

도시철도 부하특성을 고려한 ESS의 최적 운영방안 연구

Study on the Optimal Operation of ESS Considering Urban Railway Load Characteristic

허재행* · 신승권** · 박종영† · 김형익***

(Jae-Haeng Heo · Seungkwon Shin · Jong-young Park · Hyeongig Kim)

Abstract - This paper proposes the optimal operation of ESS (Energy Storage System) in the substation of urban railway in an economical point of view. Since the load patterns of urban railway have different characteristics with the general power demand pattern, the characteristics motivate us to develop the optimal operation algorithm for ESS under Korean electricity billing system. We also introduce two different ESS operation strategies for peak load shaving and electricity consumption charge minimization respectively, and formulate each scheme. Historical data from Namgwangju substation are used for economical comparison of the strategies. The results show that the proposed algorithm is the most cost-effective ESS operation scheme among the strategies and reduces around 5 percent of electric charges compared to the charge without ESS operation.

Key Words : ESS, Urban railway, ESS optimal operation, Load characteristic

1. 서론

에너지의 절약과 효율적인 사용을 통한 에너지 비용 절감은 에너지 소비자들의 끊임없는 관심사이며, 이를 위한 다양한 방법들이 제안, 활용되고 있다. 특히 서울도시철도공사의 2014년 납부 전기요금은 총 약 682억 원으로[1], 에너지 비용을 절감하기 위해 첨두부하 감소, 환기설비 운용 개선, 역사 냉방설비 운용 개선 등 다양한 노력을 하고 있다[2].

ESS는 전기소비자의 전력사용에 대한 효용을 감소하지 않고 수요 이전을 할 수 있어, 에너지의 효율적인 사용을 위해 활용되기 적합하다. 더불어 최근 ESS의 대형화와 설치비용의 하향화로 인해 관련 연구와 활용이 활발히 진행되고 있다[3-9]. 다양한 연구에서 전기요금 중 기본요금을 절감하는 형태인 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영 방안을 제안[6-9]하고, 이와 같은 운영 전략에 적합한 최적 ESS 용량 도출[6, 7], 경제성 평가[7-9] 등의 연구를 진행하였다.

한국전력공사는 전력판매를 담당하는 국내 유일의 기관으로써 소비자에게 다양한 형태의 요금제를 갖는 전력을 소비자에게 제공한다. 요금은 크게 두 가지로 구성되어 있는데 그 중 하나는

기본요금이며 나머지는 전력량요금이다. 기본요금은 일정기간동안의 최대전력용량에 대한 요금이며 전력량요금은 사용자가 사용한 전력량에 비례하여 책정되는 요금이다. 일반적으로 전력사용량이 많은 구간에서는 전력량요금 효율이 높게, 전력사용량이 적은 구간에서는 전력량요금 효율이 낮게 책정되어 있다. 이로 인해 일반 전력수요의 경우 첨두부하 절감용 ESS 활용을 통해서 기본요금과 전력량요금을 동시에 절감시킬 수 있다. 하지만 도시철도부하인 경우 ESS를 첨두부하 절감용으로만 사용한다면 비용을 더 줄일 수 있는 기회를 잃게 된다. 왜냐하면 도시철도부하의 경우 수요패턴이 전력수요의 일반적인 패턴과는 달라 첨두부하 발생 시점이 다르기 때문이다. 일반적으로 도시철도부하는 출퇴근 시간에 수요의 피크가 발생하며 일반 전력부하는 일과시간에 피크가 발생한다. 이는 도시철도 변전소에 설치된 첨두부하 절감용 ESS의 운용이 전력량요금의 증가를 야기할 수 있다. 이와 같은 문제의 해결을 위해 도시철도의 부하특성이 반영된 ESS 최적 운영 방안에 대한 연구가 필요하다.

본 논문은 ESS의 최적용량이나 최적위치등을 결정하는 계획 단계에서의 연구가 아니라, 이미 최적용량과 최적위치에 따라서 설치가 완료된 ESS에 대한 운영 단계에서의 연구이며, 도시철도 부하특성과 일반 전력부하의 특성을 비교하고 전기요금의 구성 및 계산방법을 고려하여 전체 전기요금을 절감할 수 있는 최적 ESS 운영 방안을 제안, 정식화하였다.

제안한 방법이 기존의 방법과 비교하여 비용 효율적임을 보이기 위해서 첨두부하 절감을 위한 ESS 동작방법, 전력량요금 절감을 위한 ESS 동작방법, 전기요금 최소화를 위한 ESS 동작방법을 정식화하고 모의 결과를 제안한 방법과 비교하였다.

제안한 방법을 2014년 7월부터 2015년 4월의 남광주 변전소의 실제부하데이터를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였고, 일 년

† Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail : jypark@krrri.re.kr

* Power System Research team, Master's space Co. Ltd., Korea

** Korea Railroad Research Institute, Korea

*** Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Korea

Received : June 30, 2015; Accepted : September 30, 2015

간 총 납부하는 전기요금을 항목별로 도출, 비교하였다.

2. 산업용 전기요금의 구성

국내의 경우 한국전력공사가 전기소비자의 특성에 따라 다양한 유형의 전기요금을 제공, 부과한다. 전기요금의 특성별 구분은, 전기사용 용도에 따라 주택용, 일반용, 교육용, 산업용, 농사용, 가로등, 예비, 임시, 총 8가지로 구분한다. 구분된 산업용 전기소비자는 계약전력 크기에 따라 갑, 을로, 표준전압의 크기에 따라 A, B, C로 재분류된다. 재분류된 전기 소비자는 다시 선택 I, II 요금 중 하나로 분류되어 전기요금을 납부한다.

