

손실배분계수를 이용한 송전선로 유효전력 손실의 배분법

노경수  
동국대학교 전기공학과

A Method to Allocate Real Power Losses of Transmission Lines using Loss Distribution Factors

Kyoung-Soo Ro  
Department of Electrical Engineering, Dongguk University

**Abstract** - The paper proposes a simple method to calculate the portion of real power losses allocated to individual loads. The method is implemented by loss distribution factors, and analyses the share of loads in transmission line losses. Effectiveness of the algorithm is verified by a computer simulation. The results can be used to compute the cost of ancillary services under deregulated environment in electric power industries.

1. 서 론

전력회사들이 일정 지역에서 전력의 생산, 수송 및 배분을 독점하는 상황에서 벗어나 전력의 판매에 경쟁체제가 도입되는 것이 미국을 비롯한 전세계적인 추세이다. 이것은 전력의 수요자와 공급자가 전력의 송전서비스를 선택 이용함으로써 가능하며 송전회사는 제 삼자에게 송전서비스를 제공하여야 한다. 심지어 송전회사는 그 송전서비스를 행함으로써 송전설비 확충이 필요하더라도 투자비에 근거한 가격으로 그 서비스를 제공하여야 한다. 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 함수로 주어지기 때문이다. 미국의 연방에너지조정위원회(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)에 의하면 보조서비스는 다음과 같이 정의되어진다[2]; “제어영역내에서 의무적으로 판매자에서 구입자까지의 전력수송을 원활하게 하는데 필요한 서비스와 그 제어영역내의 전력수송회사가 상호연계된 송전시스템의 안전한 운전을 유지하는데 필요한 서비스”.

중요한 7가지 보조서비스는 (1) 전압제어(무효전력 운용), (2) 부하추종(자동 발전력 제어), (3) 에너지 불평형, (4) 동기화 예비력(spining reserve), (5) 보충 예비력(supplemental reserve), (6) 유효전력 손실, 및 (7) 특정 선로 과부하 해소(congestion management) 등이다. 각각의 보조서비스에 관여되는 비용은 따로따로 계산되어야 하며 이들 각각의 비용을 합하여 전체 보조서비스 비용이 얻어진다. 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 존

재하게 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 선로손실을 직접 계산할 수 없으며 전력조류의 컴퓨터 프로그램에 의해 계산되어진다. 그 프로그램을 이용하면 거의 실시간으로 유효전력 손실값을 계산할 수 있으며, 그 결과값을 이용하여 그 손실을 각각의 부하에 배분하고자 한다. 본 논문에서는 손실배분계수(loss distribution factor)를 정의하여 그 값을 구하는 알고리즘을 제시하고자 하며 그 효용성을 9-모선 계통을 통하여 입증할 것이다.

2. 손실배분계수를 이용한 유효전력 손실의 배분

먼저 전력조류 계산 프로그램에 의해 각 선로의 송전 손실분을 계산할 수 있으며 그 송전손실분은 발전원 개개의 요소분으로 나누어질 수 있다고 가정한다. 한 모선의 실제 발전출력에서 분담된 손실분을 뺀 것을 그 모선의 가상 발전출력이라고 부를 수 있다. 그러면 한 모선에 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 모선전력이며,  $P_{ij}^f$  는 미지의 값으로 선로  $i-j$ 의 가상 선로조류값이며,  $P_{Ri}$  는 모선  $i$ 의 부하값이며, 그리고  $\gamma_i$  는 전력조류가 모선  $i$ 로부터 나와서 들어가는 모선들의 집합이다.

선로손실분은 선로조류에 비하면 상당히 작기 때문에 근사적으로 다음 식이 성립한다.

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

그러면 식(1)은 다음 식과 같이 나타내어진다.

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

또는 행렬표현법으로 나타내면

$$A_d P^f = P_R \quad (4)$$

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 벡터 표현법이다. 그러면 가상 모선전력값을 아래의 수식으로 계산할 수 있다.

$$P^f = A_d^{-1} P_R \quad (5)$$

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

비례적 분담원리(proportional sharing principle)를 이용하면[6], 가상 선로조류 값은 다음과 같이 계산되어진다.

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

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

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

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

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

$$P_{Dij,k} = U_{ij,k} P_{Lij} \quad (9)$$

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

$P_{Dij,k}$ 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.

$$P_{Lij} = \sum_{k \in \beta_{ij}} P_{Dij,k} \quad (11)$$

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

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

$$= P_{Lij} \quad (12)$$

여기서,  $b$ 는 집합  $\beta_{ij}$ 의 크기이다. ||

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

$$P_{loss,k} = \sum_{ij \in \alpha_l} U_{ij,k} P_{Lij} \quad (13)$$

여기서,  $\alpha_l$ 은 전체 선로들의 집합이다. 즉, 각 선로의 손실에 대한 한 부하의 분담분들을 모두 합하면 그 부하의 선로손실에 대한 책임분이 된다.

### 3. 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 있다. 표 1은 전력조류 계산의 결과 중 유효전력의 흐름을 보여주고 있다. 양의 값은 전력의 흐름이 그 모선에서 나가는 방향이며 음의 값은 그 모선으로 들어오는 방향을 의미한다. 그 두 값의 합이 그 선로의 선로손실에 해당된다.

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

표 3은 선로손실에 대한 각 부하의 분담분의 양을 말해주는 손실배분계수의 값을 보여주고 있다. 한 예로 선로 1-4의 유효전력 손실값이 1.082MW이며 이 손실에 대한 책임은 부하모선 4, 5, 9번에 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 4는 식 (12)에 주어진 각 부하의 선로손실에 대한 책임분을 보여주고 있다. 그 선로손실의 책임분의 합과 표 1에 주어진 각 선로손실의 합이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

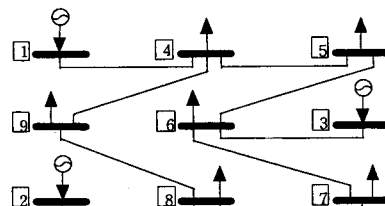


그림 1. 9-모선 샘플 시스템.

표 1. 유효전력의 흐름에 대한 조류계산의 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	-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 부담분.

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

표 3. 각 부하의 손실배분계수.

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

표 4. 부하의 선로손실에 대한 책임분(MW).

부하4	부하5	부하6	부하7	부하8	부하9	합 계
0.0603	3.0604	0.1654	3.3363	0.1794	5.5791	12.3809

#### 4. 결 론

전력회사들의 일정지역에서의 독점체제가 무너지고 전력판매에 경쟁체제가 도입됨에 따라 발전 및 송배전외에 부가되는 서비스에 대한 정확한 가격을 설정할 필요가 있다. 본 논문에서는 그 중의 하나인 송전선로에서의 유효전력 손실에 대한 가격을 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 부하의 부담분은 얼마인지를 계산할 수 있다. 따라서, 이 알고리즘이 전력회사의 경쟁체제하에서 보조서비스의 가격을 결정하는 데 기여할 수 있으리라 생각된다.

#### (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] S.C. Savulescu and L.G. Leffler, Computation of Parallel Flows and the Total and Available Transfer Capability, Open Access Impact on Energy Scheduling, Pricing, and Control, Presented at the IEEE PICA 97, Columbus, Ohio, May 13, 1997.

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

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

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

[9] 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.

#### 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

부 터	까 지	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