

가격탄력성을 이용한 전기자동차 충전요금제에 따른 연계계통의 안정성 분석

An Analysis on the Stability of the Electric Vehicles Connected Power System According to Charging Cost with Price Elasticity

김 준 혁[†] · 김 주 락^{*} · 김 철 환^{**}
(Junhyeok Kim · Joorak Kim · Chulhwan Kim)

Abstract - Now we are facing severe environmental issues such as global warming. Due to these, the concerns about eco-friendly energy have been increased. Kyoto protocol and Copenhagen climate change conference are circumstantial evidence of it. With these trends, the interests for the Electric Vehicles(EVs) which do not emit any harmful gases have gradually been raised. Unfortunately, however, massive connection of EVs to the power system could cause negative impacts such as voltage variations, frequency variations and increase of demand power. To prevent the mentioned issues, KEPCO adopts Time-of-Use(ToU) price for EVs charging. Nevertheless, it is important to verify the propriety of the charging system. In this paper, therefore, we used pre-introduced price elasticity concept to predict possible Demand Response(DR) on charging of EVs. And analyzed possible demand power increase according to various price elasticities. Simulation results show that given ToU based charging system would not enough to control the increase of demand power by EVs on the power system. It is concluded, therefore, additional methods and/or algorithms are required.

Key Words : EV, Charging price, ToU, DR

1. 서 론

근래 지구온난화와 같은 환경문제의 심각성에 대한 인식이 증 가하고 있다. 이산화탄소 배출량을 제한하는 교토 의정서와 코펜 하겐 기후변화회의 등이 이를 대변하는 실례라고 할 수 있다. 이 러한 정황에서 친환경 특성을 가지는 전기자동차에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다[1]. 전기자동차의 경우, 전기로 주행하 기 때문에 화석연료를 소모하지 않으며, 주행 시 유해한 가스를 배출하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 그러나 향후 전기자동차 의 보급이 증가하는 경우, 이는 전력계통에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 많은 수의 전기자동차가 전력계통에 연계되어 충전을 수행한다면, 전력계통에 전압변동, 주파수변동 그리고 수요전력 증가와 같은 악영향을 미칠 수 있기 때문이다[2-10]. 이러한 악 영향을 최소화하기 위하여 현재 한국전력에서는 충전시간별로 요

금을 상이하게 부과하는 사용시간별 충전요금(Time-of-Use, ToU)을 적용하고 있다. 이러한 ToU 요금시스템의 목적은 최대부 하 시간에 상대적으로 높은 요금을 부과하고, 경부하 시간에 상 대적으로 낮은 요금을 부과함으로써, 최대부하 시간의 전기자 동차 충전 수요를 경부하 및 중간부하 시간으로 이동시키는 것이 다. 그러나 전기자동차의 보급이 충분하지 않은 현재 상황에서 해당 요금제의 실효성 및 적정성을 평가하기에는 어려움이 있다. 만일 현행 요금제가 전기자동차가 다수 보급된 조건 하에서 실효 성을 가지지 못한다면, 이는 전력계통에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 가격탄력성의 개념을 적용하여 현 행 전기자동차 충전요금제의 적정성을 분석하였다.

2. 수요반응

재화의 공급가격이 상승한다면 소비자는 재화의 구매나 사용 을 감소할 것이고, 반대로 재화의 공급가격이 인하한다면 재화의 구매나 사용이 증가될 것이다. 이러한 일련의 현상을 수요반응이 라고 하며, 현재 적용되고 있는 전기자동차 충전요금제 또한 수 요반응에 그 기반을 두고 있다.

