

송전선로의 유효전력 손실을 각 부하에 배분하는 방법

論 文

49A-1-3

An Approach to Allocate Real Power Losses of Transmission Lines to Individual Loads

盧 旻 洙*
(Kyoung-Soo Ro)

Abstract - The paper proposes a simple method to calculate the portion of real power losses of transmission lines allocated to individual loads. The method is implemented by defining loss distribution factors, and analyses the loads' shares in the transmission line losses. The paper also performs calculation of sensitivities of the line losses with respect to load changes so as to be easily employed in on-line applications. Effectiveness of the algorithm is verified by computer simulations and it is estimated that the results can be used to compute the cost of one ancillary service under deregulated environment in electric power industries.

Key Words : 유효전력 손실, 보조서비스(ancillary service), 손실배분계수, 송전선 개방

1. 서 론

전력회사들이 일정 지역에서 전력의 생산, 수송 및 배분을 독점하는 상황에서 벗어나 전력의 판매에 경쟁체제가 도입되는 것이 미국을 비롯한 전세계적인 추세이다. 이러한 변화에 대한 기본적인 생각은 발전된 전기에너지(상품)와 송전(배달서비스)을 분리하는 것이 가능하며 또한 바람직하다는 데 있다. 이것은 전력의 수요자와 공급자가 전력의 송전서비스를 선택 이용함으로써 가능하며, 송전회사는 차별대우없이 제삼자에게 투자비에 근거한 가격으로 송전서비스를 제공하여야 한다. 그러면 기존의 독립체제에서는 고려되지 않았던 전력의 생산과 수송 그리고 보조서비스(ancillary service) 각각에 분리된 가격을 설정할 필요가 생긴다.

송전회사는 그들의 수요자에게 제공할 보조서비스에 대한 가격을 시간의 변화에 따라 정확히 계산할 필요가 있다. 왜냐하면 이 가격변화가 시간, 장소 및 시스템의 상태 등의 합수로 주어지기 때문이다. 미국의 연방에너지조정위원회(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)에 의하면 보조서비스는 다음과 같이 정의되어진다[2]; "제어영역내에서의 무적으로 판매자에서 구입자까지의 전력수송을 원활하게 하는데 필요한 서비스와 그 제어영역내의 전력수송회사가 상호연계된 송전시스템의 안전한 운영을 유지하는데 필요한 서비스". 중요하게 여겨지는 일곱 가지 보조서비스로서는 (1) 전압제어(무효전력 운용), (2) 부하추종(자동 발전력 제어), (3) 에너지 불평형 제어, (4) 동기화 예비력(spinning reserve) 확보, (5) 보충 예비력(supplemental reserve) 확보, (6) 유효

전력 손실, 및 (7) 특정선로 혼잡 해소(congestion management) 등을 들 수 있다. 각각의 보조서비스에 관여되는 비용은 따로따로 계산되어야 하며 이들 각각의 비용을 합하면 전체 보조서비스 비용이 얻어진다.

보조서비스 분야의 연구동향을 살펴보면 기존의 자동 발전력 제어 프로그램을 수정하여 부하추종 서비스에 대한 비용 산정 및 비용과 연계된 운전방법이 시도되고 있으며[3, 4], 전압제어를 위해 필요한 무효전력 운용에 관한 비용산정을 다루는 연구가 수행되고 있다[5]. 또한 전력회사들이 경쟁체제로 바뀔으로써 발생가능성이 높은 특정선로 혼잡 해소를 위한 연구도 활발히 이루어지고 있다 [6, 7]. 본 연구는 유효전력 손실에 관한 서비스를 다루며 유효전력 손실은 발전된 유효전력과 수요자에게 공급된 유효전력과의 차이로 구해진다. 유효전력 손실에 관한 서비스는 발전설비와 연료를 이용하여 발전기에서 수요자에 이르기까지 전력조류에 수반되는 송전선로의 손실을 보상하는 것이다.

