

송전망 개방 환경에서의 전력기여 해석법을 이용한 송전손실 분배

송화창* 이병준
고려대학교 전기전자전공공학부

A Transmission Loss Allocation with Power Contribution Method
In the Open Access Environment

Hwachang Song* Byongjun Lee
School of Electric Engineering, Korea University

Abstract - This paper presents a new loss allocation scheme using power contribution method. Power contribution is to find how much power at each generating/load bus is contributed to individual load/generating bus. In this paper, power contribution is calculated using fundamental circuit theory. In numerical simulation, an illustrative example applying the proposed scheme to 6-bus test system is shown.

1. 서 론

전력산업에 경쟁이라는 개념의 도입으로 시장 참여자들에 대한 송전 서비스를 위하여 송전망 개방 (Open Access)이 필요하게 된다. 송전망 사업자는 전력전송 서비스를 공정성과 적정성을 가지고 공급하여야 하며, 이러한 주된 서비스 외에 무효전력공급/전압제어, 주파수 제어, 예비력 서비스, 혼잡 처리, 유효전력 손실 보상 등의 보조 서비스를 참여자들에게 공급하게 된다. 이러한 환경 하에서, 주된 연구 관심중에 하나는 어떻게 각 시장 참여자들의 각 서비스에 대한 가격을 가능한 한 개별적으로, 만족스럽게, 정확하고 명확하게 결정하느냐 하는 것이다. 본 연구에서는 송전손실 분배에 관한 문제를 다룬다.

전력 풀 환경에서의 송전손실 분배의 문제는 각 모선의 전력 주입에 의한 송전계통의 전력전송으로 발생하는 유효전력 손실을 각 모선에 분배하는 것이다. 물리적인 전력계통에서 전기 에너지 전송은 일반적인 Kirchhoff 법칙에 의하여 이루어지며 이러한 에너지 전송에 따른 각 선로에서 발생하는 유효전력 손실은 그 선로에 흐르는 전류크기의 제곱에 비례한다. 최근, 문헌상에서 여러가지의 송전손실 분배법이 제안되고 있다. 이들은 전력 또는 전류 주입에 따른 비례적인 손실 분배[1], 증분 송전 손실에 의한 방법[2], 그리고 비례적 할당 (proportional sharing)으로써 전력 전송을 추적하여 손실을 분배하는 방법[3]으로 크게 나눌 수 있다.

본 연구에서는 발전모선과 부하모선의 유효전력 발전과 부하에 대한 기여를 이용한 새로운 송전손실 분배법을 소개하고자 한다. 이 방법은 문헌상의 다른 방법과는 달리 전력 기여도를 계산하고 이로부터 손실발생의 기본적인 원리를 적용하여 각 모선의 손실 참여를 구한다. 본 논문에서는 먼저 부하/발전을 임피던스로 표현하고 기본적인 회로이론을 이용하여 각 발전기/부하 모선 주입전류에 대한 의존적인 형태로 표현한다. 그리고 각 주입전류에 대한 의존성을 이용하여 부하에 대한 발전 기여 및 발전에 대한 부하 기여를 구한다. 그리고 본 연구에서는 관심 부하/발전기 모선과 모든 발전기/부하모선을 연결하는 가상선로의 개념을 도입한다. 관심 모선과 연결된 가상선로에서 발생하는 손실의 합이 관심 모선에 의한 손실 참여에 해당하게 된다. 각 모선에서

계산된 손실 참여를 계통 한계 가격과의 곱으로써 각 모선에서 손실가격을 계산한다. 사례연구에서 제안한 방법을 6모선 계통에 적용하고 문헌상에서의 방법들과 비교한 결과를 보인다.

2. 발전과 부하 기여

본 장에서는 각 발전기 모선의 특정 부하에 대한 기여도 및 각 부하모선의 특정 발전기에 대한 기여도를 구하는 방법을 소개한다. 먼저 N모선을 갖는 계통을 고려하여 본다. 이 계통은 NG개의 발전기 모선과 NL개의 부하모선이 존재하며 첫 번째 모선부터 NG번째 모선까지 발전기모선이라고 가정한다.