전기자동차 충전요금제가 어느 시간에도 동일한 충전요금을 부과하는 단일요금제로 설정되어 있다면, 전기자동차 소유주들은 언제든 희망하는 시간에 충전을 수행할 것이다. 그러나 이 경우, 최대부하 시간에 다수의 전기자동차가 연계되어 충전을 수행할

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, SungKyunkwan University, Korea/Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail: kjh30309@skku.edu

^{*} Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea

^{**} Dept. of Electrical and Electronic Engineering, SungKyun- kwan University, Korea

Received : June 8, 2015; Accepted : August 4, 2016

수 있다는 문제점을 내포한다. 만일 전기자동차의 충전에 기인하여 최대 수요전력이 상승한다면, 이를 기준으로 전력공급량을 증가시켜야하므로, 경우에 따라 송배전 설비의 증설이 요구될 수 있어 상당한 비용이 소요될 수 있다.

수요반응은 이와 같은 전기자동차의 악영향을 방지하고 최소화하기 위하여 도입되었다. 최대부하 시간에 상대적으로 높은 요금을 적용하는 경우, 전기자동차의 충전은 해당 시간을 피해 상대적으로 요금이 저렴한 경부하 시간이나 중간부하 시간에 충전을 수행할 것이다.

3. 가격탄력성

앞서 언급한 것과 같이 현행 전기자동차 충전요금제는 특정 시간대에 전력 사용을 장려하고, 반대로 특정 시간대에 전력 사용을 억제하기 위하여 시간별로 충전요금에 차등을 두고 있다. 그러나 향후 전기자동차의 보급이 증가된 상황을 대비하기 위해 서라도 해당 충전요금제의 실효성에 대한 분석이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 현행 전기자동차 충전요금제의 실효성 검증을 위하여 가격탄력성의 개념을 활용하였다. 가격탄력성이란 (1)에 나타난 것처럼, 재화의 공급가격이 변할 때, 수요가 얼마나 변하는지를 수식화한 것으로, 이를 이용하여 현행 요금제 시행 시 각 요금제 구간에 따른 수요의 변화를 예측할 수 있다. 본 논문에서는 기존 연구들에서 제안된 전력수요의 가격탄력성을 조사하고 이를 활용하여 수요변화를 예측하고 현행 요금제의 적정성을 평가하였다.

$$E = \frac{\Delta Q/Q}{\Delta P/P} \quad (1)$$

여기서, E : 가격탄력성
 ΔQ : 수요의 변화량
 Q : 초기 수요량
 ΔP : 가격의 변화량
 P : 초기 가격

3.1 기존의 연구

우리나라의 전력수요에 대한 가격탄력성을 분석한 연구는 다수 존재한다. 각 연구들에서 참고한 자료와 그에 따른 가격탄력성을 표 1에 요약하였다[11].

기존의 연구들에 의하면, 전력수요에 대한 가격탄력성은 -0.16에서 -0.91의 범위를 가지고 있다. 해당 결과를 통해, 전기는 탄력적이지 않은 필수재이므로 상대적으로 낮은 가격탄력성을 가짐을 확인할 수 있다.

3.2 전기자동차 충전요금제와 가격탄력성

가격탄력성의 개념을 도입하여 구간별로 상이하게 측정된 요

금에 따라서 소비자들이 어떻게 반응을 할 것인가에 대하여 유추해볼 수 있다. 이를 위하여, 현행 요금제의 가격변화에 대한 분석이 선행되어야 한다. 여름철 저압에서 각 구간별 충전요금의 증감률을 표 2에 나타내었으며, 현행 전기자동차 충전요금제를 표 3에 나타내었다.

