

# 수요자원의 등록 정보 및 참여 정보를 이용한 수요 반응 모델링

논 문
60-6-4

## Modeling Demand Response by Using Registration and Participation Information of Demand Resources

곽형근\* · 김진오<sup>†</sup> · 신동준\*\* · 이창호\*\*\*  
(Hyung-Geun Kwag · Jin-O Kim · Dong-Joon Shin · Chang-Ho Rhee)

**Abstract** - This paper proposes the registration information, the participation information for classifying demand resources participate in demand response program. Modeling demand resources from them, it evaluates values of demand resources. Specially assuming that ignore the loss in power system, they take a role as generation. This paper proposes how to evaluate demand resources' values. Case study shows that demand response operators schedule efficiently demand response program by using index of such as the registration information the participation information of demand resource

**Key Words** : Demand response, Power system, Demand response scheduling, Power economics

### 1. 서 론

최근 발전 자원의 물리적, 기술적 한계 때문에 수요자원의 효율적인 활용이 주요한 이슈가 되고 있다. 또한 최근 발전 시스템의 기술적 발전으로 인하여 수요자원의 활용이 활발해지고 있는데 수요반응(Demand Response, DR)이 최근 주요 이슈가 되고 있다. 수요반응은 소비자들의 소비패턴을 변화시키는 것으로 전력시장 가격의 폭등을 방지하며, 전력 공급의 신뢰도를 향상시켜 사회적인 복지 등을 개선하는 등 다양한 효과들을 가진다[1-2]. 수요 반응은 고객 자신의 전기 사용의 변화로 정의하며 그 목적 전기 사용 변화의 수단에 따라 인센티브 기반 수요반응과 가격 기반 수요반응으로 구분한다[1]. 이러한 수요반응은 주체가 고객인 점에서 현재의 전력 시스템에서 중요한 역할을 하는데, 전력의 공급이 단일 방향으로 이루어져있던 기존의 전력 시스템에 양방향 전력 공급으로의 패러다임의 변화를 가져오고 있다. 수요 반응은 그 주체가 고객이며 최근의 연구들 또한 고객의 행동을 모형화하는데 많은 연구가 진행되고 있다. 참고문헌 [2]는 고객의 행동을 가격 탄력성을 구성하여 나타내었고, 이를 바탕으로 참고문헌 [3-7]는 고객의 특성에 따른 전력 시스템에 끼치는 영향을 연구하였다. 참고문헌 [7-8]은 고객의 특성을 자세히 묘사하고 구분하여 수요 자원을 클러스터링하는 방법을 제안하고 있다. 그러나 위의 연구들은 수요 자원을 가격 탄력성으로만 평가하고 있어 수요 자원의 실제

가치를 제한적으로 평가하고 있다.

수요 반응의 효과를 분석하고 성공적인 수요 반응을 운영하기 위해서는 신뢰성 높은 가격 탄력성을 계산하는 것이 굉장히 중요한 일이다. 그러나 현재 수요 자원의 반응 특성에 관한 실제 정보가 빈약하여 가격 탄력성에 대한 신뢰성이 높지 않은 실정이다. 이러한 연유로 해외 ISO들은 수요 자원 등록 시 DR 운영에 필요한 여러 가지 정보를 요구하고 또한 고객들과 협의를 통하여 보완하고 있는 실정이다. 예를 들면 NYISO는 DR 프로그램 운영 시에 감축 가능 용량을 정의하여 실제로 고객이 수요 자원을 등록할 때 감축 가능 용량 정보, 감축 지속 시간, 응동 시간 등을 요구한다 [11-12]. 이러한 기본적인 정보들을 어떤 하나의 지수로써 정의할 필요가 존재한다. 본 논문에서는 수요자원의 가치를 다양하게 분석하기 위하여 DR 운영에 필요한 정보들을 하나의 지수로 정의하고 이를 바탕으로 각각의 수요자원을 등록 정보 및 참여 정보로 구분하여 수요자원의 가치를 평가하는 방법을 제안한다.