2.1 부하에 대한 발전기여

본 절에서는 부하에 대한 발전기 모선의 기여를 구하는 방법을 제시한다. 부하에 대한 발전기여는 모든 부하를 임피던스로 표현하고 이로부터 부하모선의 유효 및 무효전력 부하를 각 발전기 주입 전류에 대한 식으로 나타낸다. 이는 어떤 모선의 부하가 어떤 발전기로부터 공급되고 있는지를 나타내게 되며 다음 절에서 제시하는 발전에 대한 부하기여와 함께 본 논문의 송전손실 분배법을 계산에 이용된다.

모선 어드미턴스 행렬을 이용한 선 전압과 모선 주입 전류와의 관계식은 다음과 같이 나타낸다.

$$I = YV \tag{1}$$

그리고 i번째 부하모선의 부하를 등가의 병렬 어드미턴스 성분으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_{Li} = (P_{Li} - jQ_{Li}) / |V_{Li}|^2 \tag{2}$$

여기에서 P_{Li} , Q_{Li} 는 i번째 부하모선의 유효 및 무효전력 부하를 나타내고 V_{Li} 는 모선 전압을 나타낸다. 각 모선전압을 발전기 모선 주입전류에만 의존하도록 하기 위하여 식 (2)와 같은 각 부하모선의 등가 병렬 어드미턴스 성분을 모선 어드미턴스 행렬 Y에 포함시키고 각 부하모선의 주입 전류를 0으로 대치하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$I_G = Y_G V \tag{3}$$

여기에서 $I_G = [I_1, I_2, \dots, I_{NG}, 0, \dots, 0]^T$ 에 해당한다. 위 식에서 Y_G 의 역행렬 Z_G 를 좌우항에 곱하면 다음과 같이 표현된다.

$$V = Z_G I_G \tag{4}$$

위 식을 살펴보면 모든 모선의 전압이 발전모선의 주입으로만 표현되고 있음을 알 수 있다. 위 식에서 i번째 부하모선에서의 전압식은 다음과 같이 나타낸다.

$$V_{Li} = \sum_{j \in SG} Z_{G,ij} I_{Gj} \tag{5}$$

여기에서 SG는 계통에 참여하는 발전기 집합을 나타낸다. 위 식은 i모선 전압이 각 발전기 모선 주입 전류의 참여로 표현되고 있음을 알 수 있다.

그러면 그림 1에서와 같이 두 모선 i, j 를 연결하는 선로를 생각하여 보자. 두 부하모선 전압 V_{Li}, V_{Lj} 는 식 (5)으로써 각 발전기 모선의 주입 전류의 의존하는 식으로 표현할 수 있다.



그림 1. 두 모선을 연결하는 선로 예

선로 (i, j) 를 흐르는 전류 I_{ij} 는 다음과 같이 식 (6)으로 표현된다. 식 (6)을 살펴보면 모선전압과 마찬가지로 선로 조류 또한 발전기 모선 주입 전류에 의존하는 것을 알 수 있다.

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{z_{ij}} = \frac{\sum_{k \in SG} Z_{ik} I_k - \sum_{k \in SG} Z_{jk} I_k}{z_{ij}} \quad (6)$$

$$= \sum_{k \in SG} \left(\frac{Z_{ik} - Z_{jk}}{z_{ij}} \right) I_k$$

그러면 식 (6)을 이용하여 i 번째 부하모선에 연결된 선로의 집합 SL_i 를 통하여 계통으로 주입되는 전류와 i 모선의 Shunt 어드미턴스 y_{si} 를 통한 전류의 합 I_{Li} 를 구하면 다음 식으로 표현된다.

$$I_{Li} = \sum_{r \in SL_i} \sum_{k \in SG} \left(\frac{Z_{ik} - Z_{rk}}{z_{ip}} \right) I_k + y_{si} \sum_{k \in SG} Z_{ik} I_k$$

$$= \sum_{k \in SG} \left(\sum_{r \in SL_i} M_{k,r}^i + y_{si} Z_{ik} \right) I_k \quad (7)$$

$$M_{k,r}^i = (Z_{ik} - Z_{rk}) / z_{ip}$$

여기에서 r 은 i 모선과 p 모선을 연결하는 선로에 해당한다. 식 (7)과 식 (5)를 이용하여 i 모선에서 계통으로 주입되는 전력을 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$S_{Li} = V_i I_{Li} = \sum_{k \in SG} \left(\sum_{r \in SL_i} M_{k,r}^i + y_{si} Z_{ik} \right) I_k \sum_{k \in SG} Z_{ik} I_k \quad (8)$$