표 1 선행연구들의 전력수요 가격탄력성 분석결과 요약

Table 1 Summary of the preceding research on price elasticity

구분	연구자	참고자료	가격탄력성
횡단면분석	권오상 (2014)	2004~2012 가계동향조사	-0.34~-0.21
	조진서 (2013)	2008년 설문자료	-0.75~-0.72
	임슬예 (2013)	2012년 8월 설문자료	-0.68
	유승훈 (2007)	2005년 5월 설문자료	-0.25
시계열분석	임소영 (2013)	1980~2011 연간자료	-0.30
	박광수 (2006)	1981~2005 연간자료	-0.91
	유병철 (1996)	1980~1994 연간자료	단기: -0.16 장기: -0.38

표 2 전기자동차 충전요금제의 여름철 구간별 가격변동

Table 2 Variation rate for the Electric Vehicle charging price system in summer

	경부하	중간부하	최대부하
경부하	0 %	252.257 %	418.165 %
중간부하	252.257 %	0 %	160.014 %
최대부하	418.165 %	160.014 %	0 %

표 3 현행 전기자동차 충전요금제

Table 3 Electric Vehicle charging price system

구분	기본요금 (원/kW)	전력량요금(원/kWh)			
		시간대	여름	봄·가을	겨울
저압	2,390	경부하	57.60	58.70	80.70
		중간부하	145.30	70.50	128.20
		최대부하	232.50	75.40	190.80

4. 전기자동차 충전요금제의 적정성 분석

앞서 선행연구에 대한 조사를 통하여 전력수요의 가격탄력성이 -0.16에서 -0.91의 범위를 가지고 있음을 확인하였다. 본 절

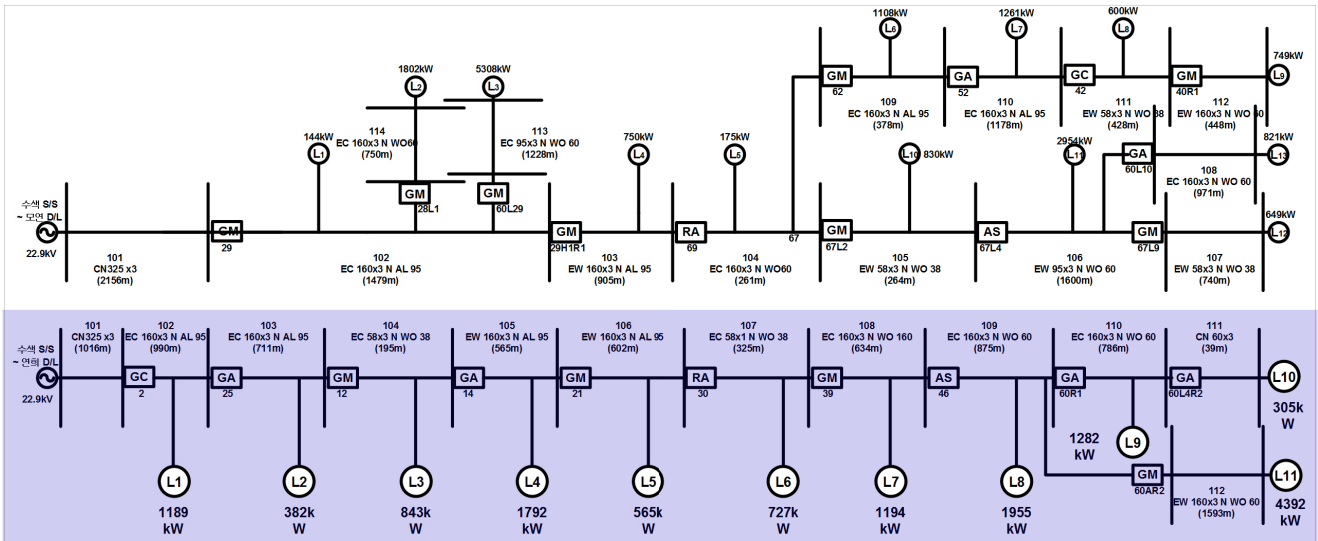


그림 1 모의 지역 배전계통 단선도
 Fig. 1 Single line diagram of the trial distribution system

에서는 이러한 범위를 적용하여 각 가격탄력성 별 수요반응을 예측하고 모의를 통하여 이를 분석하였다.

