

도시철도 시스템 전기요금 절감을 위한 혼합정수계획법 기반 ESS(에너지저장장치) 스케줄링 기법

Mixed Integer Programming (MIP)-based Energy Storage System Scheduling Method for Reducing the Electricity Purchasing Cost in an Urban Railroad System

고 락 경* · 공 성 배* · 주 성 관†
(Rakkyung Ko · Seongbae Kong · Sung-Kwan Joo)

Abstract - Increasing peak load is one of the major concerns about operation of urban railroad systems. Since ESSs (Energy Storage Systems) have a great potential for shaving the peak load, there has been a growing interest in the use of ESS for peak load reduction. Also, ESS can be optimally scheduled to minimize the electricity purchasing cost under a given ToU (Time-of-Use) tariff by taking advantage of electricity price difference between peak and off-peak time. This paper presents a Mixed Integer Programming (MIP)-based ESS scheduling method to minimize the electricity purchasing cost under a ToU tariff for an urban railroad system.

Key Words : Urban railroad system, Energy storage system, Peak shaving, ESS scheduling

1. 서 론

도시철도는 직류 전기 철도를 사용하는 시스템으로써, 역사와 열차 모두 전기를 사용하는 대용량 부하이다. 최근 온실가스 배출에 대한 규제 증가와 교통 체증 등의 문제로 인하여 도시철도 사용자의 수는 증가하고 있으며 이에 따라 도시철도의 전력 사용량과 피크전력 역시 증가하고 있다. 이와 더불어 전기요금 인상이 계속되면서 도시철도 시스템의 전기요금에 대한 부담이 증가하고 있다.

도시철도 시스템은 산업용 전기요금을 부과 받고 있으며, 산업용 전기요금은 피크전력을 기반으로 산정되는 기본요금과 전력사용량을 기준으로 산정되는 전력량 요금으로 나뉜다. 사용자의 편의를 위하여 전기 사용량을 임의로 줄일 수 없는 도시철도의 특징에 따라 요금 절감의 관심은 주로 피크전력 감소에 집중되고 있으며 이에 따라 에너지 저장장치 (Energy Storage System, ESS)에 대한 관심이 증가하고 있다.

참고문헌[1]에서는 일간 피크전력을 목적함수로 하여 이를 선형계획법에 기반을 두어 최소화 하는 방법을 통해 피크전력 저감을 수행하였으며, 선행연구[2]에서는 피크전력 저감 시 기본요금 산정 특징을 반영하는 방안에 관한 기초 이론이 제시되었다. 참고문헌[3]에서는 에너지 저장장치의 일간 총전비용을 목적함수로

설정하여 총전비용을 최소화 하며 피크전력을 제약식에 반영하여 피크저감을 수행하는 방법을 제안하였다. 선행연구 [4]에서는 에너지저장장치의 방전에 따른 수명감소를 패널티 향으로 목적함수에 반영하고, 수전전력 제약설정에 기본요금 특성을 반영하는 방법을 제시하였다. 참고문헌[5]에서는 ESS의 충·방전에 따른 수명감소와 사용연한을 고려하여 스케줄링을 수행하고, 이 결과에 따라 계통 내 최적 ESS용량을 산정을 수행하였다. 선행연구[6]에서는 수명을 고려한 ESS 및 디젤 발전기, 연료 전지 등을 포함한 계통 연계형 마이크로 그리드의 모델링 및 스케줄링 방안이 제시되어있다. 하지만 참고문헌[1]과 선행연구[2]에서는 전기요금을 충분히 고려하지 않고 피크전력 자체를 목적함수로 삼았으며, 참고문헌[3]은 전기요금을 고려하고 피크전력 저감을 수행하였으나, 저감량 산정 시 기본요금의 특징을 반영하지 못하였다. 따라서 본 논문에서는 선행연구[2, 4, 6]를 보완하여 도시철도 시스템을 수학적으로 모델링하고, 각 기기의 제약조건과 기본요금 계산 특징을 반영한 최대수전전력 제약조건을 만족시킴과 일간 전력량 요금 및 에너지 저장장치의 수명감소를 최소화시키는 ESS 스케줄링 방안을 제시한다. 스케줄링 기법 모의에서는 제안한 방법을 통하여 가상의 지하철 변전소에 대한 연간 요금절감 효과 및 피크 억제효과와 ESS의 수명감소를 분석하였다.