위 식은 각 발전기 모선 주입전류에 의한 자체 성분과 상호 성분으로 나눌 수 있으며 다음 식으로 표현된다.

$$S_{Li} = \sum_{k \in SG} \left(\sum_{r \in SL_i} M_{k,r}^i + y_{si} Z_{ik} \right) Z_{ik} I_k^2 + \sum_{l, m \in SG, l \neq m} \left(\sum_{r \in SL_i} M_{l,r}^i + y_{si} Z_{il} \right) Z_{im} I_l I_m \quad (9)$$

위 식을 이용하여 부하모선의 부하를 각 발전기 모선의 주입전류에 의한 성분으로 분해할 수 있다.

2.2 발전에 대한 부하기여

각 발전기 모선의 발전에 대한 각 부하모선의 기여 또는 앞 절과 비슷한 방법으로 구할 수 있다. 발전에 대한 부하기여는 모든 발전을 임피던스로 표현하고 이로부터 발전을 각 부하모선 주입 전류에 대한 식으로 나타내는 것으로 발전에 대한 부하기여를 구한다. i 번째 발전기 모선의 발전을 등가의 병렬 어드미턴스 성분으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_{Gi} = (-P_{Gi} + jQ_{Gi}) / |V_{Gi}|^2 \quad (10)$$

여기에서 P_{Gi}, Q_{Gi} 는 i 번째 발전기 모선의 유효 및 무효 전력 발전을 나타내고 V_{Gi} 는 모선 전압을 나타낸다. 각 발전기 모선의 등가 병렬 어드미턴스 성분을 모선 어드미턴스 행렬 Y 에 포함시키고 각 부하모선의 주입 전류를 0으로 대치하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$I_L = Y_L V \quad (11)$$

여기에서 $I_L = [0, \dots, 0, I_{NG-1}, I_{NG-2}, \dots, I_N]^T$ 에 해당한다. 위 식에서 Y_L 의 역행렬 Z_L 좌우항에 곱하면 다음과 같이 표현된다.

$$V = Z_L I_L \quad (12)$$

위 식으로부터 모든 모선의 전압은 각 부하모선의 주입 전류로 표현된다. 이 식을 이용하여 앞 절에서와 같이 i 번째 발전기 모선의 발전을 각 부하모선의 주입전류로 표현하면 다음과 같이 나타난다.

$$S_{Gi} = \sum_{k \in SD} \left(\sum_{r \in SL_i} M_{k,r}^i + y_{si} Z_{ik} \right) Z_{ik} I_k^2 + \sum_{l, m \in SD, l \neq m} \left(\sum_{r \in SL_i} M_{l,r}^i + y_{si} Z_{il} \right) Z_{im} I_l I_m \quad (13)$$

여기에서 SD 는 계통에 참여하는 부하모선 집합을 나타낸다. 식 (13)을 살펴보면, 발전모선에 대한 부하 주입전류의 기여는 주입전류의 자체 성분에 의한 것과 부하 주입전류간의 상호 성분으로 표현된다.

3. 송전손실 분배

본 논문에서는 앞에서 설명한 발전 및 부하 기여를 이용한 송전 손실 분배법을 소개한다. 식 (9)와 (13) 식으로부터 각 발전에 의한 부하기여 및 각 부하에 의한 발전기여를 계산할 수 있다. 그러나 이 두 식들은 앞에서 언급한 바와 마찬가지로 각 주입전류의 자체 성분과 상호 성분으로 나타난다. 이 중에서 상호 성분은 두 모선의 주입전류로 표현되며 이를 각각의 주입전류에 대한 성분으로 나누기 어렵다. 다음 식에서 i 번째 부하모선의 부하에 대한 I_1, I_2 발전기 모선 주입전류에 대한 상호성분에 대하여 나타내고 있다.

$$S_{Li}(I_1, I_2) = \Gamma_{Li, I_1} V_{Li, I_1} + \Gamma_{Li, I_2} V_{Li, I_2}$$

위 식을 보면 두 주입전류 I_1, I_2 는 각각 i 모선의 전압과 전류에 참여하고 있고 이 전압, 전류 성분으로 이 모선의 전력의 부분을 담당하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이를 두 주입전류에 해당하는 부하의 상호성분을 1/2씩 할당하는 방법을 이용한다. 각 발전 및 부하의 각 주입전류에 대한 자체성분과 할당된 상호성분의 합으로 표현되는 각 모선에서의 전력기여를 이용하여 본 논문에서는 다음과 같은 손실분배를 제안한다.