4.1 전기자동차 대수 산정

모의의 정확성을 위하여 서울의 특정 동(洞)을 대상으로 전기자동차 대수를 산정하여 모의를 진행하였다. 모의 지역은 일반적인 주거지역이며, 해당 지역의 전기자동차 대수를 산정하기 위하여 다음의 가정을 설정하였다.

- ① 모의 지역의 자동차 대수는 국토교통부의 2016년 통계자료를 활용한다.
- ② 한국스마트그리드 사업단에서 예측한 것과 같이, 전기자동차의 대수는 소·중형 자동차 등록대수의 약 10%로 설정한다[12].
- ③ 본 연구에서 소·중형 자동차는 1500CC 이하의 차량으로 가정한다.

2016년 국토교통부의 통계자료에 의하면, 모의 지역의 전체 차량대수는 84,076대이다[13]. 그러나 차종에 따른 데이터를 제공하지 않기 때문에 서울시 전체 차량 중 소·중형 자동차의 비율을 계산하여 모의 지역의 소·중형 자동차대수를 산정하였다.

서울시 전체 차량대수는 3,069,594대이며, 이 중 1500CC 미만의 차량대수는 345,659대이다[13]. 이는 전체 차량 중 약 11.26%가 소·중형 자동차임을 의미한다. 동일한 비율을 모의 지역에 적용한다면, 해당 지역 소·중형 자동차의 대수는 약 9,467대를 도출할 수 있다. 또한 가정에 따라, 이 중 10%인 947대가 전기자동차임을 가정하였다.

모의 지역의 부하량의 크기와 비례하여 각 부하군별 전기자동차의 대수를 계산하여 표 4에 정리하였으며, 모의 지역의 배전계

통 단선도를 그림 1에 나타내었다.

표 4 현행 전기자동차 충전요금제
 Table 4 Electric Vehicle charging price system

위치	부하량 (kW)	부하 비율 (%)	EV 대수 (대)
L1	1189	8.574	81
L2	382	2.754	26
L3	843	6.079	58
L4	1792	12.927	122
L5	565	4.074	39
L6	727	5.243	50
L7	1194	8.610	81
L8	1955	8.618	82
L9	1282	9.245	87
L10	305	2.199	21
L11	4392	31.674	300
합계	13866	100	947

4.2 시간별 전기자동차 대수

앞서 각 부하군별 전기자동차의 대수를 부하 비율에 따라 계산하였다. 다음으로 시간에 따른 전기자동차 대수의 산정이 요구된다. 이를 위하여 시간별 자동차의 교통량 데이터를 활용하였다. 해당 데이터를 활용하여 시간별 자동차의 비율을 계산하고, 이를 통해 각 부하군의 시간별 전기자동차 대수를 계산하였다. 표 5에 L11 부하군의 시간별 전기자동차 대수를 계산하여 나타내었다. 또한 전기자동차는 하기를 근거로 하여 평균 2시간의 주행을 한 후에 충전을 수행하는 것으로 가정하였다.

- ① 2016년 서울시 운행차량의 운행거리는 328,964,000 km이며, 이 때 17,318,149시간이 소요되었다[14].
- ② 2016년 서울시 운행차량의 일평균 주행거리는 43.9km이다 [15].
- ③ 즉, 일평균 주행시간은 약 2.3시간이며 계산의 편의를 위하여 2시간 주행하는 것으로 가정하였다.

