

MPDP를 이용한 수용가측 전지전력저장시스템의 최적운전

*홍종석[°] 김재철[°] 최준호[°] 정용철⁰⁰ 김태수⁰⁰ 김응상⁰⁰⁰
 ° : 송실대학교 전기공학과 00 : 철도청 000 : 전기연구원

Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Customers using the MPDP

*Jong-Seok Hong[°], Jae-Chul Kim[°], Joon-ho Choi[°], Yong-Chul Jung⁰⁰, Tae-Su Kim⁰⁰, Eung-Sang Kim⁰⁰⁰
 ° : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil UNIV., 00 : Korean National Railroad(KNR) KERI

Abstract - This paper studies for the optimal operation of BESS. The goal must be optimized electricity charge of the customer sides owned time-of-use rates in this paper. Therefore, the least of cost is caused by BESS installation. *Multi-Pass Dynamic Programming (MPDP)* algorithm is applied to the customer for the optimal operation determination in this paper. It is to solve the optimal solution under the constraints. No matter how become one stage in general, problem is divided into several stage in series in this algorithm. Regardless of the decision step, MPDP is only accomplished based on the state of stage in the present. To investigate the efficiencies of the algorithm, it is applied the typical load curve to the customer owned *Time-Of-Use(TOU)*. Result shows that the maximum economic benefits of the battery energy storage system can be achieved by the purposed algorithm.

1. 서 론

전력산업구조개편을 시행한지 3년여도 못돼 전력대란을 겪은 미국 캘리포니아주의 전력부족사태는 우리에게 많은 시사점을 안겨주고 있다. 우리나라와 환경은 다소 차이가 있으나 전력산업 구조개편을 추진하고 있는 이 시점에서 큰 교훈이 아닐 수 없다. 캘리포니아는 구조개편 이후 전력수요가 급증했으나 발전소 건설이 이루어지지 않았으며 도매시장은 자유화 되었으나 소매가격을 법적으로 동결하는 등 규제정책이 실패한 것으로 나타났다. 이로 인해 판매회사는 파산에 직면하게 됐으며 발전회사들은 신용도가 하락한 판매회사를 기피하는 사태에 이르렀으며 전기를 이용하는 수용가는 전력부족사태로 인한 일부지역에 단전사태가 발생하였다. 이에 전력부족으로 인한 대체기술로서 양수발전, 전지저장, 초전도 저장, 압축공기저장, 플라이휠일, 증기저장, 분산형전원 등과 같은 전력저장발전 시스템이 있다. 이 중 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 효과를 가지고 있다. [1] 일반적으로 BESS는 전력계통에 연계되어 운전된다. [2] 본 논문에서는 시간제 요금제도(Time-Of-Use : TOU)를 갖는 수용가에 전지전력저장시스템(3-4)을 설치하여 BESS의 최적운전을 하기 위해 다경로동적계획법(multi-pass dynamic programming:MPDP)을 적용[5-7]하였다. 이러한 알고리즘을 적용하여 이러한 알고리즘을 적용하여 첨두부하삭감(peak shaving)을 가져와 전기요금의 감소를 가져올 수 있다.

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

본 논문에서는 BESS를 수용가에 설치하였을 때 다경로동적계획법 알고리즘을 적용하여 시간제 요금제도(Time-of-use:TOU)에 채택한 수용가의 전기요금을 최소화하는 것이 목적이다. 표 1은 한국전력공사의 전력요금 구조를 나타내었다. 표 1에 제시한 요금제도[8]는 기본요금 단가가 높고 전력량요금 단가가 낮으므로 전기사용시간(설비 가동율)이 많은 수용가에 유리하다.

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	경부하	41.20	41.20	41.20
	중간부하	90.90	66.50	76.60
	최대부하	159.40	90.90	107.70

구분	계절		
	여름철 (7~8월)	봄, 가을철 (4~6,9월)	겨울철 (10월~익년3월)
경부하	22:00 - 08:00		
중부하	08:00 - 10:00	08:00 - 16:00	
	12:00 - 14:00	20:00 - 22:00	
	17:00 - 22:00		
최대부하	10:00 - 12:00	16:00 - 20:00	
	14:00 - 17:00		