2. 도시철도 시스템 전기요금 절감을 위한 혼합정수계획법 기반 ESS 충/방전 스케줄링 기법

전기요금 절감을 위한 혼합정수계획법 기반 ESS 충/방전 스케줄링 기법을 구성하기 위해 ESS를 수학적으로 모델링 한다. 하루를 T개의 시간 프레임으로 설정한 후 시간 $t \in \{1, \dots, T\}$ 에 ESS에

† Corresponding Author : School of Electrical Engineering,
Korea University, Korea

E-mail : skjoo@korea.ac.kr

* School of Electrical Engineering, Korea University, Korea

Received : May 21, 2015; Accepted : June 25, 2015

출입한 에너지를 P_t 로 나타낸다. P_t 는 충전량과 방전량을 구분하기 위하여 다시 시간 t 에서의 충전량을 나타내는 $P_{chg,t}$ 와 방전량을 나타내는 $P_{dchr,t}$ 로 분리된다. 두 변수는 모두 양수이며 세 변수의 관계는 식(1) 같다.

$$P_t = P_{chg,t} - P_{dchr,t} \quad (1)$$

P_t 는 ESS의 전력변환장치(Power Conversion System, PCS) 성능에 의하여 제한된다. 최대 충전량을 P_{M+} , 최대 방전량을 P_{M-} 로 나타낸다.

ESS에 남아있는 에너지 잔량은 SoC(State of Charge)로 나타내며 식(2)와 같이 계산된다.

$$SoC_t = SoC_{t-1} + \frac{P_t}{Cap_{ess}} \Delta t \quad (2)$$

여기서 Cap_{ess} 는 ESS의 최대 에너지 저장량을, Δt 는 시간프레임의 크기를 나타낸다. SoC는 ESS운전 중 일정 범위 내에 존재하여야 하며, 최소 SoC를 SoC_{min} , 최대 SoC를 SoC_{max} 로 나타낸다.

본 논문에서 제안하는 ESS 스케줄링 기법은 도시철도 시스템의 전기요금 절감 및 ESS의 수명감소 최소화를 목적으로 한다. 최적화 기법을 이용한 일간 ESS 스케줄링을 수행하기 위해서는 우선 목적함수를 설정해야 하며, 다음과 같이 목적함수를 설정한다.

$$\min Cost = \sum_{t=1}^T c_t P_{buy,t} + c_{discharge} u_t \quad (3)$$

$Cost$ 는 하루의 전체 운영요금을 나타내며, 각 시간의 전력량 요금과 ESS의 충/방전 상태변화에 따른 ESS의 수명감소를 나타내는 방전비용의 합으로 나타내어진다. c_t 는 전력량 요금 단가, $P_{buy,t}$ 는 전력 구매량을 나타낸다. ESS는 정해진 수명이 있으며 이에 따라 방전에 따른 방전비용을 산정해야 한다. 본 논문에서는 수명비용을 $c_{discharge}$ 로 표현하며 ESS의 배터리 교체비용을 사이클 수명으로 나누어 충/방전 상태변화에 따른 방전비용을 선정한다. u_t 는 ESS의 충/방전 상태 변화를 나타내는 이진변수이다.

