

수익률을 고려한 수용가측 전지전력저장시스템의 최적용량 선정

*홍중석, 김재철, 최준호, 손학식.
 . : 숭실대학교 전기공학과

Determination of Optimal sizes of Battery Energy Storage System Considering Rate-Of-Return for Customers-side

*Jong-Seok Hong, Jae-Chul Kim, Joon-ho Choi, Hak-Sik Son.
 . : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil UNIV.

Abstract - This paper discusses the optimal sizes of BESS. The goal must be optimized electricity charge of the customers-side with choosing the time-of-use rates. Therefore, the cost is minimized by BESS installed the customers-side. Feasible ROR that means the ratio of capital costs to economic effect owned the optimal BESS sizes is determined the suitable domestic condition based on the battery cost and power converter system cost. Payback period times can be presented by BESS through the ROR. Multi-Pass Dynamic Programming (MPDP) algorithm is applied to the customer for the optimal sizes determination in this paper. It is to solve the optimal solution under the constraints. To investigate the efficiencies of the constraints, it is applied the typical load curve to the high-voltage customer owned Time-Of-Use(TOU) whether BESS is installed or not. Well, The result is obtained that feasible BESS sizes can be achieved the suitable customers-side of meter through the ROR

고려하여 수용가의 최적용량결정을 하였다. 또한 본 논문에서는 시간제 요금제도(Time-Of-Use : TOU)를 갖는 수용가에 전지전력저장시스템[3]을 설치하여 BESS의 최적용량산정을 결정하기 위해 다경로동적계획법(multi-pass dynamic programming:MPDP)을 적용[3-5]하였다. 이러한 알고리즘을 적용하여 첨두부하삭감(peak shaving)을 가져와 전기요금의 감소를 가져올 수 있다. 그림 1은 우리나라의 1주일간 부하곡선을 월요일, 근무일, 토요일, 일요일에 대해 실험부하곡선을 나타내었다.[8]

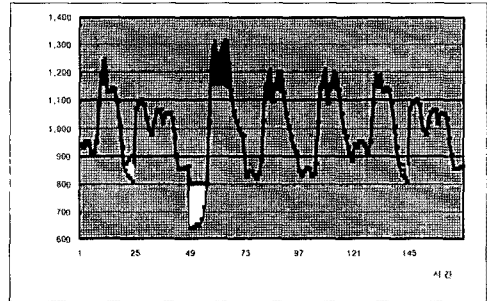


그림1. BESS 첨두부하삭감기능

1. 서 론

생활수준의 향상과 산업의 발달로 전력의 수요가 증대하고 전력설비의 대용량화와 전력수요의 대도시집중현상으로 인해 주/야간은 물론 주중과 휴일간의 전력사용량의 격차가 커지고, 심야 잉여전력의 증가는 심야 부하개발을 요구한다. 또한 급격한 첨두부하 증가는 전력에 비용을 증가를 초래한다. 또한 전력산업구조개편으로 인하여 전기요금제도에 있어서 누진제가 도입이 되어 전기를 사용하는 수용자에게는 금전적으로 부담을 안겨 주었다. 화석연료가 없는 우리나라는 향후 에너지절약과 대기오염, 소음, 발열, 진동 등에 대한 소비자 주변환경문제는 우리가 풀어야 할 시급한 문제이다. 이에 에너지 절약과 환경 친화적인 대체기술로서 양수발전, 전지저장, 초전도저장, 압축공기저장, 플라잉휠, 증기저장, 분산형전원 등과 같은 전력저장발전 시스템이 있다. 이중 전지전력 저장시스템(Battery Energy Storage System)은 전기사업자와 비전기사업자 모두에게 경제성과 고품질의 서비스를 제공할 수 있으며 이에 대한 장점으로는 부하를 향상, 순동예비력, 전압 및 주파수 제어, 발전 및 송배전 설비의 투자지연 효과, 공급의 신뢰도 향상 등의 장점을 가지고 있다.[1] 그에 반해 전지 전력저장시스템의 전지의 비용이 높다는 단점이 있다.

