

# 전기자동차 충전시스템의 에너지 최적화 알고리즘에 관한 연구

## A Study on Energy Optimization Algorithm of Electric Vehicle Charging System

부 창 진\*<sup>★</sup>

Chang-Jin Boo

### Abstract

In this paper, the energy cost saving in multi-channel electric vehicle charging system. Joint use of the electric car charger battery state of charging proposed a method based charging. A linear programming with two type is used for optimal control, and the time-of-use price is included to calculate the energy costs. Simulation results show that the reductions of energy cost and peak power can be obtained using proposed method

### 요 약

본 논문에서는 공용 사용목적으로 설치된 전기자동차 충전설비에 다수의 전기자동차가 충전시작과 종료시간이 정해진 조건에서 전력피크 제어와 전기자동차 충전 비용을 최소화 할 수 있는 전기자동차 충전시스템 제어방법을 제안하였다. 전기자동차 충전 과금정책으로 사용되는 계시별요금제기반에서 전기자동차 충전요금 절감할 수 있는 방법으로 전기자동차 배터리 충전상태를 제약조건으로 설정하고 선형계획법 알고리즘을 이용하여 전기자동차 충전시스템을 제어하는 방법을 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행 하였을 때 기존 전기자동차 충전시스템보다 충전요금이 절감됨을 확인할 수 있었다.

*Key words : Electric Vehicle, Multi-Channel Charger, Time of Use, Energy Cost, Linear program*

\* Dept. of Electrical Engineering, Jeju Int. University

★ Corresponding author

E-mail: boo1004@jeju.ac.kr, Tel: +82-64-754-0294

※ Acknowledgment

This study was supported by the research grant of Jeju International University in 2015

Manuscript received Jun. 14, 2018; revised Jun. 22, 2018;

Accepted Jun. 29, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

전세계적으로 친환경자동차에 대한 요구와 에너지 문제의 해결을 위한 방안으로 전기자동차의 개발과 보급이 급증하고 있으며, 국내에서도 정부 주도의 전기자동차 보급 확대 정책을 적극 펼치고 있다. 현재 판매되는 전기자동차는 배터리 1회 충전 시 실주행거리가 약 160[km] 이하 수준으로 주행거리에 대한 제약요인 해결을 위해 잦은 충전이 필요하기 때문에 전기자동차 보급 확산을 위해서는 충전인프라 구축이 필수이다[1]. 전기자동차 충전인프라의 확산은 전력계통에서 피크전력 발생

요인이 될 수 있기 때문에, 이를 해결하기 위한 방안으로 전력계통의 안정을 고려하는 방법[2]과 가격신호를 통한 충전시간의 이동을 유도하는 방법[3], 최적화 방법을 이용한 자동충전제어[4] 등의 연구를 통해 해결하려는 연구가 진행되고 있다. 또한 전기자동차 보급 확산은 개인주택 사용자의 경우 초기 설정한 전기자동차 충전기의 최대 전력 사용 용량 변경없이 전기자동차 충전을 수행할 수 있으나, 전기자동차 충전설비를 공동으로 사용하는 공동주택 및 공용장소에서는 제한된 변압기 허용용량 환경에서 새로운 전기자동차 충전설비의 대수나 가용용량 증설등의 어려움이 발생할 수 있기 때문에 공동으로 사용되는 전기자동차 충전설비의 충전전력을 분산하여 효율적으로 충전시스템을 운용하는 기술을 적용하여야 할 것이다.

본 논문에서는 공동으로 이용하고 있는 전기자동차 충전시스템에 다수의 전기자동차가 연결되었을 때를 가정하였다. 또한 전기자동차의 충전방식은 충전시작과 종료시간이 정해진 조건에서 충전시스템을 운영할 수 있는 방법을 제안하였다. 전기자동차 배터리 충전상태(State of charge)를 에너지 비용 최적화 제약조건 설정하고 최적화 목적함수를 선형계획법(Linear programming)알고리즘을 이용하여 전기자동차 충전시스템 제어하는 방법을 사용하였으며, 그 결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 현행 전기자동차 충전에 사용된 전력량 과금 정책으로 사용되는 계시별요금제(Time of use)기반에서 전기자동차 충전요금 절감과 전력 피크 시간대를 이동시켜 안정적으로 전기자동차 충전시스템을 운영 할 수 있음을 나타내었다.