$P_{buy,t}$ 는 전력량 요금 계산을 위해 필요한 전력 구매량이다. 이는 각 시간의 수요 $load_t$ 와 ESS의 충/방전량 P_t 로 나타낼 수 있으며 식(4)와 같은 관계를 가진다. PCS는 충/방전 수행 시 1보다 작거나 같은 효율을 가지며, 충전 시와 방전 시의 효율을 따로 구분하지 않고 round-trip 효율 η 로 나타낸다.

$$P_{buy,t} = load_t + P_{chr,t}/\eta - \eta P_{dchr,t} \quad (4)$$

상기한 바와 같이 SoC는 일정 범위 내에서 유지되어야 하며, 이는 식(5)와 같은 제약조건으로 표현된다.

$$SoC_{min} \leq SoC_t \leq SoC_{max} \quad (5)$$

PCS에 의한 충/방전량 제약은 식(6), (7)와 같이 나타낼 수 있다. y_t 는 ESS의 충전상태를 관찰하기 위한 이진변수로, 시간 t 에서 ESS가 충전을 수행하면 1, 그렇지 않을 경우 0을 가진다. 충전도 방전도 하지 않는 경우는 방전상태의 특수한 경우로 생각할 수 있기 때문에 [4] 충전상태만을 관찰하여 충/방전 상태변화를 감지한다.

$$P_{chr,t} \leq y_t P_{M+} \quad (6)$$

$$P_{dchr,t} \leq P_{M-} \quad (7)$$

피크전력 저감을 위하여 전력 구매량은 특정 값보다 작도록 유지되어야 하며, 이 값을 $P_{Load}^{MonthlyPeak}$ 로 정의한다. 이 값은 기본요금 산정절차를 반영해야하며 그림 1과 같은 산정절차를 통하여 스케줄링 시행 전에 결정한다.

$$P_{buy,t} \leq P_{Load}^{MonthlyPeak} \quad (8)$$

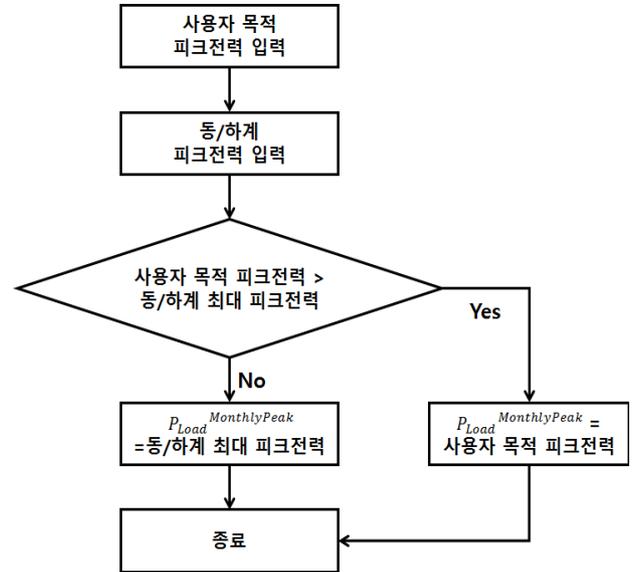


그림 1 $P_{Load}^{MonthlyPeak}$ 산정 절차

Fig. 1 Procedure to calculate $P_{Load}^{MonthlyPeak}$

기본요금은 당월을 포함한 직전 12개월 중 12~2월(동계), 7~9월(하계)의 피크전력의 최댓값과 당월의 피크전력 값을 비교하여 더 큰 값을 기준으로 요금을 부과한다. 이러한 특징을 반영하여 스케줄링 수행일의 피크전력 값을 기반으로 사용자가 설정한 사용자 목적 피크전력 값과 동/하계 최대 피크전력 값을 비교하여 동/하계 최대 피크전력 값이 당월의 목표 피크전력 값보다 크다면 $P_{Load}^{MonthlyPeak}$ 를 동/하계 피크수준으로 유지시킨다. 만약 동/하계 피크전력이 당월의 피크전력보다 높을 경우 당월의 피크전력 값은 기본요금 산정에 반영되지 않으므로 충/방전을 수행하지 않도록 하여 ESS의 수명을 소모하지 않는다. 사용할 피크전력 값이 결정된 경우 이 값과 제약식 (4)-(8)을 이용하여 목적함수 (3)를

최소화 시키는 24시간 단위 ESS 스케줄링을 수행한다.

