

전력조류 추적법을 이용한 송전요금 산정법

노경수
동국대학교 전기공학과

A Method of Power Transmission Pricing using Power Flow Tracing

Kyoung-Soo Ro
Department of Electrical Engineering, Dongguk University

Abstract - The methodologies of power transmission pricing are normally divided into two categories such as marginal cost method and embedded cost allocation method. This paper, first, discusses the possible problems that can occur when the marginal cost method is applied to pricing the transmission services. Next, the paper proposes a method to apply the power flow tracing to the transmission network charge. The result of the power flow tracing method is then used in MW-mile method to charge individual loads for the use of transmission network. Effectiveness of the algorithm is verified by computer simulations.

1. 서론

발전된 전력의 요금은 전력시장에서 결정되는 것이 일반적이지만 반하여 전력의 수송을 담당하는 송전서비스는 경쟁이 아닌 독점체제를 유지하기 때문에 송전서비스의 요금산정이 가장 중요하게 여겨지며 또한 가장 어려운 문제에 속한다. 송전서비스의 요금은 규제대상이며, 이 요금이 총 송전비용을 모든 이용자에게 공평하게 분배하는가, 즉 송전서비스 제공이 송전회사와 서비스 이용자 모두에게 적절한가를 결정하는데 결정적인 역할을 한다. 경쟁체제하에서 송전요금을 계산하기 위해 이미 탈규제적 법령제정 이전에 개발된 탁송(wheeling)요금 계산방법들이 이용되고 있다. 여기서 송전과 탁송을 다음과 같이 구분하여 사용하고자 한다. 탁송은 전력판매자와 구매자를 위하여 전력을 전송해 주는 전력회사(발전과 송배전 모두를 담당)의 송전설비를 이용하는 것으로 정의되는데 [1] 반하여 송전은 송전설비만을 소유하는 송전회사의 설비를 이용하는 것이다. 따라서 송전요금과 탁송요금은 보통 일치하지 않으며 송전요금이 송전서비스에 대한 요금으로서 보다 일반적이라고 할 수 있다. 송전요금을 산정하기 위한 다양한 방법들이 제안되었으며 이들 방법들은 크게 총괄비용배분법과 한계비용법의 두가지로 구분할 수 있다 [1, 2]. 이들 방법들에 대한 설명과 비교는 2장에서 언급될 것이다. 경제학자들은 한계비용법 [3, 4, 5]이 시스템의 운전에 대한 경제적인 신호를 제공할 수 있기 때문에 송전서비스에 대한 한계비용을 기반으로 송전요금을 계산하는 방법론에 집착할 수 있으나 이 방법은 송전서비스에 대한 한계비용을 정확하게 구하는데 어려움이 따른다. 그리고 한계비용이

매우 가변적이며 항상 수입금 조정(revenue reconciliation) 단계를 거쳐야 하는 문제점이 관측되고 있기 때문에 한계비용법이 전력전송을 위한 송전서비스 요금결정에 적용하는 데 효과적이라고는 할 수 없다. 한편, 총괄비용배분법 [1, 6, 7]은 송전설비비용을 확실하게 회수할 수 있으며 구현하기가 쉽다는 장점이 있다. 이 방법은 역으로 실제 시스템의 운전상황에 대한 정보를 무시하고 있기 때문에 경제적인 관점에서 송전설비 이용자들에게 부정확한 정보를 제공하는 단점을 내포한다.

본 논문의 목적은 첫째, 이와 같은 송전요금 산정을 위한 한계비용법 적용의 문제점을 지적하는 것이다. 둘째, 전력조류 추적법을 거리용량병산법에 적용하여 각 부하에 송전요금을 부과하는 방법을 제안하는 것이다.

2. 송전(탁송)요금 산정법

고속도로 이용자가 고속도로 사용량만큼의 고속도로 통행료를 내는 것과 마찬가지로 송전설비 이용에 대해서도 송전설비를 이용한 정도에 따라 송전선 이용자에게 송전요금이 공평하게 부과되어야 한다. 송전요금 산정은 송전에 관련된 비용을 송전요금으로 변환해내는 과정을 말하며 산정방법으로는 크게 총괄비용배분법과 한계비용법으로 나눌 수 있다. 이 장에서는 두가지 방법의 각각에 대해서 검토한 후 한계비용법을 송전요금 산정에 적용할 경우의 문제점을 밝히고자 한다.

