

Shapley Value를 이용한 수요반응 프로그램 참여자의 전력 구매비용 절감 기여도 산정

논 문
58-12-9

Shapley Value-Based Method for Calculating the Contribution of Retail Customers Participating in Demand Response Program

김 지 희* · 위 영 민** · 주 성 관†
(Ji-Hui Kim · Young-Min Wi · Sung-Kwan Joo)

Abstract - Demand response (DR) can be used to improve the efficiency of electricity markets and increase the reliability of power systems. As more utilities attempt to reduce the purchasing costs by implementing DR programs strategically, there is an increasing need for studies of how to allocate the reduced purchasing costs among DR program participants. The rebates or incentives can be given to DR program participants in proportion to the participants' contributions to the reduced purchasing costs. This paper presents Shapley Value-based method to determine the DR program participants' contributions to the reduced purchasing costs. A numerical example is presented to validate the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Demand Response, Shapley Value, Load Shifting, Electricity Purchase Cost

1. 서 론

전력시장의 수요반응(DR : Demand Response) 프로그램은 소비자의 전력사용 패턴의 변화와 전력사용 감소를 유도하며, 첨두부하시간(On-Peak Period)에서의 전력사용을 감소 시킴으로써 전력 설비의 효율적인 투자와 계통운영을 도모한다. 또한 수요반응 프로그램은 전기의 생산과 수송에 필요한 발전 및 송전 시설의 규모를 줄일 뿐만 아니라 시장가격 감소를 유도한다. 그리고 수요반응 프로그램을 통해 계통의 신뢰도 저하 문제 시 계통운영자(ISO : Independent System Operator)는 계통운영의 여유도를 증가시킬 수 있다[1].

현재까지 수요반응 프로그램에 관련된 많은 연구가 진행되었다. 미국의 캘리포니아 주는 주 전력 가격 책정 시험(SPP : California's Statewide Pricing Pilot)을 시행함으로써 수요반응 프로그램에 대한 소비자들의 반응을 조사하였다[2]. 또한 캐나다의 경우 온타리오 주에서 수요반응 프로그램을 시험 실시(OSPP : Ontario Smart Price Pilot)함으로써 다양한 수요반응 프로그램에 대한 장, 단점을 분석하였다[3]. 이 밖에도 수요반응 프로그램으로 인한 전력비용 절감에 대한 연구[4]와 수요반응 프로그램에 참여하는 전력 공급자 및 소비자 간의 관계 고찰에 관한 연구[5], 수요반응 프로그램의 새로운 방향 제시[6] 연구 등이 수행되었다.

협조적 게임이론 중 Shapley Value는 특정집단이 연합에 참가함으로써 얻게 되는 가치를 참가자들에게 분배하는 방법

이다. 참고논문 [7]에서는 수요반응 프로그램 적용 시 계통운영자의 총 발전비용 변화량에 따른 각 소비자의 기여도를 Shapley Value를 이용하여 산정하는 선행연구가 수행되었다. 본 논문에서는 선행연구 [7]을 보완하여 전력회사의 총 전력 구매비용 절감량 도출 후, 수요반응 프로그램에 참여한 소비자의 총 전력 구매비용 절감에 기여한 정도를 Shapley Value를 이용하여 산정하는 방법을 제안한다.

2절에서는 Shapley Value를 이용하여 수요반응 프로그램으로 인한 전력회사의 총 전력 구매비용 절감량을 부과된 이 변화한 각 소비자에게 분배하는 방법 및 소비자의 기여도를 산정하는 방법을 제시한다. 또한 3절에서는 제안된 Shapley Value 및 기여도 산정 방법을 이용하여 사례연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 수요반응 프로그램으로 인한 소비자의 전력 부하 패턴 변화

수요반응 프로그램은 시간대별 요금차별에 의해 소비자의 전력사용 패턴의 변화를 유도하기 위해 고안된 경제성기반 수요반응(Economic-based demand response)과 계통신뢰도가 크게 위협받는 경우 소비자의 전력사용 감소를 유도하기 위해 고안된 신뢰도기반 수요반응(Reliability-based demand response)으로 분류할 수 있다. 이 중 경제성기반 수요반응 프로그램은 소비자가 지불하는 전기 요금을 시간대 별로 차등 산정함으로써 소비자가 자발적으로 부하패턴을 변화하도록 유도하는 방법이다. 현재 소비자의 부하패턴 변화를 유도하는 수요반응 프로그램으로는 계시별 요금제(TOU : Time-Of-Use), 피크 요금제(CPP : Critical-Peak Pricing), 실시간 요금제(RTP : Real-Time Pricing)등이 있다[1]. 경

