

효용함수 및 조류추적법을 고려한 수익보정에 관한 연구

김종만, 정구형, 한석만, 김발호  
홍익대학교

An Alternative Revenue Reconciliation with Benefit Function and Power Flow Tracing

Kim.J.M, Jung.K.H, Han,S.M, Balho.H.Kim  
Hongik University

**Abstract** - Transmission pricing is one of important issues related to competitive electricity markets since rational pricing scheme ensures a fair competition between the market participants. Any application of marginal pricing method to transmission pricing may accompany revenue reconciliation to recover Transco's revenue requirements. This paper presents an alternative methodology on revenue reconciliation with customer benefit function and power flow.

1. 서 론

경쟁적 전력시장의 도입에 따라 새로 중요시되는 요소 중의 하나가 송전관련 요금체계이다. 특히 송전선 이용료는 시장참여자들이 공유하는 송전설비에 대한 비용을 회수하기 위해 시장참여자에게 할당하는 요금이다. 송전회사는 이를 합리적이고 경제적인 방법으로 산정함으로써 시장참여자들에게 적절한 경제적 신호(signal)를 제공하여 그들의 의사결정에 왜곡을 주지 않아야 한다.

송전비용 산정기법은 두 가지 목적을 고려한다. 첫째는 전력산업 구조개편 이후에도 독점적으로 운영되는 송전회사의 필요수입(Revenue Requirements) 회수를 보장하는 것이고, 둘째는 송전서비스 이용자들에게 부과할 송전요금을 공정하고 합리적인 방법으로 산정하는 것이다. 지금까지 연구된 송전비용 산정기법으로는 크게 총괄비용법(總括費用法, Embedded cost method)과 한계비용법(限界費用法, Marginal cost method)으로 나눌 수 있다. 총괄비용법은 계통 설비 이용상황에 따라 각 송전선 이용자에게 적절히 배분하는 방법으로 필요수입의 회수를 보장하고 적용이 간편하다는 장점이 있지만, 상대적으로 시장 참여자에 대한 형평성 문제를 야기시킨다는 단점이 있다. 이와 관련한 적용방법으로는 우편요금제(MW, MWh-base rule), 구간요금제, 경로산정법, 거리용량방산제(MWM, MM, ZCM)등이 있다. 반면에 한계비용법은 참여자가 계통에 끼치는 한계적 영향에 근거한 배분방식으로 송전서비스에 대한 정확한 경제적 신호를 주는 장점이 있지만, 계산과정이 복잡하고 필요수입의 완전한 회수가 보장되지 않는다는 단점이 있다. 이 경우, 필요수입의 완전 회수를 위해 수익보정(Revenue Reconciliation)과정을 거쳐 부족액을 충당한다.

본 연구에서는 한계비용법으로 회수되지 않은 필요수입부족액을 참여자의 선로이용률 및 계통으로부터 얻는 잉여비용에 따라 비례배분 하였다. 참여자의 잉여비용은 Optimal Power Flow(OPF)로 계산하였으며, 선로이용률은 조류추적법을 이용하였다.

2. 본 론

2.1 송전요금의 산정

송전선 이용료는 합리적이고 경제적인 방법으로 송전사업자의 핵심 송전선 자산의 제공, 운전, 정기적인 보수 등에 따른 비용(운전유지비, 감가상각, 재무적 수익 등)을 회수하게 되며, 이것은 규제당국에 의해 승인되는 필요수입액이다.

2.1.1 사회적 잉여

일반적으로 시장 내에서 생산자(발전사업자)와 소비자(부하사업자) 각각의 행동규범은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[3].

$$\begin{aligned} \text{Consumer Surplus} &= \text{Benefit} - \text{Expenditure} \\ \text{Producer Surplus} &= \text{Revenue} - \text{Cost} \end{aligned}$$

이를 전력산업에 적용을 하면 소비자는 전력을 구매함에 따른 비용을 지불할 때, 소비자 잉여란 일반적으로 전력을 얻기 위해 최대한 지불할 용의가 있는 금액(willingness to pay)과 실제로 지불하는 금액과의 차이, 즉 전력의 구매로부터 발생하는 잉여라고 볼 수 있다. 반면에, 생산자 잉여는 기업이 생산활동을 통해서 얻는 잉여로 실질적인 기업의 이윤이다.

