

## 수요자원 이용 횟수를 고려한 DR프로그램 운영주체의 비용 최소화 모델링

유태현\*, 허재행\*, 권현규\*, 박현곤\*, 박종근\*  
서울대\*

### Cost minimization modeling considering DR resource availability by DR service provider

Tae-hyun Yoo, Jae-haeng Heo, Hun-gyu Kwon, Hyeun-gon Park, Jong-keun Park  
Seoul National University

**Abstract** - 수요 반응 프로그램은 크게 인센티브 기반 수요 반응 프로그램과 가격 기반 수요 반응 프로그램으로 나눌 수 있다. 인센티브 기반 수요 반응 프로그램은 용량 요금 형태의 보상금을 지급하고 전력 시스템의 안정적 운영을 위해 긴급 상황 시, 이벤트를 통해 호출 됨으로써 중요성이 더욱 부각되고 있다. 신뢰도 수요 반응 자원들은 운영주체와의 사전 계약 시, 자신의 월 또는 연간 사용 한도를 정하고 계약을 하게 된다. 이는 빈번한 수요 자원 호출로 인해 수요 자원 보유자가 효과적으로 반응하지 못하게 됨을 방지하기 위함이다. 본 논문에서는 이러한 수요 자원의 최대 사용 횟수를 고려하여 신뢰도 수요 반응 프로그램의 스케줄링 방법을 제안하였다. 본 스케줄링 방법은 각 이벤트별 필요 수요 자원량과 각 수요 자원들의 비용을 고려하여 특정 기간동안의 계획을 수립하는 것으로써, 현재 널리 이용되는 단기 스케줄링과 비교하였을 때, 운영주체의 비용을 절감할 수 있게 된다.

#### 1. 서 론

전력 산업은 기존의 수직적 통합 형태에서 자유화를 이루면서 큰 변화를 맞이하고 있다. 세계 전력 시장의 동향은 소비자 및 공급자의 사회 후생의 최대화를 위하여 전력 시장이 개설되고, 이에 따라 소비자들의 전력 시장 참여가 이슈가 되고 있다. 더욱이 스마트그리드 도입에 대한 관심이 증대되면서 수요 측의 반응을 체계적으로 관리해야 하는 분위기가 조성되고 있다. 이를 위해 예전부터 시행해왔던 부하관리(Demand side management)는 양방향성과 실시간성을 고려한 부하반응(Demand Response)이라는 이름으로 새롭게 부각되고 있다. 수요 반응은 시장 가격에 반응하여 수요를 절감하거나 운영주체의 부하 절감 요구에 맞추어 자신의 부하를 줄일 수 있는 부하들을 운영하는 방법이다.

미국의 연방 규제위원회(Federal Energy Regulatory Council)의 견해에 따르면, 수요 반응 프로그램은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 하나는 인센티브 기반 수요 반응 프로그램(Incentive based demand response program)이고, 다른 하나는 가격기반 요금 프로그램(Price-based demand response program)이다. 인센티브 기반 DR 프로그램은 운영 주체가 수요 반응 프로그램 참여자와 사전 계약을 맺고, 수요 절감 이벤트 발생 시, 미리 결정된 인센티브를 제공하는 방식의 프로그램이다.

가격기반 요금 프로그램의 경우, LSE(Load Serving Entity)가 최종 소비자(End-user)와 요금에 대한 계약을 맺고 소비자의 전력 사용량에 따라 차등 전기세를 부과하는 방식의 프로그램이다. TOU(Time of Use), CPP(Critical Peak Pricing), RTP(Real Time Pricing) 등이 대표적인 프로그램이다.

