

수요 자원의 가상 발전기로의 변환을 이용한 최적의 수요 반응 및 발전 운영 계획 수립

곽형근*, 우상민*, 김진오*
한양대*

Optimal Generation and Demand Response Scheduling by Using the Transformation of Demand Resources To Virtual Generation

Hyung-Geun Kwag*, Sang-Min Woo*, Jin-O Kim*
HanYang University*

Abstract - 본 논문에서 수요 자원의 수요 반응 프로그램 참여에 관한 정보들을 등록 정보와 참여 정보로 구분하여 수요 자원의 특성을 나타내는 지수들로 구분한다. 이 지수들은 수요 반응 참여 가능 용량, 기간, 횟수, 한계 비용에 관하여 정보를 제공하며 이들을 바탕으로 수요 자원을 하나의 발전 자원으로 평가한다. 이로써 수요 자원은 발전 자원과 직접적으로 경쟁할 수 있으며 계통 운영자는 수요 자원을 운영 계획에 포함한다. 계통 운영자는 발전 및 수요 반응 비용을 최소화하여 운영 계획을 수행하는데 이때 발전 자원과 수요 자원의 제약 조건을 위반하지 않아야 한다. 본 논문에는 기존 개발된 발전 자원의 제약 조건으로부터 수요 자원의 제약 조건을 제안한다.

1. 서 론

스마트 그리드 기술의 발전처럼 최근의 전력 시스템에서의 변화는 수요 측 자원의 활용을 쉽게 하고 있다. 그 중 수요 반응은 수요 측 자원을 활용하는 발전적인 방법으로 수요 반응은 소비자의 전력 사용을 목적으로 소비자의 전력 사용 패턴의 변화를 유도하는 요금제 또는 인센티브 기반 프로그램이다[1]. 수요 반응의 정의에 따르면 수요 반응의 주체는 소비자이며 이들은 부하를 자발적으로 직접 감축하여 전력 시장에 참여한다. 이처럼 수요 반응의 주체가 고객인 점에서 수요 반응은 현재 전력 시스템에서 중요한 역할을 하는데, 전력의 공급이 단일 방향으로 이루어져있던 기존의 전력 시스템에 양방향 전력 공급으로의 패러다임의 변화를 가져오고 있다. 수요 반응의 주체는 소비자이며 따라서 소비자의 반응 행태를 모형화하는 많은 연구가 진행되고 있다. 최근의 연구들은 고객의 반응 특성을 가격 탄력성으로 구성하여 이를 바탕으로 수요 반응의 효과에 대한 다양한 결과를 보이고 있다[2-5]. 그러나 위의 연구들은 수요 자원을 가격 탄력성으로만 평가하고 있어 수요 자원의 실제 가치를 제한적으로 평가하고 있다. 또한 현재 수요 자원의 반응 특성에 관한 실제 정보가 빈약하여 가격 탄력성에 대한 신뢰성이 높지 않은 실정이다. 이러한 연유로 해외 계통 운영자들은 수요 자원 등록 시 운영에 필요한 여러 가지 정보를 요구하고 또한 고객들과 협의를 통하여 보완하고 있다. 따라서 수요 반응에 참여하는 고객들의 반응 특성을 다양하게 분석하여 전력 시스템에 어떤 영향을 끼치는 지 살펴볼 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 해외 선진국의 수요 반응 운영 규칙을 바탕으로 수요 반응 운영에 필요한 고객의 정보들을 어떤 하나의 지수로 정의하여 구분하고 이를 바탕으로 발전 및 수요 반응의 운영 계획을 실시한다.

2. 본 론

2.1 고객 정보

수요 반응 참여자는 수요 반응 프로그램에 참여하기 위해서 자원의 반응 특성을 초기 정보로써 제공하여야 한다[6]. 이러한 초기 정보들은 프로그램의 참여 정보로써 프로그램의 참여 가격 조건 또는 고객의 수요 반응 프로그램으로의 참여 제약 조건을 나타낸다. 반면 계통 운영자는 수요 반응 프로그램 참여 이후의 반응 특성을 참여 정보로써 저장하여 향후 수요 반응 운영을 위한 자료로 사용한다[6]. 본 논문에서는 이러한 정보들을 고객 정보로써 다음의 표와 같이 구분한다.