3.1 가상선로와 각 모선에서의 손실 참여

제안하는 방법은 가상선로의 개념을 도입하였다. 본 연구에서의 가상선로는 특정 부하모선과 특정 발전기 모선을 직접 연결하는 가상의 선로로 정의한다. 한 부하모선을 중심으로 하여 각 발전기 모선을 연결하는 가상선로를 도식화하면 다음과 같이 나타난다.

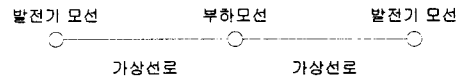


그림 2. 한 부하모선에 대한 가상선로

각 가상선로에서의 발전측에서는 가상선로로 연결된 부하모선의 발전에 대한 기여에 해당하는 전력주입이 이루어지고, 가상선로의 부하측에서는 발전모선의 부하에 대한 기여에 해당하는 전력주입이 이루어진다. 이러한 개념을 다음 그림에서 잘 표현하고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이, 이 전력주입들은 자체성분과 평균전으로 할당된 상호성분에 해당된다.



그림 3. 가상선로에서의 전력 주입

위 그림을 살펴보면 하나의 가상선로에서 소모되는 무효 전력 및 유효전력 손실은 다음 식으로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$P_{loss}^{ij} + jQ_{loss}^{ij} = S_{ji} + S_{ij} \quad (14)$$

따라서 한 부하모선에 의하여 발생하는 송전손실은 이 부하모선과 연결된 모든 가상선로에서의 손실의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{loss}^i &= \operatorname{Re} \left\{ \sum_{r \in S_{Li}} S_{ri}^r + S_{ij}^r \right\} \\ Q_{loss}^i &= \operatorname{Im} \left\{ \sum_{r \in S_{Li}} S_{ri}^r + S_{ij}^r \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

위 식은 발전기 모선에서도 같이 적용되며, 이 식을 이용하여 각 모선에서의 유효 및 무효전력 손실 참여를 구할 수 있다.

3.2 손실 가격

본 논문에서 제안하고 있는 각 모선에서의 유효전력 손실참여는 다음과 같은 특징을 갖는다. 각 발전기 모선에서 계산된 손실참여의 합과 각 부하모선의 손실참여의 합은 각각 송전손실의 총 합과 같게 된다. 따라서 각 모선의 송전손실 가격을 결정할 때, 식 (15)로 계산한 유효전력 손실참여를 그대로 이용하게 되면 전체손실에 대한 2배에 해당하는 가격을 발전기 및 부하모선에 부과하게 된다. 본 논문에서는 이를 방지하기 위해 각 모선의 손실 가격을 결정하는 데 있어서 각 모선의 유효전력 참여의 1/2 값을 이용한다. 이를 수식적으로 표현하면 다음 식과 같이 나타낸다.

$$C_{loss}^i = \lambda (P_{loss}^i / 2) \quad (16)$$

여기에서 λ 는 시장 한계가격 (Market Marginal Price)에 해당한다.

4. 사례연구

사례연구에서는 본 논문에서 제안하고 있는 송전손실 분배 방법을 6모선 계통에 적용하고 이를 문헌상에서 제안된 방법을 이용한 결과와 비교한다. 다음 그림에서 모의에 이용된 시험계통을 보이고 있다.

