

송전 손실(Loss)에 관하여 각각의 전선에서 구한 Loss의 총합과 유입 전력으로 계산한 총 Loss의 동일성

문형준*, 김재욱*, 문영현*
연세대학교*

Sameness of Total Sum Of each Line's Losses
and Total Loss evaluated by Sum of Injection Powers for Transmission Loss

Hyung-Jun Moon*, Jae-Wook Kim*, Young-Hyun Moon*
Yonsei University*

Abstract - 경쟁적 전력 시장에서 송전 손실은 중요한 문제이다. 이를 계산하는 방법은 대표적으로 2가지가 있다. 한 방법은 조류계산을 통해 구해진 전체 유입 전력의 총합으로 전체 손실을 구하는 것이고, 다른 방법은 각 전선에 흐르는 전류와 저항으로 각 전선의 손실을 구하고 모든 전선의 손실을 합쳐 주는 방법이다. 이 2개가 동일함에도 불구하고, 직관적으로 같다는 인식을 하기 어렵다. 본 논문에서는 이를 수식적으로 증명한다.

1. 서 론

각각의 송전선에서 계통의 종류(송전인지, 배전인지)와 위상학적 구조(topology)에 따라 전체 부하의 3%에서 10% 선에서 송전 손실이 생긴다. 간단히 송전계통을 분석할 경우, 저항 성분은 리액터 성분보다 상대적으로 많이 작기 때문에 송전 손실을 무시하여 계통 특성을 분석하기도 한다. 그러나 경제적으로 전력을 운용하기 위해서는 송전 손실을 고려해야 한다. 예를 들어, 어떤 발전소의 발전비용이 다른 발전소의 발전비용보다 적게 들더라도 부하 중심에서 멀리 떨어져 있을 경우 송전선에서 손실이 발생하여 비용이 많이 증가할 수 있기 때문이다. 그래서 가장 큰 경제적 효과를 위해서는 각각의 발전소의 발생량에 대한 송전 손실도 같이 고려해야 한다.

전통적인 전력 계통 운영 시에는 유효전력의 송전 손실은 소비자에게 직접적으로 전달되는 추가비용임에도 불구하고, 최적화 방법을 이용하여 발전소에 부여했다. 경쟁적 전력 시장에서는 이와 달리 유효전력의 송전 손실은 다양한 시장 대행자(agent), 발전소들과 소비자들에게 모두 책임을 물려서 시장을 공정하게 해야 한다. 그래서 경쟁적 전력 시장에서 송전 손실에 관하여 관심이 커지고 있다.

이 송전손실을 계산하는 방법은 대표적으로 2가지가 있다. 한 방법은 조류계산을 통해 구해진 전체 유입 전력의 총합으로 전체 손실을 구하는 것이고, 다른 방법은 각 전선에 흐르는 전류와 저항으로 각 전선의 손실을 구하고 모든 전선을 손실을 합쳐 주는 방법이다. 이 2개가 동일함에도 불구하고, 직관적으로 같다는 인식을 하기 어렵다. 이를 위해 수식적으로 같다는 것을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 '각각 전선에서 구한 Loss의 합' 으로 송전 손실 구하는 방법

송전 손실을 구하는 방법은 대표적으로 2가지이다. 하나는 '각각의 전선에서 구한 Loss의 합'이고, 그리고 다른 하나는 '유입전력으로 계산한 총 Loss'이다. 여기서는 앞의 방법에 대해 먼저 제시할 것이다.

2.1.1 에너지 보존 법칙 및 전력 평형

에너지 보존 법칙은 외력이 작용하지 않는 어떤 고립계(system)의 에너지는 그 형태가 달라질 수 있으나 그 총량은 항상 보존된다는 법칙이다. 즉 고립된 계의 에너지는 새로이 생겨나거나 혹은 사라지지 않는 것이다.

에너지는 일을 할 수 있는 능력을 일컫는다. 전력(electric power)은 전류에 의해 단위시간당 할 수 있는 일의 양(전기에너지량)이다. 다시 말해 단위시간 동안 전기장치에 공급되거나, 다른 형태의 에너지로 변환되거나, 계통 내에 송전망에 흐르는 전기에너지이다.