표 5 시간별 전기자동차 대수(L11)

Table 5 The number of EVs at each hour(L11)

시간	교통량 (대)	비율 (%)	운행 EV (대)	충전 EV (대)
1	1979	0.89	3	7
2	776	0.35	1	4
3	378	0.17	0	3
4	245	0.11	0	1
5	170	0.07	0	0
6	1009	0.45	1	0
7	3023	1.36	4	0
8	7388	3.32	10	1
9	14370	6.47	19	4
10	12543	5.65	17	10
11	11811	5.32	16	19
12	13225	5.95	18	17
13	15022	6.76	20	16
14	11689	7.51	23	18
15	15027	6.76	20	20
16	15589	7.02	21	23
17	17443	7.85	24	20
18	18224	8.20	25	21
19	18378	8.27	25	24
20	13755	6.19	19	25
21	9881	4.45	13	25
22	7227	3.25	10	19
23	4932	2.22	7	13
24	2930	1.32	4	10

4.3 모의 조건

현행 전기자동차 충전요금제의 적정성 평가를 위한 모의를 수행하기 위하여 다음의 모의 조건을 설정하였다.

- ① 모의 계통: 그림 1의 모의 계통을 사용하였으며, 총 1.5km의 길이를 가지고 있고, 28.6 MW의 유효전력과 13.9 Mvar의 무효전력을 부하에 공급하고 있다.
- ② 모의 계절: 요금제의 적정성 분석을 위하여 최대 수요전력과 최소 수요전력의 편차가 가장 크고 수요전력의 변동이 빈번한 여름철을 모의 계절로 설정하였다[16].
- ② 전기자동차 충전제어: 충전요금제만의 적정성을 분석하기

- 위하여 별도의 충전제어는 수행하지 않는다.
- ③ 전기자동차 연비: 전기자동차의 연비는 상용 전기자동차인 RAY 모델의 연비와 동일하게 5km/kWh로 설정하였다.
- ④ 전기자동차 충전전력: 전기자동차 충전전력은 주상용 변압기의 용량을 고려하여 3kWh로 설정하였다.
- ⑤ 전기자동차 충전시간: 평균주행거리와 전기자동차의 연비 그리고 충전전력을 고려하여 3시간동안 충전을 수행함을 가정하였다.
- ⑥ 가격탄력성: 본 연구에서는 -0.1에서 -0.7까지의 가격탄력성만을 고려하여 모의를 진행하였다. 이는 -0.7 이상의 가격탄력성을 적용하는 경우, 중간부하 및 최대부하 시간에 충전을 희망하는 모든 전기자동차가 경부하 시간대에 충전을 개시하기 때문이다.
- ⑦ 적정성 분석: 전기자동차 충전 시 모의 계통의 최대수요전력과 부하율을 통하여 충전요금제의 적정성을 평가한다.

4.4 모의 결과

앞서 언급한 것과 같이, 모의를 통하여 가격탄력성에 따른 현행 전기자동차 충전요금제를 평가하였다. 이를 위하여, 각 시간별 충전을 희망하는 전기자동차의 대수를 산정하였고, 충전요금과 가격탄력성의 변화에 따른 충전 수요의 변화를 적용하여 모의를 수행하였다. 모의 결과를 그림 2에 나타내었다.

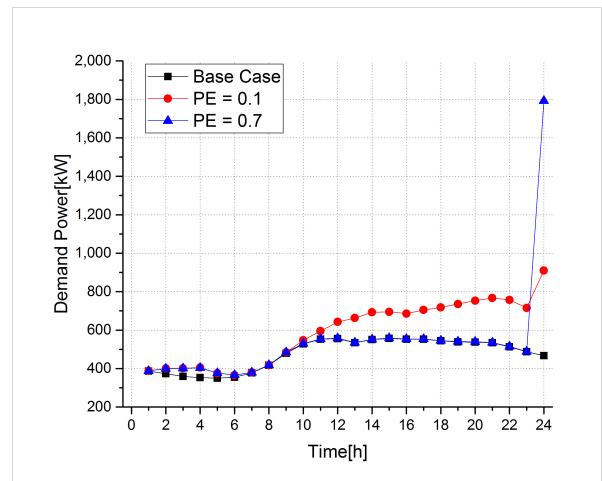


그림 2 가격탄력성 변화에 따른 수요전력
Fig. 2 Demand power with different price elasticity

그림 2에서 BaseCase는 전기자동차가 연계되지 않은 계통의 수요전력변화를 나타낸다. 모의 결과에서 확인할 수 있는 것과 같이, 가격탄력성이 낮은 경우 평균 수요전력은 증가하지만 최대 수요전력의 상승폭은 높지 않음을 확인할 수 있다. 반면, 가격탄력성이 높은 경우 평균 수요전력은 상당히 제한되나 경부하 시간에 급격한 수요전력의 증가를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 가격탄력성이 높을수록 충전요금의 증가에 민감하게 반응하여 좀 더