3. 스케줄링 기법 모의 및 결과분석

본 절에서는 2절에서 제시된 스케줄링 기법을 남광주역 지하철 변전소 데이터를 기반으로 변형된 부하데이터에 적용하여 일간 최적 스케줄을 도출하여 기본요금 및 전력량 요금의 변화와 ESS의 충/방전 상태변화 횟수를 추정한다. 그림 2의 데이터는 가상의 여름철 지하철 변전소의 부하 데이터와 시간에 따른 전력량 요금 단가를 보이고 있다. 연간 피크부하는 4월에 발생하도록 하였으며 그 값은 1339.68kW으로 가정한다. 스케줄링 기법 모의에 사용된 ESS의 데이터는 도시철도 테스트 베드에 설치 고려중인 ESS의 데이터를 사용하였으며 이 값은 표 1에 나타나 있다. ESS의 용량은 고정되어있기 때문에 이 한계를 벗어나는 피크 전력 저감량에 대해서는 피크저감을 수행할 수 없다. 만약 전력 구매량 제약에 의하여 문제가 풀리지 않을 경우, 피크전력 저감이 가능한 수준까지 피크전력 저감량을 완화시켜 다시 스케줄링을 시행하는 방법을 사용하였다. 기본요금 산정 시 동/하계 피크전력과 당월의 피크를 반영해야하며 하계의 최대 피크부하가 동계보다 큰 값을 가지므로 7월부터 스케줄링 기법을 적용한다.

그림 3은 스케줄링 기법 적용 전 후의 전력 수요량과 구매량을 비교한 그래프이다. ESS는 요금제가 저렴한 새벽시간에 충전하여 피크전력 발생 시간에 방전하는 패턴을 보이고 있다. 지하철의 피크전력은 출근시간인 오전 7~9시 부근과 퇴근시간인 오후 7~9시 부근에 발생한다. 그림 2에서 나타난 것처럼 가상의 지

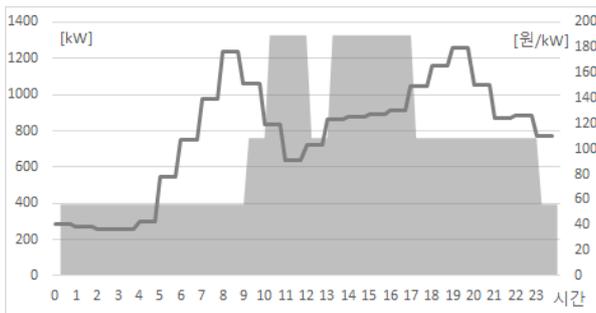


그림 2 부하데이터 및 전력량 요금 단가
Fig. 2 Load data and electricity price in won/kWh

표 1 에너지저장장치 데이터

Table 1 ESS Data

전기요금	산업용(을) 선택2
에너지저장장치 최대용량	400kWh
에너지저장장치 최대 충/방전량	200kW
충/방전 효율	90%
허용 SoC 범위	10~90%
사용자 목적 피크전력	당월 예상피크전력의 80%
방전비용	41983.2원/회

하철 변전소의 부하는 전력량요금이 최대가 되는 시간에 발생하지 않으며 경부하 혹은 중간부하시간대에 발생하는 특징을 보인다. 이는 도시철도 시스템의 피크전력 저감을 위한 방전이 전력량 요금 감소 효과를 유발할 수 없음을 뜻한다.

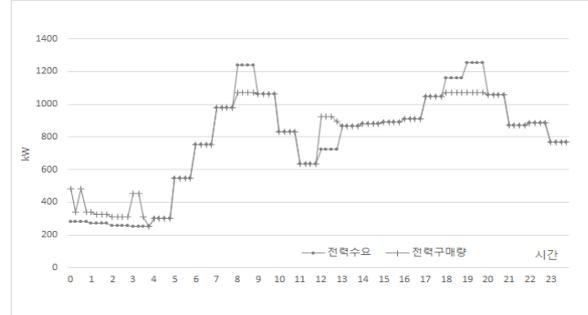


그림 3 스케줄링 기법 적용 전 후 전력 구매량 비교
Fig. 3 Comparison of electricity purchase quantity between before and after scheduling method application