그러므로 전력망(network)에서도 전력에 대한 에너지 보존 법칙이 적용된다. 이로 인해 발전소에서 발생시키는 발전량과 부하에서 사용하는 부하량은 같아야 한다. 다만 여기에 전력망을 통해 지나가게 될 경우 손실이 발생하는 데, 이 손실을 더해 주면 에너지 보존 법칙이 성립한다. 이를 전력 평형(power balance)이라고도 한다. 이를 활용하여 손실에 대한 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^n P_{G_i} - \sum_{i=1}^n P_{D_i} \quad (1)$$

이다. 여기서 P_{G_i} 는 i 번째 모선의 발전량이고, P_{D_i} 는 i 번째 모선의 부하량이다. P_{Loss} 는 계통의 전체 송전 손실(Loss)량이다. n 은 모든 모선의 수이다. 각 모선에 투입된 전력은 각 모선의 발전량에서 각 모선의 부하량을 차해 주면 나타낼 수 있다.

2.2.2 각각의 전선에서 구한 Loss의 합

위의 식 (1)을 다음과 같이 나타낼 수 있는데, 전력 계통에서 전체 유효전력 손실(MW)을 계산하는 가장 간단한 방법은 모든 각 노드에 유입된 유효 전력을 총합한 것과 같다.

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

여기서 P_i 는 i 번째 노드에 유입된 발전량이다. 이 방법의 단점은 각각의 송전선의 전력 손실에 얼마나 기여했는지에 대한 정보가 없다는 것이다. 하지만 이 방법이 더 정확하고 쉽게 구할 수 있다.

2.2 '유입전력으로 계산한 총 Loss' 로 송전 손실 구하는 방법

유효전력 손실은 또한 각각의 망의 전류와 저항을 이용하여 값을 구할 수 있다. 물리적으로 한 전선에서의 유효 전력의 손실(real power loss)은 저항에 의해 열 에너지로 방출되므로 발생한다. 열 발생량은 저항에 비례하고, 전류값의 이차 함수로 비례한다. 즉,

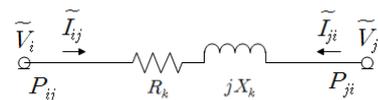
$$P_{Loss} = \sum_{k=1}^m R_k \tilde{I}_k^2 \quad (3)$$

여기서 k 는 송전선의 번호를 나타내고, m 은 송전선의 개수이다. 전력 망의 구조를 안다면, 전선의 전류를 알 수 있고 이를 통해 구할 수 있다. 이 방법은 물리적으로 이해가 쉬우므로 연구가 많이 진행되고 있다. 계산의 편이를 위해 DC 조류계산을 응용한 방법도 이용된다.

2.3 '각각의 전선에서 구한 Loss의 합' 과 '유입전력으로 계산한 총 Loss' 의 동일성

2.3.1 단일 송전선에서의 동일성

2.1과 2.2의 방법이 동일하다는 것을 증명하기 위해 다음<그림1>과 같은 상황에 대해 고려해 보겠다.



<그림 1> 한 송전선에서 전류 및 전력의 흐름

<그림 1>은 큰 계통에서 k 번째 송전선만을 나타내어 전류 및 전력의 흐름을 나타낸 것이다 이와 같은 경우 $P_{ij}^k + P_{ji}^k = R_k (\tilde{I}_k)^2$ 임이 성립함을 보이면 된다. i 번째 노드와 j 번째 노드에서 송전선에 유입된

유효 전력과 그 합은 다음과 같다.

$$P_{ij} = Re \left[\widetilde{V}_i \widetilde{I}_{ij}^* \right] \quad (4)$$

$$P_{ji} = Re \left[\widetilde{V}_j \widetilde{I}_{ji}^* \right] \quad (5)$$

$$P_{ij} + P_{ji} = Re \left[\widetilde{V}_i \widetilde{I}_{ij}^* \right] + Re \left[\widetilde{V}_j \widetilde{I}_{ji}^* \right] \quad (6)$$

식 (4), (5)를 더해줄 경우 식(6)과 같이 나타낼 수 있고, 물리적으로 전선에서 손실된 손실량(Loss)만 남게 된다. 전류의 경우, 다른 곳으로 흐르는 경우가 없기 때문에 \widetilde{I}_k 로 설정하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{I}_{ij} = -\widetilde{I}_{ji} = \widetilde{I}_k \quad (7)$$

식(6)에 식(7)를 대입하여 나타내면 다음과 같다.

$$P_{ij} + P_{ji} = Re \left[\widetilde{I}_k^* (\widetilde{V}_i - \widetilde{V}_j) \right] \quad (8)$$