<표 1> 고객 정보

등록 정보	참여 정보
최대 참여 용량	참여율
최소 감축 지속 시간	부하 반응율
최대 감축 지속 시간	평균 참여 지속 시간
최대 감축 횟수	감축 횟수
	한계 비용

최대 감축 용량($M^j(t)$ [MW])은 j 고객이 감축할 수 있는 최대 감축량이고 최소, 최대 감축 지속 시간(D_{min}^j, D_{max}^j [hr])은 부하 감축을 지속할 수 있는 최소, 최대 지속 시간이며 최대 감축 횟수(F^j [frequency/yr])는 j 고객의 1년 중 최대 감축 가능한 횟수이다. 참여율은 최대 감축 용량 중 감축량의 비율이며 다음의 식 (1)과 같다.

$$PR^j(t) = \frac{DR^j(t)}{M^j(t)} S^j(t) \quad (1)$$

여기서 $DR^j(t)$ 는 고객 j 의 t 시간에서의 부하 감축량, $s^j(t)$ 는 수요 반응 상태를 나타내는 지표로써 고객 j 가 부하를 감축할 때 1이 된다. 부하반응율은 기본 부하에서 부하 감축의 비율이며 다음의 식 (2)와 같다.

$$LRR^j(t) = \frac{DR^j(t)}{CBL^j(t)} s^j(t) \quad (2)$$

여기서 $CBL^j(t)$ 는 고객 기본 부하로써 부하 감축량을 결정하기 위하여 매 시간의 평균 부하 예측 값이다[11-12]. 평균 참여 지속 시간은 수요 반응 1회 이벤트에 대한 고객의 평균 참여 지속 시간이다.

$$d^j(t) = \frac{\sum_{t \in T} s^j(t)}{\sum_{t \in T} b^j(t)} \quad (3)$$

여기서 $b^j(t)$, $e^j(t)$ 는 DR 시작과 끝을 나타내는 지표로써 각각 고객 j 가 부하 감축을 시작할 때, 끝날 때 1이 되고, T 는 등록 순간부터 현재까지의 모든 운영 시간이다. 감축 횟수는 등록 순간부터 현재까지의 수요 반응 프로그램 참여 횟수이며 이는 다음의 식 (4)와 같다.

$$f^j(t) = \frac{\sum_{t \in T} b^j(t)}{T} \quad (3)$$

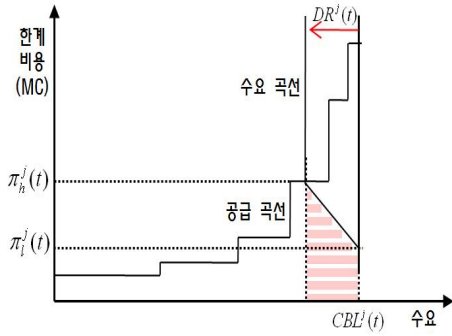
본 연구에서 수요 자원의 한계 비용은 일차 함수로 나타낸다. 고객 j 가 부하 감축을 실시하는 경우 한계 비용은 다음의 식 (4)와 같다.

$$MC^j = \alpha^j(t) DR^j + \beta^j(t) \quad (4)$$

여기서 $\alpha^j(t)$, $\beta^j(t)$ 는 고객 j 의 한계 비용 함수의 일차항, 상수항이다. 그림 1은 수요 반응 시장을 운영하는 전력 시장에서 한계 가격이 어떻게 결정되는 지를 보여준다. 그림 1의 수요 곡선 아래 부분은 수요 자원의 한계 비용을 나타내며 이는 부하 감축량이 0에서 $DR^j(t)$ 로 증가함에 따라서 한계 비용이 $\pi_h^j(t)$ 에서 $\pi_l^j(t)$ 로 높아짐을 보여준다. 따라서 식 (4)의 한계 비용 함수는 그림 1의 부하 감축량 $DR^j(t)$ 와 가격의 변화 ($\pi_h^j(t) - \pi_l^j(t)$)로부터 다음의 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$MC^j = \frac{\pi_h^j(t) - \pi_l^j(t)}{DR^j(t)} DR^j + \pi_l^j(t) \quad (5)$$

식 (3)과 (4)로부터 수요 감축에 대한 한계 비용의 일차계수 $\alpha^j(t)$ 와 상수항 $\beta^j(t)$ 는 다음의 식(5-6)과 같다.



〈그림 1〉 수요 반응을 포함한 전력 시장의 한계 비용 결정 구조

$$\alpha^j(t) = \frac{\pi_h^j(t) - \pi_l^j(t)}{DR^j(t)} \quad (6)$$

$$\beta^j(t) = \pi_l^j(t) \quad (7)$$

프로그램에 참여하는 수요 자원은 논문에서 제안한 한계 비용으로부터 발전 자원으로써 취급할 수 있다. 다음 절의 운영 계획에서 이러한 수요 자원들이 기존의 발전 자원과 어떻게 경쟁하는지 보일 것이다.

2.2 수요 반응 및 발전 운영 계획

계통 운영자는 보통 부하 예측, 발전기와 네트워크 형태 등의 정보들로부터 발전 계획을 수행한다. 이 전에 언급된 것처럼 수요 자원은 발전 자원으로 취급할 수 있는데 본 논문에서는 수요 자원을 발전 계획에 포함하여 운영 계획을 수립한다. 운영 계획의 목적 함수는 수요 반응과 발전의 운영 비용을 최소화하며 이는 다음의 식 (7)과 같다.

