

전력조류추적법을 이용한 무효전력요금 책정방법의 개선

박 성철*, 노 경수
 동국대학교 전기공학과

The Improvement of Calculating Reactive Power Tariffs by Using Power Flow Tracing

Sung-chul Park, Kyoung-soo Ro
 Electrical Engineering, Dongguk University

Abstract - This paper proposes a methodology to compute the servicing price of reactive power in electrical power market of competitive environment. The result of proposed method is proved by a 6-bus sample test system. In this paper we propose the real-time pricing method assigning to variable charges, the downstream power flow tracing assigning to fixed charges. The reactive power will be active by the proposed method through competitive electrical power market.

1. 서 론

전력산업 구조개편으로 독점체제가 무너지고 경쟁체제가 도입되면서 전력회사와 소비자사이의 합당한 전력거래가 이루어져야 한다. 전기의 특성상 거래형태가 매우 복잡하고, 전기가격이나 공급이 불안정할 경우 미치는 영향이 매우 크므로 적절한 구조의 전력거래가 매우 중요하게 된다. 독점체제에서는 고려되지 않았던 전력의 생산과 수송, 그리고 보조서비스(ancillary service)에 대하여 각각의 분리된 가격을 설정할 필요가 생긴다.

보조서비스는 제어지역 내에 전력회사가 상호연계된 송전시스템의 안전한 운전을 유지하는데 필요한 서비스로 정의되어 진다[1]. 중요하게 여겨지는 7가지의 보조서비스는 (1) 발전계획 및 급전, (2) 전압제어(무효전력 운용), (3) 부하추종(자동 발전력 제어), (4) 에너지 불평형 제어, (5) 동기화 예비력(spinning reserve) 확보, (6) 보충 예비력(supplemental reserve) 확보, (7) 유효전력 손실 등을 들 수 있다.

각각의 보조서비스에 대한 비용은 따로 계산되어야 하며, 이들 각각의 비용을 합하면 전체의 보조서비스 비용이 얻어진다.

실시간 가격책정 방법의 방법은 최적화(OPF)문제에 무효전력의 가격을 목적함수 내에 포함하여 비용을 결정하였고[2-4], Baughman은 두 개의 부분으로 구성된 두 레벨의 최적화문제의 해를 구함으로써 전력시스템의 각 버스에서의 가격을 결정하였다[5]. 그러나 실시간 가격책정 방법은 유효전력에 대한 가격을 정의하는데 있어서는 상당히 이론적으로 정립되어 있지만 무효전력부분에 있어서는 부적절한 면이 있다.

본 논문과 관련하여 송전선로의 조류에 대한 발전 또는 부하가 분담하게 되는 전력을 추적하는 여러 방법들[6,7]이 제안되어 있지만 폭 넓게 받아들여지는 것은 없다.

제안하는 방법은 무효전력서비스에 대한 가변비용과 고정비용으로 나누어 회수비용을 구성하는 것이다. 즉, 실시간 가격책정 방법으로 가변비용을 할당하고, 상위전력조류추적 방법으로 고정비용을 할당하는 방법이다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법을 이용함으로써 전력거래에 수반되는 총 보조서비스의 가격을 결정하는데 도움을 줄 것이라 사료된다.

2. 무효전력의 실시간 가격책정 방법

최적화 문제(Optimal Power Flow)의 목적은 등호 제약조건인 전력조류방정식과 부등제약조건인 발전제약, 전압제약, 그리고 선로조류제약을 만족하면서 부하(Load)를 만족하는 총 운전비용(Total operating Cost)을 최소화하는 각 발전기들의 출력을 찾는 것이다. 최적화 문제(OPF)의 목적함수와 라그랑제 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Minimize } C = \sum_{i \in G} C_i(P_{gi}) \tag{3}$$

