

모선 간 전력량을 고려한 전력망 사용요금 산정법

황석현,곽정원,김유창,오창석,박종근
서울대학교

Charging Methodology of line usage based on bus injection

Seok-Hyun Hwang, Jeong-Won Kwak, Yu-Chang Kim, Chang-Seok Oh, Jong-Keun Park
Seoul National University

Abstract - 전력 산업은 대규모 투자가 필수적인 산업이라 자연 독점으로 남아 있게 되는 경우가 다반사이다. 그래서 사용 요금은 시장의 규칙에 의해서가 아니라 규제자에 의해 많은 부수적인 방법을 통해 회수하고 있다. 본 논문에서는 모선 간 전력량을 고려한 전력망 사용요금 산정법을 제안하고자 한다. Equivalent Bilateral Exchange(EBE)와 Relative Electrical Path Width(REPW)를 각각 정의한 후 EBE와 REPW를 이용하여 전력 이동량을 계산하고 모선 간 전력 이동량을 바탕으로 DC 조류 계산을 이용하여 전력망 사용량을 할당하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 검증하기 위해 2기 4모선을 테스트 시스템으로 선정해 기존의 방법과 비교를 해 보았다.

1. 서 론

전력산업은 전력 설비를 건설하고 운영하는 대규모 투자가 필수적인 산업이다. 과거 수직 통합적 체제에서는 전력회사가 미래의 전력수요를 예측하고 적절한 공급 신뢰도를 유지하도록 설비 투자를 실행하였지만 경쟁시장에서는 설비투자의 주체가 전력회사나 국가에서 시장 참여자로 변화되었으며, 이들은 투자를 결정하기 위해서 이윤의 극대화를 최우선으로 고려한다. 특히 장기투자 의사 결정에서 중요한 요소 중의 하나가 고정비의 회수이다.

경제학의 기본 원리에 따르면, 가격이 한계 비용을 반영할 때 소비자 잉여와 생산자 잉여의 합이 가장 커지게 되며, 소비자들은 자신의 소비활동이 특정 제품의 생산 비용에 미치는 영향을 정확히 인식하고 이를 자신의 소비 의사결정에 합리적으로 반영할 수 있게 되어 가장 효율적인 자원 배분이 실현된다. 만약 전기의 가격이 이러한 시장의 규칙에 의해 결정이 된다면 그 가격은 자동적으로 한계비용을 반영한 가격이 될 것이고, 이것이 완전경쟁시장에서 자원이 효율적으로 배분되는 과정이라 할 수 있다. 하지만, 전력 산업은 전력을 생산하고 소비자에게 전달되는 과정에 드는 비용이 아주 크기 때문에 독점적인 형태를 가지고 있을 수밖에 없다. 따라서 생산된 전기를 효율적으로 배분할 수 있는 요금제를 설계하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

수입이 비용을 보상할 수 있도록 요금 구조를 조정하는 방법은 국가마다 시행착오를 거쳐 가며 여러 가지 방법을 시험해 보고 있다. 본 논문에서는 모선 간 전력량을 고려해서 전력망 사용요금을 산정할 수 있는 방법에 대해 제안하고자 한다.

2. 모선 간 전력량 계산

2.1 EBE(Equivalent Bilateral Exchange)

부하 간 송전망의 송전 특성이 동일하다고 가정하면, 부하로 공급되는 전력은 발전 모선의 전력량의 비에 비례해서 공급된다고 볼 수 있다. 이러한 관계를 Equivalent Bilateral Exchange(EBE)라 하고 임의의 발전 모선과 부하 모선 간의 EBE를 수식화하면 다음과 같다.

$$EBE_{ik} = \frac{P_i P_k}{\sum P_g} = \frac{P_i P_k}{P_{sys}} \quad (1)$$

2.2 REPW(Relative Electrical Path Width)

EBE를 설명할 때, 송전 특성이 동일하다고 가정했다. 하지만, 실제 계통은 서로 상이한 특성을 가지고 있기 때문에, 이를 반영하기 위해 모선간 전기적인 관계를 이용하였다. 본 논문에서는 DC 조류계산을 통해 사용량을 할당하기 때문에, 모선간의 전압 관계식은 크게 의미가 없다.

$$\begin{bmatrix} I_g \\ I_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gl} \\ Y_{lg} & Y_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ V_l \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 이용해 V_l 과 I_g 의 형태로 변형하면 다음과 같다.