2.1 총괄비용배분법

총괄비용배분법에서는 먼저 송전선로의 건설비, 운용비 및 추가 증설비용 등, 송전서비스에 관련된 제반비용을 일괄하여 하나의 비용으로 합친다. 다음에 이 비용을 송전선 이용자들에게 송전선 사용정도에 따라 적절히 배분하는 것이다. 이 방법은 적용이 간편하며 투자비용의 회수를 보장할 수 있게 송전요금을 산정할 수 있는 장점이 있어 독점기업의 비용회수를 위해 널리 이용되고 있다. 송전선 이용자들의 송전선 사용정도를 어떻게 정의하는가에 따라 다양한 송전요금 산정방법들이 제안되었으며 이러한 총괄비용배분법의 종류로는 우편요금법(Postage stamp rule), 계약경로법(Contract path rule), 거리용량병산법(MW-mile rule) 등이 있다. 위 방법들의 자세한 내용은 참고문헌 [1, 6, 7]에 설명

되어 있다.

우편요금법은 구현방법이 간단하기 때문에 가장 대표적인 송전요금 계산법의 하나이며 또 하나의 장점으로선 전체 송전시스템을 하나의 중앙집중적으로 운전되는 시스템으로 볼 수 있는 것이다. 하지만 이 방법은 실제 송전시스템의 운전현황에 대한 정보를 반영하지 않기 때문에 송전선 이용자들에게 경제적인 관점에서 부정확한 정보를 제공하는 셈이다.

계약경로법은 송전시스템내에서 전력조류의 경로를 가정함으로써 이 계약경로상의 송전 설비비용을 송전선 이용자들에게 할당하는 것으로 요금산정이 용이한 장점이 있다. 하지만 이 방법 역시 실제 송전시스템의 운전현황에 대한 정보를 반영하지 못한다. 거래되는 전력은 계약경로를 통하여 흐르는 것이 아니라 대부분 계약경로외의 다른 송전설비를 통하여 흐르며(순환조류 혹은 병렬조류라 일컫음) 이것이 계약경로외의 송전설비의 증설을 필요로 하게 할 수도 있다.

거리용량병산법은 거래되는 전력의 크기와 거래가 이루어지는 두 점사이의 거리를 바탕으로 송전선 이용자에게 송전설비의 제반비용을 할당하는 것을 말한다. 이 방법도 실제 송전시스템의 운전현황에 대한 정보를 반영하지 못하지만 각 송전설비의 최대 이용량에 기초하여 송전요금을 할당하기 때문에 부분적으로 시스템의 보안을 위한 계획과정을 흉내낸다고 할 수 있다.

이러한 총괄비용배분법은 현재 존재하는 송전설비에 대한 비용만을 고려하고 있으며 송전설비 용량의 과부족에 대한 정보를 무시하고 있기 때문에 경제적인 관점에서 보면 효과적이지 못하다. 반면 이 방법은 적용하기가 비교적 용이하며 송전설비의 투자비에 대한 회수를 보장해 줄 수 있는 장점이 있다.

2.2 한계비용법

한계비용법은 송전요금을 한계비용에 의하여 산정하고자 하는 방법이다. 하지만 이 방법은 장소에 따라 다른 현물가격제(spot pricing)와 탁송요금(wheeling rate) 산정방법에서 유래한다[3, 4, 5]. 부하패턴, 가용발전력과 가용송전용량 등이 시간에 따라 변하므로 탁송을 담당하는 전력회사의 발전력 배분과 요금이 변하게 된다. 송배전 과정의 손실 및 제동안전도 등을 고려하기 때문에 다른 모선에서 전기요금이 다르게 결정되게 된다. 탁송은 한 지역에서 전기를 구입하여 다른 지역에서 그 전기를 판매하는 것이라고 볼 수 있으므로 그 현물가격의 차이가 그 탁송요금을 결정한다.