저렴한 경부하 시간대의 충전 수요가 집중되기 때문이다. 특히 경부하 시간대가 시작하는 23시에 전기자동차 충전수요가 집중되는 것을 확인할 수 있다.

또한 모의 결과를 통하여, 충전개시 시간은 가격탄력성에 민감하게 반응하지만, 충전이 개시된 후에는 가격탄력성의 영향이 상당히 작다는 것을 확인할 수 있다. 이는, (2)에서 확인할 수 있는 것과 같이, 현행 요금제를 적용할 경우, 중간부하 시간대에서 최대부하 시간대로 변경될 때 수요변화는 '가격탄력성×0.60014'를 따르기 때문이다.

$$P_2 = P_1 - P_1 \times E \times 0.60014 \quad (2)$$

여기서, P_2 : 수요 변화량
 P_1 : 초기 수요량
 E : 가격탄력성

각 가격탄력성별 평균 수요전력, 최대 수요전력 그리고 부하율을 표 6에 나타내었다.

표 6 가격탄력성에 따른 모의결과 요약

Table 6 Summary of the simulation results with different price elasticity

구분	가격탄력성				Base Case
	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	
평균수요전력 (kW)	591.80	574.83	559.50	550.97	477.40
최대수요전력 (kW)	910.02	1,129.28	1,355.34	1,463.08	556.99
부하율 (%)	65.03	50.90	41.81	37.66	85.71
	-0.5	-0.6	-0.7		
평균수요전력 (kW)	543.67	538.69	540.37		
최대수요전력 (kW)	1,554.40	1,639.72	1,792.61		
부하율 (%)	34.98	32.85	30.14		

일반적인 경우, 전력공급은 최대수요전력을 기준으로 산정된다. 달리 말해, 전기자동차의 충전으로 인하여 최대 수요전력이 계통에서 감당할 수 없을 정도로 증가한다면 추가적인 송배전설비가 요구됨을 의미한다. 가격탄력성이 -0.7인 경우, 최대 수요전력은 1,792 kW로 전기자동차 비-연계 계통의 최대 수요전력인 556.99 kW의 3배 이상을 가진다. 이는 향후 전기자동차 보급 증가 시 현행 충전요금제만으로 한계가 있음을 시사한다.

3. 결 론

현재 한국전력의 경우 경부하 시간대에 전기자동차의 충전을 장려하고 최대부하 시간대에 충전을 제한하고자 사용시간대별로

상이한 충전요금을 부과하는 충전요금제를 적용하고 있다. 그러나 해당 요금제에 대한 적정성 평가가 수행되지 않은 실정므로, 향후 전기자동차의 보급이 증가한 상황에서 해당 요금제가 얼마나 실효성을 가질 수 있는지에 대한 분석이 요구된다.

본 연구에서는 요금제의 적정성 평가를 위하여 가격탄력성 개념을 도입하였다. 분석과정에서 기존 선행연구에서 도출한 국내 전력수요에 대한 가격탄력성을 적용하였다. 모의 결과, 가격탄력성이 증가할수록 부하율이 심각하게 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 최대부하 시간대와 중간부하 시간대의 충전이 제한되면서 대부분의 충전이 경부하 시간대에 집중되기 때문이다. 또한 충전개시 시간은 가격탄력성에 민감하게 반응하지만, 충전이 개시된 후에는 상대적으로 둔감하게 반응하는 것을 확인하였다. 이를 통하여, 향후 전기자동차의 보급이 증가된 환경에서 현행 요금제만으로는 전력수요를 제한하고 제어하는데 한계가 있음을 확인할 수 있었다.