2.1.2 최적조류계산

본 논문에서는 공급자 및 소비자의 효용함수를 고려하므로 사회후생을 최대화하기 위한 최적조류계산을 다음과 같이 정식화하였다.

$$\begin{aligned} \text{MAX} \quad & \text{Social Welfare} \\ \text{s. t.} \quad & G(x) = 0 \\ & H(x) \leq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

위의 최적조류계산을 수행하여 한계송전수입(Marginal Revenue: MR)을 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

$$MR = \sum_i \rho_i [d_i - g_i] \tag{2}$$

$\rho_i, d_i, g_i$  : 모선  $i$ 의 모선한계가격, 수요량, 발전량

송전회사의 필요수입회수를 위한 필요수입부족액은 다음과 같다.

$$RS = RR - MR \tag{3}$$

RS - 필요수입부족액

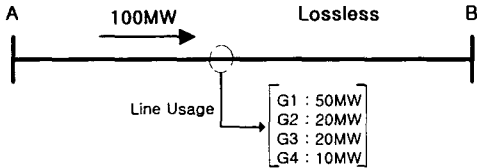
RR - 총 필요수입

MR - 한계비용법으로 회수한 송전비용

2.1.3 조류추적법

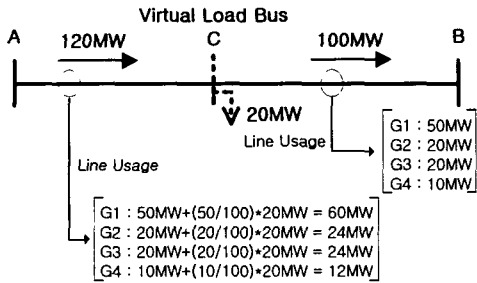
송전선에 흘러가는 조류는 어느 발전기에서 나와 어느

부하로 가는 조류인지 명확히 파악할 수 없다. 참고문헌 [1]에서 Wu는 이에 대한 대안으로 전체 선로조류의 생산자와 소비자를 찾는 방법을 이용하는 전력조류추적방법을 제시하였다. 본 논문에서는 Wu의 방법을 이용하되 손실을 고려한 조류추적법을 수행하고자 한다. 기본적인 가정으로 Wu는 선로손실을 무시(또는 선로 양단에 할당)하였지만(그림 1), 임의의 가상 부하가 손실을 대신한다고 가정하면, 더 정확한 상태파악이 가능하다. 그리고 여기서는 각 선로손실을 참여자의 선로점유율에 비례하여 배분하였다(그림 2). 이외의 절차는 각 선로에 대한 부하모션이 더 늘어났을 뿐, Wu의 방법과 큰 차이는 없다.



(그림 1) 손실을 고려하지 않을 때의 선로조류

Wu는 (그림 1)과 같이 손실을 무시한 상태에서 조류추적을 수행하였다. 하지만 손실 자체만 보더라도 계통에 미치는 영향은 크다. 본 연구에서는, 손실대신 가상 부하모션(Virtual Load Bus)이라는 개념을 도입하여 Wu의 조류추적법에 수정을 가하였다. (그림 2)가 예이다. 모션BC 구간은 손실이 없을 경우이며, 모션AC의 선로 사용정도는 BC사용량에 근거하여 비례배분 하였음을 보여주고 있다.