* 준 회원 : 고려대 공대 전자전기공학과 석사과정

** 정 회원 : 고려대 공대 전기전자전파공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 고려대 공대 전기전자전파공학부 조교수

E-mail : skjoo@korea.ac.kr

접수일자 : 2009년 8월 20일

최종완료 : 2009년 9월 7일

제성기반 수요반응 프로그램을 적용함으로써 전력수요는 첨두부하시간에서 중간/경부하시간(Mid/Off-Peak Period)으로 이동하게 되고 이로 인해 소비자의 부하패턴 변화 및 전력회사의 총 전력 구매비용이 절감된다.

수요반응 프로그램 적용 시 한계가격과 최대발전용량 등의 다양한 발전기 종류 및 발전기의 한계가격에 따른 각 시간대 별 계통한계가격(SMP : System Marginal Price)의 변화를 고려한다면 수요반응 프로그램으로 인한 전력회사의 총 전력 구매비용의 절감은 더욱 두드러질 것이다.

본 논문에서는 소비자의 부하패턴 변화에 따른 전력회사의 총 전력 구매비용 절감을 통하여 수요반응 프로그램 참여 시 소비자가 전력회사의 총 전력 구매비용 절감량에 기여한 정도를 산정한다.

2.2 Shapley Value를 이용한 전력회사의 총 전력 구매비용 절감량 분배

협조적 게임이론에서 Shapley Value는 일반적인 비용 분배 시 적용되는 방법이다. Shapley Value는 특정 집단이 연합에 참가함으로써 얻게 되는 가치를 통해 비용을 분배받기 때문에, 참여 집단은 공정하고 반복 가능한 분배 비율을 얻을 수 있다. 또한 Shapley Value를 통해 각 참가자에게 배분되는 가치는 독립적이고, 각각의 참가자들에게 배분된 가치의 합은 총 가치와 같다[8]. Shapley Value는 모든 구성요소의 배열순서와는 무관하며 가중치 또한 동등하게 부과된다[9].

가치 분배에 참여하는 특정 집단의 참가자에 대한 Shapley Value는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_i^* = \sum_{\substack{S \subseteq N \\ i \in S}} \frac{(|S|-1)!(|K|-|S|)!}{|K|!} \cdot [v(S) - v(S - \{i\})], \forall i \in N \quad (1)$$

여기서 X_i^* 는 참가자 i 에게 분배되는 가치이고 K 는 참가자 i 의 집합, $|K|$ 는 참가자들의 총 수이다. 그리고 S 는 참가자 i 로 구성되어 있는 특정 집단들의 연합이며, $|S|$ 는 특정 집단을 구성하고 있는 참가자들의 수를 나타낸다. $v(S)$ 는 Shapley Value를 적용하는 문제의 가치함수(value function)이고 N 은 게임에 참여하는 참가자 수를 의미한다.

위 식에서 $[v(S) - v(S - \{i\})]$ 부분은 참가자 i 가 연합 S 에 참여함으로써 나타나는 기여도를 나타내며 $|K|!$ 은 총 연합의 참가자들이 만들 수 있는 연합의 순열을 설명한다. 또한 $(|S|-1)!$ 는 처음 $(|S|-1)$ 의 참가자가 선행할 수 있는 순서를 나타내고 $(|K|-|S|)!$ 는 나머지 $(|K|-|S|)$ 의 참가자들이 전체 $(|S|-1)!(|K|-|S|)!$ 에서 행할 수 있는 순서를 나타낸다. 즉, $(|S|-1)!(|K|-|S|)!/|K|!$ 은 특정집단에게 분배되는 가치를 할당하는 가중치 요소라 할 수 있다[10],[11].

2.3 전력회사의 전력 구매비용 절감량에 대한 각 소비자의 기여도

수요반응 프로그램을 적용함으로써 도출되는 전력회사의

총 전력 구매비용 절감량에서, 각 소비자의 부하패턴 변화가 전력회사의 총 전력 구매비용 절감에 기여한 정도를 알아볼 것이다. 총 전력 구매비용 절감에 대한 각 소비자의 기여도는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{X_i^*}{v(S^{total})} \times 100 \quad [%] \quad (2)$$

여기서 α_i 는 수요반응 프로그램에 참여한 각 소비자의 부하패턴 변화에 따른 총 전력 구매비용 절감의 기여도를 나타내고 S^{total} 은 모든 소비자들이 수요반응 프로그램에 참여하였을 경우 수요반응 프로그램 적용 전·후에 따른 전력회사의 총 전력 구매비용 절감량을 나타낸다.