상기 수요 반응 프로그램들은 운영 목적, 전력 시장의 형태 등에 따라 구분, 선택되어 운영된다. 계통 신뢰도 향상을 목적으로 한 신뢰도 수요 반응 프로그램은 인센티브 기반 수요 반응 프로그램의 형태를 띄고 있으며, 소비자의 가격에 대한 신호 반응을 목적으로 한 경제성 수요 반응 프로그램은 가격기반 요금 형태를 띄고 있다. 한국의 CBP(Cost Based Pool) 시장과 같은 경우, 도매시장의 제한적 도입 및 소매시장의 부재로 인하여, 가격기반 요금 프로그램의 적용이 어렵기 때문에 인센티브 기반 프로그램들이 운영되고 있다. 용량요금을 지급하면서 비상 시, 부하를 절감하게 되는 직접부하제어지원제도와 소비자의 자율 참여를 전제로 한 비상 절전제도는 수요 관리(Demand Side Management)의 대표적 프로그램이라 할 수 있다. 전력거래소에서 운영되고 있는 수요 자원 시장의 경우, 계통 예비력 수준 향상을 목표로 수요 입찰 프로그램의 성격을 띄고 있다. 현재 운영되고 있는 이

러한 프로그램은 모두 신뢰도 향상을 위한 수요 반응 프로그램이라 할 수 있으며, 앞선 단락에서 언급하였던 한국의 CBP 시장 체계의 특성 때문에 신뢰도 수요 반응 프로그램의 효과적인 운영은 더욱 중요하다고 할 수 있다. 효과적인 운영을 위해서는 특히 자원 특성을 잘 반영한 모델을 통해 프로그램들을 운영해야 하며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 선행연구들의 한계

수요 자원들의 특성을 고려한 모델링 기법들은 세계적으로 많이 연구되고 있다. 발전기의 unit commitment 문제와 경제 급전 문제 등에 수요 반응을 어떻게 적용할지에 대한 연구들이 이루어지고 있다. 하지만, 선행 연구들은 다음과 같은 한계를 가지고 있다.

첫 번째로 신뢰도 수요 반응 자원들을 경제성 수요 반응 자원처럼 평가하고 모델링 하고 있다. 선행 연구들에서는 신뢰도 수요 반응 프로그램 및 경제성 수요 반응 프로그램의 차이를 고려하지 않고 프로그램 선택에 따른 수익만을 고려하였다 [1],[3],[4]. 하지만, 신뢰도 수요 반응 프로그램과 같은 경우, 이벤트 발생 시, 절감이 강제되기 때문에 수요 반응 프로그램을 운영하는 LSE(Load Serving Entity)입장에서는 자원의 특성을 정확히 고려하여야 한다.

둘째로, 신뢰도 DR 자원들은 자주 이용되지 않기 때문에, 하루 단위의 짧은 기간에 대한 이용 계획이 아닌 중기 혹은 장기의 이용계획을 세워야 한다. 예를 들어 Interruptible/Curtailable load 나 직접부하제어, 국내의 수요 자원 시장 등은 특정 기간에 집중적으로 운영되기 때문에 이를 고려하여 모델링되어야 한다. 셋째로 신뢰도 향상을 목적으로 한 수요 반응 프로그램은 프로그램 운영 주체와 특정 소비자 간의 사전 계약을 바탕으로 수행되고, 이러한 신뢰도 수요 반응 프로그램의 계약 내용에는 수요 자원의 이용 횟수를 제한하고 있다. 예를 들어, 계약 부하는 월 간 10회 이하의 제어 이벤트를 부여 받게 되고, 일 6시간 이하의 최대 절감 시간을 가지게 되며, 일 2회 이상의 이벤트 지시를 받지 않게 된다. Michael Angelo 외 저자들은 interruptible load 로 가정한 수요 반응 자원들의 여러 가지 특성을 반영하여 시간대 별로 배분하는 문제에 대하여 연구하였다 [2]. 하지만, 수요 자원의 특성에 초점을 맞추지 않고 발전기와 같이 스케줄링을 하였다는 한계가 있다.