$$\begin{aligned} TC(P, Q, V, \delta) = & \sum_{i \in G} C_i(P_{gi}) \\ & + \sum_{i \in n} \lambda_{pi} [P_i - \sum_{j \in n} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)] \\ & + \sum_{i \in n} \lambda_{qi} [Q_i + \sum_{j \in n} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)] \\ & - \sum_{i \in G} \mu_{i,p,\min} (P_i - P_{i,\min}) + \sum_{i \in G} \mu_{i,p,\max} (P_i - P_{i,\max}) \\ & - \sum_{i \in G} \mu_{i,q,\min} (Q_i - Q_{i,\min}) + \sum_{i \in G} \mu_{i,q,\max} (Q_i - Q_{i,\max}) \\ & - \sum_{i \in n} \sum_{j \in n}^{i \neq j} \eta_{ij,\min} (P_{ij} - P_{ij,\min}) \\ & + \sum_{i \in n} \sum_{j \in n}^{i \neq j} \eta_{ij,\max} (P_{ij} - P_{ij,\max}) - \sum_{i \in n} \nu_{i,\min} (V_i - V_{i,\min}) \\ & + \sum_{i \in n} \nu_{i,\max} (V_i - V_{i,\max}) \end{aligned} \tag{4}$$

특정시간에 버스 i에서의 실시간 가격책정은 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_{qi} = \frac{\delta L}{\delta Q_{di}}$$

3. 상위전력조류추적 방법

그래프이론은 각 발전기들과 부하들 사이의 전력조류와 선로조류에서 각 발전기들과 부하들의 기여도를 계산할 수 있다. 상위전력조류추적(Downstream Power Flow Tracing)의 방법은 매우 빠르고 효과적인 전력조류에서 부하와 발전기들 사이의 기여도를 계산할 수 있다.

3.1 가정(Assumption)

루프조류 없이 유한모선의 전력시스템에서 적어도 하나의 순수한 자원(Generation)을 가져야 한다. 또한 루프조류 없이 전력시스템에서 적어도 하나의 순수한 부하(Load)를 가져야 한다.

상위전력조류추적방법은 버스 1 → 버스 2 → 버스 3 → 버스 4순으로 그래프이론을 바탕으로 전력조류를 추적한다. 문제를 해결하기 위한 2개의 행렬 즉, 총 부하

전력조류로부터 부하의 추출도 행렬과 총 버스전력조류에서 발전기의 기여도 행렬을 만든다.

3-2. 알고리즘(algorithm)

총 부하전력조류로부터 부하 추출도(A_L)를 표현하면,

$$A_{Li} = \begin{cases} 0 & i \notin \text{net load buses} \\ \frac{\text{net load power on bus } i}{P_i} & i \in \text{net load buses} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 P_i 는 버스 i 로 유입되는 전력조류의 합을 나타낸다. 부하의 추출도 행렬은 음의 값을 가지지 않는다.

총 버스전력조류에서 발전기의 기여도(B)행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{bus-i, bus-k} = \begin{cases} 1 & k=i, k \in \text{net gen. buses} \\ 0 & k=i, k \notin \text{net gen. buses} \\ 0 & k > i \\ 0 & k < i, k \notin \text{net gen. buses} \\ \sum_{j \in i} A_{ij-m} \cdot B_{m-k} & k < i, k \in \text{net gen. buses} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 "k(i)"의 k는 버스 i에서의 상위버스이고, "k(i)"의 k는 버스 i에서의 하위버스를 의미한다.

부하가 시스템의 발전기들로부터 어떻게 배분을 받는지를 나타내면 다음과 같다.

$$P_L = A_L P = A_L B P_G = K_{LG} P_G \quad (7)$$

K_{LG} 는 부하에서 발전기의 기여도행렬을 나타낸다.

4. 제안한 방법

실시간 가격책정 방법의 목적함수는 유효전력을 생산하는 비용을 최소화하는 운전점을 찾는 것이므로 무효전력 가격산정에는 정확한 신호(Signal)를 제공하지 못하고, 또한 목적함수에 유효전력 생산비용과 무효전력 생산비용을 비교해 보면 상대적으로 작은 무효전력 생산비용을 무시하므로 무효전력 가격산정에는 적합하지 않다. 이러한 결점을 보정하기 위해 무효전력의 회수비용을 가변비용과 고정비용으로 나누어 회수한다.

실시간 가격책정 방법에 의한 가변비용을 전체 회수비용의 20%, 상위전력조류추적 방법에 의한 고정비용을 80%로 분리하는 방법으로 각 버스에서의 무효전력서비스에 대한 가격산정방법을 제안한다.

5. 사례 연구

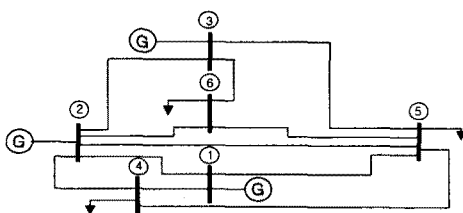


그림 1. 6-모선 테스트 시스템

앞장에서 제시한 방법들을 그림 1에 주어진 테스트 시스템에 적용하여 그 결과를 살펴보기로 한다.