그리하여 BESS비용에 대한 경제성 평가가 필요하며, 그 경제성에 따른 수용가에 맞는 적절한 BESS용량을 결정하는 것이 중요하다. 이 전지용량을 결정하기 위하여 투자비에 대한 경제효과를 비로 나타내는 수익률을

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

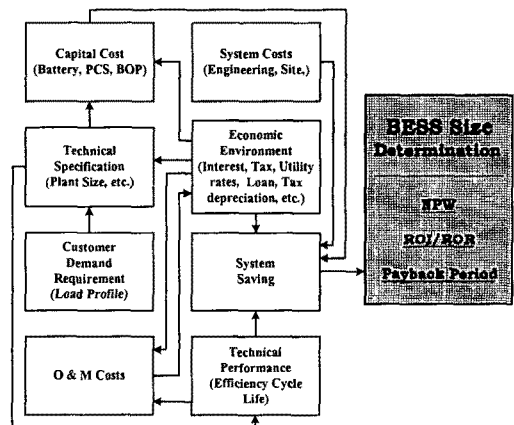


그림2. BESS 블록다이어그램

그림 2는 최적용량 결정에 드는 비용을 블록다이어그램으로 표시한 것이다.[2] 여기서 전지비용과 전력변환장치비용(BC), 주변장치비용(CC), 용지비용(SC), 운전유지비용(OMC)을 적용하였다.

2.1.1 BESS 투자비용과 전기요금체계

본 논문에서는 BESS를 수용가에 설치하였을 때 수용가의 전기요금과 BESS 설치비용의 비로 수익률을 계산하였다. 식은 다음과 같다.

$$CPL(Bcap, Bpr) = BC + CC + BOPC + SC + OMC \quad (1)$$

$$TC = \sum_{i=1}^{12} [BR_i(BP, YP_{MAX(7.8.9, pm)}) + FR_i(\sum_{j=1}^{24} (PPD_{ij}, LP_{ij}, LM_{ij}, LO_{ij}))] \quad (2)$$

$$BR_i(BP, YP_{MAX(7.8.9, pm)}) = BP \times YP_{MAX(7.8.9, pm)} \quad (3)$$

$$FR_i(\sum_{j=1}^{24} (PPD_{ij}, LP_{ij}, LM_{ij}, LO_{ij})) = \sum_{j=1}^{24} PPD_{ij} \times (LP_{ij} + LM_{ij} + LO_{ij}) \times 1 \text{ hour} \quad (4)$$

여기서, i 는 달(month), j 는 시간(hour)이며, $BR_i(BP, YP_{MAX(7.8.9, pm)}) = i$ 달의 기본요금(원/달)

BP = 기본요금

$YP_{MAX(7.8.9, pm)}$ = 년중 최대피크전력(kW)

$FR_i(PPD_{ij}, LP_{ij}, LM_{ij}, LO_{ij})$

= i 달의 전력사용량요금(원/달)

PPD_{ij} = j 시간의 전력소비량(kWh)

LP_{ij} = j 첨두부하시간의 전력요금

단, j 가 첨두부하시간이 아닌 경우 $LP_{ij} = 0$

LM_{ij} = j 중간부하시간의 전력요금

단, j 가 중부하시간이 아닌 경우 $LM_{ij} = 0$

LO_{ij} = j 중간부하시간의 전력요금

단, j 가 첨두부하시간이 아닌 경우 $LO_{ij} = 0$

$CPL(Bcap, Bpr)$: 투자비용(kWh/kW)

2.1.2 목적함수

절감된 전기요금은 BESS 설치전 전기요금과 BESS 설치후 전기요금의 차로 나타낼 수 있다. (식5) 아울러 최적용량 산정시 수익률은 다음과 같다.

$$ES_n = TC_n - TCB_n \quad (5)$$

$$\text{Maximize } R = \frac{\sum_{n=1}^N ES_n(Bcap, Bpr, LP_n, LM_n, LO_n)}{CPL(Bcap, Bpr)} \quad (6)$$

여기서 기존의 요금(TC)와 BESS를 설치했을 때 전기요금(TCB)의 차가 절감된 요금이다. 또한 식(6)은 최적 수익률을 나타내며, 여기서 R 은 수익률을 나타내며 CPL 은 BESS 투자비용을 각각 나타냈다.

2.2 전지 모델

충전시에는 $P_{j+1} < 0$

$$E_{j+1} = (E_j - PB_{j+1}) \times \eta \quad (7)$$

방전시에는 $P_{j+1} > 0$

$$E_{j+1} = (E_j + PB_{j+1}) \quad (8)$$

P_{j+1} : 시간 $j+1$ 에서 BES의 출력(power output)

E_{j+1} : 시간 $j+1$ 에 저장된 에너지

η : BES 에너지효율

2.3 알고리즘

2.3.1 BESS 충,방전영역결정

전지는 화학적에너지를 전기에너지로 저장하는 장치이다. 이 알고리즘에서는 BESS에 저장된 에너지를 상태변수(state variables)로 이용하였다. 그림 1은 BESS

용량에 따른 충,방전운영영역을 표시하였다. $j \leq T1$ 일 경우는 충전시의 영역범위를 나타내는데 j 시간의 최대 저장량은 그 전단계($j-1$)에 남아있던 충전된 에너지에 효율(η)을 곱한 BESS 출력 합을 말한다. 반대로 방전시에도 똑같이 설명될 수 있다. 또한 BESS 용량과 제조업자가 정한 전지수명에 따른 최소 에너지 저장량을 표시하였다.