전기요금의 구성은 기본요금과 전력량요금으로 이루어진다. 기본요금은 요금적용전력에 대해 kW당 적용되며, 전력량요금은 사용한 전력에 대해 kWh당 적용된다.

$$\begin{aligned} \text{전기요금} &= \text{기본요금} + \text{전력량요금} \quad (1) \\ &= (\text{요금적용전력} [kW] \times \text{기본요금요금} [\text{원}/kW]) \\ &\quad + (\text{사용전력} [kWh] \times \text{전력량요금요금} [\text{원}/kWh]) \end{aligned}$$

이때, 기본요금 계산을 위한 요금적용전력은 검침 당월을 포함한 직전 12개월 중 12월분, 1월분, 2월분, 7월분, 8월분, 9월분 및 당월분의 최대수요전력 중 가장 큰 최대수요 전력으로 결정되고, 전력량요금은 계절별(여름, 봄·가을, 겨울), 부하시간대별(경부하, 중간부하, 최대부하시간대) 9단계의 단위요금이 적용된다. 기본요금의 kW당 요금 수준과 전력량요금의 시간대 별 요금 수준은 선택한 요금제에 따라 다르게 적용된다.

도시철도공사는 산업용 갑, 고압A 선택 II 요금을 선택하여 매월 전기요금을 납부하고 있다. 기본요금은 요금적용전력에 대해 kW당 7,470원이 적용되며, 전력량요금의 단위요금은 표 1과 같다.

표 1 도시철도공사 적용 전력량요금

Table 1 Electricity rates for Metropolitan Rapid Transit Corp.

(단위 : 원/kWh)

구 분	여름철	봄·가을철	겨울철
경부하시간대	55.6	55.6	63.0
중간부하시간대	81.4	60.4	79.9
최대부하시간대	114.9	79.6	109.3

3. 도시철도 부하특성 분석

전력시장에서는 거래시간별로 일반발전기에 대해 SMP를 일괄 적용하여 생산한 전력에 대하여 보상한다. 이 때, SMP의 결정은 전력생산에 참여한 일반발전기 중 가장 높은 변동비를 갖는 발전기의 변동비로 결정된다. 따라서 SMP와 전력수요패턴은 매우 밀접한 상관관계를 갖는다. 2014년 일 년 중 평일(월-금)의 시간별 국내 SMP와 국내 예측수요의 상관계수를 하루 단위로 계산하여

평균한 결과값은 0.9246으로 전력가격과 전력수요패턴은 매우 높은 양의 상관관계를 갖는 것을 확인하였다.

참여하는 일반발전기의 현황에 따라 시간별로 변화하는 발전측의 전력시장가격과는 달리, 판매 측의 일반 산업용 전기요금제의 전력가격은 계시별 요금제(이하 TOU, Time of Use)가 적용되어 시간대별로 고정된 요금이 적용된다. 일반적으로 전력사용량이 많은 계절, 시간대에서는 전력가격이 높고 전력사용량이 적은 계절, 시간대에서는 전력가격이 낮게 책정되어 있다

그림 1은 2015년 1월의 평일(월-금) 20일의 시간대별 SMP평균, 일반전력수요평균, 도시철도공사에 부과되는 TOU(표 1 참조)를 도시한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 SMP, 전력수요패턴, 도시철도공사 부과 TOU가 유사한 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

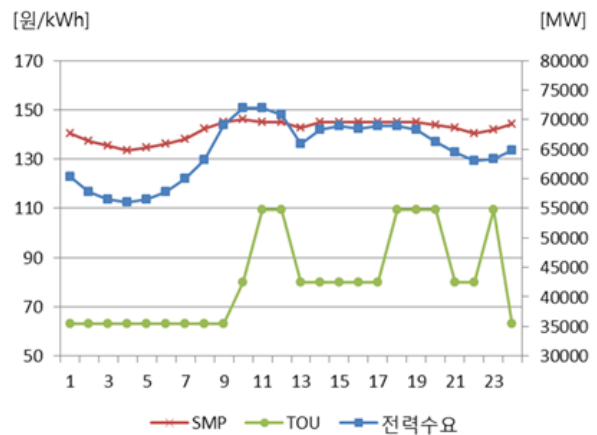


그림 1 전력가격(SMP, TOU)과 전력수요(2015년 1월)

Fig. 1 Daily electricity prices(SMP, TOU) and power demand (Jan. 2015)

높은 침투부하는 전력시스템 운영자에게 높은 수준의 설비용량을 요구하여 비경제적 운영을 야기한다. 시스템운영자는 이를 해결하기 위해 심야전력요금제도, ESS를 이용한 부하이전, 다양한 수요반응(DR, Demand Response) 프로그램 등을 이용하여 침투부하를 줄이기 위한 다양한 노력을 하고 있다. 소비자에게 적용되는 TOU는 소비자 스스로 전력소비를 줄일 수 있는 유인을 제공한다. 즉, 판매사업자는 수요가 높은 시간대에 높은 전력가격을 부과함으로써 발전비용을 보상하고 동시에 소비자의 수요를 감축시켜 경제적 이익을 얻는다.

그림 2는 도시철도부하(2015년 1월 12일, 남광주 변전소)와 그 부하에 적용되는 TOU를 도시한 그래프이다. TOU와 유사한 형태를 띠던 국내 전력수요와는 달리 도시철도수요의 경우 침투부하가 출퇴근 시간대(7-9시, 18-20시)에 나타나 일반적으로 업무시간대(10-12시, 13-17시)에 피크가 나타나는 일반 전력수요와는 차이점을 보인다.

이와 같은 일반 전력부하와 도시철도부하의 특성차이는 소비자의 에너지 감축 전략에 영향을 줄 수 있다. 수요의 피크와 TOU 피크가 같은 시간에 일어나는 전력수요의 경우, 높은 가격

이 형성된 시간에 전력사용량을 감축함에 따라 첨두부하 감소와 전력량요금 절감 효과를 동시에 누릴 수 있는 반면에, 도시철도 부하의 경우 첨두부하의 감소와 전력량요금 절감 극대화 시점이 차이가 날 수 있다. 이와 같이 첨두부하 발생 시점과 전력가격 피크 시점이 다를 경우, 기존의 첨두부하를 절감하던 에너지 감축 전략이 비용적으로 효율적이지 않을 수 있다. 그러므로 에너지 사용량 감축 전략은 각 수요의 특성을 고려하여 구축되어야 한다.

