNG
연료비	124.94	199.72	135.94	100.00
고정비	3,078,560	12,562,860	9,783,809	12,435,841

표 8. 발전소들의 연료비와 발전원가

Table 8. Cost of fuel and development of plant

발전소		설비용량 ([MW])	연료비 ([\$/kWh])	발전원가 ([\$/kWh])
내륙	평택	351.6	0.066	0.232
	서인천	1,880	0.039	0.065
	안양	317.6	0.058	0.116
	분당	397	0.052	0.092
제주도	내연	40	0.135	0.156
	화력	20	0.124	0.277
	내연	40	0.199	0.513
	복합	105	0.135	0.228

에너지저장장치와 발전소들과의 비교를 쉽게 하기 위하여 표 8의 발전원가와 표 6에서 구한 배터리 종류에 따른 발전원가를 비교하여 표 9에 나타내었다.

예를 들어 평택과 남측전지의 발전원가의 비교를 위하여 (남측전지 발전원가/평택의 발전원가) = (0.232/0.1544)를 구해보면 0.6656의 값이 구해진다.

이 값이 1이하이면 에너지저장장치의 발전원가가 낮아 경쟁력이 있음을 나타내며, 경쟁력이 있는 1이하의 값은 회색으로 표시하였다. 이는 발전소들의 발전원가를 100[%]로 할 경우, 상대적인 배터리의 발전원가 값을 표현한 것으로, 예시된 0.6656은 약 34.5[%] 상당의 경제성이 있다고 사료된다. 표 9를 통해 보여진 결과치는, 발전설비용량이 큰 내륙 발전소들과 비교하면 경쟁력이 비교적 떨어지지만, 제주도의 소형 발전소들과 비교하면 그 효율이 상당히 높음을 알 수 있다.

표 9. 기존발전과 ESS발전 원가의 비교

Table 9. Compare the cost of existing generator with ESS

		Lead-acid	Na/S	V-redox	Li-Ion
평택	내륙	0.6656	0.6559	0.8409	1.1020
서인천		2.3759	2.3410	3.0014	3.9336
안양		1.3313	1.3118	1.6818	2.2041
분당		1.6786	1.6540	2.1205	2.7791
내연	제주도	0.9899	0.9754	1.2505	1.6390
화력		0.5575	0.5493	0.7043	0.9230
내연		0.3010	0.2966	0.3802	0.4984
복합		0.6773	0.6674	0.8556	1.1214

5. 결론

에너지 저장장치는 전력계통에서 발전용량확보, 계통운영보조서비스, 송배전망 지원 등의 역할을 수행하여 전력계통의 신뢰도와 안정성을 증대시킨다. 본 논문에서는 에너지저장장치의 수단으로서 배터리의 발전원가를 계산하였고, 기 운영 중인 발전소를 내륙발전소와 제주발전소로 구분한 후 발전원가를 비교하여 그 경제성을 입증하였다. 제주도와 같이 효율이 낮은 소규모발전설비가 주로 설치된 계통에 배터리를 이용한 에너지저장장치를 설치하여 발전원으로 사용하는 경우, 10~30[%] 정도의 경제성이 있음을 보였다.

활발히 진행 중인 에너지 저장장치에 대한 연구로 앞으로 다양한 에너지 저장장치가 개발될 것으로 예상되며 보다 높은 신뢰성과 경제성을 갖게 될

것이며, 전력계통과 에너지 저장장치의 결합은 전력계통 신뢰도와 경제성을 높이는 수단이 될 것으로 기대된다.

## References

- (1) Electricity Advisory Committee (EAC), "Bottling Electricity: Storage as a Strategic Tool for Managing Variability and Capacity Concerns in the Modern Grid," EAC Report, Dec. 2008.
- (2) 한국전력거래소, "전력시장운영규칙".
- (3) James M. Eyer, Joseph J. Iannucci, and Garth P. Corey "A Study for the DOE Energy Storage Systems Program," Sandia Report, SAND2004-6177, December 2004.
- (4) 김응상, "복합화력발전 시스템과의 발전원가 비교에 의한 전지전력 저장시스템의 경제성 분석," 전기학회논문지, Vol. 48A, No. 3 MAR, 1999.
- (5) "Benefit/Cost Framework for Evaluating Modular Energy Storage," Sandia 2008-0978 Unlimited Release.
- (6) 김찬기, "제주계통의 안정적 운전에 대한 타당성 연구," 전력전자학회 논문지 제 13권 5호.
- (7) 2007년 12월 기준 전력통계, www.kepco.co.kr.

## ◆ 저자소개 ◆

### 최준영 (崔峻榮)

1963년 7월 9일생. 1994년 서울대학교 졸업(박사). 1994~1996년 엘지전자 생활시스템 연구소 선임연구원. 2004~2005년 아리조나주립대 방문연구원. 1996년~현재 전주대학교 공과대학 전기전자정보통신공학부 교수.

### 이종현 (李種賢)

1979년 7월 2일생. 2008년 경원대학교 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 경원대학교 공과대학 전기전자공학과 박사과정.

### 안종욱 (安鍾旭)

1980년 4월 24일생. 2008년 경원대학교 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 경원대학교 공과대학 전기전자공학과 박사과정.

### 고원석 (高遠錫)

1971년 8월 20일생. 2007년 Univ. of Central Florida 졸업(박사). 2008년~현재 경원대학교 가천에너지연구원 선임연구원.

### 홍준희 (洪俊熹)

1963년 3월 1일생. 1995년 서울대학교 졸업(박사). 2006년~현재 한국전산원 U-KOREA 기획위원. 2005년~현재 대한전기학회 정보화 위원. 1995년~현재 경원대학교 전기공학과 교수.