3. 사례 연구

본 절에서는 수요반응 프로그램으로 인한 각 소비자의 부하패턴의 변화 및 전력회사의 전력 구매비용 절감량을 알아보기 위해 Shapley Value를 이용한 각 소비자의 기여도 산정에 대한 사례연구를 수행하였다. 먼저 사례연구를 위한 발전기 별 한계가격 및 최대발전용량을 표 1에서 제시하였다.

표 1 각 발전기 별 한계가격 및 최대발전용량
Table 1 The Marginal Price and Maximum Capacity of Each generator

	한계가격[\$/MWh]	최대발전용량[MW]	
발전기	G1	10	200
	G2	30	100
	G3	50	215

다음으로, 사례연구의 부하패턴 특성 및 수요반응 프로그램 적용 전·후의 부하패턴 변화는 표 2와 같다.

표 2 각 부하 별 첨두/경부하시간 및 수요반응 프로그램 적용 전·후의 부하량

Table 2 The On/Off-Peak Period of Each Load and the Load Quantity Before/After Applying a DR Program

	시간대[시]	첨두부하시간	경부하시간	
L1	시간대[시]	9~15	0~9, 15~24	
	부하량 [MWh]	수요반응 프로그램 적용 전	120	60
		수요반응 프로그램 적용 후	80	73
L2	시간대[시]	10~14	0~10, 14~24	
	부하량 [MWh]	수요반응 프로그램 적용 전	250	40
		수요반응 프로그램 적용 후	190	52
L3	시간대[시]	12~18	0~12, 18~24	
	부하량 [MWh]	수요반응 프로그램 적용 전	145	52
		수요반응 프로그램 적용 후	105	65

표 2에서 부하 L1, L2, L3은 모두 하계 부하 곡선 형태를 나타내며 이를 첨두부하시간, 경부하시간으로 분류하였다. 또한, L1, L2, L3의 하루 동안의 총 부하량은 1800MW로 동일하고 각 부하 시간대 별 첨두부하시간, 경부하시간, 수요반응 프로그램 적용 전·후의 부하량이 각기 다르다. 수요반응 프로그램 적용 시 첨두부하시간에서 경부하시간으로 이동하는 부하량은 240MW로 일정하고, 총 부하량 감소(Load Shedding) 없이 부하 이동(Load Shifting)만 발생한다고 가정한다. 마지막으로 첨두부하시간에서 경부하시간으로 이동한 부하량은 시간대 별로 고르게 분포된다.

표 2를 바탕으로 각 부하별 수요반응 프로그램 적용 전·후의 각 소비자 별 부하패턴을 그림 1~그림 3에서 나타내었다.

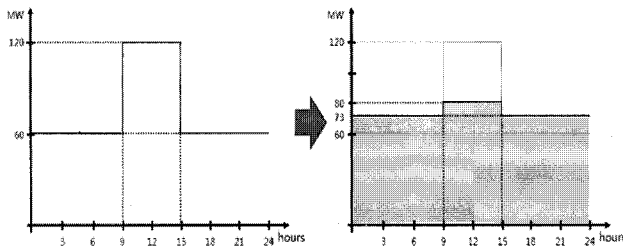


그림 1 L1의 수요반응 프로그램 적용 전·후의 부하패턴
Fig. 1 The Load Pattern of L1 Before/After a DR Program

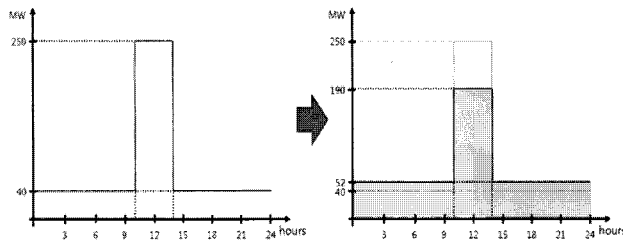


그림 2 L2의 수요반응 프로그램 적용 전·후의 부하패턴
Fig. 2 The Load Pattern of L2 Before/After a DR Program