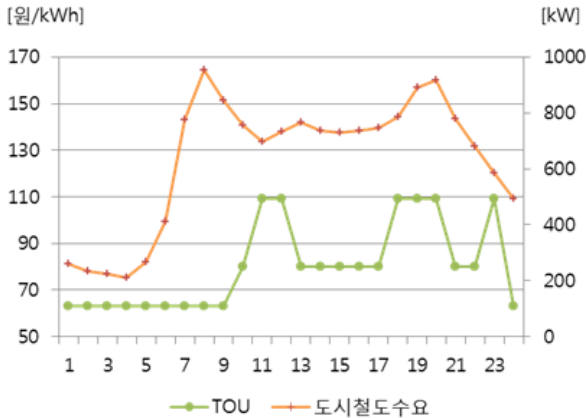


그림 2 전력가격(TOU)과 도시철도수요(2015년 1월)
 Fig. 2 Daily electricity price(TOU) and urban railway load curve (Jan. 2015)

4. 에너지 비용 경감 방안

수식 (1)에서 확인한 것처럼 전기요금은 기본요금과 전력량요금으로 구성되어 있다. 전기소비자들은 전기요금의 구성과 계산 방법을 고려하여 다양한 에너지 비용 경감 전략을 마련할 수 있다.

기본요금은 요금적용전력에 기본요금요율을 곱하여 계산하며, 이 때 요금적용전력은 직전 12개월 중 첨두부하 발생이 유력한 달과 당월 중 최대수요 전력으로 결정된다. 즉, 첨두부하의 감축을 통해 기본요금을 절감한다.

전력량요금의 경우, 사용전력에 해당 시간대의 TOU를 곱한 금액이 부과되며, 전력사용량을 감축함으로써 납부 요금을 절감할 수 있다. 이 때, 시간대별 전력가격 수준이 다름을 이용, 더 높은 전력가격이 부과되는 시간대에 전력사용량을 감축하여 감축량 대비 높은 경제적 이익을 얻을 수 있다.

일반 전력부하와 TOU는 그림 1과 같이 피크시점이 유사하다. 따라서 첨두부하에 대한 에너지감축 전략만으로 충분히 기본요금과 전력량요금을 동시에 감축할 수 있다.

하지만 철도부하인 경우 그림 2와 같이 TOU와 도시철도부하의 Peak 시점이 다르다. 따라서 단순히 첨두부하에 대한 에너지 감축만으로 TOU가 높은 시점에 전력량요금을 낮출 수 있는 기회를 놓칠 수 있다. 따라서 그림의 노란색 영역에서 에너지 감축

을 실시하여 기본요금뿐만 아니라 전력량요금도 줄일 수 있게 된다. 그림 3의 A영역은 기본요금 절감을 위한 에너지 절감 영역이라면 B영역은 전력량요금 절감을 위한 에너지 절감 영역, C영역은 전력량요금과 기본요금을 동시에 절감하기 위한 에너지 절감 영역이다.

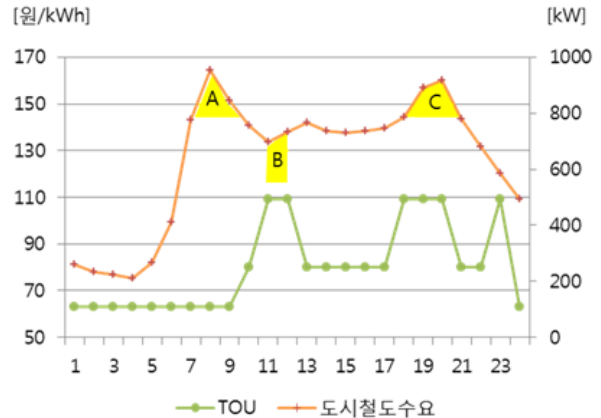


그림 3 도시철도 부하의 전기요금 감축을 위한 방안 예시
 Fig. 3 Examples of strategies for reducing electric charges

전기소비자의 입장에서 에너지 비용을 경감하기 위한 방법으로는 수요반응참여 및 ESS의 운용이 대표적이다. 수요반응은 계약을 혹은 입찰을 통해 참여하며, 수요 감축 신호에 따라 감축 필요시점에 계약량 만큼의 수요를 감축하고 그 대가를 보상받는다. 프로그램에 따라 감축 미이행시 페널티가 적용되는 경우도 있다. ESS 운용을 통한 에너지 비용 경감은 운영자의 전략에 따라 수요를 이전하여 경제적인 이익을 얻는 방법이다.

수요반응을 통한 에너지 비용 경감과 ESS를 이용한 전략은 몇 가지 차이점이 있다. 우선 수요반응은 에너지 비용의 감소보다는 시스템의 안정적인 운영에 그 목적이 있고, ESS운용의 경우 ESS 소유자의 의사에 따라 시스템의 안정적인 운영뿐만 아니라 다양한 다른 목적으로의 운용이 가능하다. 더불어 운용 전략에 자율성이 있는 ESS와는 달리 수요반응의 경우 소비자는 신호에 따라 반응하므로 자율성이 떨어진다. 또한 ESS의 운용은 전기사용량의 단순 감축이 아닌 수요이전이며, 이로 인하여 소비자의 전력사용에 대한 효용감소가 전혀 없다. 하지만, 인프라 구성이 거의 필요 없는 수요반응과는 달리, ESS는 높은 설치 및 운영비용의 발생한다.

본 논문에서는 수요 이전을 이용하여 전기소비자의 효용감소 없이 에너지 비용을 경감할 수 있도록 ESS를 이용한 최적 전기요금 절감 방안을 제안한다.

5. 전기요금 절감을 위한 ESS의 운영방안 및 정식화

ESS의 운용은 기존수요의 수요이전을 가능하게 하고, ESS 운영자는 설치 및 운영 목적에 맞는 최적 충·방전 시점과 양을

결정하기 위해 운영 알고리즘을 구성한다.