(그림 2) 손실을 고려할 때의 선로조류

### 2.1.4 필요수입부족액의 할당

한계비용만으로는 송전회사가 필요로 하는 수익을 전량 확보하는 것이 불가능하다.(계통 특성에 따라 다르지만, 대략 15%정도 밖에 회수하지 못한다.) 따라서, 수익보정은 한계비용법을 적용하였을 때, 발생하는 송전회사의 필요수입부족액을 계산하여 계통의 각 참여자에게 할당하는 과정으로, 크게 최적조류계산을 수행하여 결정되는 모션한계가격을 변화하는 방법과, 필요수입부족액을 추가비용으로 처리하는 방법이 있다. 본 연구에서는 사회후생을 최대화하는 최적조류계산 수행 후 한계비용법에 근거한 송전비용 (MR)을 계산하고 필요수입 (RR)과 앞서 계산된 한계수익을 이용하여 필요수입부족액 (RS)을 계산한다. 여기서 계산된 필요수입부족액은 선로 조류량에 따라 다음과 같이 할당된다.

$$RS^k = \frac{f^k}{\sum f^l} \times RS \quad (4)$$

$RS^k$ : 선로- $k$ 에 할당되는 추가비용

$f^k$ : 선로- $k$ 의 조류

최적조류계산으로부터 도출된 선로조류에 대한 조류추적과정을 거치면, 각 선로에 대한 발전기 및 부하의 조류 이용률이 결정된다.

$$i\text{발전기의 선로이용률} : \sum_j \left[ \frac{f^k}{\sum f^l} \times \frac{P_i C_j}{f^k} \right] \quad (5)$$

$$j\text{부하의 선로이용률} : \sum_i \left[ \frac{f^k}{\sum f^l} \times \frac{C_j P_i}{f^k} \right] \quad (6)$$

$P_i C_j$ :  $i$ 발전기가 각 부하( $j$ )에 공급하는 조류량

$C_j P_i$ :  $j$ 부하가 각 발전기( $i$ )로부터 공급받는 조류량

그리고 최적조류계산으로부터 참여자의 잉여(surplus)를 계산한다. 그 후  $i$ 발전기와  $j$ 부하사이의 잉여비율로 각 선로 조류사용에 대한 영향을 평가하였다.

$$\text{발전기측 잉여비율} : \frac{PS_i}{PS_i + CS_j} \quad (7)$$

$PS_i$ :  $i$ 발전기의 잉여,  $CS_j$ :  $j$ 부하의 잉여

그리하여 참여자의 선로사용정도에 따라 참여자들이 계통으로부터 얻는 잉여에 근거하여 추가비용을 다음과 같이 처리한다.

선로- $k$ 에서  $i$ 발전기가 할당받는 부과비용( $AP_{k,i}$ ):

$$\begin{aligned} AP_{k,i} &= \frac{f^k}{\sum f^l} \times \sum_j \left[ \frac{P_i C_j}{f^k} \times \frac{PS_i}{PS_i + CS_j} \right] \times RS \\ &= \sum_j \left[ \frac{P_i C_j}{f^k} \times \frac{PS_i}{PS_i + CS_j} \right] \times RS^k \end{aligned} \quad (8)$$

선로- $k$ 에서  $j$ 부하가 할당받는 부과비용( $AC_{k,j}$ ):

$$\begin{aligned} AC_{k,j} &= \frac{f^k}{\sum f^l} \times \sum_i \left[ \frac{C_j P_i}{f^k} \times \frac{CS_j}{PS_i + CS_j} \right] \times RS \\ &= \sum_i \left[ \frac{C_j P_i}{f^k} \times \frac{CS_j}{PS_i + CS_j} \right] \times RS^k \end{aligned} \quad (9)$$

결국, 시장참여자  $i, j$ 가 송전회사에 지불해야 하는 총 부과비용 (RS)은 다음과 같다.