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} C_g^i(P_g^i(t)) + \sum_{j=1}^{N_d} C_{DR}^j(DR^j(t)) \right\} \quad (7)$$

여기서 N_g, N_d 는 발전기와 수요 자원의 개수, i, j ,는 각각 발전기와 수요 자원을 가리킨다. C_g^i 는 i 발전기의 발전 비용이며 보통 2차 함수로 표현된다. C_{DR}^j 는 수요 자원의 부하 삭감을 시도하는 경우의 DR 비용을 나타내며 식 (4-7)으로부터 다음의 식 (8)과 같다.

$$C_{DR}^j(DR^j(t)) = \frac{\alpha^j(t)}{2} (DR^j(t))^2 + \beta^j(t) DR^j(t) \quad (8)$$

목적함수 (7)의 제약 조건은 수요 반응 제약 조건과 발전 제약 조건 두 가지로 구분할 수 있다. 보통 발전 제약 조건은 조류 제약 조건, 발전량 제약 조건, 최소 최대 지속 시간 제약 조건 등을 포함한다. 수요 반응의 제약 조건은 감축 가능 용량, 감축 지속 시간, 참여 횟수, 수요 반응 상태에 관한 제약 조건 등을 포함한다. 감축 가능 용량 제약 조건은 다음의 식 (9)와 같다.

$$0 \leq DR^j(t) \leq M^j(t) s^j(t) \quad (9)$$

수요 자원의 평균 감축 지속 시간은 최소, 최대 감축 지속 시간 사이의 값을 가져야 한다.

$$D_{\min}^j \leq d^j \leq D_{\max}^j \quad (10)$$

제약 조건의 감축 지속 시간은 현재의 DR 이벤트에 대하여 감축을 지속할 수 있는 시간을 의미하므로 식 (3)에서 합 기호를 뺀 후 식 (10)에 적용하면 다음의 식 (11)과 같이 나타난다.

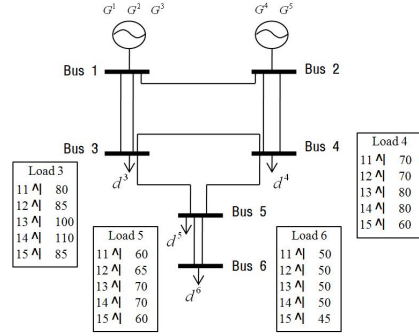
$$D_{\min}^j b^j(t) \leq d^j \leq D_{\max}^j b^j(t) \quad (11)$$

수요 자원의 참여 횟수는 최대 참여 횟수보다 클 수 없다.

$$\sum_{k \in T} b^j(k) + b^j(t) \leq F^j \quad (12)$$

2.3 사례 연구

그림 2의 6모선 테스트 시스템에서 수요 자원의 참여율을 0.2로 가정했을 때 발전 및 수요 반응 운영 계획은 표 2와 같이 나타난다. 표 2에서 부하 버스 3, 4에서 12시부터 14시까지 DR 이벤트가 발령될 것이며 부하 감축 예상량은 2 MW, 1.6 MW이다.



〈그림 2〉 사례 연구를 위한 테스트 시스템

〈표 2〉 발전 및 수요 반응 운영 계획의 결과

		11 시	12 시	13 시	14 시	15 시
With out DR (PR=0)	G1	120	120	120	120	120
	G2	0	10	36	36	0
	G3	0	0	4	14	0
	G4	80	80	80	80	70
	G5	60	60	60	60	60
	Cost	1033.3	1063.3	1162.3	1214.8	1017.9
With DR (PR=0.2)	G1	120	120	120	120	120
	G2	0	6.4	36	36	0
	G3	0	0	0	7.9	0
	G4	80	80	80	80	70
	G5	60	60	60	60	60
	DR3	0	2	2	2	0
	DR4	0	1.6	1.6	1.6	0
	DR5	0	0	0	1.5	0
DR6	0	0	0.4	1	0	
Cost	1033.3	1060.3	1150.6	1200.2	1017.8	

표 2의 결과는 앞서 설명한 수요 자원의 제약 조건과 발전기의 제약 조건을 포함하여 목적함수의 최적화 수행 결과이다. DR 3, 4의 수요 자원은 높은 한계 비용을 가지는 G2의 발전량을 대체하였음을 볼 수 있다.

3. 결 론

초기 정보와 참여 정보의 고객 정보들을 어떤 하나의 지수를 사용하여 수요 자원의 특성을 구분하였다. 이러한 정보들은 프로그램 참여자의 자격 조건을 의미하는데, 발전 및 수요 반응 운영 계획에서 운영 비용 최소화를 위한 수요 반응 제약 조건으로 포함되었다. 사례 연구에서 테스트 시스템을 통하여 수요 반응 및 발전 운영 계획을 결과를 살펴보았다.

[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] 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
- [5] 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
- [6] NYISO Day-Ahead Demand Reduction Program Manual Available:http://www.nyiso.com/public/markets_operations/market_data/demand_response