

수요 반응과 신뢰도 지수에 따른 발전 스케줄링

곽형근*, 배인수*, 김진오*
한양대*

Generator Scheduling considering Demand Response and Reliability Indices

Gun-Hyung Kwag*, In-Su Bae*, Jin-O Kim*
Hanyang University*

Abstract - 전력 산업이 경쟁 체제로 변화되면서 고객들의 전기 가격 체계가 현물 가격으로 변환되고 있다. 이러한 가격 체계에서 전기 가격은 수요와 반응하게 되고 이러한 상호작용을 수요 반응이라 한다. 본 논문에서는 가격의 변화에 따른 수요의 다양한 변화를 가격 민감도, 신뢰도 민감도를 정의하여 설명한다. 이것은 고객의 입장에서는 더 경쟁적인 체계이고 운영자의 입장에서는 더 효율적이고 효과적인 체계이다.

1. 서 론

현재 많은 국가에서 전력 산업에 관하여 구조 개편을 실시하고 있는데 규제가 완화된 전력 시스템에서 현물 가격이 소개되었다. 이러한 현물 가격은 소비자들의 반응을 이끌어 내기 때문에 전기 가격에 대한 소비자들의 반응을 모형화하기 위하여 수요-가격 탄력성을 도입하였다.

이 논문에서는 수요-가격 탄력성을 다양화하기 위하여 2.1 절에서 가격 민감도를 제안하여 수요-가격 탄력성을 다양하게 하고 또한 2.2 절에서 고객의 신뢰도 민감도를 제안하여 고객의 신뢰도 요구 사항을 모형화한다. 최종적으로 OPF를 사용한 발전 스케줄링을 실시하고 결론에서 RBTS, OPF, Matlab을 사용하여 가격과 신뢰도에 따른 수요 응답과 발전 계획을 모의한다.

2. 본 론

2.1 가격 민감도

현재까지는 모든 고객들을 동일한 수요-가격 탄력성으로 구성하였다 [1-2]. 그러나 실제 전력 시스템에서는 다양한 수요-가격 탄력성을 가진 고객이 존재한다. 본 논문은 다양한 탄력성을 나타내기 위하여 가격 민감도를 제안한다. 가격 민감도, S_{ρ} ,는 가격 변화에 따른 수요의 변화의 비율로 정의한다. 가격 민감도를 사용하면 수요의 변화는 다음 (1)식과 같다.

$$\Delta d = S_{\rho} \cdot E \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) \cdot d_0 \quad (1)$$

다양한 고객의 반응을 살펴보기 위하여 가격 민감도를 개별 고객의 가격 민감도, $S_{\rho,ij}$,로 표현하면 다음 (2-4)식과 같다.

$$\Delta d = \left(\sum_{i=1}^{N_L} \frac{L_i}{L} S_{\rho,i}\right) \cdot E \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) \cdot d_0 \quad (2)$$

$$= \left(\sum_{i=1j \in Bus i}^{N_L} \frac{L_{ij}}{L} S_{\rho,ij}\right) \cdot E \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) \cdot d_0 \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1j \in Bus i}^{N_L} S_{\rho,ij} \cdot E \cdot \left(\frac{\Delta \rho_{ij}}{\rho_{0,ij}}\right) \cdot d_{0,ij} \quad (4)$$

L 은 전체 부하, L_i 는 버스 i 에서의 버스 부하, L_{ij} 는 각 개별 고객의 부하, $S_{\rho,i}$ 는 i 버스의 가격 민감도, $S_{\rho,ij}$ 는 각 개별 고객의 가격 민감도, N_L 은 부하 버스의 수, 를 나타낸다.

$$S_{\rho,i} = \sum_{j \in Bus i} \frac{L_{ij}}{L_i} S_{\rho,ij}, \quad S_{\rho} = \sum_{i=1}^{N_L} \frac{L_i}{L} S_{\rho,i},$$

$$L_i = \sum_{j \in Bus i} L_{ij}, \quad L = \sum_{i=1}^{N_L} L_i$$

$$\Delta \rho_{ij} = \frac{L_{ij}}{L} \Delta \rho, \quad \Delta \rho_{0,ij} = \frac{L_{ij}}{L} \Delta \rho_0, \quad d_{0,ij} = \frac{L_{ij}}{L} d_0$$

정의로부터 각 개별 고객의 수요 변화는 다음 (4)식과 같다.

$$\Delta d_{ij} = S_{\rho,ij} \cdot E \cdot \left(\frac{\Delta \rho_{ij}}{\rho_{0,ij}}\right) \cdot d_{0,ij} \quad (5)$$

식(4)와 (5)로부터 모든 고객의 수요 변화 벡터를 더함으로써 전체 수요 변화를 다음의 (6)식으로 계산한다.