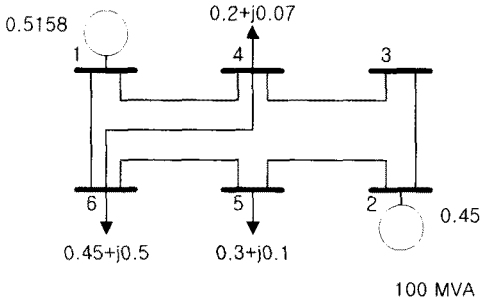


그림 4. 6모선 시험계통

발전기 모선의 전압은 각각 $V_1=1.05[\text{pu}]$, $V_2=1.10[\text{pu}]$ 으로 모의하였으며 각 선로 데이터는 다음 표에서 보이고 있는 값을 이용하였다.

표 1. 6모선 시험계통의 선로 데이터

선로	R	X	B	t
1-6	0.123	0.518	0.000	
1-4	0.080	0.370	0.000	
4-6	0.097	0.407	0.000	
5-6	0.000	0.300	0.000	1.025
2-5	0.282	0.640	0.000	
2-3	0.723	1.050	0.000	
3-4	0.000	0.133	0.000	1.100

표 2에서 논문에서 제시한 방법(PCM)과 [4]에서 최근

제안한 모선 임피던스 행렬을 이용한 방법(Z-bus) 그리고 실제 전력회사에서 이용되고 있는 전력주입(P) 또는 전류주입(I) 비율에 의한 방법 [1]을 비교하였다. 모선 한계 가격은 50 ₩/MWh로 가정하였으며 총 손실이 6.58 MW로 계산되어 손실가격은 329 ₩/h에 해당한다.

표 2. 사례연구 결과 [₩/h]

모선	PCM	Z-bus	P	I
1	-11.5	-329.5	86.33	93.09
2	176.5	-520.5	83.68	73.87
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	37.0	-443.0	33.47	34.93
5	76.5	426.5	50.21	50.62
6	50.5	1195.5	71.31	76.49
계	329	329	329	329

위의 결과를 살펴보면 전력주입 또는 전류주입 비율에 의한 방법은 발전이나 부하가 없는 모선을 제외하고는 모두 양의 값을 나타낸다. Z-bus를 이용한 방법은 발전기 모선의 값은 음(-)의 값을 모두 나타내고 있으며, 부하모선에도 4번 모선에 음(-)의 값이 존재한다. 이에 따라 5, 6번 모선에 집중되어 손실가격이 나타나고 있다. Z-bus 방법은 전력손실은 각 모선에서의 전류주입에 의하여 송전손실에 가장 큰 영향을 미친다는 가정을 가지고 있다. 본 논문에서 제안한 방법은 1번 모선의 손실가격이 음(-)의 값을 가지며, 나머지 모선에서는 양(+)의 값을 나타내고 있다. 전력주입 또는 전류주입 비율에 의한 방법의 결과와 다른 점은 5번 모선과 6번 모선의 순서가 바뀐 점과 2번 모선에서 큰 손실 가격을 나타내고 있는 점이다.

5. 결 론

본 논문에서는 송전손실의 각 모선 참여를 구하기 위하여 부하에 대한 발전의 기여, 발전에 대한 부하의 기여를 각 모선에서 결정하고 이를 이용하여 손실을 발생하는 기본적인 원리를 적용하였다. 본 논문에서 제안하는 방법의 특징은 전체 송전손실을 발전과 부하에서 1/2씩 분담하도록 표현되어 있다. 또한 본 논문에서 제시한 부하/발전에 대한 발전/부하의 기여는 각 주입전류에 대한 자체성분과 상호성분으로 표현되었다. 이중 상호성분의 경우, 본 논문에서는 이를 나타내는 두 개의 전류 주입 성분에 대하여 1/2씩 분배하는 방법을 이용하였다. 상호성분을 분배하는 방법에 따라 손실참여가 다르게 계산될 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] J.J. Gonzalez and P. Basagoiti, "Spanish power exchange market and information system. Design concepts, and operating experience," Proceeding of the 1999 Power Industry Computer Applications Conference, Santa Clara, USA, May 1999, pp. 245-252.
- [2] F. Schweppe, M. Caramanis, R. Tabors, and R. Bohn, Spot Pricing of Electricity. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [3] J. Bialek, "Tracing the flow of electricity," IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, no. 4, pp. 313-320, July 1996.
- [4] A.J. Conejo, F.D. Galiana, and I. Kockar, "Z-Bus Loss Allocation," IEEE Trans. PWRs, vol. 16, no. 1, Feb. 2001.