탁송회사 w가 t시간동안 I^w만큼의 전기에너지를 탁송한다고 하면 최적의 탁송비용 x^w(t)는 다음과 같이 탁송회사 w의 탁송에 대한 한계비용으로 정의한다[3].

$$x^w(t) = \frac{\partial C^w(t)}{\partial I^w(t)} \quad (1)$$

여기서,

I^w(t): t시간동안 탁송된 에너지의 양(kWh).

C^w(t): t시간동안 탁송회사 w의 총운전비용(\$).

또한, 선로제약조건과 발전제약조건이 구속되지 않는 경

우, t시간동안 모선 k에서의 현물가격 ρ_k(t)는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_k(t) = \lambda^w(t) \left[1 + \frac{\partial L^w(t)}{\partial D_k(t)} \right] \quad (2)$$

여기서,

λ^w(t): t시간동안 탁송회사 w의 한계운전비용.

(시스템 λ).

L^w(t): t시간동안 탁송회사 w의 송전손실.

D_k(t): t시간동안 모선 k의 전력수요.

이제, 탁송회사 w내에 존재하는 모선 s에서 모선 b로 I^w만큼의 에너지를 판매한다고 하면 탁송회사 w의 탁송비용 x^w(t)는 다음과 같이 표현된다[4].

$$x^w(t) = \rho_b(t) - \rho_s(t) \quad (3)$$

여기서,

ρ_b(t): t시간동안 b모선에서의 현물가격.

ρ_s(t): t시간동안 s모선에서의 현물가격.

따라서 두 모선사이의 탁송요금은 각 모선에서 한 단위의 전력을 생산하는 비용의 차이로 나타난다. 그리고 이러한 한계비용으로 표현되는 각 모선의 현물가격은 최적전력조류(optimal power flow, OPF) 계산 프로그램에 의해 구해질 수 있다.

2.3 송전요금 산정에 한계비용 적용의 문제점

앞 절에서 언급한 한계비용법은 탁송을 담당하는 전력회사(발전과 송배전 모두를 담당)의 탁송요금 산정을 위한 방법으로 제안되었으며 이 방법이 그대로 송전요금 산정에 적용되기에는 문제점이 있다.

한계비용법을 이용하여 탁송요금을 계산할 경우 수치상으로 음의 값이 나올 수도 있으며[5], 따라서 이 방법이 실제로 적용되기에는 문제점이 있다고 볼 수 있다. 이 경우 한계비용법을 이용하여 구한 탁송요금이 충분한 투자비와 운전비를 회수하지 못하기 때문에 수입금 조정단체를 반드시 거쳐야 한다. 한계비용법으로는 총 송전비용의 약 15-30%정도만을 회수할 수 있으며 나머지 70-85%정도를 수입금 조정단체에서 회수해야 한다[8, 9]. 이 말은 역으로 한계비용을 이용한 탁송요금 결정이 탁송서비스에 대한 비용을 제대로 반영하지 못한다는 증거가 된다.

(2)식을 (3)식에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$x^w(t) = \lambda^w(t) \left[\frac{\partial L^w(t)}{\partial D_b(t)} - \frac{\partial L^w(t)}{\partial D_s(t)} \right] \quad (4)$$

(4)식에서 보면 탁송비용은 탁송이 이루어지는 두 모선에서 송전손실에 대한 편미분의 차이에 의해 좌우된다. 작은 값이나마 송전손실이 존재하기 때문에 0이 아닌 탁송비용이 산출된다. 하지만 이상적인 경우를 상정하여 송전손실이 없다고 가정하면 탁송비용은 0이 되게 된다. 송전 설비비용에 의해 탁송비용이 결정되는 것이 아니라 송전손실에 의해 탁송비용이 결정되는 것이 된다.

한계비용법은 탁송서비스에 대한 비용을 계산하는데 그 탁송에 관련된 송전설비의 투자비와 운전비를 고려하지 않고 두 모선간 현물가격의 차이를 이용하고 있다. 그 현물가격은 결국 발전소의 발전비용에 기초하여 계산되어지므로 탁송비용이 발전비용을 기초로 하여 구해지게 된다. 따라서 두 모선간의 송전설비 투자비의 크기에 상관없이 탁송비용이 결정되는 셈이다.