본 논문에서는 어느 수요를 이전시킬지에 따라 세 가지 운영 알고리즘을 소개한다. 먼저 하루 중 피크부하를 오프피크부하 시간대로 이전하는 '첨두부하 절감을 위한 ESS 운영' 방법을 소개하고, 두 번째로는 전력가격이 높은 시간대의 부하를 낮은 시간대로 이전시키는 '전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영' 방법을 소개한다. 마지막으로 '전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영' 전략을 제안한다. 전기요금 측면에서는 세 가지 운영알고리즘은 각각 기본요금 최소화를 위한 ESS 운영, 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영, 총 전기요금 최소화를 위한 ESS 운영으로 구분할 수 있다.

5.1 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영

첨두부하 절감을 위한 ESS 운영은 하루 중 첨두부하를 다른 시간대로 이전하여 요금적용전력을 낮추기 위한 운영방법이다. 이는 ESS를 이용하여 요금적용전력과 기본요금요율의 곱으로 계산되는 기본요금을 낮춰 큰 경제적 이익을 얻을 수 있어 현재 도시철도 변전소에 설치된 대다수의 ESS가 본 목적을 가지고 운영되고 있다.

첨두부하 절감을 위한 ESS의 목적함수는 아래 수식 (2)와 같고, 이를 만족시키는 ESS의 총방전 시점과 양, ESS를 찾는 문제가 된다.

$$\min \sum_{m=1}^M (\rho_{base} \cdot p_m^{max}) \quad (2)$$

where

M : 전기요금 과금기간[개월]
 ρ_{base} : 기본요금요율[원/kWh]
 p_m^{max} : 변전소에서 계측한 m 번째 월의 요금적용 전력[kWh]

수식 (2)는 전기요금이 과금되는 모든 달의 기본요금(요금적용전력과 기본요금요율의 곱)의 합이 최소가 되도록 ESS를 운영하는 것을 의미한다.

ESS의 운영과 시간대별 수요예측이 하루단위로 이뤄진다고 할 경우, 목적함수 수식 (2)는 아래 수식 (3)과 같이 하루 중 첨두부하를 최소화시키는 문제로 다시 쓸 수 있다.

$$\min \sum_{n=1}^N p_n^{max} = \min \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (p_{n,t} - p_n^{mean})^2 \quad (3)$$

where

N : 시뮬레이션 기간[일]
 T : 하루 중 시간 간격[개]
 p_n^{max} : 변전소에서 계측한 n 일의 첨두부하[kWh]
 $p_{n,t}$: 변전소에서 계측한 n 일 t 번째 시점의 수요[kWh]
 p_n^{mean} : 변전소에서 계측한 n 일의 평균 수요[kWh]

이때, 변전소에서 계측한 수요와 ESS 운용 전 도시철도 수요,

ESS의 충·방전량과의 관계식 및 ESS의 충전상태(이하 SoC, State of Charge)의 점화식은 아래 수식 (4), (5)와 같다.

$$p_{n,t} = d_{n,t} + ESS_{n,t} \quad (4)$$

$$SoC_t = SoC_{t-1} + \eta \cdot \left(\frac{ESS_t \times \frac{24}{T}}{ESS^{cap}} \right) \quad (5)$$

where

$d_{n,t}$: ESS 운영 전, n 일 t 시점의 수요[kWh]
 $ESS_{n,t}$: n 일 t 시점의 ESS 총방전량[kWh]
 SoC_t : t 시점의 ESS의 충전상태[%]
 η : ESS의 총방전 효율[%]
 ESS^{cap} : ESS의 용량[kWh]

수식 (4)에서 ESS_t 가 양수이면 충전을, 음수일 경우는 방전을 의미한다.

이때의 제약조건은 아래 수식 (6)-(8)과 같다.

$$ESS^{min} \leq ESS_t \leq ESS^{max} \quad (6)$$

$$SoC^{min} \leq SoC_t \leq SoC^{max} \quad (7)$$

$$SoC_0 = SoC_n \cdot T = \frac{1}{5} (SoC^{max} - SoC^{min}) \quad (8)$$

where

ESS^{min}, ESS^{max} : ESS의 총방전 최소, 최대 제약[kWh]
 SoC^{min}, SoC^{max} : ESS의 SoC 최소, 최대 제약[%]
 SoC_0 : ESS의 초기 충전상태[%]
 n : 시뮬레이션 일 ($n = 1, 2, 3, \dots, N$)

수식 (6)은 t 시점에서 ESS가 최대로 충전 혹은 방전할 수 있는 양의 최소, 최댓값을 보여주는 제약 조건이다. 이 양은 ESS의 총방전 속도와 연관이 있으며, 음의 값을 갖는 ESS^{min} 의 크기는 t 시점에서의 방전 최대량을 나타낸다. 예를 들어 ESS의 용량이 100kW/100kWh이고 충전, 방전속도가 각각 0.5c, 1c라고 한다면 시간당 최대 충전가능량(ESS^{max})은 50kW, 시간당 최대 방전가능량(ESS^{min})은 -100kW가 된다. 수식 (7)은 어느 시점 t 에서의 SoC가 ESS의 배터리운영용량 범위 안에 있어야 한다는 제약조건이다. 마지막으로 수식 (8)은 하루단위로 운영되는 ESS의 경계조건으로 1시와 25시(명일 1시)의 SoC는 배터리운영용량 범위의 20% 수준을 유지하도록 하는 제약조건이다. 경계조건을 1시와 25시로 지정한 이유는, 일반적인 도시철도의 운영은 1시경 종료되므로 ESS의 운영도 도시철도의 운영 역시 1시를 기준으로 이루어 지는 것이 합당하다. 또한 일반적으로 경계조건으로 50% 수준을 제시하지만, 본 연구에서는 도시철도부하의 특성을 고려하여 20% 수준으로 운영할 것을 제안한다. 이는 새벽시간에는 철도부하의 부재로 상대적으로 부하수준이 낮은 반면 철도부하가 1시에도 존재하여 상대적으로 높은 부하수준을 유지하기 때문인데, 이 때 높은 경계조건으로 ESS를 운영할 경우, 1시 직전 시간대에 ESS 충전을 위해 불필요한 운영의 가능성이 있다.