표 2는 스케줄링 기법 적용 전/후의 각 월의 피크전력 값을 비교하고 있다. ESS의 방전비용을 산정하였기 때문에 피크전력 저감을 위한 방전이 아닐 경우, ESS의 방전비용이 전력량 요금 단가차이에 의한 전력량 요금 절감량보다 크다면 충전 및 방전을 수행하지 않을 것으로 예상된다. 1월과 2월의 경우 알고리즘 적용 전 피크전력이 하계 최대 피크전력 값인 1175.9kW에 미치지 못하므로 $P_{Load}^{MonthlyPeak}$ 산정 절차에 따라 이 기간에는 피크저감을 위한 방전은 일어나지 않으며, 전력량 요금 단가차이를 이용하기 위한 방전만이 존재할 것이다. 표 3은 알고리즘 적용 전후의 전력량요금의 차이를 나타낸다. 표 3에서 1월과 2월의 전력량 요금변화는 0이며 이는 ESS의 최대 용량만큼 충/방전을 시행하여 경부하 시간대와 최대부하 시간대의 전력량요금 차이로 얻을 수 있는 요금 절감량(40,600원)이 ESS의 방전비용보다 낮기 때문이다.

표 4는 1년 동안의 요금별 절감효과와 전체 요금 절감효과를 나타낸다. ESS의 방전비용을 산정하여 전력량요금 단가차이를 이

표 2 스케줄링 기법 적용 전/후의 월별 피크전력 비교
Table 2 Comparison of peak load between before and after scheduling method application (unit: kW)

월	적용 전 (kW)	적용 후 (kW)	월	적용 전 (kW)	적용 후 (kW)
7월	1190.4	1071.3	1월	1071.8	1071.8
8월	1306.5	1175.9	2월	1158.2	1158.2
9월	1266.7	1175.9	3월	1243.6	1175.9
10월	1178.4	1169.4	4월	1339.6	1205.7
11월	1267.2	1175.9	5월	1220.1	1175.9
12월	1262.4	1175.9	6월	1198.0	1175.9

표 3 스케줄링 기법 적용 후 전력량 요금 변화

Table 3 Change of energy charge after scheduling method application

월	전력량 요금 변화 (원)	월	전력량 요금 변화 (원)	월	전력량 요금 변화 (원)
1월	0	5월	36,096	9월	26,296
2월	0	6월	126,764	10월	44,316
3월	103,424	7월	165,456	11월	123,804
4월	1,456	8월	400,156	12월	164,584

용한 충/방전을 수행하지 않음에 따라 피크전력 저감을 위한 방전을 수행하는 날에 한하여 피크전력을 저감하고 남은 여유분을 최대부하시간대에 방전하여 전력량 요금절감효과가 나타났다. 표 5는 월간 Cycle 수와 이에 따른 총 방전비용을 나타낸다. 이때, Cycle은 충/방전 상태변화가 각 한 번씩 일어나는 것을 뜻한다. 스케줄링 기법 모의에서 연간 총 72 Cycle 방전을 수행하였으며 ESS의 방전비용이 전력량 요금단가 차이를 통한 이득보다 크기 때문에 충/방전은 피크전력 저감이 필요한 날에 한해 1번 나타남을 관찰할 수 있다. 표 5의 총 방전비용이 표 4의 전체요금 변화보다 적기 때문에 전체 운영요금 절감효과가 있음을 확인할 수 있다. ESS의 방전비용의 경우 ESS의 사용 연한동안 최대 충/방전 상태 변화 횟수를 넘길 정도로 방전하지 않을 것으로 예상된다면, 방전비용을 낮추어 더 자주 방전을 수행할 수 있도록 한다. 배터리 제작 기술의 발전에 따라 ESS의 수명이 증가하고 방전비용이 충분히 낮아질 경우 전력량 요금 단가 차이를 이용한 전력량 요금 절감 효과가 ESS의 방전비용보다 커질 것으로 예상되며, 이 경우 도시철도 시스템의 운영비용 역시 더욱 감소할 것으로 예상된다.