송전선로의 특성상 선로의 저항값을 없앨 수 없기 때문에 유효전력 손실은 전력을 전송하는 곳에는 항상 존재하게 된다. 선로손실은 시스템의 구조와 상태, 발전기들의 위치와 출력값, 부하의 위치와 수요량 등에 의해 달라지며, 송전시스템 부하값의 약 3%가 유효전력 손실로 소비되는 것이 보통이다. 그렇지만, 그 손실은 시스템의 조건들이 변하면 크게 달라진다. 특히 시스템의 부하수준이 매우 높은 경우 그 손실은 평균부하수준인 경우보다 더 많아지게 된다. 그리고 손실의 비선형특성으로 인하여 손실에 따르는 비용을 이와 관련된 부하들에 배분하는 계산이 간단하지 않다. 일반적으로 송전선로 손실을 측정하기는 어려우며 전력조류의 컴퓨터 프로그램에 의해 계산되어진다. 그 프로그램을 이용하면 거의 실시간으로 유효전력 손실값을 계산할 수 있게 된다.

이미 각 선로의 전력조류에 대한 각 발전기의 부담분을 계

* 正 會 員 : 東國大 工大 電氣工學科 專任講師. 工博
接受日字 : 1999年 5月 17日
最終完了 : 1999年 10月 26日

산하는 연구가 수행되어 왔으며[9, 11, 13, 14, 15] 또한 배전 시스템에서 손실을 각 부하에 분배하는 수식이 제안되기도 하였다[16]. 본 논문에서는 각 선로의 전력조류에 대한 각 부하의 분담분을 이용하여[11] 각 선로에서 생기는 선로손실을 각 부하에 배분하는 방법을 제시하고자 한다. 손실배분계수(loss distribution factor)를 정의하여 그 값을 구하는 알고리즘을 제시하고자 하며 아울러 부하변화에 따른 선로손실의 변화를 구할 수 있는 감도(sensitivity)식을 유도하여 실시간 적용을 쉽게 하고자 한다.

2. 손실배분계수를 이용한 유효전력 손실의 배분

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

$$P_i^f = \sum_{j \in \gamma_i} |P_{ij}^f| + P_{Ri} \tag{1}$$

여기서, P_i^f 는 미지의 값으로 모선 i 의 가상 모선전력값이며, $|P_{ij}^f|$ 는 미지의 값으로 선로 i - j 의 가상 선로조류값이며, P_{Ri} 는 모선 i 의 부하값이며, 그리고 γ_i 는 전력조류가 모선 i 로부터 나와서 들어가는 모선들의 집합이다.

선로손실분은 선로조류에 비하면 상당히 작기 때문에 근사적으로 다음 식이 성립한다.

$$|P_{ij}^f| = |P_{ji}^f| = \frac{|P_{ji}^f|}{P_j^f} P_j^f \cong \frac{|P_{ji}|}{P_j} P_j^f \tag{2}$$

그러면 식(1)은 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$P_i^f - \sum_{j \in \gamma_i} \frac{|P_{ji}|}{P_j} P_j^f = P_{Ri} \tag{3}$$

또는 행렬표현법으로 나타내면

$$A_d P^f = P_R \tag{4}$$

여기서, A_d 는 전체 모선의 갯수를 n 이라고 하면 ($n \times n$) 행렬이며, P^f 는 미지의 값으로 가상 모선전력 벡터이며, 그리고 P_R 은 부하의 벡터표현법이다. 그러면 가상 모선전력 값을 아래의 수식으로 계산할 수 있다.

$$P^f = A_d^{-1} P_R \tag{5}$$

$$\text{또는 } P_i^f = \sum_{k=1}^n [A_d^{-1}]_{ik} \cdot P_{Rk} \tag{6}$$

비례적 분담원리(proportional sharing principle)를 이용하면[11], 가상 선로조류 값은 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{ij}^f &= \frac{P_{ij}^f}{P_i^f} P_i^f \cong \frac{P_{ij}}{P_i} \sum_{k=1}^n [A_d^{-1}]_{ik} \cdot P_{Rk} \\ &= \sum_{k=1}^n R_{ij,k} \cdot P_{Rk} \end{aligned} \tag{7}$$

여기서, $R_{ij,k}$ 는 선로 i - j 의 선로조류 값에 대한 k -번째 부하의 분담계수이며 아래 식으로 주어진다.

$$R_{ij,k} = \frac{P_{ij}}{P_i} [A_d^{-1}]_{ik} \tag{8}$$

다음에는 이 선로조류에 대한 부하의 분담계수를 이용하여 손실배분계수(loss distribution factor)를 정의하고자 한다.