구분	적용범위(표준전압)
저압전력	표준전압 110V 이상 380V 이하 고객
고압 A	표준전압 3,300V 이상 66,000 이하 고객
고압 B	표준전압 154,000V 고객
고압 C	표준전압 345,000V 이상 고객

시간제요금제도를 사용하는 수용가의 첨두부하, 중간부하, 경부하시간을 각각 LP, LM, LO라 하면 1년간 전체전기요금은 다음과 같다.

$$TC = \sum_{i=1}^{12} [BR_i(BP, YP_{MAX}) + FR_i(PPD_j, LP_j, LM_j, LO_j)] \tag{1}$$

$$BR_i(BP, YP_{MAX}) = BP \times YP_{MAX} \tag{2}$$

$$FR_i(PPD_j, LP_j, LM_j, LO_j) \tag{3}$$

$$= \sum_{j=1}^{HIT} PPD_j \times (LP_j + LM_j + LO_j) \times 1 \text{ hour}$$

여기서, i는 달(month), j는 시간(hour)이며,

$$BR_i(BP, YP_{MAX}) = i\text{달의 기본요금(원/달)}$$

BP = 기본요금
 YP_{MAX} = 년중 최대피크전력(kW)
 $FR_i(PPD_i, LP_i, LM_i, LO_i)$
 = i달의 전력사용량요금(원/달)
 PPD_j = j 시간의 평균전력소비량(kWh)
 LP_j = j 첨두부하시간의 전력량요금
 단. j가 첨두부하시간이 아닌 경우 $LP_j=0$
 LM_j = j 중간부하시간의 전력요금
 단. j가 중부하시간이 아닌 경우 $LM_j=0$
 LO_j = j 중간부하시간의 전력요금
 단. j가 첨두부하시간이 아닌 경우 $LO_j=0$
 LHT_j = i 달의 전체시간

그러므로 BES가 수용가에 설치되었을 때, 목적함수(objective function)는 다음과 같다.

$$\text{Minimizing } TC = \sum_{i=1}^N [BR_i(BP \times \text{Max}(YP_{MAX} - PPB_i)) + FR_i(PPD_j - PB_j, LP_j, LM_j, LO_j)] \quad (4)$$

여기서
 PB_j = j 시간당 BESS의 출력
 PPB_i = i 달의 BESS 출력에 의한 최대피크사감량 $\text{Max}(YP_i - PPB_i)$
 = i 달의 계약용량에서 BESS의 최대피크값의 차

2.2 전지 모델

충전시에는 $P_{j+1} < 0$
 $E_{j+1} = (E_j - PB_{j+1}) \times \eta \quad (5)$

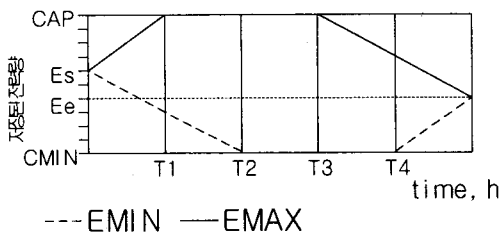
방전시에는 $P_{j+1} > 0$
 $E_{j+1} = (E_j - PB_{j+1}) \quad (6)$

여기서
 P_{j+1} : 시간 j+1에서 BESS의 출력(power output)
 E_{j+1} : 시간 j+1에 저장된 에너지
 η : BESS 에너지효율

2.3 다경로동적계획의 해법

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,방전운전영역을 표시하였다. $j \leq T1$ 일 경우는 충전시의 영역범위를 나타내는데 j 시간의 최대 저장은 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 1. BESS 저장될 에너지 적정영역
- $E_{max j} = E_{max j-1} + PC_{max} \times \eta \quad j \leq T1 \quad (7)$
 - $E_{max j} = E_{max j+1} + PD_{max} \quad j > T3 \quad (8)$
 - $E_{max j} = CAP \quad T1 < j \leq T3 \quad (9)$
 - $E_{min j} = E_{min j-1} - PD_{max} \quad j \leq T2 \quad (10)$
 - $E_{min j} = E_{min j+1} - PC_{max} \times \eta \quad j > T4 \quad (11)$
 - $E_{min j} = CMIN \quad T2 < j \leq T4 \quad (12)$
 - $E_{max 1} = Es \quad E_{max j_{max+1}} = Ee \quad (13)$
 - $E_{min 1} = Es \quad E_{min j_{max+1}} = Ee \quad (14)$
 - $CMIN \leq E_{max j} \leq CAP \quad (15)$
 - $CMIN \leq E_{min j} \leq CAP \quad (16)$