### 2. 수요 자원의 등록 정보 및 참여 정보

수요 반응 프로그램에 참여하는 수요 자원은 프로그램의 자격 조건을 만족하여야 한다[11-12]. 자격 조건을 만족하는 수요 자원은 수요 반응 프로그램을 운영하는 운영자에게 수요 반응 프로그램의 참여에 관한 초기 정보를 제공하여야 하는데 이러한 초기 정보들은 실제로 DR 이벤트가 발령된 경우 여러 제약조건으로 인하여 초기 정보와는 다르게 나타날 수 있다. 이런 수요 반응 이후의 실제 참여 정보들은 그 수가 많아질수록 어떤 합리적인 값으로 표현이 가능한데 이를 바탕으로 프로그램 운영자는 수요 자원의 DR 참여 정보를 객관적으로 평가할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 수요 자원의 수요 반응 프로그램의 초기 참여 정보와 수요반응

\* 정 회 원 : 한양대 공대 전기공학과 박사과정

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 한양대 전기공학과 교수

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

\*\* 정 회 원 : 한국전기연구원 전력산업연구센터 선임연구원

\*\*\* 정 회 원 : 한국전기연구원 전력산업연구센터 센터장

접수일자 : 2011년 1월 5일

최종완료 : 2011년 4월 27일

표 1 수요 자원들의 등록 정보 및 참여 정보

Table 1 Registration and Participation information of DR resources

등록 정보	참여 정보
Magnitude	Participation Rate
Duration	Load Response Rate
Frequency	Average Duration
Variable Cost	Frequency Rate
Fixed Cost	Elasticity

프로그램의 사후 실적 정보를 정의하여 수요 자원을 평가하는 방법을 제안한다.

### 2.1 수요 자원의 등록 정보

수요 자원의 합리적이고 효율적인 평가를 위하여 본 논문에서는 DR 프로그램 발령 사전 정보인 등록 정보와 DR 프로그램 수행 후 프로그램 참여 정도를 나타내는 참여 정보로 구분하여 수요 자원을 평가한다. 표 1은 본 연구에서 정의할 수요 자원의 등록 정보와 참여 정보를 나타낸다.

수요 자원의 등록 정보는 DR 프로그램의 시행 이전에 조사하여 부하의 유형을 분류하는 기준으로 활용한다. 실제로 PJM이나 NYISO는 감축 가능한 최대 용량 또는 감축 지속 시간 등을 정의하고 있으며 고객이 수요 자원을 등록할 때 이러한 정보를 요구하고 있다[11-12]. 이러한 해외 ISO들의 실 사례를 바탕으로 본 논문에서는 DR 자원의 등록 정보를 다음의 5 가지로 구분하여 정의한다. 감축참여용량(Magnitude)이란  $j$  고객이 수요반응 프로그램에 입찰 또는 참여할 수 있는 최대 용량( $M^j [kW]$ )으로 정의한다. 감축 지속시간(Duration)이란 소비자가 수요반응 프로그램에 1회에 참여하는 최소 또는 최대 지속 시간 ( $D_{\min}^j [hr/frequency]$ ,  $D_{\max}^j [hr/frequency]$ )으로 정의한다. 감축참여횟수(Frequency)란 소비자가 1년 중 수요반응 프로그램에 참여 가능한 횟수( $F^j [frequency/yr]$ )로 정의한다. 공지시간(Notification)이란 DR 프로그램 메시지를 받는데 소비자가 필요로 하는 최소 시간( $N [시간(y, m, d, m)]$ )으로 정의한다. 계통운영자가 정한 DR 감축 최소 단위(0.1MW)당 자원의 최소 보상비용을 입찰 가변 비용( $VC^j$ ), DR 이벤트 시행 시 발생하는 고정 비용인 입찰 고정 비용( $FC^j$ )로 정의한다.