주장(Claim): 선로손실에 대한 부하의 분담분은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$P_{Dij,k} = U_{ij,k} P_{Lij} \tag{9}$$

$$\text{여기서, } U_{ij,k} = \frac{R_{ij,k} P_{Rk}}{\sum_l R_{ij,l} P_{Rl}} \tag{10}$$

$P_{Dij,k}$ 는 선로 i - j 의 선로손실에 대한 k -번째 부하의 분담분이며, P_{Lij} 는 선로 i - j 의 선로손실분이다. 그리고 $U_{ij,k}$ 는 손실배분계수이다.

증명: 선로 i - j 의 손실은 그 손실에 영향을 끼치는 모든 부하에 대한 분담분의 합과 같으므로 다음 식이 성립한다.

$$P_{Lij} = \sum_{k \in \beta_{ij}} P_{Dij,k} \tag{11}$$

여기서, β_{ij} 는 선로 i - j 의 손실에 영향을 끼치는 부하모선들의 집합이다. 식 (11)의 오른쪽 식을 식 (9)와 (10)을 이용하여 전개하면

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \beta_{ij}} P_{Dij,k} &= P_{Dij,1} + \dots + P_{Dij,b} \\ &= \frac{R_{ij,1} P_{R1}}{\sum_l R_{ij,l} P_{Rl}} P_{Lij} + \dots + \frac{R_{ij,b} P_{Rb}}{\sum_l R_{ij,l} P_{Rl}} P_{Lij} \\ &= P_{Lij} \end{aligned} \tag{12}$$

여기서, b 는 집합 β_{ij} 의 크기이다. ||

한편 (10)식으로 주어진 손실배분계수의 다른 표현법으로서 다음 식과 같이 선로조류의 제곱에 비례하는 식으로도 가능하다.

$$U_{ij,k} = \frac{(R_{ij,k} P_{Rk})^2}{\sum_l (R_{ij,l} P_{Rl})^2} \quad (13)$$

사례연구에서 (10)식과 (13)식으로 주어진 손실배분계수를 이용하여 각 부하의 선로손실에 대한 책임분을 계산하고 두 방법의 결과치를 비교하고자 한다.

그러면, 한 부하에 의해 야기되는 총 손실은 다음 식과 같이 표현되어진다.

$$P_{loss,k} = \sum_{ij \in \alpha_i} U_{ij,k} P_{Lij} \quad (14)$$

여기서, α_i 은 전체 선로들의 집합이다. 즉, 각 선로의 손실에 대한 한 부하의 부담분들을 모두 합하면 그 부하의 선로손실에 대한 책임분이 된다.

3. 부하변화에 대한 선로손실의 감도계산

앞 장의 알고리즘을 실시간 운용에 효과적으로 적용하기 위해서는 부하변화에 대한 선로손실의 감도를 계산할 필요가 있다. 이 감도계수는 부하값이 변함에 따라 선로손실이 얼마나 변하는가를 말해주는 척도가 된다. 즉, 각 부하값의 변화에 따른 선로손실의 감도를 쉽게 구함으로써 실시간 운용에 상당한 도움을 주고자 한다.

아래 식 (15)에 주어진 선로조류 식을 이용하여 선로 $i-j$ 간의 선로조류 손실을 구하면 식 (16)와 같이 표현되어진다[17, 18].

$$P_{ij} = G_{ij}|E_i|^2 - G_{ij}|E_i||E_j|\cos(\theta_i - \theta_j) - B_{ij}|E_i||E_j|\sin(\theta_i - \theta_j) \quad (15)$$

$$P_{loss,ij} = P_{ij} + P_{ji} = G_{ij}|E_i|^2 + G_{ji}|E_j|^2 - 2G_{ij}|E_i||E_j|\cos(\theta_i - \theta_j) \quad (16)$$

여기서, G_{ij} 는 선로 $i-j$ 의 컨덕턴스(conductance)이며, B_{ij} 는 선로 $i-j$ 의 서셉턴스(susceptance)이며, $|E_i|$ 는 모선 i 의 전압크기이며, θ_i 는 모선 i 의 전압의 위상각이며, 그리고 $P_{loss,ij}$ 는 선로 $i-j$ 간의 유효전력 손실을 나타낸다.