## II. 전기차 충전시스템 설계

### 1. 전기차 충전인프라

전기자동차 충전인프라는 전기자동차에 전력을 공급하는데 필요한 기반 시설을 의미하며, 구성요소는 전원을 공급하기 위한 전기설비와 전원을 단상 220[V]로 공급받는 완속 충전기와, 3상 380[V]로 공급받는 급속충전기로 구분되는 전기자동차 충전기, 충전기에서 전기자동차에 전기를 공급하기 위해 연결시키는 인터페이스로 크게 구분할 수 있다. 또한 전기자동차 충전시스템은 크게 충전방식, 연결방식, 통신 및 제어방식에 따라

구분할 수 있다. 충전방식은 전기자동차와 충전기를 커넥터로 연결하는 방식에 따라 접촉식(Conductive), 유도식(Inductive) 충전방식 그리고 배터리 교환방식(Battery Swapping)으로 구분 가능하다[5]. 전기적 연결 장치는 전기자동차와 전기적으로 연결시킬 수 있는 커넥터(Connector)와 전기자동차에 장착된 인렛(Inlet)이 있으며 단상 및 삼상 교류용, 직류 전용 그리고 교류 및 직류가 함께 있는 콤보(Combo)형으로 구분할 수 있다. 전기자동차 충전시스템에서 통신방식은 CAN 통신방식과 PLC 통신방식을 주로 사용하며, 전기자동차 충전에 사용한 전력 사용 비용에 대한 과금은 전력계통에서 교류(AC)전력을 공급받아 전기자동차에 충전전력을 공급하고 이를 계량하여 요금을 부과하게 된다.

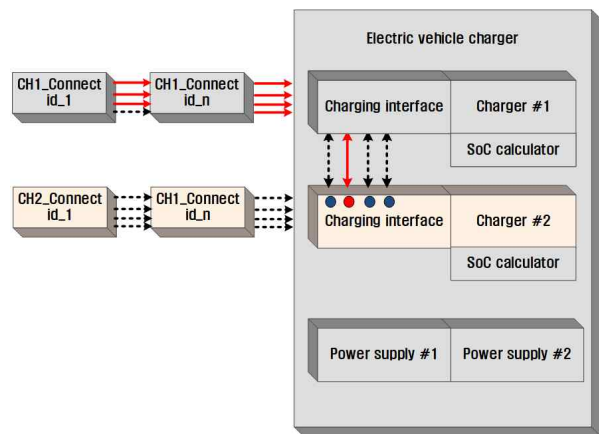


Fig. 1. Design of electric vehicle charger

그림 1. 전기차 충전시스템 설계

국내에서는 전기자동차 보급 활성화를 위해 전기자동차용 충전에 대한 별도의 계시별 요금제도가 운영되고 있다. 그림 1은 전기자동차 충전시스템 구성도를 나타낸 것이며, 충전용 전력선택기는 일부 제조사에서 제공되는 다수의 전기자동차 충전이 가능한 모델에서 제공되는 기능이며, 인터페이스를 통해 다수의 전기자동차를 충전할 수 있는 구조로 설계되었다.

### 2. 전기차 충전특성

일반 가정 개인 소유가 아닌 공동으로 사용하는 충전시스템의 운영은 전기자동차가 도착하여 충전을 시작하는 시간과 충전완료 후 출발 시간이 중요하며, 이때 전기자동차의 배터리 상태에 따라 충전시간에 영향은 크다고 할 수 있으며, 특히