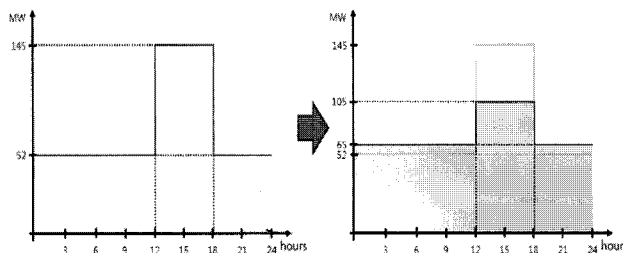


그림 3 L3의 수요반응 프로그램 적용 전·후의 부하패턴
Fig. 3 The Load Pattern of L3 Before/After a DR Program

다음으로, 시나리오 별 수요반응 프로그램 적용 현황을 표 3에서 나타내었다.

표 3 각 시나리오 별 수요반응 프로그램 적용 현황
Table 3 The Situation of Each Scenario by a DR Program

	L1	L2	L3
기본 시나리오	x	x	x
시나리오 1	o	x	x
시나리오 2	x	o	x
시나리오 3	x	x	o
시나리오 4	o	o	x
시나리오 5	o	x	o
시나리오 6	x	o	o
시나리오 7	o	o	o

위 표에서 'x'표시는 해당 부하에 수요반응 프로그램을 적용하지 않았다는 것을 의미하고, 해당 부하에 수요반응 프로그램을 적용하였을 시에는 'o'으로 표시한다.

표 3에서 제시한 수요반응 프로그램 적용 시나리오를 바탕으로 L1, L2, L3의 부하패턴 총 합에 해당 시간대에 따른 부하량과 각 시간대 별 계통한계가격을 시나리오 별로 정리하여 표 4에 나타내었다.

표 4 시간대 별 각 부하패턴의 합계, 시나리오 별 부하량 변화 및 계통한계가격(SMP), 총 전력 구매비용
Table 4 Total Sum of Hourly Load-Patterns, the Variation of Each Scenario, SMP, and Total Electricity Purchase Cost

	시간대 (시)	0	9	10	12	14	15	18	총 전력 구매비용 [\$]
		9	10	12	14	15	18	24	
기본 시나리오	부하량 [MWh]	152	212	422	515	305	245	152	160,160
	SMP [\$ /MWh]	10	30	50	50	50	30	10	
시나리오 1	부하량 [MWh]	165	172	382	475	265	258	165	143,340
	SMP [\$ /MWh]	10	10	50	50	30	30	10	
시나리오 2	부하량 [MWh]	164	224	362	455	317	257	164	152,000
	SMP [\$ /MWh]	10	30	50	50	50	30	10	
시나리오 3	부하량 [MWh]	165	225	435	475	265	205	165	148,900
	SMP [\$ /MWh]	10	30	50	50	30	30	10	
시나리오 4	부하량 [MWh]	177	184	322	415	277	270	177	134,700
	SMP [\$ /MWh]	10	10	50	50	30	30	10	
시나리오 5	부하량 [MWh]	178	185	395	435	225	218	178	137,920
	SMP [\$ /MWh]	10	10	50	50	30	30	10	
시나리오 6	부하량 [MWh]	177	237	375	415	277	217	177	140,500
	SMP [\$ /MWh]	10	30	50	50	30	30	10	
시나리오 7	부하량 [MWh]	190	197	335	375	237	230	190	129,280
	SMP [\$ /MWh]	10	10	50	50	30	30	10	

표 4에서 시나리오 별 총 전력 구매비용은 각 시간대에 따른 계통한계가격과 부하량, 해당시간을 곱한 값의 총 합을 의미한다. 세 개의 부하패턴 합에 수요반응 프로그램을 적용하기 전(기본 시나리오)을 그림 4에서 나타내었으며, 수요반응 프로그램을 적용한 후(시나리오 7)의 세 개의 부하패턴 합을 그림 5에서 나타내었다.