$$RS = \sum_k [AP_{k,i} + AC_{k,j}] \quad (10)$$

### 2.2 사례연구

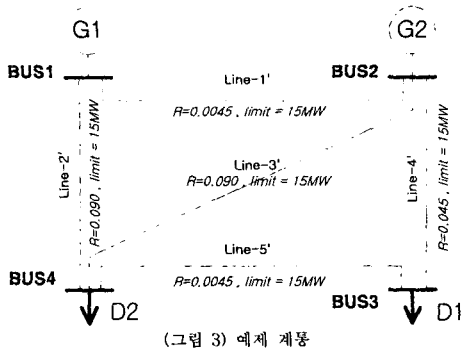
본 연구에서는 GAMS 최적화 프로그램으로 사용하여 최적조류계산을 수행하였으며 사례계통으로 (그림 3(의 4모션, 5선로 계통을 이용하였으며, 총 필요수입액 (RR)은 \$200이라 가정하였다. 적용된 발전기 비용합수 및 부하의 효용합수는 다음과 같다.

$$P(G_1) = 96.000 + 2.50G_1 + 0.250G_1^2$$

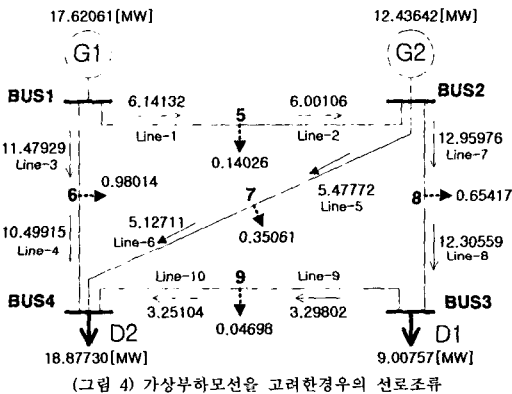
$$P(G_2) = 96.000 + 2.00G_2 + 0.400G_2^2$$

$$CS(D_1) = -10 + 25.0D_1 - 1.30D_1^2$$

$$CS(D_2) = -30 + 25.0D_2 - 0.60D_2^2$$



최적조류계산으로 송전한계수익(MR)은 \$29,934, 필요 수입부족액(RS)은 \$170,066이 나온다. 이후 각 선로손실에 대한 가상부하모션을 추가하여 Wu의 조류추적법을 적용하면(그림 4), (표 1)과 같은 선로에 대한 개별 참여자의 이용계수를 추출할 수 있다.



(표 1) 선로조류에 따른 부과비용 및 참여자의 선로 이용률

선로	조류량 [MW]	부과비용 [\$]	G1(A)		G2(B)	
			D1	D2	D1	D2
1	6.14132	13.6455	0.51810	0.48190	0	0
2	6.00106	13.3339	0.51810	0.48190	0	0
3	11.47929	25.5061	0	1	0	0
4	10.49915	23.3283	0	1	0	0
5	5.47772	12.1711	0	0.32548	0	0.67452
6	5.12711	11.3920	0	0.32548	0	0.67452
7	12.95976	28.7956	0.23916	0.08632	0.49563	0.17889
8	12.30559	27.3421	0.23916	0.08632	0.49563	0.17889
9	3.29802	7.3279	0	0.32548	0	0.67452
10	3.25104	7.2236	0	0.32548	0	0.67452

선로5는 5.47772[MW]만큼을 사용하며 송전회사의 부과비용으로 책정된 금액은 \$12,171이다. 조류의 구성비는 다음과 같다. 즉, 선로5에서 G1에 의해 D1으로 공급되는 양은 없고 D2를 위해 32.5%가 흐른다. 또한 G2의 경우도 마찬가지로 67.5%의 비율로 조류가 D2를 위해 공급되고 있음을 알 수 있다.

다음으로 최적조류계산의 결과로 나온 발전사업자와 부하사업자 간 잉여비용(식(7))을 구하면 다음과 같다.

