

거래전략을 고려한 송전손실 분배 알고리즘에 관한 연구

유창석, 이종기, 문영현  
연세대학교 전기전자공학부

A Study on the Algorithm of Transmission Losses Allocation Considering Transaction Strategy

Chang-Seok You, Jong-Gi Lee, Yong-Jun Kwon, Young-Hyun Moon  
School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

**Abstract** - 최근에, 전력 시장에 경쟁 체제가 소개되면서 탈규제(deregulation)가 중요한 문제로 대두되고 있다. 시장의 탈규제에 관한 중요한 주제 중에 하나가 정확한 전송 손실의 분석이 필요한 곳에서의 지역 경쟁 체제(spot pricing)이다. 이러한 경쟁 체제에서 해결해야 할 중요한 문제 중의 하나가 다수의 독립발전사업자에 대하여 공정하고 정확한 전력 요금을 책정하는 것이다. 따라서 각 모선별 전송 손실을 배분하는 것이 매우 중요하다. 이 논문은 송전 손실을 배분하는 새로운 알고리즘을 제시한다. 각 모선의 송전 손실을 계산하는 데는 손실 감도를 이용한 적분방법이 이용된다. 송전 손실은 전체 계통의 거래 전략(transaction strategy)을 이용한 부하 비율의 계산을 통해서 증분 송전 손실(Incremental transmission losses)의 방법으로 계산된다. 제안된 방법은 9모선 계통에 시험되었고 이를 통해 제안된 방법이 신뢰할 만한 알고리즘임을 보여준다.

을 고려하지 않고 단순히 전체 부하 전력에 대한 구하고자 하는 모선의 전력의 비율로써 부하비율을 계산하여 손실 감도를 구하였다. 이러한 방법은 실제 전력계통에서 고려할 수 있는 환경과 다소 차이가 있으며 이를 개선하기 위한 방법으로 전력계통의 전력 흐름을 고려한 거래 전략(transaction strategy)을 구성하여 이를 이론에 반영하였다. 전력 시장 시스템은 발전소 측과 소비자 간의 임의의 계약에 의한 거래에 의해 이루어지므로 서로 간에 계약된 전력의 수요와 공급에 따라서 전력의 흐름을 구하고 이를 통하여 거래 전략을 구성할 수 있다. 이러한 방법을 통해서 각 모선 별로 할당되는 송전 손실을 시장 시스템에 맞게 좀 더 합리적으로 얻어질 수 있다. 각 모선에서의 손실 계산식은 부하 파라미터  $\lambda$ 에 비례하는 증가 손실을 적분하는 것을 통한 정밀한 이론적 분석으로 구해졌다. 또한 부하 파라미터  $\lambda$ 에 의한 증가 손실을 적분하는 방법을 사용하지 않은 기존의 방법을 비교하여 계산하여 보았다. 이를 통해 제안된 알고리즘에 대한 신뢰성을 확보하게 되었다.

1. 서 론

2. 본 론

세계 각국에서 전력 산업(electric power system)의 탈규제(deregulation)현상은 떠오르는 이슈로 부각되고 있다. 탈규제의 근본적인 목적 중 하나는 전력 소비자에게 합리적인 선택을 제공하는 것이다. 즉 경쟁을 통해서 전력의 소비 가격을 낮추는 것이다. 우리나라 역시 국내 전력산업이 전통적인 독점 공기업 체제이고 그 규모가 점점 방대해짐에 따라 정부가 효율적으로 규제 및 제어하기가 어려워 전력 산업의 구조 개편이 절실히 요구되고 있다.

2.1 각 모선별 손실 계산

모선 별 선로 손실 계산은 손실 감도(loss sensitivity)를 기초로 계산될 수 있다. 우선, 모선 i에서 가정되는 전력 손실은 모선 i에서 전력의 변화에 의해서 생긴 손실의 증가분을 적분함으로써 아래 식과 같이 계산할 수 있다[3][4].

이러한 재편되고 있는 전력 산업의 환경(environment) 하에서 가장 중요하게 고려해야 할 사항 중 하나는 가능한 정확하게 시장(market)에 참여하고 있는 모든 사업자(partner)에게 만족할 만한 송전 서비스(transmission service)의 비용(cost)을 계산하는 문제이다. 전력을 송전하는 비용에 있어서 가장 비중 있는 요소 중 하나가 바로 송전 손실(transmission losses)에 관한 문제이다. 전체 전력 시스템의 비용에 대한 송전 손실을 통해 발생하는 비용은 약 4% 정도로서 전력 소비 가격을 책정하는 데 무시할 요소로써 고려되고 있다[1].