<그림1>을 통하여, \widetilde{I}_k 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{I}_k = \frac{\widetilde{V}_i - \widetilde{V}_j}{R_k + jX_k} \quad (9)$$

식(9)를 활용하여 식(8)을 변형시키면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ij} + P_{ji} = Re \left[\frac{(\widetilde{V}_i - \widetilde{V}_j)^* (\widetilde{V}_i - \widetilde{V}_j)}{R_k - jX_k} \right] \quad (10)$$

$$= Re \left[(R_k + jX_k) \left\{ \frac{\widetilde{V}_i - \widetilde{V}_j}{R_k + jX_k} \right\} \left\{ \frac{\widetilde{V}_i - \widetilde{V}_j}{R_k + jX_k} \right\}^* \right] \quad (11)$$

$$= Re \left[(R_k + jX_k) \widetilde{I}_k \widetilde{I}_k^* \right] \quad (12)$$

$$= R_k |\widetilde{I}_k|^2 \quad (13)$$

(단, $\widetilde{I}_k \widetilde{I}_k^* = |\widetilde{I}_k|^2$)

식 (10)에서 식 (13)까지 전개함으로써 한 송전선에서 '각각의 전선에서 구한 Loss의 합'과 '유입전력으로 계산한 총 Loss'는 같다는 것을 알 수 있다.

2.3.2 전체 계통에서의 동일성

전체 계통에서 적용하기 위해 다음과 같이 전개한다. 각각의 송전선에 대한 값을 더해지면 전체 계통에서의 손실값을 구할 수 있다.

$$P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n P_{ij} \quad (14)$$

식(14)는 i 번째 노드에 유입된 전력은 i 를 제외한 나머지 노드들(j 로 표시)에서 송전선에 유입된 전력의 합과 같다는 것이다. 이를 정리하여 전체 계통에 유입된 전력을 합쳐 주면 다음 식 (15)와 같다.

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n P_{ij} \right) = \sum_{k=1}^m (P_{ij}^k + P_{ji}^k) = \sum_{k=1}^m R_k |I_k|^2 \quad (15)$$

유입된 전력의 합은 발전된 전력에서 부하에서 사용된 전력을 차한

것과 같다. 이 식은 식 (1)과 식(2)를 통해서도 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n (P_{G_i} - P_{D_i}) = \sum_{i=1}^n P_{G_i} - \sum_{i=1}^n P_{D_i} \quad (16)$$

결론적으로 식 (15), (16)을 정리하면 다음과 같이 나온다.

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{k=1}^m R_k |I_k|^2 \quad (17)$$

3. 결 론

위와 같이 송전손실을 구하는 2가지 방법 및 이에 대한 동일성에 대해 수학적으로 분석하였다. 송전 손실이 계산된 후에는, 누가 이것에 대한 비용을 지불해야 할지 결정해야 한다. 계통에서 부하와 발전소들, 또는 거래 전략에 대한 것들이 어느 정도의 등급으로 손실을 배분해야 할지 결정해야 한다. 이런 각각의 구성원에 배분할 것인지에 대한 방법을 생각할 수 있는 '송전 손실 배분'과 또한 송전선이 사용할 수 있는 용량에 따른 지역한계가격(Locational Marginal Price; LMP)를 구할 경우에도 다양하게 전력 손실이 사용된다. 요즘은 주로 물리적 이해의 편이성에 의해 각각의 Loss에서 나온 합으로 배분에 대해 많이 생각하지만, 분석에 어려움으로 비례 배분으로 가정해서 한다. 그러므로 유입 전류의 총합으로 구하는 방법이 간단하지만 더 효율적이고 정확할 수 있다. 이 방법을 통해서 슬랙 버스에 무관한 penalty factor(손실 계수)에 대해서도 구할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 재원을 받아 수행된 연구임 (No.2011-0018076)

[참 고 문 헌]

- [1] Antonio Gomez-Exposito, Antonio J. Conejo, and Claudio Canizares, "6. Optimal and Secure Operation of Transmission Systems", *Electric Energy System - Analysis and Operation*, pp. 211-264, 2009.
- [2] John J. Grainger and William D. Stevenson Jr. , "Economic Operation of Power System", *Power System Analysis*, pp. 531-590, 1994.
- [3] Young-Hyun Moon, Hyo-Sik Hong, Heon-Su Ryu, Byung-Kon Choi, and Jung-Do Park, "Slack-bus independent penalty factor for regional spot pricing under deregulation", *Electric Power & Energy System*, 24, pp. 821-826, 2002