### 2.2 수요 자원의 참여 정보

수요 자원의 참여 정보는 DR 프로그램의 시행 이후 부하의 참여 이력을 업데이트하여 부하의 유형을 분류하는 기준으로 활용한다. DR 자원의 참여 정보는 다음의 5 가지로 구분하여 정의한다. 참여용량율(Participation Rate, PR)이란 참여자가 등록한 감축참여용량(Magnitude) 중 수요반응 프

로그램에 참여한 용량 비로 정의한다.

$$PR_k^j = \frac{DR_k^j}{M_k^j} DR_{event}(1||0) \quad (1)$$

여기서  $j$ 는  $j$  번째 수요 자원,  $DR_k^j$ 는  $k$  번째 DR 이벤트 발령 시  $j$  수요 자원의 부하 감축량,  $DR_{event}(1) \equiv 1$ ,  $DR_{event}(0) \equiv 0$ 을 나타낸다.

부하반응율(Load Response Rate, LRR)이란 참여자의 최대 소비 전력 중 수요반응 프로그램에 참여한 용량 비()로 정의한다.

$$LRR_k^j = \frac{DR_k^j}{CBL_k^j} DR_{event}(1||0) \quad (2)$$

여기서  $CBL_k^j$ 은  $j$  수요 자원의 고객 기본 부하(customer baseline load, CBL)을 나타낸다. CBL은 부하 감축량을 결정하기 위하여 수요자원의 매 시간 에너지 소비량의 평균 값이다[11-12].

평균지속시간(Average Duration, d)이란 부하 감축의 지속시간( $d_k^j [hr]$ )으로 정의한다.

$$d_k^j = t_k^j \quad (3)$$

여기서  $t_k^j$ 는  $k$  번째 DR 이벤트 발령 시  $j$  수요 자원이 부하 감축을 지속한 시간이다.

참여율(frequency rate)이란 1년 중 DR 자원의 DR 프로그램 실제 참여 횟수로 정의한다.

공지율(Notification Rate)이란 소비자가 DR 프로그램 메시지를 받고 난 이후 응답까지 걸리는 시간( $n [hr]$ )로 정의한다. 공지응답율(Notification Response Rate)이란 소비자가 받은 공지 중 참여자가 응답한 공지 비율로 정의한다. 탄력성(Elasticity)이란 전기 가격의 변화율에 따른 DR 감축량의 변화율( $\epsilon_{DR}^j$ )로 정의한다.

### 2.3 등록 정보, 참여 정보의 계산

최대 부하  $D_0$ 를 가지는  $j$  고객의 수요 자원이 감축참여 용량  $M^j$ , 최초, 최대참여지속시간  $D_{\min}^j$ ,  $D_{\max}^j$ , 참여가능횟수  $F^j$ 를 가지고 DR 프로그램에 등록하였다고 가정한다. 이때 전체  $T$  시간 동안 DR 이벤트  $DR_1$ ,  $DR_2$ 가  $t_1$ 시에서  $t_2$ 시까지,  $t_3$ 시에서  $t_4$ 시까지 다음의 그림 (1)처럼 발령되었고  $j$  고객의 수요 자원은  $DR_1$  이벤트 동안  $DR_1^j$ 를 감축하였고  $DR_2$  이벤트 동안  $DR_2^j$ 를 감축하였다.

표 2는 DR 프로그램 시행 이후 수요 자원이 참여한 결과를 바탕으로 계산한 참여 정보이다.