이상에서 살펴본 바에 의하면 총괄비용배분법과 한계비용법의 두 방법은 각자 장단점을 내포하고 있다고 볼 수 있다. 위에서 언급한 문제점에도 불구하고 한계비용법은 송전시스템의 운전적인 측면에서 장소에 따라 다른 경제적인 정보를 제공하는 잇점을 지니고 있다.

종합해 보면 어느 한 방법으로 송전요금을 산정하는 것은 부정확하게 여겨지며 송전설비의 투자비용에 대한 최수는 총괄비용배분법 중의 한 방법을 적용하는 것이 타당해 보이며 송전시스템의 운전비용 최수는 한계비용법을 적용하는 것이 유리하리라 여겨진다. 하지만 두 비용의 차이를 살펴보면 초기 투자비용의 비중이 훨씬 크기 때문에 송전비용의 계산은 총괄비용배분법을 이용하는 것이 나으리라 생각된다.

3. 전력조류 추적을 이용한 송전요금 결정

이 절에서는 참고문헌 [8]에서 소개한 전력조류 추적법을 소개한 다음 풀 형태로 전력시장이 운영되는 경우 전력조류 추적법을 거리용량병산법에 적용하여 일반적인 송전요금을 부하에 부과하는 방법을 제안하고자 한다.

먼저 전력조류 계산 프로그램에 의해 각 선로의 송전손실분을 계산할 수 있으며 그 송전손실분은 발전원개개의 요소분으로 나누어질 수 있다고 가정한다. 한 모선의 실제 발전출력에서 분담된 손실분을 뺀 것을 그 모선의 가상 발전출력이라고 부를 수 있다. 그러면 한 모선에서 전력조류의 나가는 방향에 따라 성립하는 가상 전력 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$P_i^n = \sum_{j \in \gamma_i} |P_{i-j}^n| + P_{R,i} \quad (5)$$

여기서,

P_i^n : 미지의 값으로 모선 i 의 가상 모선전력.

P_{i-j}^n : 미지의 값으로 선로 $i-j$ 의 가상 선로조류.

$P_{R,i}$: 모선 i 의 부하.

γ_i : 전력조류가 모선 i 로부터 나와서 들어가는 모선들의 집합.

선로손실분은 선로조류에 비하면 상당히 작기 때문에 근사적으로 다음 식이 성립한다.

$$|P_{i-j}^n| = |P_{j-i}^n| = \frac{|P_{j-i}^n|}{P_j^n} P_j^n \cong \frac{|P_{j-i}|}{P_j} P_j^n \quad (6)$$

그러면 식(5)은 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$P_i^n - \sum_{j \in \gamma_i} \frac{|P_{j-i}|}{P_j} P_j^n = P_{R,i} \quad (7)$$

또는 행렬표현법으로 나타내면

$$A_d P^f = P_R \quad (8)$$

여기서,

A_d : $(N \times N)$ 행렬.

N : 전체 모선의 갯수.

P^f : 미지의 값으로 가상 모선전력 벡터.

P_R : 부하의 벡터표현.

그러면 가상 모선전력 값을 아래의 수식으로 계산할 수 있다.

$$P^f = A_d^{-1} P_R \quad (9)$$

$$\text{또는 } P_i^n = \sum_{k=1}^n [A_d^{-1}]_{ik} \cdot P_{R,k} \quad (10)$$

비례적 분담원리(proportional sharing principle)를 이용하면, 가상 선로조류 값은 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{i-j}^n &= \frac{P_{i-j}^f}{P_i^n} P_i^n \cong \frac{P_{i-j}^f}{P_i} \sum_{k=1}^n [A_d^{-1}]_{ik} \cdot P_{R,k} \\ &= \sum_{k=1}^n R_{i-j,k} \cdot P_{R,k} \end{aligned} \quad (11)$$

$R_{i-j,k}$ 는 선로 $i-j$ 의 선로조류 값에 대한 k -모선 부하의 분담계수이며 아래 식으로 나타내어진다.

$$R_{i-j,k} = \frac{P_{i-j}^f}{P_i} [A_d^{-1}]_{ik} \quad (12)$$

각 부하모선이 부담하여야 할 송전요금에 대한 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TC_k = \sum_j \sum_i a_{i-j} * R_{i-j,k} * P_{R,k} * L_{i-j} \quad (13)$$

여기서,

TC_k : k -모선 부하가 부담하여야 할 송전요금.