$$\Delta d = \sum_{i=1j \in Bus i}^{N_L} \Delta d_{ij} \quad (6)$$

2.2 신뢰도 민감도

신뢰도 지수가 높으면 전기 가격이 높아지기 때문에 어느 정도 불편함을 감수하더라도싼 전기 가격을 원하는 고객이 있을 수 있고, 한 번의 사고로 엄청난 손해를 입는 어떠한 고객은 높은 신뢰도의 전기를 원할 것이다. 이를 위하여 신뢰도 민감도를 정의한다. 어떤 고객이 인터럽션을 겪지 않을 확률 중 그 고객이 허용할 수 있는 정도로써 신뢰도 민감도를 정의한다. 예를 들면 어떤 고객의 신뢰도 민감도가 0.95인 경우 전체 중 5%의 사고까지는 그 고객이 허용할 수 있는 정도로써 신뢰도 민감도가 1인 경우는 사고가 일어나는 것을 허용하지 않는다는 의미이다. 이러한 신뢰도 민감도는 신뢰도 지수를 기반으로 한 값이며 넓은 의미로써 신뢰도 지수 전체를 대표할 수 있는 포괄적인 의미이며 좁은 의미로써 사고가 나지 않을 확률을 의미한다. 시스템의 전체 기준 신뢰도 지수를 $S_{r,0}$, i 버스 j 고객의 신뢰도 민감도를 $S_{r,ij}$ 일 때, 신뢰도 민감도를 전체 기준 신뢰도 지수로 표준화하면 다음의 식 (7)과 같다.

$$S_{r,nor,ij} = (S_{r,ij} - S_{r,0})/S_{r,0} = S_{r,ij}/S_{r,0} - 1 \quad (7)$$

에너지 당 인터럽션 기대 비용 $C_{E,ij}(r_d)$ 는 다음의 식 (8)과 같다 [4].

$$C_{E,ij}(r_d) = \frac{CIC_{ij}(r_d)}{E_{ij}} \times S_{r,nor,ij} \quad (8)$$

$CIC_{ij}(r_d)$ 는 r_d 시간 동안 i 버스 j 고객의 인터럽션 비용, E_{ij} 는 고객의 연간 부하량을 나타낸다.

i 버스에서 고객의 전체 인터럽션 기대 비용은 다음의 식 (9)와 같다.

$$C_{E,i}(r_d) = \sum_{j \in Bus i} \left(\frac{L_{ij}}{L_i}\right) C_{E,ij}(r_d) \quad (9)$$

$$= \sum_{j \in Bus i} \left(\frac{L_{ij}}{L_i}\right) \frac{CIC_{ij}(r_d)}{E_{ij}} (S_{r,ij}/S_{r,0} - 1)$$

i 버스에서 고객의 전체 인터럽션 기대 비용 $C_{E,i}(r_d)$ 에 r_d 시간 동안 공급된 에너지와 i 버스에서의 고장률을 곱함으로써 시스템 전체 인터럽션 기대 비용을 구할 수 있다.

그림 1에서 r_d 시간 동안 버스 i 에서 공급된 에너지 E_{i,r_d} 는 다음의 식 (10)으로 나타낸다.

$$E_{i,t} = \int_{t_1-r_d}^{t_1} P_{g,i} dt \quad (10)$$

$P_{g,i}$ 는 발전량 곡선을 나타낸다.

발전 회사는 발전 하기 전 미리 고객의 부하량에 맞추어 발전을 계획 하는데, 일어나지 않은 사고에 대한 값을 기댓값으로 환산하였기 때문에 실제로 사고가 일어나지 않은 경우 실제 사고 비용만큼 고객에게 지불 하지 않으므로 이 기댓값은 발전 회사 입장에서는 기회 비용이 될 것이다. 따라서 이 기댓값을 기회 비용이라하고 r_d 시간 동안 전체 인턴랩 선 기대 비용은 다음의 기회 비용 식 (11)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{Opportunity Cost} &= \sum_{i=1}^{N_L} E_{i,t} \times C_{E,i}(r_d) \times \lambda_i \quad (11) \\ &= \sum_{i=1}^{N_L} E_{i,t} \times \sum_{j \in \text{Bus } i} \left(\frac{L_{ij}}{L_i} \frac{CIC_{ij}(r_d)}{E_{ij}} \right) \\ &\quad \times (S_{r,ij}/S_{r,0} - 1) \times \lambda_i \\ &= \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j \in \text{Bus } i} \left(\frac{L_{ij}}{L_i} \right) \int_{t-r_d}^t P_{g,t} dt \times \frac{CIC_{ij}(r_d)}{E_{ij}} \\ &\quad \times (S_{r,ij}/S_{r,0} - 1) \times \lambda_i \end{aligned}$$

발전 비용은 다음의 식 (12-13)과 같다.

$$\text{Generation Cost} = \text{Cost(generation)} + \text{Opportunity Cost} \quad (12)$$

$$= \sum_{i=1}^{N_g} C_{\pi}(P_{g_i}) + \sum_{j=1}^{N_L} E_{i,t} \times C_{E,j}(r_d) \times \lambda \quad (13)$$

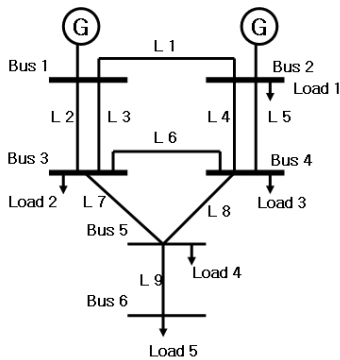
뉴튼-랩슨 OPF를 사용하면 발전 계획은 다음의 식(14)와 같다.

$$\min \sum_{i=1}^{N_g} C_{\pi}(P_{g_i}) + \sum_{j=1}^{N_L} E_{i,t} \times C_{E,j}(r_d) \times \lambda \quad (14)$$

위 식(14)에 전력 조류와 발전량 및 전압 그리고 선로의 제약 조건을 추가함으로써 발전 계획을 실시한다.