5.2 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영

전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영은 하루 중 TOU가 비싼 시간대의 수요를 낮은 시간대로 이전시켜 전력량요금을 낮추기 위한 운영방법이다. 이 방법은 도시철도부하의 특성상 첨두부하 발생 시점이 최대부하시간대와 달라(그림 1) 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영의 경우 전력가격이 낮은 시간대의 수요를 가격이 높은 시간대로 이전할 가능성이 존재함을 고려, 제안하는 방법이다. 전력량요금 최소화를 위한 ESS의 목적함수는 아래 수식 (9)과 같다.

$$\min \left[\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (\rho_{n,t} \cdot p_{n,t}) \right] \quad (9)$$

where

$\rho_{n,t}$: n일, t 시점에 적용되는 전력량요금 효율[원/kWh]

이 때, 수요들의 관계식과 SoC 점화식은 각각 수식 (4), (5)와 동일하고, 제약조건은 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영의 제약조건 수식 (6)-(8)에 아래 수식 (10)를 추가한 것과 같다.

$$p_{n,t} \leq p_n^{max} \quad (10)$$

where

p_n^{max} : 변전소에서 계측한 n일의 최대 수요[kW]

이 제약조건은 ESS의 운용으로 인해 전력량요금을 낮추는 과정에서 요금적용전력의 상승으로 기본요금이 증가하는 것을 막기 위한 조건이다.

5.3 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영

제안하는 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS는 전기소비자가 납부하는 전기요금의 전체 합이 최소가 되도록 하는 운영 전략이다. 이는 도시철도 부하특성으로 인해 수요 이전을 통해 비용 이득을 얻을 수 있는 시간대인 첨두부하 시간대와 전력가격 피크 시간대의 시점이 다르다는 점에서 기인하여 제안하는 방법이다. 이 때, 첨두부하의 수요와 전력가격이 높은 시간대의 수요를 각각 수요가 낮은 시간대, 전력 가격이 낮은 시간대로 이전되 서로의 수요 이전이 각각 전력량요금과 기본요금의 증가를 야기하지 않도록 한다.

전기요금 최소화를 위한 최적 ESS의 목적함수는 아래 수식 (11)와 같다.

$$\min \left[\sum_{m=1}^M \rho_{base} \cdot p_m^{max} + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (\rho_{n,t} \cdot p_{n,t}) \right] \quad (11)$$

이때, 수요들의 관계식과 SoC 점화식은 각각 수식 (4), (5)와,

제약조건은 수식 (6)-(8)과 동일하다.

제안하는 ESS 운영 방안은 설치된 ESS의 용량 및 제약에 따라 해당 기간 중 첨두부하 절감량이 결정이 되고, 결정된 절감량에 따른 새로운 첨두부하보다 큰 수요에 대해서는 첨두부하 절감을 위한 ESS로, 그 외 시간대에 대해서는 전력량 최소화용 ESS로 운영될 것으로 예상된다. 이전되는 수요는 기본요금과 전력량요금이 증가하지 않도록 하여 기존의 첨두부하 절감용 ESS와 전력량요금 최소화용 ESS 운영 대비 더욱 비용 효율적인 결과를 나타낼 것으로 기대된다.

6. 시뮬레이션 및 경제성 비교

본 논문에서는 앞서 제시한 세 가지의 ESS 운영방안의 결과로 납부하는 전기요금 총액의 비교를 통해 각각의 경제성을 비교하였다.

시뮬레이션에 활용한 부하데이터는 남광주 변전소의 2014년 7월 21일-27일, 2015년 1월 12일-18일, 4월 13일-19일까지의 데이터를 사용하였다. 활용한 월요일부터 일요일까지의 일주일 데이터는 각각 겨울, 봄·가을, 여름데이터를 대표한다. 각 데이터는 15분 단위로 하루에 96개의 값(T)을 가지며, 4월 데이터를 가을에도 적용하여 총 4주, 2688개의 데이터를 이용하여 1년으로 확장하였다.

또한, 설치된 ESS의 데이터는 모두 일정하게 적용하여 ESS 운영 알고리즘에 대한 경제성 분석이 가능하도록 하였다. 적용된 ESS는 1MW/2MWh 용량으로 변전소에 설치되어 운영한다고 가정하였고, 이때의 총방전 효율 η 는 90%, ESS 효율을 위한 SoC 운영범위는 10-90%로 일괄 적용하였다. 충전 및 방전속도는 모두 0.5c로 적용하였다.(표 2)

요금적용전력의 결정을 위해서는 납부 해당월 기준 직전 12개월의 최대부하값이 필요하다. 본 시뮬레이션은 1년간의 최적화를 진행함에 따라 1년 중 최대수요를 각 달의 요금적용전력으로 가정하고 진행하였다.

표 2 ESS 데이터

Table 2 ESS specification

구분	값	단위	관련 파라미터
PCS용량	1,000	[kW]	ESSmin = -1,000 ESSmax = 1,000
배터리용량	2,000	[kWh]	ESScap = 2,000
SoC 최소 운영범위	10	[%]	SoCmin = 200*
SoC 최대 운영범위	90	[%]	SoCmax = 1,800
충방전효율	90	[%]	$\eta=90$
충방전속도	0.5	[c]	-

* 2000kWh × 10[%] / 100 = 200kWh.

6.1 ESS 운용 전

ESS가 설치되지 않은 남광주 변전소에서 1년간 지불할 전기 요금은 약 591백만 원이며, 각 요금별 정확한 액수는 아래 표 3과 같다.

요금적용전력은 2014년 7월 24일 오전 9시경의 최대부하 1638.8 kW가 열두 달에 적용되어 기본요금이 책정되었다.

표 3 ESS 운용 전 연간 기대 납부 전기요금

Table 3 Expected annual electric charges without ESS operation

구 분	기본요금	전력량요금	납부금액
ESS 운용 전	146,902,032	443,678,066	590,580,098

(단위 : 원)

6.2 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영 후

첨두부하 절감을 위한 ESS의 목적함수로 수식 (3)를 이용하여 ESS를 운영하며, 그 결과 매일 첨두부하를 최소화하는 방식으로 ESS를 충방전하여 수요를 이전한다.