향후, 현행 전기자동차 충전요금제가 가지는 한계를 보완할 수 있는 최적 충전제어 방법에 대한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] "Toward an Ontario action plan for plug-in electric vehicles (PEVs)", WISE Report to Ontario's Centers for Excellence, May, 2010.
- [2] Jonathan Donadee and Marija Ilić, "Stochastic Co-Optimization of Charging and Frequency Regulation by Electric Vehicles", North American Power Symposium (NAPS), 2012.
- [3] Sekyung Han, Soohye Han, "Economic Feasibility of V2G Frequency Regulation in Consideration of Battery Wear", Energies Vol. 6, pp. 748-765, 2013.
- [4] Yuki Mitsukuri, Ryoichi Haraa, Hiroyuki Kitaa, Eiji Kamiyab, Shoji Takib and Eiji Kogureb, "Study on Voltage Regulation in a Distribution System Using Electric Vehicles — Optimal Real and Reactive Power Dispatch by Centralized Control", Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 134~140, 2013.
- [5] C. Roe, F. Evangelos, J. Meisel, A. P. Meliopoulos, and T. Overbye, "Power system level impacts of PHEVs," in Proc. 42nd Hawaii International Conference on System Sciences 2009, pp. 1-10.
- [6] L. Pieltain Fernandez, T. Gomez San Roman, R. Cossent,

C. M. Domingo, and P. Frias, "Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks" IEEE Transaction on Power System, vol. 26, no. 1, pp. 206-213, Feb. 2011.

[7] K. Dyke, N. Schofield, and M. Barnes, "The impact of transport electrification on electrical networks" IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 57, no. 12, pp. 3917-3926, Dec. 2010

[8] J. Taylor, A. Maitra, M. Alexander, D. Brooks, and M. Duvall, "Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations," IEEE Power Energy Society General Meeting, 2009

[9] A. Boulanger, A. Chu, S. Maxx, D. Waltz, "Vehicle electrification: Status and issues", Proceedings of IEEE, vol. 99, no. 6, pp.1116-1138, Jun. 2011

[10] O. Sundstorm, C. Binding, "Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints", IEEE Transaction on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 26-37, Mar. 2012

[11] Ha-Hyun Jo and Min-Woo Jang, "An Analysis of the Price Elasticity of Electricity Demand and Price Reform in the Korean Residential Sector Under Block Rate Pricing", Yonsei University, 2015

[12] Korea Smart Grid Institute, "A Research of Charging Infrastructure for Electric Vehicle," 2010

[13] "2016 Statistics of transportation registration", Ministry of Land, Infrastructure and Transport

[14] "2016 Analysis of driving record", Korea Transportation Safety Authority

[15] "2015 Statistics of driving distance for vehicle", Korea Transportation Safety Authority

[16] Hyun-Chul Kim, "An Analysis of the Weekly and Hourly Load Pattern", Korea Energy Economics Institute, 2013



김 주 락 (Joorak Kim)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 전자전기 공학부 졸업. 1999년 동 대학원 전기제어공학과 졸업(공학석사). 2010년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원
 Tel: 031-460-5411
 Fax: 031-460-5028
 E-mail: jrkim@krri.re.kr



김 철 환 (Chulhwan Kim)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수
 Tel: 031-290-7124
 Fax: 031-299-4137
 E-mail: hmwkim@hanmail.net

저 자 소 개



김 준 혁 (Junhyeok Kim)

1985년 5월 17일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2014년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(공학석사). 2014년~현재 동 대학원 정보통신공학부 박사과정
 Tel: 031-460-5913
 Fax: 031-460-5028
 E-mail: kjh30309@skku.edu