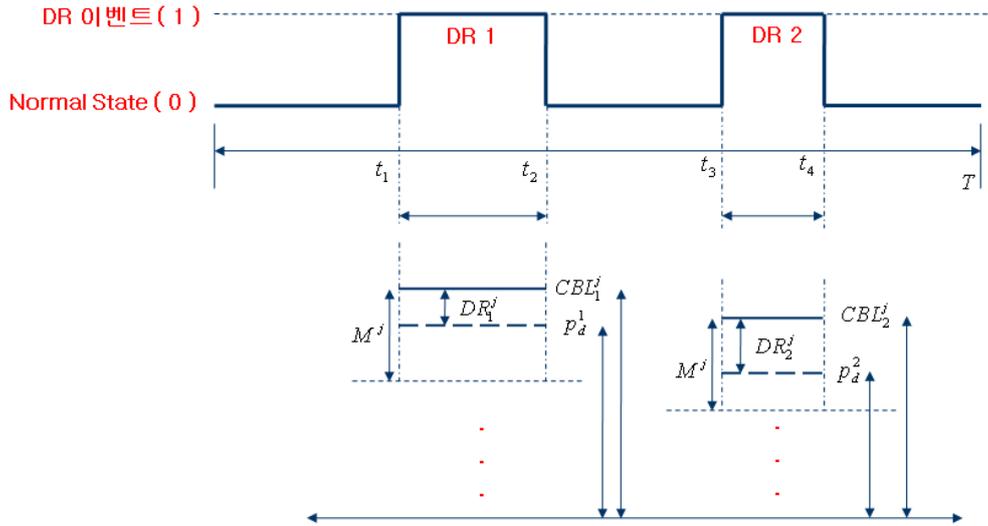


그림 1 수요 자원의 참여 정보를 계산 예시  
 Fig. 1 An Example of calculating participation information of DR resources

표 2 그림 1의 수요 자원의 참여 정보 계산 결과  
 Table 2 Results of Calculating Participation information of DR resources

참여 정보	참여 정보
Participatin Rate	$PR_1^j = DR_1^j / M^j$
	$PR_2^j = DR_2^j / M^j$
	$PR^j = \frac{1}{2}(PR_1^j + PR_2^j)$
Load Response Rate	$LRR_1^j = DR_1^j / CBL_1^j$
	$LRR_2^j = DR_2^j / CBL_2^j$
	$PR^j = \frac{1}{2}(LRR_1^j + LRR_2^j)$
Average Duration	$d_1^j = 2, d_2^j = 1$
Frequency Rate	$f^j = 2/T$

2.4 수요 자원의 가치 평가

수요자원이 DR 프로그램에 참여하는 경우 발전기 변동비 곡선과 부하의 수요 곡선이 그림 2처럼 나타난다. 그림 2에서 공급 곡선은 발전기의 가변 비용을 나타내고 수요 곡선은 수요의 한계 비용을 나타낸다. 수요 곡선의 수직선은 모든 수요 자원이 전기의 가격에 반응하는 것은 아님을 나타내는데 이러한 수직선은 무한한 한계 비용을 가지고 가격에 순응하는 고객을 나타낸다. 반면 수요 곡선의 음의 기울기 부분은 유한한 한계 비용을 가지고 가격에 반응하는 고객을 나타낸다. 수요 곡선의  $DR_1$ 은 첫 번째 DR 이벤트 발령 시 수요자원들의 총 감축량이 되며  $CBL_1$ 은 DR 이벤트 발령 이전의 전체 고객들의 기본 부하를 나타낸다. 따라서 음의 기울기 아래 부분은 수요반응이 일어난 부분을 의미하며 수요 감축에 대한 수요 자원들의 최소 보상 비용으로써 수요 자원의 가치를 나타낸다. 수요자원들의 수요 감축에 대한

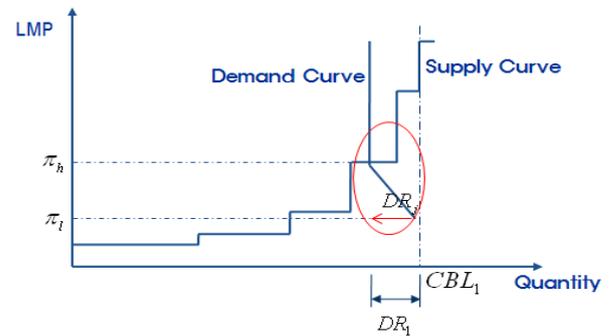


그림 2 전기 가격에 따른 DR  
 Fig. 2 DR on electricity market prices

가치를 다음의 그림 3의 그래프처럼 나타낼 수 있다. DR 실적에 관한 과거 자료가 없는 경우, 수요자원의 가치는 수요자원의 등록정보의 입찰 가변 비용과 입찰 고정 비용을 기준으로 평가하는데 다음의 식 (5)와 같이 나타난다.