$$P_{\text{loss, busi}} = c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} \left( \frac{\partial P_{\text{Loss}}(P, Q)}{\partial P_i} dP_i + \frac{\partial P_{\text{Loss}}(P, Q)}{\partial Q_i} dQ_i \right) = \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} \left( \frac{\partial P_{\text{Loss}}(\lambda)}{\partial P_i} + p_i \frac{\partial P_{\text{Loss}}(\lambda)}{\partial Q_i} \right) P_i d\lambda \quad (1)$$

여기서,  $p_i$ 는 모선 i번째에서의 주입 전력에 대한 역률

기존의 통합된 전력 산업 시스템 하에서 송전 손실은 주로 전력 시스템 내에서 슬랙모선(slack bus)에 의해 다루어져 왔다. 그러나 현재의 경쟁체제(competitive model)에서는 송전 손실에 의한 비용은 투명하고 차별 없이 전력 시스템의 각 송전 네트워크 사용자(transmission network user)에게 분배(allocation)되어야 한다. 하지만 불행하게도 조류 계산 방정식(power flow equation)은 비선형 방정식(nonlinear equation)으로 표현되므로 전력 시스템의 각 네트워크사용자에게 송전 손실에 대한 비용을 정확하게 분배하기는 사실상 불가능하다[2].

또한 모선 별 손실감도는 다음과 같은 방법으로 구해진다. 전력계통에서 Slack 모선은 전체 계통의 손실부분을 담당하게 된다. 이때, 구하고자 하는 손실감도가 발전기 모선의 손실감도라면 발전기 모선에 연결된 부하 모선 전체에  $\Delta P_L$  만큼 전력을 증가 시킨다. 그러면 Slack 모선에서는 부하 모선의 증가분  $\Delta P_L$  과 그것으로 인해 발생한 손실량을 합한 값만큼의 증가분이 발생할 것이다. 따라서 손실감도는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

본 논문에서는 손실 감도(loss sensitivity)를 이용한 각 모선 별 손실 배분 알고리즘을 제안하였다. 손실 감도를 이용한 기존의 방법은 전체시스템의 전력 흐름(power flow)

$$\frac{\partial P_{\text{Loss}}(\lambda)}{\partial P_i} = (\text{부하에 } \Delta P \text{만큼 증가시킨 후 계산된 Slack 모선의 전력}) - (\text{초기 Slack 모선의 전력}) - \Delta P_L \quad (2)$$

이 때 부하 모선에 증가시키는  $\Delta P_L$  은 구하고자 하는 발 전기 모선에서 나오는 전력에 대한 각 부하 모선에 흘러 들어 가는 전력에 대한 비율만큼을 각 부하 모선에 나누어서 증가시켜야 한다. 이때의 비율이 바로 부하비율이다.

## 2.2 부하비율 계산

부하 비율을 구하는 방법을 간단한 예시를 통해 나타내 면 다음과 같다.

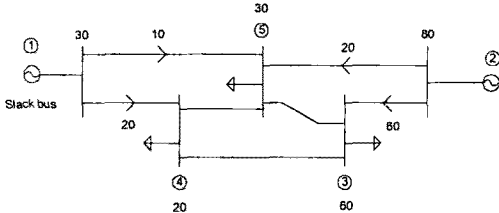


Fig. 1 5모선 계통에서 임의로 흐르는 power-flow

Fig. 1은 5모선 계통에서 임의로 흐르는 전력의 흐름을 보여준다. 부하비율은 구하고자 하는 모선에서 나오는 전력에 대한 각 부하 모선에 흘러 들어가는 전력에 대한 비율 이므로 모선1에 대한 부하비율은 다음과 같은 식으로 나타 낼 수 있다.

$$P_{G1} \rightarrow P_{L4} : 20/30 = 0.67 \\ \rightarrow P_{L5} : 10/30 = 0.33$$

$$\frac{\Delta P_{L4}}{\Delta P_{G1}} = 0.67$$

$$\frac{\Delta P_{L5}}{\Delta P_{G1}} = 0.33$$

(3)

$$\frac{\Delta P_{Lj}}{\Delta P_{G1}}$$

(3)식에서 볼 수 있듯이 일반적으로 부하비율을  $\frac{\Delta P_{Lj}}{\Delta P_{G1}}$  와 같은 식으로 표현할 수 있다.

이 때, 전력계통에서의 전력의 흐름을 그 계통의 거래당 사자간의 거래 전략(transaction strategy)으로 볼 수 있다.

## 2.3 거래 전략의 구성

임의의 계통에서의 전류는 전체 계통의 손실을 최소화하 도록 흐른다. 또한 전력의 최적화된 흐름(Optimal flow)은 계통에서의 전류의 흐름으로 결정된다. 따라서 거래 전략 (transaction strategy)이 최적화되게 구성될수록 각 모선에 할당된 손실의 합이 전체 조류계산을 통하여 계산된 손 실과 일치하게 된다.

임의의 DC power system을 통해서 이와 같은 내용을 입증할 수 있으며, AC power system에도 동일하게 적용 된다. Fig. 2의 system을 통해서 위와 같은 내용을 고찰해 보면 다음과 같다.