결국, (12)에 주어진 선로조류에 대한 부하의 분담계수를 거리용량병산법에 적용함으로써 각 부하모선이 부담하여야 할 송전요금을 구할 수 있다. 참고문헌 [8]에서 소개하고 있는 선로조류에 대한 발전모선의 분담계수를 거리용량병산법에 적용하면 각 발전모선이 부담하여야 할 송전요금을 구할 수 있으며, 또는 두 방법을 병행함으로써 송전요금을 부하와 발전모선에 일정 비율로 나누어 부담시킬 수도 있을 것이다.

4. 사례 연구

앞 장에서 제안된 송전요금 계산 알고리즘을 그림 1에 주어진 샘플 시스템에 적용하여 그 효용성을 살펴보기로 한다. 전력조류 계산에 필요한 시스템의 발전력, 부하 및 선로에 대한 값들은 부록에 나타나 있다. 표 1은 전력조류 계산의 결과 중 유효전력의 흐름을 보여주고 있다. 양(+)의 값은 전력의 흐름이 그 모선에서 나가는 방향이며 음(-)의 값은 그 모선으로 들어오는 방향을 의미한다. 그 두 값의 합이 그 선로의 선로손실에 해당된다.

식 (12)의 결과로써 선로조류에 대한 각 부하의

분담계수가 표 2에 주어지고 있다. 선로 1-4에 흐르는 조류에 대해서는 부하 4, 5, 9가 분담하고 있으며 분담계수는 각각 1.0, 0.511, 0.43이다. 그리고 선로 4-5의 조류에 대해서는 부하 5만이 분담하고 있으며 분담계수는 0.511이다. 분담계수의 활용에 대해서는 예를 들어, 모선 5의 부하값이 90MW이므로 선로 4-5의 유효전력 조류값은 90×0.511 에 의해 45.99MW가 됨을 알 수 있으며, 이 값은 선로 4-5의 조류가 5번 모선으로 주입되는 값(46.01MW)과 거의 일치함을 알 수 있다.

표 3은 식 (13)를 이용하여 각 송전선로의 송전요금에 대한 부하모선의 분담분과 각 부하가 부담하여야 할 전체 송전요금을 보여주고 있다. 모선 4, 6, 8번

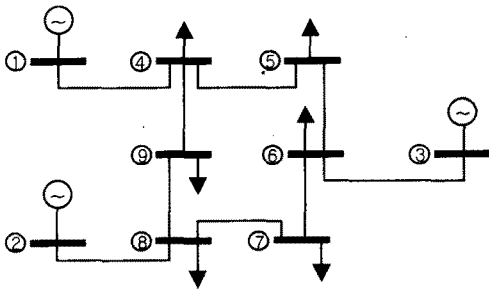


그림 1 9-모선 샘플 시스템.

표 1. 유효전력 흐름에 대한 조류계산 결과 (MW).

부 터	까 지	P(부터)	P(까지)	손 실
1	4	111.34	-110.26	1.082
4	5	46.88	-46.01	0.871
5	6	-43.99	45.26	1.264
3	6	85.00	-84.13	0.868
6	7	28.88	-28.38	0.499
7	8	-71.62	73.24	1.621
8	2	-160.99	163.00	2.009
8	9	73.75	-71.22	2.529
9	4	-53.78	55.38	1.598

표 2. 선로조류에 대한 각 부하의 분담계수.

선로	부하4	부하5	부하6	부하7	부하8	부하9
1-4	1.000	0.511	0.0	0.0	0.0	0.430
4-5	0.0	0.511	0.0	0.0	0.0	0.0
6-5	0.0	0.489	0.0	0.0	0.0	0.0
3-6	0.0	0.489	1.0	0.284	0.0	0.0
6-7	0.0	0.0	0.0	0.284	0.0	0.0
8-7	0.0	0.0	0.0	0.716	0.0	0.0
2-8	0.0	0.0	0.0	0.716	1.000	0.570
8-9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.570
4-9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.430

표 3. 각 부하가 부담하여야 할 송전요금 (\$).