$$V_l = [Y_{ll}]^{-1} [I_l] - [Y_{ll}]^{-1} [Y_{lg}] V_g \quad (3)$$

$$I_g = [Y_{gl}] [Y_{ll}]^{-1} [I_l] + ([Y_{gg}] - [Y_{gl}] [Y_{ll}]^{-1} [Y_{lg}]) V_g \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_l \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ll} & F_{lg} \\ K_{gl} & N_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_l \\ V_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Z_{ll} = [Y_{ll}]^{-1}$$

$$F_{lg} = -[Y_{ll}]^{-1} [Y_{lg}]$$

$$K_{gl} = [Y_{gl}] [Y_{ll}]^{-1} \quad (6)$$

$$N_{gg} = [Y_{gg}] - [Y_{gl}] [Y_{ll}]^{-1} [Y_{lg}]$$

여기서, K_{gl} 행렬은 발전 모선과 부하 모선으로의 전류 관계를 나타내고 음의 값을 가지므로, 절대값을 취해서 이를 계통의 특징을 나타내는 지수로 사용하였고 이를 Relative Electrical Path Width(REPW)라 정의했다.

2.3 전력 이동량 계산 및 수정

모선 간 전력 이동량은 모선 i와 j간의 전력량과 송전선 특성에 의해 결정되기 때문에 EBE와 REPW의 곱으로 결정된다. 하지만, EBE와 REPW의 곱으로 구한 값은 실제 모선의 발전량이나 부하량과는 일치하지 않기 때문에 모선의 전력량을 맞추기 위한 추가적인 반복 과정이 필요하다.

	Gen 1	Gen 2	...	Load Power
Load 1	PT 11	PT 21	...	PL 1
Load 2	PT 12	PT 22	...	PL 2
...
Gen Power	PG 1	PG 2	...	

<그림 1> 모선간 전력 이동량 구하는 과정

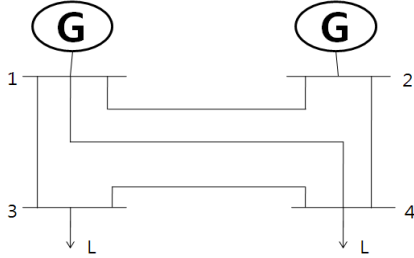
그림 1을 보면 각 모선간 전력 이동량을 PT_{ij} 로 표시하였다. 여기서 PT_{1n} 의 합은 발전기 1의 발전량인 PG_1 과 같아야 하고, PT_{n1} 는 부하량 PL_1 과 같아야 한다. 앞서 설명한 바와 같이 EBE와 REPW의 곱만으로는 실제량과 일치하지 않기 때문에 추가적인 반복 과정이 필요한데, 그 방법은 다음과 같다.

우선 발전 모선의 발전량을 맞춰준다. 세로 방향의 화살표를 따라 있는 PT_{1n} 의 합과 발전량의 차를 구해 부하량의 비에 따라 가중치를 두어 그 값을 각각 더한다. 이와 같은 방법으로 발전량과 PT_{kn} 의 값이 일치하도록 조정한다.

다음으로 부하 모선의 부하량을 맞춰준다. 앞서 설명한 발전량을 맞춰주는 방법과 같은 방법으로 각 부하량의 합과 원래 부하량의 차이를 구해 발전량의 비에 따라 가중치를 두어 그 값을 각각 더해준다. 이와 같은 방법을 반복적으로 사용하여 모선간 전력 이동량을 계산한다.

3. 사례 연구

3.1 Test System



〈그림 2〉 Test system, 2기 4모선

〈표 1〉 Bus Power at Test system

	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 3
Power	350MW	150MW	300MW	200MW

〈표 2〉 Line parameter of Test system

From	To	R (p.u.)	X (p.u.)
1	2	0.065	0.536
1	3	0.031	0.467
1	4	0.072	0.711
2	4	0.019	0.154
3	4	0.028	0.102

3.2 송전선 사용량 계산.

식 (6)을 이용하면 $[K_{gl}]$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[K_{gl}] = \begin{bmatrix} -j0.45 & -j0.33 \\ -j0.55 & -j0.67 \end{bmatrix}$$

그리고, 이 값의 절댓값에 해당하는 값이 REPW 이므로, REPW는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[REPW_{gl}] = \begin{bmatrix} 0.45 & 0.33 \\ 0.55 & 0.67 \end{bmatrix}$$

$$EBE_{13} = \frac{350 \times 300}{500} = 210$$

$$EBE_{14} = \frac{350 \times 200}{500} = 140$$

$$EBE_{23} = \frac{150 \times 300}{500} = 90$$

$$EBE_{24} = \frac{150 \times 200}{500} = 60$$

앞서 설명했던 방법으로 각 모선에 흐르는 전력량을 구하면 다음과 같다.

$$PT_{13} = 216 \text{ MW} \quad PT_{14} = 134 \text{ MW}$$

$$PT_{23} = 84 \text{ MW} \quad PT_{24} = 66 \text{ MW}$$

이 결과를 이용하여 계통에 단일 전원, 단일 부하만 있다고 가정하고 DC 조류 계산을 하면, 표 3과 같은 결과를 얻을 수 있다.