##### 2.2 수요자원의 이용 횟수 제한 고려의 필요성

기존 연구들에서는 수요 반응 프로그램을 목적에 따라 구분하지 않고 자원 스케줄링을 해왔다. 하지만, 수요 반응 프로그램은 목적에 따라 매집된 자원의 특징이 달라지게 된다. 예를 들어, 직접부하제어(Direct load control)의 보상금은, 실제 제어를 하지 않아도 지급되는 고정 지원금과 실 제어 시, 제어량에 따라 지급하게 되는 제어 지원금으로 구성되어 있다. 고정 지원금을 지급하기 때문에, 운영 주체의 의지에 따라 항상 절감을 대비해야 하며 급전 가능한(dispatchable) 자원들이 참여하게 된다. 하지만, 사전 계약에서 정해지는 최대 사용 횟수 및 일일 사용 횟수 제한은 운영 주체가 해당 프로그램에서 자원을 매우 빈번하게 호출하게 되는 것을 막는다. 이와 반대로 비상 절감 프로그램(Emergency Demand Response Program)에 참여하게 되는 자원의 경우 고정 지원금을 받지 않는 대신에 수요 절감 이벤트 참여에 자율성이 보장된다. 따라서 사용 횟수에 대한 제약이 없다.

이렇게 제한되어 있는 자원 이용 횟수를 고려하지 않고 자원 배분을 하는 것은 비용 상승의 원인이 된다. interruptible load

로 참여하게 되는 수요 자원은 최대 이벤트 참여 횟수와 참여 가능 용량이 정해져 있다. 해당 수요 자원이 이벤트 발생 후, 아주 적은 량을 참여하게 되더라도 이벤트 참여로 간주되어 이벤트 참여 가능 횟수가 줄어들게 된다.

따라서 수요 반응 요구량이 적은 경우, 비용이 작은 자원을 먼저 쓰는 대신, 비용이 큰 자원을 먼저 사용하게 된다면 향후에 있을 이벤트에 대해서 효과적으로 대처할 수 있을 것이다. 이러한 동기를 통해 사용 가능 횟수를 고려하여 운영주체(LSE)의 수요 반응 자원 스케줄링 방법을 모델링할 수 있다.

### 2.3 이용 횟수를 고려한 목적함수의 정식화

논문에서는 이용 횟수를 고려한 자원 이용 스케줄링을 제시하였다. 이용횟수를 고려하지 않는 경우, 신뢰도 DR 자원의 최적 이용을 할 수 없다. 따라서, 특정 기간 동안의 전체 수요 자원 이용 계획을 세워야 한다. 수요 자원의 이용 횟수를 고려한 운영 주체의 비용 최소화 문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N u_{t,i} \cdot Sch_{t,i} \cdot C_i \cdot Q_{t,i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & s.t. \\ & u_{t,i} = 0 \text{ or } 1 \\ & n_{t,i} \leq n_{i,max} \\ & n_{t,i} = \sum_{\tau=1}^t Sch_{\tau,i} \\ & Sch_{t,i} = \min \left( 1, n_{i,max} - \sum_{\tau=1}^{t-1} Sch_{\tau,i} \right) \\ & 0 \leq Q_{t,i} \leq Q_{i,max} \\ & \sum_{i=1}^N Q_{t,i} = d_t \end{aligned}$$

Where,  
 $u_{t,i}$  : t일의 i자원의 이용여부(0or 1)  
 $T$  : 프로그램 시행일  
 $N$  : 수요자원의갯수  
 $C_i$  : 수요자원의비용(\$/MWh)  
 $n_{i,max}$  : T기간동안 i자원의 최대이용 횟수  
 $Q_{t,i}$  : t일의 i자원의 절감할당량  
 $d_t$  : t일의 수요 자원 필요량  
 $n_{t,i}$  : t기간까지 i자원의 이용 횟수  
 $Sch_{t,i}$  : t기간의 i자원의 이용가능 여부  
 $Q_{i,max}$  : i자원의 최대절감가능량

식 (1)의 정식화를 통하여 자원의 이용 한도를 고려한 LSE의 비용 최소화를 얻어낼 수 있다. 자원 최적화 과정에서 이용 횟수 한도에 걸리는 수요 자원은 배제되고 남은 자원을 통해 스케줄링되게 된다. 본 논문에서 제시하는 LSE의 수요 자원 배분 스케줄링 방법은 각 자원의 이용 가능 여부의 문제와 이벤트 시기에 요구되는 수요 자원의 양에 대한 문제가 결합되어 해석적인 방법으로서의 문제 해석이 난해하며, 유전 알고리즘 또는 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 통해 해결하여야 한다.