여기서,
 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 j에서 저장될수 있는 BESS의 최대값
 $E_{min j}$: 단계 j에서 저장될수 있는 BESS의 최소값
 CAP : BESS 용량
 $CMIN$: 전지수명에 따라 유지되어야할 최소에너지

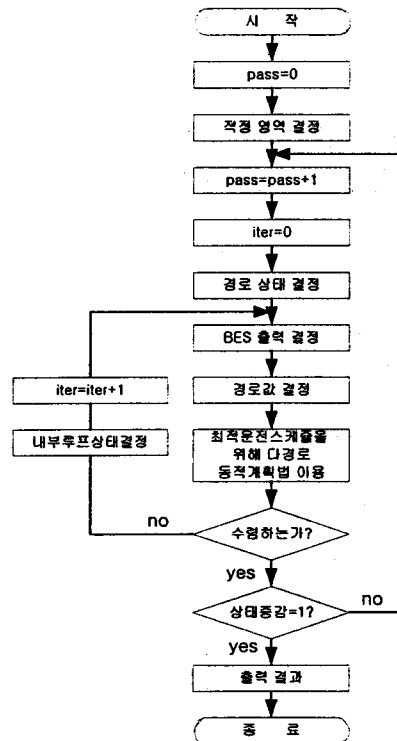


그림 2. 최적운전스케줄을 찾기위한 순서도

2.3.2 BESS 상태(state)결정

그림 3은 전지전력저장시스템의 임의의 상태와 목표치로 도달하는 경로(path)를 보여준다. 여기서 그림3(가)는 3개의 시간 스테이지(time stage)를 가지는 상태(state)를 나타내며 패스(pass)1에서 24시간을 기준으로 하였을 때 갖는 BESS의 운전특성(충/방전특성)을 가진 두 시간스테이지 사이의 경로(path)를 보여준다. 그림3(나)는 5개의 시간스테이지에서 상태와 패스(pass)2에서 갖는 BESS의 충/방전 특성을 나타낸다.

그림 3에서와 같이 다경로동적계획법은 제약조건하에서 최적의 상태(state)에 접근하기 위해 그림 2에서 나타낸 내부루프(inner loop)를 반복하여 목표치에 근접할 수 있도록하는 BESS의 최적운전스케줄을 찾을 수 있다.

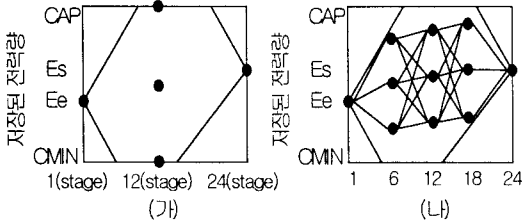


그림 3. 상태(state)와 경로(paths)

2.3.3 BESS 출력(power output)결정

앞서 언급한 BESS 상태결정은 BESS의 출력을 결정하는데 이용된다. 그러므로 두 시간스태이지(time stages)사이의 BESS 출력은 다음과 같이 결정되어진다.