(표 2) 시장 참여자간 잉여비용

	G1	G2	D1	D2
G1			0.475917	0.335395
G2			0.419876	0.286844
D1	0.524083	0.580124		
D2	0.664605	0.713156		

마지막으로 각 잉여비용만큼 사용량에 따른 필요수입 부족분에 대한 비용을 비례배분하면 (표 3)과 같다.

(표 3) 선로사용 및 잉여비용에 따른 참여자의 상세 할당비용(\$)

선로	(A)				(B)			
	G1	D1	G1	D2	G2	D1	G2	D2
1	3.3634	3.7038	2.2047	4.3688	0	0	0	0
2	3.2866	3.6192	2.1544	4.2690	0	0	0	0
3	0	0	8.5516	16.9455	0	0	0	0
4	0	0	7.8214	15.4986	0	0	0	0
5	0	0	1.3282	2.6319	0	0	2.3541	5.8526
6	0	0	1.2432	2.4634	0	0	2.2034	5.4780
7	3.2764	3.6080	0.8334	1.6514	5.9903	8.2766	1.4771	3.6723
8	3.1110	3.4258	0.7913	1.5680	5.6880	7.8588	1.4025	3.4869
9	0	0	0.7997	1.5846	0	0	1.4173	3.5237
10	0	0	0.7883	1.5620	0	0	1.3971	3.4735

선로1에 대해, D1은 G1보다 적은 비용을 지불하며, 특히 선로3,4에 대해 G1 및 D2는 많은 비용을 지불함을 알 수 있다. 이는 계통으로부터 얻은 수익(잉여)에 근거하여 참여자에게 부가비용을 할당하는 방법을 채택하였기 때문이며, 각 송전선로에 대한 참여자 영향을 효율적으로 평가하게 한다.

최종적으로 각 참여자가 지불하는 부가요금은 (표 4)와 같다.

(표 4) 각 참여자가 지불하는 부가요금(\$)

	Line-1	Line-2	.....	Line-10	부가요금
G1	5.5681	5.4410	.....	0.7883	39.5534
G2	0	0	.....	1.3971	21.9298
D1	3.7038	3.6192	.....	0	66.9000
D2	4.3688	4.2690	.....	5.0355	41.6228

### 3. 결 론

송전비용 산정방법으로 한계비용법은 경제적 효율성을 제공한다는 측면에서 총괄비용법보다 좋다고 할 수 있다. 하지만 송전회사의 완전한 수입보장을 위해서는 수익보정과정이 필요하다. 본 연구에서는 미회수금을 부가요금으로 처리하여 일정한 기준에 의해 재할당하는 방법을 제안하였다. 이는 최적화에 의해 결정된 경제적 신호를 고려하여 송전수익을 결정하고, 미회수금은 다른 기준에 의해 참여자에게 부가비용의 형식으로 재할당한다. 여기서의 할당 기준은 각 선로에 대한 참여자의 기여도 및 계통으로부터 얻은 잉여에 근거한 방법이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(02-전-01) 주관으로 수행된 과제임

### [참 고 문 헌]

- [1] Felix Wu, Yixin Ni, Ping Wei, "Power Transfer Allocation for Open Access Using Graph Theory-Fundamentals and Applications in Systems Without Loopflow", IEEE Transaction on Power System, Vol. 15, No. 3, August 2000
- [2] Balho. H. Kim, "The Economic Efficiency Impacts of Alternatives for Revenue Reconciliation", IEEE Transaction on Power System, Vol. 12, No. 3, p1129-p1135, August 1997
- [3] Surachai Chaitusancy, "Actual Social Welfare Maximization in Pool Market", IEEE Transaction on Power System, p1553-p1558, 2002
- [4] 유정일, 정구형, 신영근, 한석만, 김발호 "수요함수를 고려한 송전비용 산정방안에 관한 연구", 대한전기학회 추계 학술대회 논문집, pp 378-380, 2002
- [5] 김발호, 박종배, "송전선이용료 산정기법"