표 4 스케줄링 기법 적용 전 후 전기 요금 비교

Table 4 Comparison of electricity cost between before and after scheduling method application

	전력량요금 (천원)	기본요금 (천원)	계 (천원)
적용 전	541,111	115,096	656,207
적용 후	539,918	103,587	643,504
차	1,193	11,509	12,702

표 5 월별 Cycle 및 총 방전비용

Table 5 Monthly Cycles and total discharge cost

월	1월	2월	3월	4월	Cycle 총합
Cycle	0	0	12	4	72
월	5월	6월	7월	8월	
Cycle	4	4	8	16	총 방전비용
월	9월	10월	11월	12월	
Cycle	4	4	8	8	6,045

4. 결 론

본 논문에서는 에너지 저장장치의 방전비용과 일간 전력 구매비용을 목적함수에 반영하고 ESS 동작에 필요한 제약과 기본요금 산정 방식의 특징을 반영한 최대 수전전력 제약을 반영한 혼합정수계획법 기반 스케줄링 문제를 구성하여 이를 통해 피크전력을 저감하고 일간 운영요금을 최소화하는 ESS 충/방전 스케줄링 기법을 제시하였다. 스케줄링 기법 모의에서는 변형된 지하철 변전소 부하데이터에 대하여 스케줄링 기법을 적용하여 적용 전·후의 효과를 비교하였다. 제안된 스케줄링 기법을 통하여 매월의 피크전력을 기본요금 산출에 사용되는 동·하계 최대 피크전력 수준으로 유지하여 불필요한 ESS의 수명감소를 방지할 수 있을 것으로 예상되며 제시된 스케줄링 기법의 결과에 따라 기본요금 및 일간 전력량 요금을 최소화 할 수 있을 것으로 사료된다. 제시된 스케줄링 기법은 ESS의 방전비용에 크게 의존하므로 기술 발전에 따라 ESS의 방전비용이 낮아질수록 요금 절감효과가 개선될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(13RTRP-B067916-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Jae Yong Lee, Seong Gon Choi, "Linear programming based hourly peak load shaving method at home area", Advanced Communication Technology(ICACTION), 2014 16th International Conference on(16-19 Feb, 2014), pp.310-313, Feb. 2014.
- [2] Rakkjung Ko, Hyung-Chul Jo, Minseok Jang, Sung-Kwan Joo, "ESS scheduling for peak shaving of urban railway system", KIEE Summer Conference 2014, pp.1696-1697, Jul. 2014.
- [3] Kyeong-Hee Cho, Seul-Ki Kim, Jong-Yul Kim, Eung-Sang Kim, "Optimal Sizing of Battery Storage System for Peak Shaving of High-Speed Railway Substation", KIEE Power Engineering Society Fall Conference 2013, pp.32-34, Oct. 2013.
- [4] Rakkjung Ko, Hyung-Chul Jo, Kim YoungWook, Jung Taesung, Lee DongYeon, Kim Hyeonjin, "ESS Scheduling Algorithm for Urban Railway Peak Energy Price", KICS Winter Conference 2015, pp.677-678, Jul. 2015.
- [5] "Optimal Sizing of Energy Storage for Regenerative Braking in Electric Railway Systems", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume. 30 Issue. 3, pp.1492-1500, Aug. 2014.

- [6] Rakkyung Ko, Seongbae Kong, Hyeonjin Kim, Dosung Kim, Taesung Jung, DongYeon Lee, Sung-Kwan Joo, "A preliminary study on the scheduling problem for energy storage systems and distributed resources in a microgrid", KIEE Power Economic·Energy Storage System Research Association Conference 2015, pp. 185~186, May, 2015

저 자 소 개



고 락 경(Rakkyung Ko)

2014년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 현재, 고려대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정.



공 성 배(Seongbae Kong)

2009년 단국대학교 전기공학과 졸업. 2011년 고려대학교 전기전자전파공학과 졸업(공학석사). 현재, 고려대학교 전기전자전파공학부 박사과정.



주 성 관(Sung-Kwan Joo)

1995년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1999년 University of Washington 전기공학과 졸업(공학석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2004~2006년, North Dakota State University 조교수. 2006년~현재, 고려대학교 전기전자공학부 교수.