최적운영 결과, ESS 운용 전 요금적용전력이었던 7월 24일 9시의 부하가 낮아지고, 해당 수요가 다른 시간대로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4는 7월 24일 하루의 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영 전, 후 수요와 각 시간대별 전력가격을 도시한 그림이다. 전력수요는 변전소에서 계측된 15분 간격의 전력량 [kWh]으로 나타내었다. 그림 5는 같은 날, 각 시간대별 ESS출력량과 SoC를 나타낸다. 두 그림은 하루를 도시한 것으로, 15분 간격의 데이터를 활용하여 총 96개의 타임스텝을 갖는다.

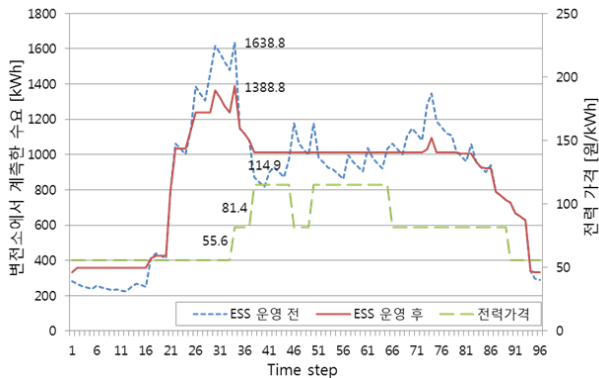


그림 4 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영에 따른 수요이전 및 시간대별 전력가격 (2014년 7월 24일)

Fig. 4 Load shift by the ESS operation for peak load shaving and electricity price (24th of July, 2014)

ESS 운용 전의 1638.8kWh이었던 피크수요는 ESS의 운용으로 인해 설치된 ESS의 15분 최대 출력량인 250kWh (1MW × 0.25h)

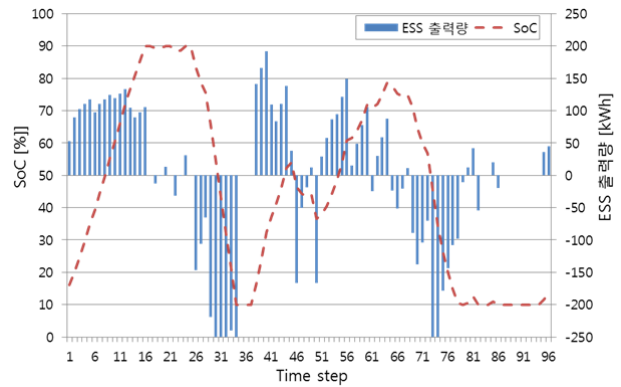


그림 5 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영 알고리즘에 따른 시간대별 ESS 출력 및 SoC (2014년 7월 24일)

Fig. 5 ESS output and SoC by the ESS operation for peak load shaving (24th of July, 2014)

만큼의 수요가 감축되어 1388.8kWh가 되었고, 이때의 수요가 새로운 요금적용전력이 되어 연간 2,241만원의 기본요금 절감 효과를 보였다.

반면, 전력가격을 전혀 고려하지 않은 ESS의 운용은 첨두부하의 수요를 전력가격이 더 높은 시간대로 이전하고, 이로 인해 전력량요금이 연간 약 36만원여의 추가 비용이 발생하였다. 이와 같은 현상은 그림 4의 37-44, 49-64 시점에 나타난다.

첨두부하 절감을 위한 ESS 운영으로 인해 납부할 연간 기대 전기요금은 아래 표 4와 같다.

표 4 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영 후 연간 기대 납부 전기요금

Table 4 Expected annual electric charges with the ESS operation for peak load shaving

구 분	기본요금	전력량요금	납부금액
첨두부하 절감을 위한 ESS	124,492,032	444,046,344	568,538,550
ESS 운용 전 대비	-22,410,000	+368,278	-22,041,722

(단위 : 원)

6.3 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영 후

전력량요금 최소화를 위한 ESS의 목적함수는 수식 (9)과 같고, 이를 이용한 ESS의 운영 결과 전력가격이 높은 시간대의 수요를 낮은 시간대로 이전하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6은 7월 24일 하루의 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영 전, 후 수요와 각 시간대별 전력가격을 도시하였고, 그림 7은 같은 날, 각 시간대별 ESS의 출력량과 SoC를 나타내었다.

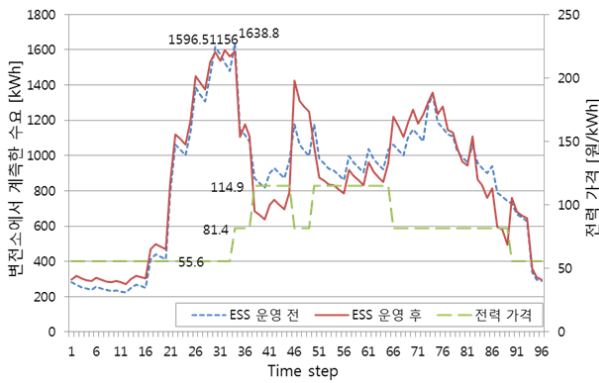


그림 6 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영에 따른 수요이전 및 시간대별 전력가격 (2014년 7월 24일)

Fig. 6 Load shift by the ESS operation for electricity consumption charge minimization and electricity price (24th of July, 2014)

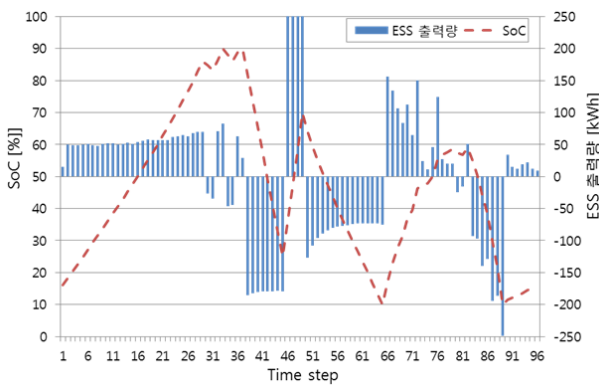


그림 7 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영 알고리즘에 따른 시간대별 ESS 출력 및 SoC (2014년 7월 24일)

Fig. 7 ESS output and SoC by the ESS operation for electricity consumption charge minimization (24th of July, 2014)

전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영은 시간대별 전력가격에만 영향을 받으므로 첨두부하를 이전하는 운영을 하진 않는다. 다만 기본요금의 증가를 방지하기 위해 포함한 제약조건 수식 (10)으로 인하여 피크수요가 약 42.29kWh정도 감소하였고, 이로 인하여 연간 약 379만 원 정도의 기본요금 절감효과가 나타났다.