각 발전기들의 설비비용을 200, 140, 170\$/h라 할 때, 각 발전기의 발전범위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &50\text{MW} < P_{g1} < 200\text{MW}, -100\text{MVAR} < Q_{g1} < 150\text{MVAR} \\ &37.5\text{MW} < P_{g2} < 150\text{MW}, -100\text{MVAR} < Q_{g2} < 150\text{MVAR} \\ &45\text{MW} < P_{g3} < 180\text{MW}, -100\text{MVAR} < Q_{g3} < 150\text{MVAR} \end{aligned}$$

5.1 실시간 가격책정 방법의 결과

무효전력의 실시간 가격책정 방법을 적용하기 위하여 MATPOWER2.0(A MATLAB™ Power System Simulation Package)를 사용하여 그 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 실시간 가격책정 방법의 결과

bus number	Voltage Mag(pu)	Angle(deg)	Generation P(MW)	Q(MVAR)	Load P(MW)	Q(MVAR)	λ (\$/MVA-hr)
1	1.100	1.050	79.26	61.20	-	-	-
2	1.099	0.074	122.04	122.34	-	-	-
3	1.100	0.516	112.35	100.40	-	-	-
4	1.008	-1.880	-	-	100.00	100.00	0.733
5	0.992	-2.675	-	-	100.00	100.00	0.801
6	1.016	-2.354	-	-	100.00	100.00	0.497

예제 시스템에서 무효전력을 공급하는데 \$100의 비용이 들었다면, 각 버스의 가격은 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} \text{버스4} &\rightarrow 100 \times 0.733 = 73.3 (\$/h) \\ \text{버스5} &\rightarrow 100 \times 0.801 = 80.1 (\$/h) \\ \text{버스6} &\rightarrow 100 \times 0.497 = 49.7 (\$/h) \end{aligned}$$

5.2 상위전력조류추적 방법의 결과

그래프 이론에 입각하여 선로조류와 부하들에게서 각 발전기의 기여도와 선로조류와 발전기들로부터 각 부하의 추출도를 계산한다. 우선, 발전기들로부터 각 선로조류를 계산하면 다음과 같다.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	0	0	0	0	0	0
2	0.5695	0	0	0	0	0
3	0.4397	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0.4727	0	0	0	0
6	0	0.2256	0	0	0	0
7	0	0.2595	0	0	0	0
8	0	0	0.2580	0	0	0
9	0	0	0.7032	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0

방정식(5)를 적용하면 다음과 같은 추출도 행렬(A_L)을 보여주고 있다.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
L1	0	0	0	0	0	0
L2	0	0	0	0	0	0
L3	0	0	0	0	0	0
L4	0	0	0	1	0	0
L5	0	0	0	0	1	0
L6	0	0	0	0	0	0.9653

방정식(6)을 적용하면 다음과 같은 기여도 행렬(B)을 보일 수 있다.

	P_{01}	P_{02}	P_{03}	P_{04}	P_{05}	P_{06}
P_1	1	0	0	0	0	0
P_2	0	1	0	0	0	0
P_3	0	0	1	0	0	0
P_4	0.5695	0.4727	0	0	0	0
P_5	0.4397	0.2256	0.2580	0	0	0
P_6	0	0.2595	0.6796	0	0	0

방정식(7)을 적용함으로써 발전되는 무효전력의 부하에 대한 배분계수를 얻을 수 있다.

Bus	Load	Supplied by Gen. 1	Supplied by Gen. 2	Supplied by Gen. 3	Total
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	100.0000	34.8534	57.8301	0.0000	92.6835
5	100.0000	26.9096	27.5999	25.9032	80.4127
6	100.0000	0.0000	30.6462	65.8624	96.5086
Total	300.0000	61.7630	116.0762	91.7656	269.6048

유효전력과 무효전력의 관계를 이용하여 각 버스의 무효전력 설비비용을 할당하면 다음과 같다.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\text{버스 1} \rightarrow \frac{225}{625} \times 200 \approx 72 (\$/h)$$

$$\text{버스 2} \rightarrow \frac{225}{450} \times 140 \approx 70 (\$/h)$$

$$\text{버스 3} \rightarrow \frac{225}{549} \times 170 \approx 69.6721 (\$/h)$$

각 부하 버스에서의 가격을 무효전력배분을 이용하여 할당하면 다음과 같이 책정된다.