계시별요금제 기반에서 배터리의 잔량상태는 전력요금 및 전력피크 저감 측면에서 중요한 요소로 작용한다. 기존의 전기자동차 충전시스템은 전기자동차의 충전완료 후 커넥터를 제거하여야만 다른 전기자동차가 충전할 수 있는 구조로 개인 주택에 설치된 경우는 문제가 없으나 공동으로 사용하는 충전시스템의 경우 선행 충전을 수행한 사용자가 충전완료 후 커넥터 분리를 하지 않은 경우 다음 사용자의 충전이 불가능하다. 그림 2를 보면 충전시스템 4대에 배터리 충전상태가 각각 다른 전기자동차가 연결된 경우(S80, S60, S40, S20) 전기자동차의 리튬배터리의 특성에 따라 충전전류가 감소하는 시기에 대기하는 전기자동차 충전시스템 이용자에게 권한을 부여할 수도 있다. 배터리잔량이 낮은 차량일수록 최대충전 전력 사용과 그 충전 시간이 오래 걸리게 되며, 배터리잔량이 100%가 되면 전기자동차의 충전은 더 이상 충전하지 수행하지 않고 정지하게 된다.

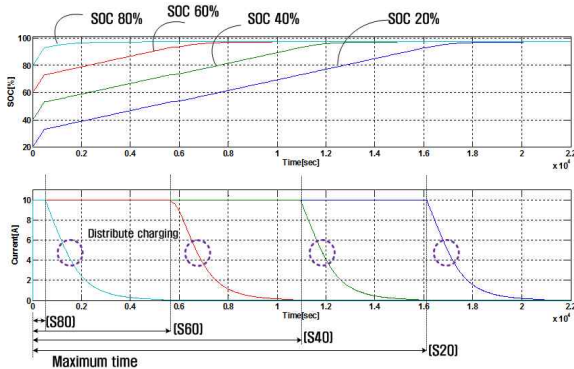


Fig. 2. Electric vehicle battery state of charge  
그림 2. 전기차 배터리 충전상태

### III. 에너지 비용 최소화 전기자동차 충전 제어방법

전기자동차 충전의 경우 일반 누진제 요금이 아닌 전기자동차 충전을 위한 계시별요금제 기반에서 과금되기 때문에 전기자동차 충전은 경부하시간대의 사용을 최대로 하고 최대부하시간대 사용을 최소로 하는 시간대별 충전요금을 최소화 할 수 있도록 제어시한을 설정하여야 한다. 계시별 요금제는 경부하시간대, 중부하시간대, 최대부하시간대로 3개의 구간이 24시간을 기준으로 구분되어 있으나, 본 논문에서는 다수의 전기차가 공용으로

충전을 할 수 있는 환경에서 시스템 운영을 확인하기 위해서 충전을 최초로 시작하는 출근시간과 충전 완료 최종 시한인 퇴근시간을 기준으로 시뮬레이션 하기 위해 경부하 시간대를 제외하게 되며, 중부하 시간대의 전기자동차 충전시간을 최대 사용하고, 최대부하시간대의 사용을 최소화하여 전기자동차 사용자가 퇴근시간에 전기자동차의 충전상태 80%를 만족할 수 있게 하였다. 일반적으로는 그림 3과 같이 배터리의 잔량을 선택적으로 선택할 수 있으나 요금제 구간에서 충전 비용의 최소화를 위해 배터리의 최종 잔량은 80%로 고정하였다.

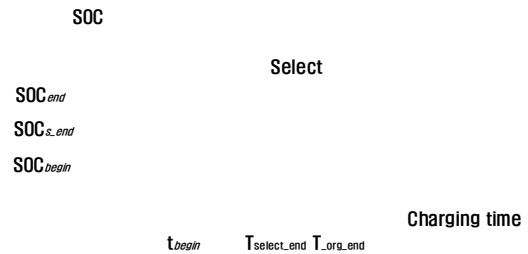


Fig. 3. Electric vehicle charging method  
그림 3. 전기차 충전시스템 설계

전기자동차 충전시스템의 충전요금을 최소화하는 방법은 전력사용을 제어하는 방식이다. 본 논문에서는 전기자동차가 충전시스템에 연결되었을 때의 배터리충전 상태에 따라 충전전력 사용요금을 최소화하기 위해 식 1과 같이 목적함수를 사용하였다.