BESS가 충전일 때 즉, $E_j < E_{j+1}$ 이며,

$$PB_{j+1} = (E_j - E_{j+1}) \times \eta (P_{j+1}) \quad (17)$$

$$0 > P_{j+1} > -PCMAX$$

BESS가 방전일 때 즉, $E_j > E_{j+1}$ 이며,

$$PB_{j+1} = (E_j - E_{j+1}) \quad (18)$$

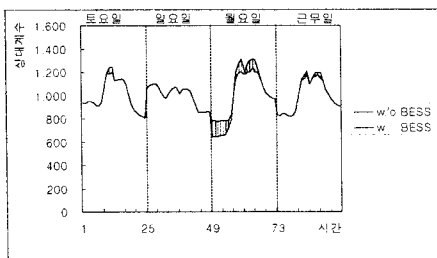
$$0 < P_{j+1} < PDMAX$$

2.3.4 BESS 경로(path)비용 결정

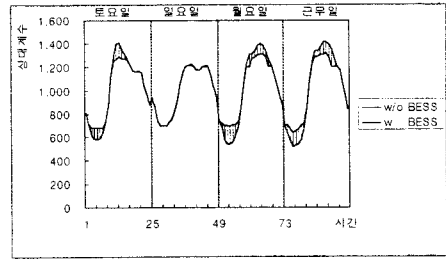
시간제 요금제도(Time-of-Use:TOU)계약을 맺은 수용가에 BESS의 최적운전을 결정함은 BESS에 의해 삭감될 수용가의 첨두부하에 따른 부담해야 할 전기요금의 최소화해 있다. 경로비용(path cost)은 전기요금과 초과전력으로 인한 비용으로 결정된다. 본 논문에서 제한한 알고리즘은 최적스케줄을 찾기 위해 이용되었으므로 시간스태이지 0에서 고려중인 스타이지의 상태(state)까지 최적패스(optimal pass)상의 시간동안 최대첨두부하는 기존계약용량에 대해서 삭감된 피크부하전력을 계산하면 된다.

3. 사례연구

사례연구에서는 경공업 수용가, 상업용 수용가의 1999년 8월 일일부하곡선[9]을 이용하였으며 전기요금은 경공업인 경우 산업용(병)중 선택(2)요금 고압 A, 상업용인 경우 일반용(을)중 선택(2)요금 고압A를 적용하였다. 그림 4는 우리나라의 1년중 피크치를 기록하는 하계부하(8월)를 나타냈다. 그리하여 중축을 상대계수로 하루평균을 1000으로 하였을 때 토요일, 일요일, 월요일, 근무일로 나타냈으며, 황축은 시간대별 사용전력을 나타내었다. 그 결과 시간제 요금제도에 따른 수용가에 BESS설치에 첨두부하의 삭감을 가져왔다. 그림4은 BESS설치시와 미설치시일 때 결과를 나타냈다.



(가) 경공업 수용가



(나) 상업용 수용가

그림 4. BESS 적용시 수용가 부하곡선

위의 결과 외에 전지전력저장시스템은 분석과정에서 정량적 분석(quantitative analysis)과 질적 분석 방법(qualitative analysis)이 사용되는데 질적 분석 방법은 BESS 시스템에 대해 관리자의 판단력, 직관 또는 과거 경험 같은 주관적 요소에 의존하므로 과학이 아닌 기술적 측면에서 중요하다. 본 논문에서는 전지나 컨버터, 주변기기의 가격에 대해서 논하지 않았으므로 차후 연구되어야 할 부분이다.

3. 결 론

사례연구에서 보는바와같이 BESS의 충,방전(Charging/Discharging)은 부하율이 낮은 심야시간대의 전력을 첨두부하시간에 환원하므로서 전기요금의 절약이라는 이익을 가져다 준다. 본 연구에서는 시간제 요금제도를 채택한 수용가에 BESS를 설치함에 있어 최적인전을 위해 다단계동적계획법 알고리즘을 이용하였다. 향후 연구로 경제성을 고려한 적정용량 선정에 비주얼(visual)한 소프트웨어 구현에 관한 연구를 할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] MAX D. ANDERSON, "Battery Energy Storage Technologies", Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 3, Mar. 1993
- [2] Tsung-Ying Lee, et. al., "Optimal Capacity of the Battery Energy Storage System in a Power System", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 8, No. 4, Dec. 1993
- [3] D.K. Maly, et. al., "Optimal Battery Energy System Charging Scheduling with Dynamic Programming", IEE Proceedings- Volume: 142 Issue: 6, Nov. 1995 Page(s): 453-458
- [4] 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
- [5] THOMAS E. BECHERT, et. al., "Area Automatic Generation Control by Multi-Pass Dynamic Programming", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-96, no. 5, pp. 1460~1469, Sep/Oct. 1977
- [6] Jin-Shyr Yang et. al., "Short term Hydro Coordination using Multi-Pass Dynamic Programming IEEE Trans. PS, Vol. 4, No. 3, Aug. 1989
- [7] Deh-chang Wei, et. al., "Air conditioner Direct Load Control by Multi-Pass Dynamic Programming", IEEE Trans. PS, Vol. 10, No. 1, Feb. 1995
- [8] http://www.kepco.co.kr/cyber/cyber3_4.html
- [9] 이상철 외, 계약종별·산업별 부하곡선 평가자료집III, 한국전력공사, 1999년 12월