$$LMP^j = VC^j DR^j + FC^j \tag{5}$$

DR 실적에 관한 과거 자료가 믿을 만한 경우, 수요자원의 가치는 수요자원의 참여정보의 부하반응율을 기준으로 평가하는데 식 (2)와 정의로부터 다음의 식 (6)과 같이 나타난다[2].

$$\epsilon = - \frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta \pi}{\pi}}$$

이므로

$$\epsilon_k^j = - LRR_k^j \frac{\pi_l}{\pi_h - \pi_l} \tag{6}$$

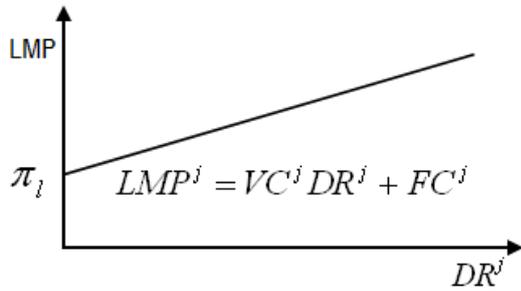


그림 3 수요 자원의 가치 평가  
Fig. 3 Evaluating values of demand resources

$j$  수요 자원의 가격 탄력성은 각 DR 이벤트의 가격 탄력성의 평균값이며 다음의 식 (7)과 같이 나타난다.

$$\epsilon_{DR}^j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon_k^j \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 DR 실적에 관한 자료의 수이다.

이때 수요자원의 가치는 식 (5)와 (7)로부터 다음의 식 (8)과 같다.

$$LMP^j = -\epsilon_{DR}^j DR^j + \pi_{DR}^j \quad (8)$$

여기서  $\pi_{DR}^j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \pi_{k,l}^j$ 이다.

수요자원들의 가치를 결정할 때 DR 실적 자료가 많을수록 객관적이고 합리적인 판단이 가능하다. 다음 절에서 DR 실적 자료의 개수에 따라 수요 자원의 가치를 평가한다.

### 3. Case Study

그림 4의 6모선 시스템에 버스 1에는 G1,G2가 버스 2에는 G3, G4, G5가 있다고 가정하고 발전기의 최대 발전양과 한계 비용은 다음의 표 3과 같다.

표 3 발전기의 최대 발전량 및 한계 비용

Table 3 Marginal cost and maximum generation

	최대 발전량 [Mw]	한계 비용 [won/KwHr]
G1	60	50
G2	40	60
G3	30	72.5
G4	18	95
G5	10	180

그림 4의 6모선 시스템의 각각의 부하 버스에서 12시부터 14시사이 수요가 50Mw, 40Mw, 35Mw, 25Mw가 예상되어 DR 이벤트 DR<sub>1</sub>이 발령되고, 16시부터 17시까지 수요가 40Mw, 45Mw, 30Mw, 20Mw가 예상되어 DR이벤트 DR<sub>2</sub>가 발령되었다고 가정한다. 그림 5는 DR 이벤트가