〈표 3〉 Line Flow single generator and single load

	1-2 line	1-3 line	1-4 line	2-4 line	3-4 line
Bus 1-3	55.7	106.3	54.1	55.7	-109.9
Bus 1-4	42.1	51.1	40.9	42.1	51.1
Bus 2-3	-17.6	16.5	1.1	66.4	-67.5
Bus 2-4	-10.1	5.6	4.5	55.8	5.6

Bus 1	48.9	78.7	47.5	48.9	-29.4
Bus 2	-13.85	11.05	2.8	61.1	-30.95
Bus 3	19.05	61.4	27.6	61.05	88.7
Bus 4	16.0	28.35	22.7	48.95	28.35

제안된 방법으로 구한 결과를 PTDF를 이용해 구한 결과 및 Graph Theory를 이용해 구한 결과와 각각 비교해보자.

부하 모선에 1MW를 더 사용했을 때, 발전 모선을 기준으로 조류 계산을 하여 송전선의 조류 변화량을 구해서 표 4의 결과를 얻었다. 이 결과값은 송전선 사용량이 아니라, 부하를 증가시켰을 때 발생하는 발전 모선과 부하 모선의 민감도를 나타내는 척도이다.

〈표 4〉 PTDF applied to Test system

	1-2 line	1-3 line	1-4 line	2-4 line	3-4 line
Bus 1-3	0.3	0.5	0.3	0.3	-0.5
Bus 1-4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4
Bus 2-3	-0.2	0.2	0	0.8	-0.5
Bus 2-4	-0.2	0.1	0.1	0.4	0.1

조류 추적법의 한 방법인 Graph Theory를 통해 얻은 결과는 표 5에 나타내었다.

〈표 5〉 Graph Theory applied to Test system

	1-2 line	1-3 line	1-4 line	2-4 line	3-4 line
Bus 1	70.1	179.4	100.5	70.1	-64.17
Bus 2	0	0	0	150	-55.83
Bus 3	26.4	179.4	37.8	78.8	-120.6
Bus 4	43.7	0	62.7	141.3	0

제안된 방법은 송전선 사용량을 계산할 수 있다는 점에서 PTDF 방법보다 나은 방법이라고 할 수 있고, Counter-flow를 고려할 수 있다는 점에서 조류 추적법보다 나은 방법이라 할 수 있다.

3. 결론

경쟁시장에서 설비투자의 주체인 시장 참여자는 투자를 결정하기 위해서 이윤의 극대화, 즉 고정비의 회수를 최우선으로 고려한다. 하지만, 고정비의 회수는 한계 비용 방법으로는 모두 회수할 수 없는 특성을 갖고 있기 때문에 정책적으로 많은 방법들이 제안되었다.

본 논문에서 제안된 방법은 모선 간 전력 이동량을 사용해 DC 조류계산을 통한 사용량 할당 방법이다. 이 방법은 다음과 같은 장점이 있다.

첫째, 기준 모선에 영향을 받지 않는다. 발전기 하나와 부하 하나만 있는 시스템으로 전체 시스템을 간략화 한 후 DC 조류 계산을 통해 사용량을 할당하기 때문에 PTDF와는 달리 기준 모선의 위치에 영향을 받지 않는 결과를 얻을 수 있다.

둘째, 충분한 지역적인 신호를 제공할 수 있다. 기존의 방법과 비교했을 때, 역조류도 고려할 수 있으며 전력망의 특징을 반영했기 때문에 시스템의 특징을 반영한 지역 신호를 제공할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] 한국전력공사 영입처, “직접구매 도입 및 배전분할 대비 배전/판매 부문 요금전략 연구”, 2003
- [2] Felix F. Wu, Yixin Ni, Ping Ewi, “Power Transfer Allocation for Open Access Using Graph Theory - Fundamentals and Applications in Systems Without Loopflow”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 15, no. 3, pp. 923-929, August 2000
- [3] K. Visakha, D. Thukaram, Lawrence Jenkins, “Transmission charges of power contract based on relative electrical distance in open access,” Electric Power Systems Research, 70(2004), 153-161
- [4] Choong-Kyo Han, Jong-Keun Park, Hae-Sung Jung, “Power Tracing Method for Transmission Usage Allocation Considering Reactive Power,” A : KIEE International Transactions on Power Engineering Volume 5-A Number 1 pp. 79-84, 2005
- [5] 광정원, “모선간 전력량 및 송전 계통 특성을 고려한 송전선 사용량 할당 방법,” 2008