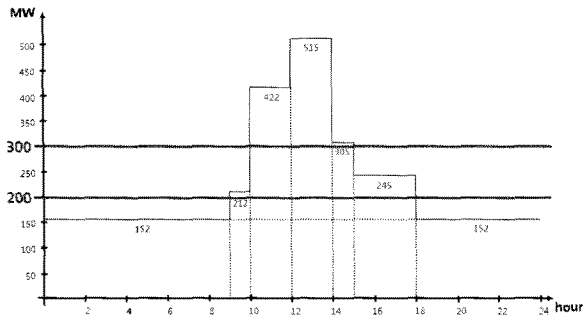


그림 4 수요반응 프로그램 적용 전(기본 시나리오) 총 부하 패턴의 합

Fig. 4 Total Sum of Load Patterns Before Applying a DR Program(Base Scenario)

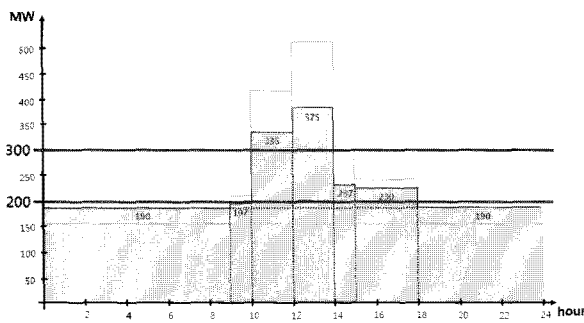


그림 5 수요반응 프로그램 적용 후(시나리오 7) 총 부하 패턴의 합

Fig. 5 Total Sum of Load Patterns Before Applying a DR Program(Scenario 7)

Shapley Value를 이용한 전력회사의 총 전력 구매비용 변화량에 따른 소비자의 기여도를 나타내기 위해 기본 시나리오와 해당 시나리오 간의 총 전력 구매비용의 절감량을 가치함수로 설정하며, 이에 대한 설명을 표 5에서 나타내었다.

표 5 각 시나리오 별 Shapley Value의 가치함수 및 구매비용 절감량

Table 5 The Value Function of Shapley Value and the reduction in the Electricity Purchase Cost of Each Scenario

	Shapley Value의 가치함수	구매비용 절감량[\$]
기본 시나리오	-	0
시나리오 1	$v(\{Load 1\})$	16,820
시나리오 2	$v(\{Load 2\})$	8,160
시나리오 3	$v(\{Load 3\})$	11,260
시나리오 4	$v(\{Load 1, Load 2\})$	25,460
시나리오 5	$v(\{Load 1, Load 3\})$	22,240
시나리오 6	$v(\{Load 2, Load 3\})$	19,660
시나리오 7	$v(\{Load 1, Load 2, Load 3\})$	30,880

앞 서 제시한 표 1~표 5를 바탕으로 L1에 대한 Shapely Value의 계산 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_1^* &= \frac{(1-1)!(3-1)!}{3!} \cdot [v(\{Load 1\}) - v(\{Load 1\} - \{Load 1\})] \\
 &+ \frac{(2-1)!(3-2)!}{3!} \cdot [v(\{Load 1, Load 2\}) - v(\{Load 1, Load 2\} \\
 &\quad - \{Load 1\})] \\
 &+ \frac{(2-1)!(3-2)!}{3!} \cdot [v(\{Load 1, Load 3\}) - v(\{Load 1, Load 3\} \\
 &\quad - \{Load 1\})] \\
 &+ \frac{(3-1)!(3-3)!}{3!} \cdot [v(\{Load 1, Load 2, Load 3\}) \\
 &\quad - v(\{Load 1, Load 2, Load 3\} - \{Load 1\})] \\
 &= \frac{1}{3} \cdot (16820 - 0) + \frac{1}{6} \cdot (25460 - 8160) \\
 &\quad + \frac{1}{6} \cdot (22240 - 11260) + \frac{1}{3} \cdot (30880 - 22240) \\
 &= [\$] 14060
 \end{aligned}$$

위와 같은 방식으로 L2, L3의 Shapley Value를 계산하면 $X_2^* = \$ 8440$, $X_3^* = \$ 8380$ 이 도출된다. 결과적으로, Shapley Value를 이용하여 도출된 각 부하 별 새로운 전력 구매비용 변화량은 L1의 경우 시나리오 1의 총 전력 구매비용 변화량 (\$16820)보다 \$2760 감소하고 L2는 시나리오 2의 총 전력 구매비용 변화량(\$8160)보다 \$280 증가한다. 또한 L3은 시나리오 3의 총 전력 구매비용 변화량(\$11260)보다 \$2880 감소한다.