선로	부하4	부하5	부하6	부하7	부하8	부하9
1-4	22.40	128.77	0.0	0.0	0.0	150.50
4-5	0.0	251.11	0.0	0.0	0.0	0.0
6-5	0.0	440.10	0.0	0.0	0.0	0.0
3-6	0.0	110.03	25.00	71.00	0.0	0.0
6-7	0.0	0.0	0.0	215.84	0.0	0.0
8-7	0.0	0.0	0.0	412.42	0.0	0.0
2-8	0.0	0.0	0.0	250.60	49.00	249.38
8-9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	467.40
4-9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	650.38
총합	22.40	930.00	25.00	949.86	49.00	1367.15

은 부하값이 작고 발전소로부터 거리가 가깝기 때문에 송전요금이 작게 나왔으며 부하 9의 경우는 선로 4-9의 길이가 길 뿐만 아니라 단위길이당 비용상수의 값이 크기 때문에 많은 송전요금이 부과되었다.

5. 결 론

전력회사들의 일정지역에서의 독점체제가 무너지고 전력판매에 경쟁체제가 도입됨에 따라 발전, 송배전 및 보조서비스에 대한 정확한 비용을 산정할 필요가 있게 된다. 본 논문에서는 송전설비 이용에 대한 요금을 계산하는 방법을 다루고 있다. 탈규제적 범규 공표이전부터 논의되고 있었던 탁송에 관한 요금산정과 송전요금사이의 차이점을 검토하였으며 탁송요금 산정을 위해 제안되었던 한계비용법을 송전요금 산정에 적용할 경우의 문제점을 제시하였다. 한계비용법은 시스템의 운전에 대한 경제적인 신호를 제공할 수 있는 장점 때문에 널리 이용되고 있으나 송전요금 산정에서는 수입금 조정단계를 항상 수반하게 되는 불합리한 측면이 있다. 본 논문에서는 전력조류 추적법을 거리용량병산법에 적용하여 송전요금을 결정하는 방법을 제안하였다. 송전선로의 유효전력 조류에 대한 각 부하의 분담분을 이용하여 송전선로의 전력조류에 책임이 있는 부하들을 밝혀낼 수 있으며 그 부하들의 선로조류에 대한 분담분은 얼마인지, 부하들의 송전서비스에 대한 총 송전비용이 얼마인지를 계산하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] H.H. Happ. "Cost of Wheeling Methodologies", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, Feb. 1994, pp. 147-156.
- [2] D. Shirmohammadi et al., "Some Fundamental Technical Concepts about Cost Based Transmission Pricing", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 2, May 1996, pp.

1002-1008.

- [3] M.C. Caramanis et al., "The Costs of Wheeling and Optimal Wheeling Rates", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 1, No. 1, February 1986, pp. 63-73.
- [4] M.C. Caramanis et al., "WRATES: A Tool for Evaluating the Marginal Cost of Wheeling", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 4, No. 2, May 1989, pp. 594-605.
- [5] R. Mukerji et al., "Evaluation of Wheeling and Non-Utility Generation(NUG) Options using Optimal Power Flows", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, Feb. 1992, pp. 201-207.
- [6] R.R. Kovacs and A.L. Leverett, "A Load Flow Based Method for Calculating Embedded, Incremental and Marginal Cost of Transmission Capacity", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, Feb. 1994, pp. 272-278.
- [7] D. Shirmohammadi et al., "Evaluation of Transmission Network Capacity Use for Wheeling Transactions", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 4, No. 4, October 1989, pp. 1405-1413.
- [8] J. Bialek, "Topological Generation and Load Distribution Factors for Supplement Charge Allocation in Transmission Open Access", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 3, August 1997, pp. 1185-1193.
- [9] H. Rudnick et al., "Evaluation of Alternatives for Power System Coordination and Pooling in a Competitive Environment", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 605-613.
- [10] J.W. Marangon Lima, "Allocation of Transmission Fixed Charges: An Overview", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 3, August 1996, pp. 1409-1418.