$$\min J = \sum_{n=1}^N \sum_i^I S_i(n) \cdot p_i(n) \cdot c_i \quad (1)$$

여기서  $S_i(n)$ 은 전기자동차를 설정된  $i$ 차 제어시한에서 충전을 시작하거나 정지할 수 있는 스위칭 상태와 배터리의 상태를 나타내며,  $p_i(n)$ 은 제어시한  $i$ 차 배터리 상태에서 소비되는 전력이고,  $N$ 은 배터리잔량의 총합계,  $c_i$ 는 제어시한  $i$ 차에서 전기자동차 계시별요금을 나타낸다. 또한 공동이용 건물에 대한 충전시간을 고려할 때 오전 9시에서 오후 18시까지의 사용시한이 구성되며, 전력요금제는 1시간 단위로 부과되지만 최대전력산정은 15분단위의 수요시한을 가지고 있으므로, 제어시한을 최소 15분 단위로 설정하였을 경우는 36이고, 배터리잔량의 경우 선형적 특성을 가정할 수 있는 배터리 잔량 80%가 전기자동차 1대의 최대충전 완료시간으로 선정할 수 있다.

전기자동차 충전시스템의 효과적인 운영을 위해서는 충전을 시작하는 전기자동차의 배터리 잔량이 정의 되어야 한다. 충전이 시작되었을 때의 배터리 잔량은 식 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$SoC_i(t+1) = SoC_i + \frac{1}{B_c} \int_{t_0}^t P_i(t) dt \quad (2)$$

여기서  $SoC_i$ 는 시간  $i$ 에서 최기의 배터리 잔량을 나타내고, 1분당 변화되는 배터리의 상태는 식 3과 같다[6].

$$T_i = \frac{(SoC_{i+1} - SoC_i) \cdot E_i}{\eta P_{c_i}} \times 60 \quad (3)$$

식 1의 전기자동차 충전시스템의 운영의 최적화를 위해 충전 전력에 대한 배터리 충전잔량이 선형이라고 가정하였을 때 배터리상태에 대한 제약조건을 식 4와 같이 설정한다.

$$SoC_i(n) \leq SoC_{i+1} \quad (4)$$

전기자동차 충전시스템은 설정된 구간에서 계시별 요금제 기반으로 가장 낮은 비용으로 충전을 수행하게 되며 on/off 방식의 충전 방식은 현재의 전기자동차 배터리 잔량이  $SoC_i(n) \leq SoC_{i+1}$ 이면 1이고, 배터리상태  $SoC_i(n) \geq SoC_{i+1}$ 이면 0이 된다.

전기자동차 충전시스템의 운영은 알고리즘의 적용은 초기에 제어시한을 출근시간 09시에서 퇴근시간 18까지를 설정하고 전기자동차 1대당 제약조건으로 배터리 잔량은 80%를 설정한 후 최적화를 수행한다.

#### IV. 컴퓨터시뮬레이션

전기자동차 충전시스템의 배터리 충전상태를 확인하기 위해 Matlab을 사용하여 3.85[V]의 리튬배터리 모듈을 직병렬 연결하고, 이 전압을 기준으로 최대 충전전류를 인가하여 리튬배터리 시스템의 출력을 확인하였다. 그림 4는 리튬 배터리 모델을 나타낸 것으로 충전전압과 배터리상태에 대한 특성을 록업테이블을 이용하여 전기자동차의 배터리 잔량 특성을 확인 할 수 있으며, 쿨롱효율의 선택과 직렬 내부저항의 상태를 선택할 수 있으며 추가적으로 히스테리시스 특성을 반영하였다. 그림 5는 설계된 모델의 충전전압, 전류, 배터리 상태에

대한 출력을 나타낸 것으로 배터리상태가 80%까지 전압은 상승하고 충전전류는 7A로 고정되어 충전을 수행하다가 80% 이상에서는 전압도 증가율이 낮아지고 충전전류는 감소함을 확인 할 수 있다. 이 결과를 통해 배터리 잔량이 80%가 되는 지점을 전기자동차 충전의 상한 제약조건으로 사용하여 충전시스템 제어 알고리즘을 설계하였다.