버스 4 →

$$\frac{34.8534}{61.7630} \times 72 + \frac{57.8301}{116.0762} \times 70 \approx 75.5048 (\$/h)$$

버스 5 →

$$\frac{26.9096}{61.7630} \times 72 + \frac{27.5999}{116.0762} \times 70 + \frac{25.9032}{91.7656} \times 69.6721 \approx 67.6807 (\$/h)$$

버스 6 →

$$\frac{30.6462}{116.0762} \times 70 + \frac{65.8624}{91.7656} \times 69.6721 \approx 68.4866 (\$/h)$$

5.3 제안한 방법의 결과

실시간 가격책정 방법에 의한 가변비용을 전체 회수비용의 20%, 상위전력조류추적 방법에 의한 고정비용을 80%로 분리하는 방법으로 각 버스에 무효전력서비스에 대한 요금을 산정하면 다음과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{버스 4} \rightarrow 73.3 \times 0.2 + 75.5048 \times 0.8 \approx 75.0638 (\$/h) \\ \text{버스 5} \rightarrow 80.1 \times 0.2 + 67.6807 \times 0.8 \approx 70.1646 (\$/h) \\ \text{버스 6} \rightarrow 49.7 \times 0.2 + 68.4866 \times 0.8 \approx 64.7293 (\$/h) \end{array} \right.$$

표 3. 방법에 따른 무효전력서비스 요금의 비교

(단위: \$/h)

bus number	method	Real-Time Pricing	Downstream Power Flow Tracing	Proposed Method
	4		73.3000	75.5048
5		80.1000	67.6807	70.1646
6		49.7000	68.4866	64.7293

6. 결론

전력산업구조개편을 단행함으로써 예전의 독점체제가 무너지고 경쟁체제가 도입됨에 따라 발전 및 송전, 배전 그리고 그 이외에 부과되는 보조서비스에 대한 정확한 요금을 산정할 필요가 있다. 그 중 하나인 시스템의 안정도와 전압조정에 필요한 무효전력의 가격산정에 대한 방법을 본 논문에서는 제시하고 있다. 실시간 가격책정 방법은 유효전력의 생산비용보다 적은 무효전력의 생산비용을 무시하므로 무효전력에 대한 적절한 가격신호를 제공하지 못한다. 그러므로, 전체의 회수비용을 가변비용과 고정비용으로 나누어 각각의 비용을 다른 방법으로 산정하는 방법을 제시하고 있다. 실시간 가격책정 방법은 최소의 운전점을 결정하는 알고리즘으로 가변비용 할당에 적합하고, 상위전력조류추적 방법은 각 발전기와 부하의 기여도를 알 수 있고, 빠르게 계산할 수 있으므로 고정비용 할당에 적합하다.

본 논문에서 제안한 방법은 자유경쟁체 하에서 무효전력에 대한 보조서비스요금을 계산하는데 기여할 수 있고, 전력시장의 활성화를 기대할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] B. Kirby and E. Hirst, "Ancillary Service Costs for 12 U.S. Electric Utilities", Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/CON-427, 1996.
- [2] Joon Young Choi, "Optimal Real Time Pricing of Real and Reactive Powers", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 4, November 1998, pp. 1226-1231
- [3] Maxwell Muchayi, "A summary of algorithms in reactive power pricing", Electrical Power and Energy Systems 21, 1999, pp. 119-124
- [4] Y. Dai, "Analysis of Reactive Power Pricing under Deregulation", IEEE Trans. on Power Systems, 2000
- [5] M. L. Baughman, and S. N. Siddiqi, "Real-time Pricing of Reactive Power: Theory and Case Study Results", IEEE Trans. Power Systems, vol. 6, No. 1, February 1991, pp.23-29
- [6] Goran Strbac, "Allocating Transmission System Usage on the Basis of Traceable Contributions of Generators and Loads to Flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998, pp. 527-534
- [7] Felix F. Wu, "Power Transfer Allocation for Open Access Using Graph Theory-Fundamentals and Applications in Systems Without Loopflow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 3, August 2000, pp. 923-929