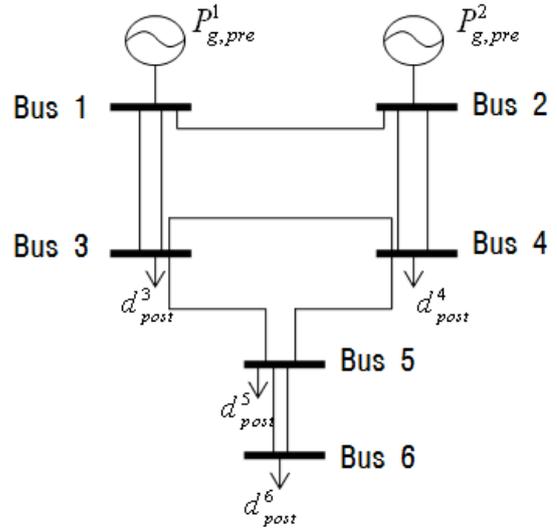


그림 4 모의시스템  
Fig. 4 Test System

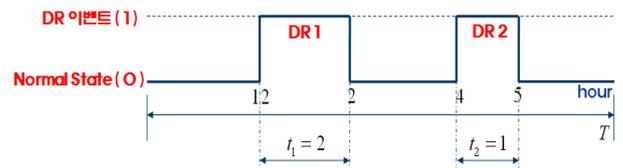


그림 5 DR 이벤트  
Fig. 5 DR evnets

표 4 각 부하 버스 수요 자원들의 등록 정보

Table 4 The registration information of DR resources

		DR <sup>3</sup>	DR <sup>4</sup>	DR <sup>5</sup>	DR <sup>6</sup>
등록	$M$	3	3.5	2.5	4
	$D_{min}$	1	1	1	1
	$F$	10	10	10	10
정보	$N$	2	2	2	2
	$\alpha, \beta$	0.72, 12	2.4, 16	4, 50	3.6, 26

발령된 시간을 나타낸다.

표 4는 6모선 시스템의 각 부하 버스의 수요자원들의 등록 정보를 나타낸다. 각각의 등록 정보로 DR 프로그램에 등록된 수요자원들 DR<sup>3</sup>, DR<sup>4</sup>, DR<sup>5</sup>, DR<sup>6</sup>는 DR<sub>1</sub> 이벤트 동안 각각 2.5Mw, 2Mw, 2.5Mw, 1.25Mw만큼 부하를 감축하였고, DR<sub>2</sub> 이벤트 동안 각각 2Mw, 2.25Mw, 1.5Mw, 0Mw만큼 부하를 감축하였다. 표 5와 6은 각각 DR 이벤트 DR<sub>1</sub>, DR<sub>2</sub>가 발령된 이후 각 부하 버스에서의 수요자원들의 참여 정보 결과를 나타낸다.

표 5와 6의 결과를 보면 PR은 수요자원의 최대감축용량에 대한 부하 감축량의 비율을 나타내며 PR을 비교함으로써 다음 DR 이벤트가 발령될 때 각 수요자원들의 부하 감축 여부에 관한 신뢰성을 판단할 수 있다. LRR은 부하 예

**표 5** 각 부하 버스 수요 자원들의 참여 정보

**Table 5** The registration information of DR resources

	$DR_1$	$DR^3$	$DR^4$	$DR^5$	$DR^6$
참 여	$PR$	0.833	0.571	1	0.313
	$LRR$	0.05	0.05	0.0714	0.04
	$d$	1.5	1.5	1.5	1.5
정 보	$f$	0.01389	0.01389	0.01389	0.01389
	$\epsilon, \pi_l$	-0.72, 60	-2.4, 60	-4, 72.5	-3.6, 72.5

**표 6** 각 부하 버스 수요 자원들의 참여 정보

**Table 6** The registration information of DR resources

	$DR_2$	$DR^3$	$DR^4$	$DR^5$	$DR^6$
참 여	$PR$	0.667	0.643	0.6	0
	$LRR$	0.05	0.05	0.05	0
	$d$	1.5	1.5	1.5	0
정 보	$f$	0.01389	0.01389	0.01389	-
	$\epsilon, \pi_l$	-0.72, 60	-2.4, 60	-4, 72.5	$\infty$

상량에 대한 부하 감축량의 비율을 나타내며  $LRR$ 을 비교 함으로써 다음 DR 이벤트 동안의 감축량을 예측할 수 있다.  $d$ 는 부하 감축 지속 시간이며  $f$ 는 1년 중 참여 횟수이므로 DR 운영자는 이 지수를 사용하여 DR 참여 여부를 결정할 수 있다.