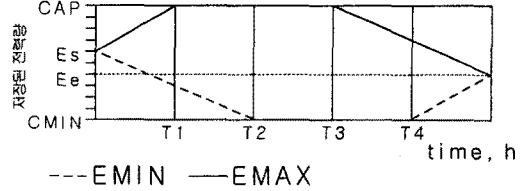


그림 2. BES 저장될 에너지 적정영역

$$E_{max, j} = E_{max, j-1} + PC_{max} \times \eta \quad j \leq T1 \quad (9)$$

$$E_{max, j} = E_{max, j+1} + PD_{max} \quad j > T3 \quad (10)$$

$$E_{max, j} = CAP \quad T1 < j \leq T3 \quad (11)$$

$$E_{min, j} = E_{min, j-1} - PD_{max} \quad j \leq T2 \quad (12)$$

$$E_{min, j} = E_{min, j+1} - PC_{max} \times \eta \quad j > T4 \quad (13)$$

$$E_{min, j} = CMIN \quad T2 < j \leq T4 \quad (14)$$

$$E_{max, 1} = Es \quad E_{max, imax+1} = Ee \quad (15)$$

$$E_{min, 1} = Es \quad E_{min, imax+1} = Ee \quad (16)$$

$$CMIN \leq E_{max, j} \leq CAP \quad (17)$$

$$CMIN \leq E_{min, j} \leq CAP \quad (18)$$

Es : BESS에서 저장된 초기 에너지

Ee : BESS에서 마지막에 저장된 에너지

PC_{max} : 충전시 BESS의 최대출력

PD_{max} : 방전시 BESS의 최대출력

PC_{min} : 충전시 BESS의 최소출력

PD_{min} : 방전시 BESS의 최소출력

$E_{max, j}$: 단계 j 에서 저장될수 있는 BESS의 최대값

$E_{min, j}$: 단계 j 에서 저장될수 있는 BESS의 최소값

CAP : BESS 용량

$CMIN$: 전지수명에 따라 유지되어야할 최소에너지

2.4 국내 전기요금과 BESS 기술사양

표 1에서 보는 요금제도는 기본요금 단가가 높고 전력량요금 단가가 낮으므로 전기 사용시간(설비 가동률)이 많은 수용가에 맞는 전력요금 구조예를 나타냈다. [7]

표 1. 일반용(을) 전기요금 체계 : 고압 A, 선택요금 2

전력요금 (kW당)	시간대	전력량 요금(kWh당)		
		여름철 (7~8월)	봄, 가을철 (4~6.9월)	겨울철 (10월~익년3월)
6.780 (원)	경부하 중간부하 최대부하	41.20 90.90 159.40	41.20 66.50 90.90	41.20 76.60 107.70
구 분	계절			
		여름철 (7~8월)	봄, 가을철 (4~6.9월)	겨울철 (10월~익년,3월)
	경 부 하	22:00 - 08:00		
	중 부 하	08:00 - 10:00 12:00 - 14:00 17:00 - 22:00	08:00 - 16:00 20:00 - 22:00	
최대부하	10:00 - 12:00 14:00 - 17:00	16:00 - 20:00		

표 2는 현재 국내에서 연구 개발중인 1MW/4MWh 전지전력저장시스템을 기준으로 한 기술적 사양이다.[6]

표 2. BESS 기술적 사양 단위:천원

항 목	규 격
전지비용 [Won/kWh]	225
컨버터 비용 [Won/kWh]	375
주변기기 비용 [Won/kWh]	56.25
용지비용 [Won/kWh]	52.5
연간운전유지비 [Won/kWh]	0.96
손실전력 [kWh/cycle]	1120
전지잔존가치 (전지가격에 대한 비율)[%]	11
자본비 상승률	5.0
충방전 출력비용	0.5
운전유지비 상승률 [%]	4.5
전력량 상승률 [%]	4.5
수용요금 상승률 [%]	4.5
소득세 [%]	35.0