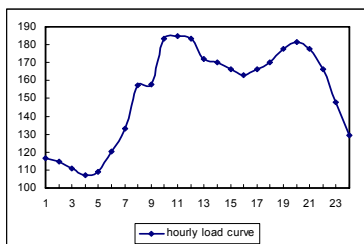
2.3 사례 연구

그림 1은 총 240MW 용량의 발전 버스 2개와 전체 피크 부하가 185MW인 RBTS 테스트 시스템이다[5].



<그림 1> 모의 시스템

수요 탄력성 데이터는 레퍼런스 [1]의 사례 연구에 사용된 데이터를 사용하였고, 하루 동안의 부하 커브는 다음의 그림(2)와 같다.



<그림 2> 매 시간의 부하 곡선

발전기 1과 2의 비용 함수는 다음의 식(15)으로 가정한다.

$$\begin{aligned} C_1 &= 0.3P_{g,1}^2 + 1.0P_{g,1} + 200 \quad (15) \\ C_2 &= 0.2P_{g,2}^2 + 1.3P_{g,2} + 180 \end{aligned}$$

가격 민감도와 신뢰도 민감도에 따라서 고객의 특성을 4개의 시나리오로 구성한다.

<표 1> 고객 특성 별 시나리오

민감도	without	시나리오1	시나리오2	시나리오3	시나리오4
가격	0	0.9~1	0~0.2	0.8~1	0~0.1
신뢰도	0.95	0.93~0.95	0.99~1	0.99~1	0.94~0.96

각 시나리오 별 발전 비용은 다음의 표 (2)와 같다.

<표 2> 시나리오 별 발전 비용

	without	Sen. 1	Sen. 2	Sen. 3	Se. 4
1 시	2249.23	2349.01	2280.21	2366.83	2254.52
2 시	2190.85	2278.07	2220.25	2297.27	2195.99
...
6 시	2207.14	2536.00	2407.01	2551.00	2376.51
7 시	2819.58	3111.91	2873.83	3126.25	2834.94
8 시	3790.58	3740.44	3811.05	3772.52	3786.82
9 시	4661.27	4570.51	4680.72	4608.82	4656.51
10 시	5040.96	4734.79	5035.96	4784.36	5026.93
11 시	5138.79	4870.05	5138.99	4920.06	5125.62
12 시	5040.96	4733.49	5036.30	4785.51	5026.93
13 시	4478.24	4218.34	4476.89	4262.09	4464.33
...
22 시	4212.1	4358.35	4256.51	4385.32	4220.76
23 시	3396.07	3502.47	3432.99	3525.44	3402.77
24 시	2685.77	2753.65	2714.6	2776.81	2690.11
합계	89671.93	88448.55	90284.43	89234.28	89772.32

표 (2)의 시나리오 4는 고려하지 않은 경우와 비슷하게 나타난다. 시나리오 1,3의 전체 비용은 고려하지 않은 경우의 비용보다 더 낮게 나타나는데, 이것은 가격 민감도에 따른 수요 반응의 영향이다. 또한 시나리오 2의 비용이 가장 높게 나타나는데 가격민감도에 따른 수요 반응의 영향이 없을 뿐만 아니라 고객들이 높은 신뢰도를 요구함으로써 그 비용이 증가했음을 보여준다.

3. 결 론

이 논문은 가격 민감도와 신뢰도 민감도를 제안하여 탄력성, 정전 비용, OPF를 사용하여 다양한 고객의 특성에 따른 수요 반응의 영향력을 살펴보았다. 발전 계획을 고객의 특성에 맞게 효율적으로 실시할 수 있음을 볼 수 있다. 추가적인 연구를 통하여 시스템의 신뢰도에서의 영향력을 모의할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] D.S. Kirschen, "Factoring the elasticity of demand in electricity prices", IEEE transaction on power system, vol.15, no.2, pp 612-617,2000
- [2] L. Goel, "Reliability enhancement of a deregulated power system considering demand response", Power Engineering Society General Meeting 2006 IEEE, 2006
- [3] P. Wang, "Technique to evaluate nodal reliability indices and nodal prices of restructured power systems", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol.143, No.2, pp 171-180, 1996
- [4] G. Wacher, "Customer cost of electric service interruptions" Proceeding of the IEEE, vol.77, no.6, pp. 919-930, 1989
- [5] R. Bilinton "A Reliability test system for educational purposes-basic Data", IEEE transactin on power system, vol.4, no.3, pp.1238-1244, 1989