다음은 Shapely Value를 이용하여 도출된 각 부하 별 새로운 전력 구매비용 변화량을 바탕으로 수요반응 프로그램 적용 시 고려될 수 있는 총 전력 구매비용 절감에 대한 소비자의 기여도를 나타낸 것이다.

$$\alpha_1 = \frac{X_1^*}{v(\{Load 1, Load 2, Load 3\})} \times 100 = \frac{14060}{30880} \times 100 = 45.53 [\%]$$

$$\alpha_2 = \frac{X_2^*}{v(\{Load 1, Load 2, Load 3\})} \times 100 = \frac{8440}{30880} \times 100 = 27.33 [\%]$$

$$\alpha_3 = \frac{X_3^*}{v(\{Load 1, Load 2, Load 3\})} \times 100 = \frac{8380}{30880} \times 100 = 27.14 [\%]$$

위 식에서 알 수 있듯이, 수요반응 프로그램 적용 시 전력회사의 총 전력 구매비용 절감량에 대한 부하 L1의 기여도는 45.53%, L2의 기여도는 27.33%, L3의 기여도는 27.14%이다.

4. 결 론

본 논문에서는 Shapley Value를 이용하여 수요반응 프로그램 적용 시 전력회사의 총 전력 구매비용 절감량에 대한 각 소비자의 기여도를 산정하는 방법을 제시하였다. Shapley Value를 이용하여 도출한 총 전력 구매비용 절감량에 대한 각 부하패턴의 기여도는 수요반응 프로그램에 참여한 소비자에게 인센티브를 산정할 때 고려되는 요소로 반영할 수 있을 것이다. 향후에는 수요반응 프로그램 적용 시 각 소비자의 부하패턴 변화로 인한 전력회사의 총 전력 구매비용 절감을 소비자의 관점에서 평가, 분석하여 각 소비자에게 공정한 인센티브를 산정하는 방법에 대한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행된 전력산업 연구개발사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] "Assessment of Demand Response and Advancing Metering," FERC Report, Aug. 2006
- [2] S. S. George, A. Faruqi, "California's Statewide Pricing Pilot-Overview of Key Findings," MADRI Advanced Metering Infrastructure Workshop, May. 2005
- [3] Ontario Energy Board, IBM Global Business Services, eMeter Strategic Consulting, "Ontario Energy Board Smart Price Pilot Final Report," Ontario Energy Board, July. 2007
- [4] J. G. Roos, I. E. Lane, "Industrial Power Demand Response Analysis for One-Part Real-Time Pricing," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 13, No. 1, pp.159-164, Feb. 1998
- [5] E. Celebi, J. D. Fuller, "A Model for Efficient Consumer Pricing Schemes in Electricity Markets," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No. 1, pp.60-67, Feb. 2007
- [6] S. Valero, M. Ortiz, C. Senabre, C. Alvarez, F. J. G. Franco, A. Gabaldon, "Methods for Customer and Demand Response Policies Selection in New Electricity Markets," IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 1, No. 1, pp.104-110, Jan. 2007
- [7] 김지희, 위영민, 주성관, "Shapley Value를 이용한 수요 반응 프로그램 참여자의 기여도 산정 연구," 대한전기학회 하계학술대회, 2009
- [8] J. C. Peng, H. Jiang, Y. H. Song, "A Weakly Conditioned Imputation of an Impedance-Branch Dissipation Power," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No. 4, pp.2124-2133, Nov. 2007
- [9] 오정석, "수익분배의 경제학," 삼성경제연구소, 2007
- [10] X. Tan, T. T. Lie, "Application of the Shapley Value on Transmission Cost Allocation in the Competitive Power Market Environment," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No. 1, pp.15-20, Jan. 2002
- [11] A. Huang, "Coordination and Economic Analysis of Inter-Regional Electricity Markets," M.S. Thesis, North Dakota State University, pp.56-57, Dec. 2005

저 자 소 개



김 지 희 (金志姬)

1984년 9월 2일생. 2008년 고려대학교 공과대학 전기전자전파공학부 졸업(공학사). 현재, 고려대학교 공과대학 전자전기공학과 석사과정.



위 영 민 (魏永民)

1980년 4월 7일생. 2005년 중앙대학교 공과대학 전자전기공학부 졸업(공학사). 2005년 삼성전자 엔지니어 근무. 현재, 고려대학교 공과대학 전기전자전파공학과 박사과정.



주 성 관 (朱成官)

1971년 7월 6일생. 1995년 고려대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1999년 University of Washington 졸업(공학석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재, 고려대학교 전기전자전파공학부 조교수.