반면, 전력가격이 가장 높은 최대부하시간대(37-44, 49-64 시점)의 수요를 다른 시간대로 이전하여 전력량요금을 절감하기 위한 최적화 운영을 통해 연간 전력량요금을 약 719만 원 정도의 절감효과를 기대할 수 있었다.

전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영으로 인해 납부할 연간 기대 전기요금은 아래 표 5와 같다.

표 5 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영 후 연간 기대 납부 전기요금

Table 5 Expected annual electric charges with the ESS operation for electricity consumption charge minimization

(단위 : 원)

구 분	기본요금	전력량요금	납부금액
전력량요금 최소화를 위한 ESS	143,111,296	436,483,526	579,594,822
ESS 운용 전 대비	-3,790,736	-7,194,540	-10,985,276

6.4 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영 후

전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영은 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영과 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영 방법을 동시에 고려하여 납부하는 총 전기요금을 최소화하기 위한 방법으로 목적함수는 수식 (11)과 같다. 이와 같은 운영은 요금적용전력이 나타나는 시간대와 전력가격이 높은 시간대의 수요를 경부하 시간대 및 전력가격이 낮은 시간대로 이전하여 전기요금 절감 효과를 극대화 하였다.

그림 8은 7월 24일 하루의 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영 전, 후 수요와 각 시간대별 전력가격을 나타내고, 그림 9는 같은 날 각 시간대별 ESS 출력량과 SoC를 도식화 한 그래프이다.

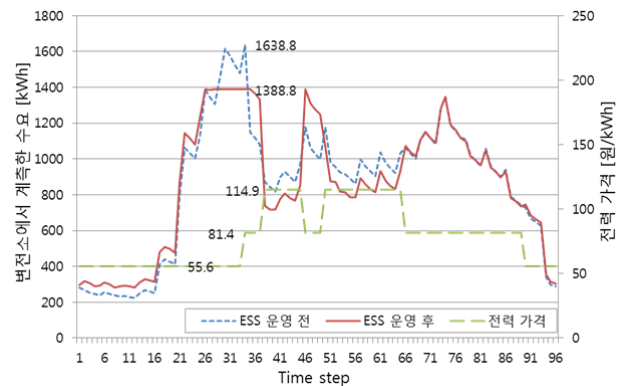


그림 8 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영에 따른 수요이전 및 시간대별 전력가격 (2014년 7월 24일)

Fig. 8 Load shift by the ESS operation for total electric charge minimization and electricity price (24th of July, 2014)

전기요금 최소화를 위한 최적 ESS는 기존 요금적용전력인 1638.8kWh를 ESS 최대출력량 만큼인 250kWh 감축하여

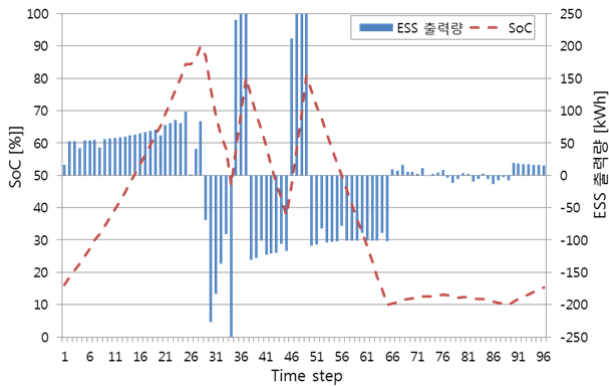


그림 9 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영 알고리즘에 따른 시간대별 ESS 출력 및 SoC (2014년 7월 24일)

Fig. 9 ESS output and SoC by the ESS operation for total electric charge minimization and electricity price (24th of July, 2014)

1388.8kWh로 새롭게 결정하고, 그 외 시간대의 1388.8kWh 이상인 수요 역시 1388.8kWh 이하로 유지시키는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인한 연간 기본요금 절감 기대금액은 2,241만원이다.

뿐만 아니라, 본 알고리즘은 전력가격에 대하여도 수요이전을 시행하여 연간 약 715만원의 전력량요금 절감도 기대할 수 있다.

전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영으로 인해 납부할 연간 기대 전기요금은 아래 표 6과 같다.

표 6 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영 후 납부 전기요금
Table 6 Expected annual electric charges with the ESS operation for total electric charge minimization

(단위 : 원)

구분	기본요금	전력량요금	납부금액
전기요금 최소화를 위한 최적 ESS	124,492,032	436,532,284	561,024,316
ESS 운영 전 대비	-22,410,000	-7,145,782	-29,555,782

6.5 비 교

전기요금 절감을 위한 세 가지 ESS 운영방안을 적용하여 얻은 연간 기대 전기요금은 아래 표 7과 같다.

본 시뮬레이션을 통해 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영을 통한 기본요금 절감의 효과가 동일한 ESS를 활용한 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영으로 인한 전력량요금 절감 효과보다 큰 것으로 확인되었고, 그 때의 연간 총 전기요금 절감금액은 각각 22,041,635원, 10,985,276원이다. 두 효과를 동시에 고려한 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영은 동일한 ESS를 활용하여

기존의 운영방법에 비해 약 29,555,782원의 연간 전기요금 절감 효과를 기대할 수 있음을 확인하였다.

각 운영방법을 통한 전기요금 절감은 ESS 운영 전 전기요금 대비 각각 -3.732%, -1.860%, -5.005%의 절감효과를 보였고, 이 절감효과는 설치된 ESS의 PCS용량과 배터리용량의 최적화를 통해 더욱 커질 것으로 기대된다.