그러면, 구하고자 하는 부하변화에 대한 선로손실의 감도식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$S_{ij,k} = \frac{\Delta P_{loss,ij}}{\Delta P_{Rk}}$$

$$= \sum_{m=2}^N \frac{\partial P_{loss,ij}}{\partial \theta_m} \frac{\partial \theta_m}{\partial P_{Rk}} + \sum_{m \in \Lambda} \frac{\partial P_{loss,ij}}{\partial |E_m|} \frac{\partial |E_m|}{\partial P_{Rk}} = - \sum_{m=2}^N \frac{\partial P_{loss,ij}}{\partial \theta_m} \frac{\partial \theta_m}{\partial P_k} - \sum_{m \in \Lambda} \frac{\partial P_{loss,ij}}{\partial |E_m|} \frac{\partial |E_m|}{\partial P_k} \quad (17)$$

여기서, 식 (17)의 각 항의 첫 번째 성분은 식 (16)를 이용하면 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial P_{loss,ij}}{\partial \theta_i} = 2G_{ij}|E_i||E_j|\sin(\theta_i - \theta_j) \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_{loss,ij}}{\partial |E_i|} = 2G_{ij}|E_i| - 2G_{ij}|E_j|\cos(\theta_i - \theta_j) \quad (19)$$

그리고 $S_{ij,k}$ 는 k -번째 부하값의 변화에 대한 선로 $i-j$ 의 선로손실 변화분을 나타내며, N_g 는 총 발전모선의 갯수이며, Λ 는 부하모선들의 집합이다. 식(17)의 $\frac{\partial \theta_m}{\partial P_k}$ 와 $\frac{\partial |E_m|}{\partial P_k}$ 는 일반적인 뉴턴-랩슨법에 의한 전력조류 계산 알고리즘에 나오는 자코비안(Jacobian)행렬의 역행렬의 요소들이다.

4. 사례 연구

앞 장에서 제시된 알고리즘을 그림 1에 주어진 샘플 시스템에 적용하여 그 효용성을 살펴보기로 한다. 전력조류 계산에 필요한 그 시스템의 발전력, 부하 및 선로 값들은 부록에 나타나

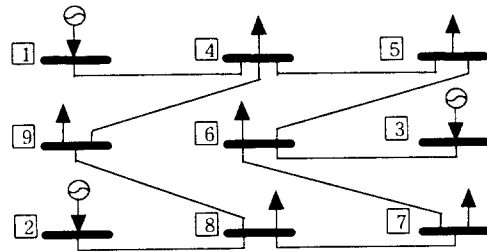


그림 1 9-모선 샘플 시스템.
Fig. 1 9-bus sample system.

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 (8)의 결과로써 선로조류에 대한 각 부하의 부담계수가 표 2에서 주어지고 있다. 예를 들어 선로 4-5의 유효전력 조류값은 모선 5의 부하값이 90MW이므로 90×0.511 에 의해 45.99MW가 됨을 알 수 있으며 이 값은 선로 4-5의 선로조류가 5 번 모선으로 들어가는 값(46.01MW)과 거의 일치함을 알 수 있다.

표 1 유효전력의 흐름에 대한 조류계산의 결과(MW)

Table 1 Result of power flow calculations for real power flow

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	-25.84	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

Table 2 Sharing factors of loads for each line flow

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	1.000	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 3과 표4는 식 (10)과 (13)을 이용하여 선로손실에 대한 각 부하의 분담분의 양을 말해주는 손실배분계수의 값을 보여주고 있다. 한 예로 표 3에서 선로 1-4의 유효전력 손실 값이 1.082MW이며 이 손실에 대한 책임은 부하모선 4, 5, 9 번에 있다는 것을 말해 준다. 그리고, 각각의 책임량은 다음 식으로 계산되어진다.