### 3. 사례 연구

본 논문에서는 제한된 조건에서 정식화된 문제를 풀어 LSE의 비용 최소화에 대하여 사례연구를 수행하였다. 본문에서 언급된 수식 (1)을 풀기 위해서는 heuristic 한 방법을 통해 문제해결을 하여야 하나, 자원 이용 횟수의 고려를 통한 비용 변화 부분만을 확인하기 위하여 범위를 제한하여 시뮬레이션 하였다.

사례 연구에서는 국내 수요에 따른 비용 최소화 전략에 대하여 분석하였다. 수요 데이터는 2009년 12월 국내 공급 예비력 및 2010년 12월 공급 예비력을 사용하였다. 2009년 데이터를 이용하여 2010년의 수요 반응 프로그램 이벤트 발생 시기 및 이벤트 시 필요 수요 반응 량을 예측하여 전략을 도출하였다. 이 전략과 2010년 실제 수요를 통해 비용이 낮은 자원부터 차례로 사용하였을 때의 전략의 비용을 비교하였다. 3가지 수요 자원을 통해 LSE는 자신의 수요 절감 스케줄링을 작성하며, 각 자원들은 월

최대 이용 가능 횟수를 가진다. 수요 절감 이벤트의 발령 조건은 공급예비력이 특정 수준이하로 내려갈 때 발령된다고 가정하였다. 표 1은 시뮬레이션 수행 시의 조건을 나타낸다. 표 2는 단기 계획에 의한 스케줄링과 제안하는 방법의 스케줄링에서의 비용이다.

제안하는 방법을 사용한 결과, 수요 자원 필요 배정량이 적게 설정된 이벤트 날의 경우, \$10/MWh의 비용을 가진 자원이 이용되지 않고 \$30/MWh의 비용을 가진 자원이 이용됨을 확인할 수 있었다. 이에 따라 전체 수요 반응 프로그램 운영비용이 감소하게 되었다.

<표 1> 시뮬레이션 데이터

	자원A	자원B	자원C
비용 (\$/MWh)	\$30/MWh	\$20/MWh	\$10/MWh
보유 용량 (MW)	100MW	100MW	100MW
최대 이용가능 횟수(회/월)	5회/월	5회/월	5회/월
통보결정조건	운영예비력이 6000MW이하로 내려갈 때		
발전기 비용	\$40/MWh		

<표 2> 단기 계획 스케줄링과 제안하는 방법에 의한 스케줄링 비용

	단기 계획에 의한 스케줄링	제안하는 방법에 의한 스케줄링
비용(\$)	\$29350	\$18780

### 4. 결론

본 논문에서는 LSE 입장에서 interruptible load로 이용되는 DR 자원들의 사용 제한 횟수를 고려하였을 때의 비용을 최소화하는 방법을 제안하였다. 기존의 연구들에서는 LSE 입장에서 DR 자원을 이용하여 수요 절감 서비스를 제공하려 할 때, 단기적인 계획 수립을 통해 자원을 배분하였으나, 본 논문에서 제시되는 방법을 사용하였을 때는 수요 자원 필요량이 적을 시에는 비용이 비싼 자원을 택하고 필요량이 많을 시에는 싼 자원을 택할 수 있어 비용을 절감할 수 있음을 보여주었다. 향후의 연구에서는 본 논문에서 제시한 정식화 문제를 PSO 알고리즘을 통한 최적해 도출에 관하여 연구하게 될 것이다. 또한, 스케줄링과 실제 운영 사이에 발생하게 되는 차이를 다루는 매커니즘에 대하여 추가적으로 연구하게 될 것이다.

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
 (No. 20101030100010)

### [참고 문헌]

[1] H.Aalmi *et al*, "Demand response model considering EDRP and TOU programs", *IEEE trans*. 2008  
 [2] Michael Angelo A. Pedrasa *et al*, "Scheduling of Demand side Resources Using Binary Particle Swarm Optimization", *IEEE trans*, 2009  
 [3] Yunfei Wang *et al*, "An event-driven demand response scheme for power system security enhancement", *IEEE trans*, 2011  
 [4] Rahmat Aazami *et al*, "A demand response based solution for LMP management in power markets", *Electrical Power and Energy Systems*, 2011