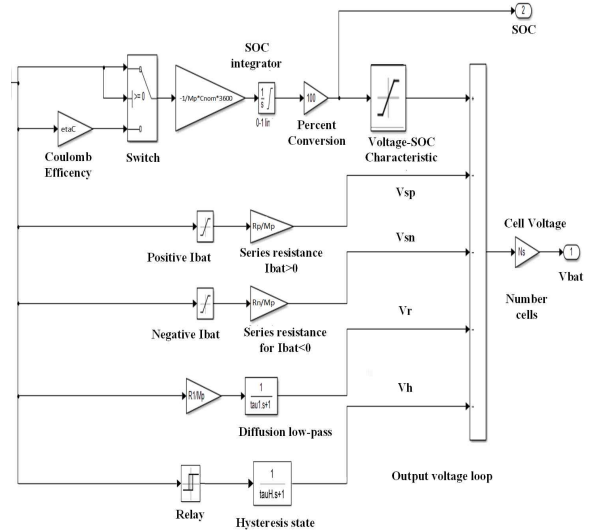


Fig. 4. Design of the electric vehicle battery system  
그림 4. 전기자동차 배터리스스템 설계

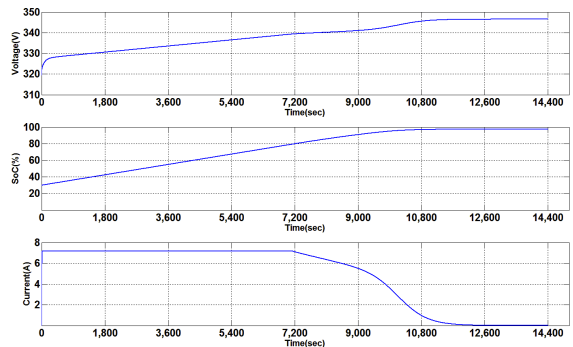


Fig. 5. Electric vehicle battery system output  
그림 5. 전기자동차 배터리 시스템 출력

첫 번째 전기자동차 충전 특성을 분석하기 위해 충전 구간을 오전 09시에 충전시작을 4대의 전기자동차가 충전을 개시하였을 때에 대한 분석을 수행하였다. 4대의 전기자동차의 배터리 잔량은 각각 40%, 50%, 60%, 60%의 상태를 가지고 있으며 배터리 잔량 80%를 상한으로 설정한다. 최적화함수의 경우 스위칭 상태는  $0 \leq x \leq 1 (0kW \leq P \leq 7kW)$ 로 충전전력을 조절할 수 있는 구조이다. 주요 목표는 전력피크저감과 에너지 사용비용

절감에 있다. 동시 4대의 충전은 전력 피크를 발생시키며, 최대전력량을 사용하므로 전력요금 기반에서 15분을 기준으로하는 기본요금에 영향을 미친다. 또한 기본요금에는 영향을 미치지 않을 수 있으나 TOU에서 사용요금 증가와 다른 건물 부하의 피크시간과 중복되어 전체적인 피크발생의 우려가 있다.

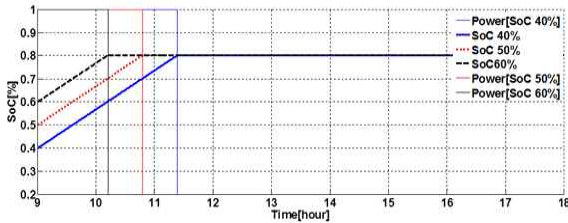
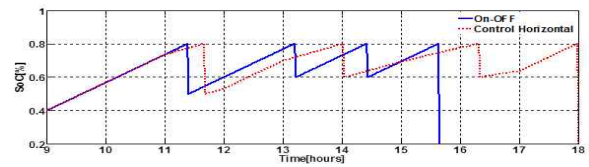
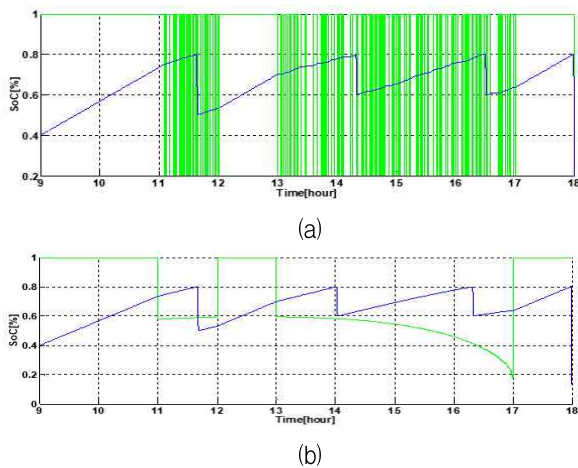