$$4\text{번 모선} : 0.0742 \times 1.082 = 0.0803\text{MW}$$

$$5\text{번 모선} : 0.4268 \times 1.082 = 0.4618\text{MW}$$

$$9\text{번 모선} : 0.4989 \times 1.082 = 0.5398\text{MW}$$

$$\text{합계} : 1.0820\text{MW}$$

표 5는 식 (14)에 주어진 각 부하의 선로손실에 대한 책임분을 보여주고 있다. 첫 번째 경우는 식 (10)으로 주어진 손실배분계수를 이용하였으며 두 번째 경우는 식 (13)을 이용한 것이다. 선로손실에 대한 각 부하의 책임분의 합을 표 1에 주어진 선로손실의 합(12.341MW)과 비교해 보면 첫 번째 경우가 더 정확함을 알 수 있다. 그리고 식 (17)을 이용하여 모선 5의 부하가 10MW만큼 증가하였을 경우에 각 선로의 손실변화량이 표 6

표 3 (10)식을 이용한 각 부하의 손실배분계수.

Table 3 Loss distribution factors for loads using eq. (10).

선로	부하4	부하5	부하6	부하7	부하8	부하9
1-4	0.0742	0.4268	0.0	0.0	0.0	0.4989
4-5	0.0	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
6-5	0.0	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
3-6	0.0	0.5341	0.1214	0.3445	0.0	0.0
6-7	0.0	0.0	0.0	1.0000	0.0	0.0
8-7	0.0	0.0	0.0	1.0000	0.0	0.0
2-8	0.0	0.0	0.0	0.4566	0.0893	0.4541
8-9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000
4-9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000

표 4 (13)식을 이용한 각 부하의 손실배분계수.

Table 4 Loss distribution factors for loads using eq. (13).

선로	부하4	부하5	부하6	부하7	부하8	부하9
1-4	0.0126	0.4173	0.0	0.0	0.0	0.5701
4-5	0.0	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
6-5	0.0	1.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
3-6	0.0	0.6812	0.0352	0.2835	0.0	0.0
6-7	0.0	0.0	0.0	1.0000	0.0	0.0
8-7	0.0	0.0	0.0	1.0000	0.0	0.0
2-8	0.0	0.0	0.0	0.4933	0.0189	0.4878
8-9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000
4-9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000

표 5 부하의 선로손실에 대한 책임분 (MW).

Table 5 Amounts of transmission line losses allocated to loads (MW).

구분	부하4	부하5	부하6	부하7	부하8	부하9	합 계
(1)	0.0603	3.0604	0.1654	3.3363	0.1794	5.5791	12.3809
(2)	0.0136	3.1778	0.0306	3.3571	0.0380	5.1070	11.7241

표 6 5번 모선의 10MW 부하증가에 대한 각 선로의 손실 변화량 (MW).

Table 6 Changes of line losses for 10MW load increase at the 5th bus (MW).

1-4	4-5	6-5	3-6	6-7	8-7	2-8	8-9	4-9
.202	.3257	.0991	.0013	-.0353	.0714	.0018	-.0952	.0622

에 나타나 있다. 모선 5의 부하변화에 선로 4-5의 선로손실이 가장 크게 증가하고 있으며 그 결과의 정확도는 부하변화 후의 전력조류 계산에서 입증되었다.

5. 결 론

전력회사들의 일정지역에서의 독점체제가 무너지고 전력판매에 경쟁체제가 도입됨에 따라 발전 및 송배전외에 부가되는 보조서비스에 대한 정확한 비용을 산정할 필요가 있게 된다. 본 논문에서는 그 중의 하나인 송전선로에서의 유효전력 손실에 대한 비용을 부하측에 부가할 수 있는 기준이 되는 손실배분계수를 정의하여 그 값을 구하는 알고리즘을 제시하고 있다. 손실배분계수로 인하여 어느 송전선로의 손실에 책임이 있는 부하들을 밝혀낼 수 있으며 그 부하들의 부담분은 얼마인지, 그 부하들의 선로손실에 대한 총 책임분은 얼마인지를 계산해 낼 수 있다. 그리고 부하변화에 따른 선로손실의 증감을 쉽게 구할 수 있도록 감도 계산식을 유도하여 실시간 적용을 용이하게 하였다.