표 7 ESS 운영방안 별 연간 예상 납부전기요금 비교

Table 7 Expected annual electric charges comparison between the ESS operation strategies

(단위 : 천원)

구 분	기본 요금	전력량 요금	총 요금	대비 [%]
Case I	146,902	443,678	590,580	100
Case II	124,492	444,046	568,538	96.268
Case I 대비	-22,410	+368	-22,042	-3.732
Case III	143,111	436,484	579,595	98.140
Case I 대비	-3,791	-7,195	-10,986	-1.860
Case IV	124,492	436,532	561,024	94.995
Case I 대비	-22,410	-7,146	-29,556	-5.005

Case I : ESS 운영 전

Case II : 첨두부하 절감을 위한 ESS 운영

Case III : 전력량요금 최소화를 위한 ESS 운영

Case IV : 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS 운영

7. 결 론

본 논문에서는 도시철도 변전소에 설치된 ESS의 경제적 운영을 위해 전체 전기요금의 납부금액을 최소화하는 ESS 운영 방안을 제안하였다. 첨두부하 발생 시점과 전력가격 피크 시간대가 일반적으로 다른 도시철도 부하의 경우 기 운영되던 첨두부하 절감용 ESS 운영 알고리즘을 적용할 경우 전력량요금이 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 제안하는 방법은 기본요금과 전력량요금의 합을 최소화할 수 있도록 정식화하였다.

ESS 운영 방안별 납부할 전기요금의 비교를 위해 기본요금 최소화를 위한 '첨두부하 절감을 위한 ESS', 전력량요금 최소화를 위한 '전력량요금 최소화를 위한 ESS', 전체 전기요금의 최소화를 위한 '전기요금 최소화를 위한 최적 ESS' 운영 알고리즘을 정식화하였다. 동일한 스펙의 ESS 설치를 가정하고 남광주 변전소의 실제 데이터를 이용, 일 년간 납부할 전기요금을 비교한 결과 전기요금 최소화를 위한 최적 ESS가 가장 납부 기대금액이 낮은 것으로 확인하였고, ESS 운영 전 대비 약 5%의 요금 절감의 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 본 논문에서 제시한 방법은 과도한 ESS동작이 ESS의 열화에 미치는 영향을 고려하지 못하고 있다. 이는 현실적으로 중요한 문제이며 ESS 열화 정도를 비용화하여 목적함수에 추가 할 수 있다면 ESS 열화 비용까지 고려한 최적 운영전략을 도출해 낼 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] SMRT homepage : <http://www.smrt.co.kr>
- [2] Sung-Jik Eum, Energy White paper, Seoul Metropolitan Rapid Transit CORP, pp. 35-107, 2007
- [3] Hansang Lee, Donghee Yoon, Hyungchul Kim, Sung-Kwan Joo, and Hosung Jung, "Efficiency Improvement Effect Analysis for Marginal Storage Capacity in DC Electric Railway Systems", Trans. of KIEE, Vol.63, no.8, pp. 1159-1163, 2014.
- [4] Cheon Heon An, Han Min Lee, Gil Dong Kim, and Hi Sung Lee, "A Study on Effects of Energy Saving by Applying Energy Storage System", Journal of Korean Society for Railway, Vol.12, no.4, pp. 582-589, 2009
- [5] Sung-Dae Kim, and Kyu-Hyoung Choi, "A Study on the Efficiency of Energy Storage System Applied to the Power Traction System of DC Electric Railway", 2011 KSR Fall Conf. pp. 754-760, 2011
- [6] Jong-young Park, Hosung Jung, Hyungchul Kim, and Seung-kwon Shin, "Capacity Determination of ESS for Peak Load Shaving Based on the Actual Measurement of Loads in the Substation of Urban Railway", Trans. of KIEE, Vol.63, no.6, pp. 860-865, 2014.
- [7] Jong-young Park, Seung-kwon Shin, Hyungchul Kim, and Hosung Jung, "Economic Assessment of ESS for Peak Load Shaving in the Substation of Urban Railway", Trans. of KIEE, Vol.63, no.12, pp. 1752-1758, 2014.
- [8] Sung-min Cho, Hee-sang Shin, and Jae-chul Kim, "Modeling of battery energy storage system at substation for load leveling and its economic evaluation", Trans.of KIEE, Vol.61, no.7, pp. 950-956, 2012.
- [9] Sung-hwan Park, Jin-young Choi, Tae-ho Lee, Dong-jun Won, Seung-il Moon, Yeong-jun Seo, Kyeong-seob Moon, and Yong-wan Kim, "Economic assessment of short-term battery energy storage system applying to Korean power system", 2013 KIEE Summer Conf., July, 2013.

저 자 소 개



허재행 (Jae-Haeng Heo)

1978년 9월생. 2012년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2012~2013년 서울대학교 BK21 정보 기술 사업단 박사후 연구원. 2013~2014년 전북대학교 연구교수. 현재 장인의공간 연구원.

Tel : 031-345-8859

Fax : 031-345-8857

E-mail : jhheo78@masterspace.co.kr



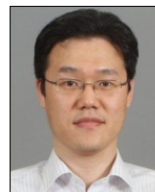
신승권 (Seungkwon Shin)

1972년 6월생. 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2003~현재 한국철도기술연구원 스마트역사연구팀 선임연구원.

Tel : 031-460-5685

Fax : 031-460-5749

E-mail : skshin@krii.re.kr



박종영 (Jong-young Park)

1976년 8월생. 1999년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2007~2009년 한국전기연구원. 2009년~2013년 LS산전. 2013년~현재 한국철도기술연구원 스마트역사연구팀 선임연구원.

Tel : 031-460-5731

Fax : 031-460-5749

E-mail : jypark@krii.re.kr



김형익 (Hyeongig Kim)

1985년 7월생. 2011년 인하대학교 전기전자공학부 졸업. 2014년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정 수료. 현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정 연구원.

Tel : 02-880-9144

Fax : 02-880-1794

E-mail : hyeongigkim@snu.ac.kr