Fig. 6. Electric vehicle initial SOC and charge time  
그림 6. 전기자동차 초기 충전상태와 충전시간

제어시한 내에서 공급전력 제어방식은 on-off로 구성된 이진 제어방식과 전력을 가변할 수 있는 방식을 선택할 수 있다. 이진 전력제어방식은 최대부하시간내에서 on-off를 반복하게 되며, 스위칭 시한 횟수가 증가 할수록 전기자동차 충전시스템의 수명에 영향을 줄 수 있다.

그림 7은 전기자동차 충전시스템의 전력제어를 가변할 수 있는 방식으로 중부하 시간대의 전력사용은 최대로 사용하고 있으나 최대부하시간대가 지속되는 13시에서 17시까지 전력사용량을 점차적으로 감소시키다가 17시에 최대전력을 사용하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 전력요금 측면과 전력피크 측면에서도 효과적으로 동작함을 알 수 있다.



(c)  
Fig. 7. Comparison of charging method, (a) binary switching (b) variable switching (c) control horizon  
그림 7. 연속 충전방식과 제어구간 충전방식의 비교, (a) 이진 스위칭, (b) 가변 스위칭, (c) 제어구간 설정

두 번째의 경우 오전 09시에 오피스 건물에 4채널 전기자동차 충전시스템이 설치되어 있고 2대 충전이 가능하고 나머지 2대는 충전 포트를 가지고 있어 충전이 개시된 충전기 중 완료된 충전포트에 권한을 받아 충전을 수행 할 수 있는 경우에 대한 컴퓨터 시뮬레이션이다. 4대의 전기자동차는 각각 배터리 초기 잔량은 20%, 30%, 41%, 31%이며 배터리 충전 상태는 80%를 상한으로 설정하고 충전전력은 0kW에서 6.6kW의 전력을 공급하며 완속 완충시간 6시간을 기준으로 하였다.

그림 8은 전기자동차를 2대 충전할 수 있는 충전기에서 전기자동차를 계시별요금제를 고려하지 않은 충전에 4대의 배터리상태를 나타낸다. 2대 중 1대가 먼저 충전이 완료되었을 때 커넥터 분리와 연결 시간은 고려하지 않았다. 전기자동차 충전은 EV 1 과 EV 2가 먼저 충전을 시작하고, 초기 배터리잔량이 높은 EV 2가 충전을 완료하게 되면 EV 3가 충전을 하게된다. 초기에 충전을 개시하였던 EV 1이 EV 충전이 완료되면 EV 4가 충전을 개시하게 된다. 여기서 EV 3가 EV 1보다 충전을 먼저 완료하게 된다면 EV 4는 EV 3 포트에 연결이 될 수 있다.

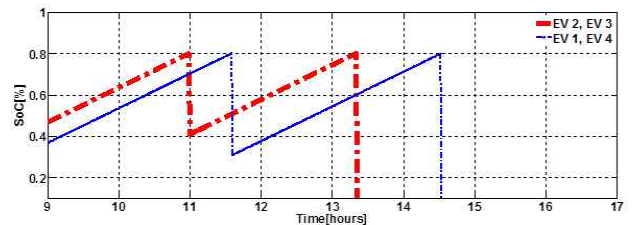


Fig. 8. Electric vehicle continuous charge  
그림 8. 전기자동차 연속충전

그림 9는 본 논문에서 제안한 충전 방식의 배터리 잔량을 나타낸 것으로 최대부하시간대에 배터리잔량상태가 완만하게 나타남을 확인할 수 있다. 기본 2채널에 예비 포트에 대한 자동 스위칭이 가능하여 기존 시스템에서 충전기 분리 및 연결에



대한 문제점을 개선할 수 있고, 기존 시스템에서는 TOU를 고려하지 않지만, 본 논문에서는 최대 부하시간대인 11시에서 12시 사이와 13시에서 16시까지의 충전 시간대에 전기자동차 충전을 최소화함으로써 피크전력을 저감할 수 있다.