#### 4. 결 론

수요자원을 평가하기 위하여 본 논문은 DR 참여 이전의 정보인 등록 정보와 사후 정보인 참여 정보로 구분하여 수요 자원을 평가하였다. 이러한 등록 정보와 참여 정보의 각 지수들은 DR 참여 여부를 결정하고 DR 참여시 얼마나 오랫동안 얼마나 많은 양을 감축할 것인가에 대한 객관적인 정보를 제공한다. 운영자는 참여 정보의 지수들을 기반으로 DR을 계획하며 나아가 전력 시스템의 운영 계획을 수립할 수 있다. 향후 참여 정보에 따른 DR 운영 계획을 수립하는 연구를 진행하여 참여 정보 지수에 따른 DR 운영 계획이 합리적이고 효율적임을 보일 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 전력산업원천기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.2010101030003B)

#### 참 고 문 헌

[1] M.H. Albadi\*, E.F. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," Electric Power Systems Research, vol. 78, Nov, 2008, pp. 1989-1996.  
 [2] Daniel S. Kirschen, Goran Strbac, Pariya

Cumperayot, and Dilemar de Paiva Mendes, "An Factoring the Elasticity of Demand in Electricity Prices," IEEE Trans. Power system, vol.15, pp.612-617, May. 2000

[3] E.Bompard, Y. Ma, R.Napoli, G.Abrate, "The Demand Elasticity Impacts on the Strategic Bidding Behavior of the Electricity Producers," IEEE Trans. Power system, vol.22, pp.188-197, Feb. 2007  
 [4] P.Wang, Y.Ding, Y.Xiao, "Technique to evaluate nodal reliability indices and nodal prices of restructured power systems," IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, vol.152, pp.390-396, May. 2005  
 [5] L.Goel, Wu Qiuwei, Wang Peng, "Reliability enhancement of a deregulated power system considering demand response," IEEE Meet. Power Engineering Society General Meeting, pp.6  
 [6] E.Shayesteh, M.Eliasi, N.Mahmoudi-Kohan, M.P.Moghaddam, "Security-based demand response allocation," IEEE. Power & Energy Society General Meeting, pp.1-7, Jul. 2009  
 [7] Su Chua-Liang, D.Kirschen, "Quantifying the Effect of Demand Response on Electricity Markets," IEEE Trans. Power System, vol.24, pp.1199-1207, Aug. 2009  
 [8] S.Valero, M.Ortiz, C.Senabre, C.Alvarez, F.J.G.Franco, A.Gabalton, "Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets," IET. Generation, Transmission & Distribution, vol.1, pp.104-110, Jan. 2007  
 [9] H.A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, G.R. Yousefi, "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets," Electric Power Systems Research, vol. 80, Apr, 2010, pp. 426-435.  
 [10] J.M.Yustaa, H.M.Khodrb, A.J.Urdaneta, "Optimal pricing of default customers in electrical distribution systems: Effect behavior performance of demand response models," Electric Power Systems Research, vol. 77, Apr, 2007, pp. 4486-558.  
 [11] NYISO Day-Ahead Demand Reduction Program Manual Available:[http://www.nyiso.com/public/markets\\_operations/market\\_data/demand\\_response](http://www.nyiso.com/public/markets_operations/market_data/demand_response)  
 [12] NYISO Emergency Demand Reduction Program Manual Available:[http://www.nyiso.com/public/markets\\_operations/market\\_data/demand\\_response](http://www.nyiso.com/public/markets_operations/market_data/demand_response)

#### 저 자 소 개



#### 곽 형 근 (郭炯根)

1979년 11월 29일생. 2006년 한양대 전기 공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정  
 Tel : 02-2220-0347  
 E-mail : venice53@hanyang.ac.kr



**김진오 (金鎮喆)**

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업 (공학). 현재 한양대 전기공학과 정교수

Tel : 02-2220-0347

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr



**이창호 (李昌浩)**

1955년 8월 20일생. 1980년 전남대 정치경제학과 졸업(학사). 1983년 부산대 대학원 경제학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 경제학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전력산업정책연구 센터장

Tel : 031-420-6120

E-mail : chrhee@keri.re.kr



**신동준 (申東峻)**

1972년 1월 28일생. 1990년 한양대 전기공학과 졸업(학사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전력산업정책연구 선임연구원

Tel : 031-420-6120

E-mail : shindj@keri.re.kr