2.5 사례연구

사례연구에서는 마이크로소프트사의 비주일 베이직과 액셀을 이용하여 각각의 전력요금(kW/kWh)에 대해서 표현하였다. 표 3과 표 4는 경공업 수용가와 상업용 수용가의 일일부하곡선 중 첨두부하가 있는 주(peak week)와 7,8,9월 주(week)중 최대부하를 가지는 경우와 기저부하를 가지는 달의 주를 각각 표시하였다. 이 데이터는 1999년 일일부하곡선자료집 중 경공업 수용가와 상업용 수용가를 이용하였으며 전기요금체계는 경공업인 경우 산업용(병)중 선택(2)요금 고압 A를, 상업용인 경우 일반용(을)중 선택(2)요금 고압A를 적용하였을 때 최적의 전기요금 산출할 수 있었다.[7-8]

표 3. 경공업 수용가 부하곡선

Month	분류	Max.	Min.	Load	비 고
		Load (kW)	Load (kW)	Factor (%)	
7월		12172.00	5827.70	75.8	
8월		10143.07	4947.84	76.2	
9월		12445.71	5777.70	74.5	Peak
12월		9712.77	4367.87	74.0	Min.

표 4. 상업용 수용가 부하곡선

Month	분류	Max.	Min.	Load	비 고
		Load (kW)	Load (kW)	Factor (%)	
3월		254.69	98.18	79.3	Min.
7월		644.48	254.90	72.3	
8월		986.27	362.96	70.8	Peak
9월		579.85	211.87	71.2	

경공업수용가를 나타내는 표 3에서는 년중 12월에 9712.77(kW)를 기록 최저기저부하를 기록하였으며, 12445.71을 기록한 9월에 연중최대부하가 나타났다. 그리고 상업용 수용가 부하곡선을 나타내는 표 4는 4월에 최저부하를 기록했으며, 8월에 최고첨두부하를 기록하였다. 이와같이 기저부하와 첨두부하에 대한 수급불급형을 가지는 두 수용가에 대해 BESS의 최적용량을 선정함으로써 전기요금의 최소화를 가져온다. 아울러 사례연구에서는 일주일을 기준으로 하였을 때 BESS 설치에

다른 첨두부하속감(kW)을 수익률을 고려하여 얻은 결과이며, 표 5에 경공업에 대한 수익률을 나타냈다.

표 5. 경공업 수용가의 비교 결과(1999/08)

BESS Capacity	수익률(%)
1810kW/12493kWh	4.61044
1860kW/12693kWh	4.66230
1910kW/12893kWh	4.71333*
1960kW/13093kWh	4.41671
2010kW/15093kWh	4.42821

위 결과에서 수익률이 제일 좋은 1910kW/12893kWh의 전지용량을 결정하였다. 이 결과의 충전 시간은 약 6.75시간이 된다. 향후 이를 통해 최적 충/방전운전을 할 수 있다. 이 밖에 상업용에 경우에도 이와 같은 방법으로 시행하면 147kW/993kWh 용량에 2.0% 수익률을 가지는 것으로 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 우선 국내 수용가에 맞는 시간제 요금 제도를 결정하여 적용하였다. 이를 토대로 수익률을 고려하여 경공업 및 상업용 수용가에 맞는 전지전력저장시스템의 적정용량 결정을 하였다. 이로 인하여 전기사업자에게는 심야잉여공급의 증가로 인하여 심야부하 개발에 협조할 수 있었으며, 비전기사업자에게는 경제적 효과, 즉 전기요금의 절감이라는 장점을 가져다주었다. 향후 전지전력저장시스템의 저변 확대에 인하여 전지비용의 절감이 된다면 금전적인 면은 물론 환경 친화적인 면에서도 좋은 역할을 할 것이라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] MAX D. ANDERSON, "Battery Energy Storage Technologies". Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 3, Mar. 1993
- [2] Ronald C. Reckrodt, et. al., "Economic models for battery energy storage: Improvements for existing methods". IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 5, No. 4, Dec. 1990
- [3] Tsung-Ying Lee, et. al., "Effect of the battery energy storage system on the time-of-use rates industrial customers". IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 5, Sep. 1994
- [4] Tsung-Ying Lee, et. al., "Determination of optimal contract capacities and optimal sizes of battery energy storage systems for time-of-use rates industrial customers". IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, Sep. 1995
- [5] Chin H. Lo, et. al., "Economic dispatch and optimal sizing of battery energy storage systems in utility load-leveling operations". IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, Sep. 1999
- [6] 정연해, 전지전력저장시스템의 경제성 평가 모델에 관한 연구, 석사학위논문, 숭실대학교, 2000년 6월
- [7] http://www.kepco.co.kr/cyber/cyber3_4.html
- [8] 이상철 외, 계약종별·산업별 부하곡선 평가자료집III, 한국전력공사, 1999년 12월