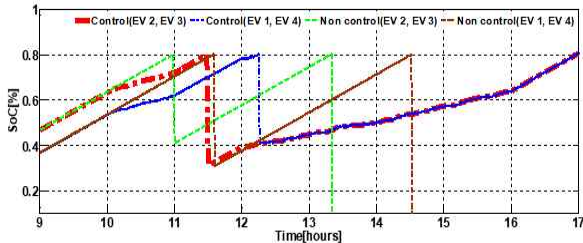


Fig. 9. Electric vehicle optimized charging system with 2CH  
 그림 9. 2채널 전기자동차 최적화 충전시스템

그림 10은 기존 순차적 충전시스템 10,668 원과 제어시스템 10,171.82원으로 충전요금을 절감할 수 있음을 나타내었다.

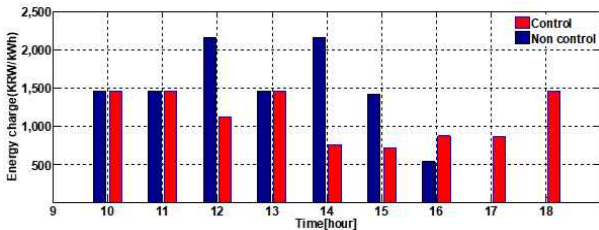


Fig. 10. Comparing the EV tariff for TOU  
 그림 10. 전기자동차 계시별요금제 사용요금 비교

**V. 결 론**

본 논문에서는 공동으로 사용하는 전기자동차 충전시스템 환경에서 배터리의 충전상태가 선형적인 배터리 잔량이 80%일때 전기자동차 1대의 충전완료 시간으로 설정하여 충전에 사용된 전력사용 요금의 절감과 최대전력사용으로 인한 전력피크를 증부하 시간대로 이동시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 시뮬레이션 결과 기본요금을 결정하는 15분단위의 계산은 사용용량이 2대이기 때문에 13.2kW를 초과할 경우가 없다. 하지만 건물등에 동일한 변압기를 사용할 경우 전기자동차 충전부하가 전체 사용전력에 가산되기 때문에 피크절감 측면과 기본요금 산정에 영향을 주기 때문에 제어할 필요성은 있다. 향후 배터리 상태에 대한 동적 특성과 외란 등을 고려한 시스템 모델설계와 실험을 진행하게 되면 다채널을 활용과 신재생에너지와 ESS를 결합하면 효율적인 전기자동차 충전시스템의 운용이 가능케 될 것이다.

**References**

[1] Ministry of Environment, "A Study on Supporting Criteria and Demand Infrastructure for Electric Vehicle Supply," 2011

[2] M. Caramanis, "Management of Electric Vehicle Charging to Mitigate Renewable Generation Intermittency and Distribution Network Congestion," *IEEE Conf on Decision and Control*, pp. 4717 - 4722, 2009 DOI: 10.1109/CDC.2009.5399955

[3] A. Joao, M. Pedeo, S. Pilipe, et al. "Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System," *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 99, No. 1, pp. 168-183, 2011 DOI: 10.1109/JPROC.2010.2066250

[4] S. Shengnan, Z. Tianshu, P. Manisa and R. Saifur, "Impact of TOU Rates on Distribution Load Shapes in a Smart Grid with PHEV Penetration," *IEEE PES*, pp. 1-6, 2010 DOI: 10.1109/TDC.2010.5484336

[5] Ministry of Environment,, "Electric Vehicle Charging Infrastructure Installation and Operation Guidelines," 2017

[6] L. Chen, C. Y. Chung, Y. Nie and R. Yu, "Modeling and optimization of electric vehicle charging load in a parking lot," *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1-5, 2013 DOI: 10.1109/APPEEC.2013.6837301

**BIOGRAPHY**

**Chang-JinBoo**



2001 : BS degree in Electrical Engineering, Jeju National University.  
 2003 : MS degree in Electrical Engineering, Jeju National University.  
 2007 : PhD degree in Electrical Engineering, Jeju National University.  
 2014 - Current : Dept. of Electrical Eng. Jeju International. University.