따라서, 본 논문에서 제시된 알고리즘이 전력회사들의 경쟁체제하에서 유효전력 손실에 대한 보조서비스비용을 계산하는 데 기여할 수 있으리라 생각된다. 향후 연구과제로는 무효전력 조류의 비용을 부하측에 부가할 경우 기준이 되는 알고리즘을 개발하는 것이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 동국대학교 신입교수 연구비 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

[1] B. Kirby and E. Hirst, *Ancillary Services, Open Access Impact on Energy Scheduling, Pricing, and Control*, Presented at the IEEE PICA 97, Columbus, Ohio, May 13, 1997.

[2] B. Kirby and E. Hirst, *Ancillary Service Costs for 12 U.S. Electric Utilities*, Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/CON-427, 1996.

[3] J. Kumer et al., "AGC Simulator for Price-based Operation- Part I: A Model", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 527-532.

[4] J. Kumer et al., "AGC Simulator for Price-based Operation- Part II: Case Study Results", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 533-538.

[5] S. Hao and A. Papalexopoulos, "Reactive Power Pricing and Management", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, February 1997, pp. 95-104.

[6] A.D. Papalexopoulos, "Congestion Management in a Competitive Environment", *Future Needs and Trends in Power System Computing*, Presented at the IEEE PICA 97, Columbus Ohio, May 14, 1997.

[7] F.L. Alvarado, "Congestion Management in an Open Market", *Future Needs and Trends in Power System*

Computing, Presented at the IEEE PICA 97, Columbus Ohio, May 14, 1997.

[8] L. Willis, J. Finney and G. Ramon, *Computing the Cost of Unbundled Services*, *IEEE Computer Applications in Power*, October 1996, pp. 16-21.

[9] W.Y. Ng, "Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluations", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 3, March 1981, pp. 1001-1005.

[10] H. Rudnick et al., "Marginal Pricing and Supplement Cost Allocation in Transmission Open Access", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp. 1125-1142.

[11] 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.

[12] D. Shirmohammadi, "Cost of Transmission Transactions : An Introduction", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, No. 4, Nov. 1991, pp. 1546-1560.

[13] A. Zobian and M.D. Ilic, "Unbundling of Transmission and Ancillary Services Part I: Technical Issues", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 539-548.

[14] A. Zobian and M.D. Ilic, "Unbundling of Transmission and Ancillary Services Part II: Cost-Based Pricing Framework", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 549-558.

[15] G.M. Huang and H. Zhang, "Transmission Loss Allocations and Pricing via Bilateral Energy Transactions", *Proceedings of 1999 IEEE Power Engineering Summer Meeting*, pp. 720-725.

[16] C.N. Macqueen and M.R. Irving, "An Algorithm for the Allocation of Distribution System Demand and Energy Losses", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11 No. 1 February 1996, pp. 338-344.

[17] A.R. Bergen, *Power System Analysis*, Prentice-Hall, 1986, pp. 172-179.

[18] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, 1984, pp. 71-98.

부 록. 9-모선 샘플 시스템의 데이터

1. 부하 데이터(정격: 345kV, 100MVA)

모선번호	P _d (MW)	Q _d (MVar)
4	8	3
5	90	30
6	10	4
7	100	35
8	14	6
9	125	50

2. 발전출력 데이터(정격MVA=100)

모선번호	P_g (MW)	Q_g (MVar)
1	0	0
2	163	0
3	85	0

3. 선로 데이터

부터	까지	R	X	B
1	4	0.0083	0.0576	0.0860
4	5	0.0370	0.1420	0.1580
5	6	0.0590	0.2100	0.3580
3	6	0.0120	0.0586	0.0603
6	7	0.0419	0.1508	0.2090
7	8	0.0285	0.1120	0.1490
8	2	0.0074	0.0625	0.0812
8	9	0.0420	0.1810	0.3060
9	4	0.0400	0.1250	0.1760

저 자 소 개



노경수 (盧炘洙)

1963년 3월 27일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1997년 미국 Virginia Tech 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 동국대

학교 전기공학과 전임강사.

Tel : 02-2260-3346, Fax : 02-2260-3346

E-mail : ksro@dgu.ac.kr