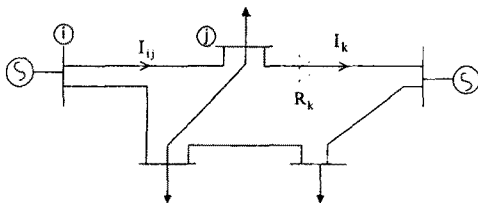


Fig. 2 임의의 power system

Fig. 2에 그려진 계통의 손실은 다음 식과 같다.

$$Loss = \frac{1}{2} \sum R_k I_k^2 \quad (4)$$

(4)식의 제약조건은 다음과 같다.

$$\sum_{k \in S_{Ni}} I_k = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad I_k = I_{ij} \quad (5)$$

( $S_{Ni}$ 는 node i에 연결된 모든 선로 집합)

(4)식과 (5)식을 Lagrange's equation으로 나타내면

$$L = \frac{1}{2} \sum R_k I_k^2 - \sum \lambda_i \left( \sum_{k \in S_{Ni}} I_k \right) \quad (6)$$

이다.

이 때, (6)식의 optimal condition은 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial I_k} = R_k I_k - (\lambda_i - \lambda_j) = 0 \quad \text{---(A)}$$

(단, 모선 i, j는 선로 k가 연결된 모선)

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = \sum_{k \in S_{Ni}} I_k = 0 \quad \text{---(B)}$$

$$(A) \rightarrow \lambda_i = V_i, \lambda_j = V_j \rightarrow R_k I_k = V_i - V_j \text{ (KVL)}$$

$$(B) \rightarrow \text{(KCL)}$$

손실의 optimal condition이 KVL과 KCL을 만족하므로 System에서의 전류는 전체 계통의 손실을 최소화하도록 흐르게 됨을 알 수 있다.

## 2.4 거래 전략을 통한 전력시장에서의 거래정책

전력 시장 시스템은 발전소 측과 소비자 간의 임의의 계약에 의한 거래에 의해 이루어지므로 서로 간에 계약된 전력의 수요와 공급에 따라서 전력의 흐름을 구하고 이를 통하여 임의의 거래 전략(arbitrary transaction strategy)을 구성할 수 있다. 또한 전력계통의 조류계산을 통해서 최적 거래 전략(optimal transaction strategy)을 구성할 수 있다. 이 때, 어떠한 거래 전략(transaction strategy)을 구성 하더라도 각 모선 별 손실의 합은 조류계산으로 계산한 계 통의 전체 손실 보다 큰 값이 나오게 되어 있으며 거래 전략(transaction strategy)이 가장 최적화 될 때 각 모선 별 손실은 조류계산으로 계산한 전체 손실과 일치하게 되므 로, 거래 전략(transaction strategy)이 최적화 되지 않게 구성될 경우, 각 모선 별로 계산된 손실의 합이 전체 계통 의 손실에 대한 초과분은 전력의 공급 측에서 이익을 가져 갈 수 있도록 정책을 마련할 수 있을 것이다.

## 2.5 시뮬레이션 결과

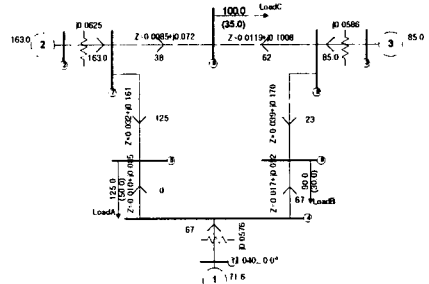
위의 내용을 입증하기 위하여 wsc9-bus system에 임 의의 거래 전략(transaction strategy)과 최적 거래 전략 (optimal transaction strategy)을 적용하여 각 모선 별 손 실과 전체계통의 손실을 구한 후 비교해보았다. 또한 부하 레벨 파라미터  $\lambda$ 에 의한 적분 방법을 이용하지 않은 기존 의 방법과 비교하여 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 검증해 보았다. Simulation은 C++ program을 이용하였 다.

wsc9-bus system에 대하여 계산된 결과는 Table 1

에 주어져 있다. Fig. 3에는 여러 가지 경우의 전력 흐름도를 나타내었다. Case 1은 AC 조류계산[5]을 통해 얻어진 최적 거래 전략(optimal transaction strategy)의 결과이고, Case 2와 Case 3은 임의의 거래 전략(transaction strategy)을 나타낸다. 그리고 Case 4는 부하 레벨 파라미터  $\lambda$ 에 의한 적분 방법을 이용하지 않은 기존의 방법으로 계산된 결과이다. 다음의 데이터를 보면 세 가지의 경우 모두 AC 조류계산을 통해 얻어진 전력손실보다 약간 크게 나옴을 알 수 있다. 또한 최적 거래 전략(optimal transaction strategy)을 사용한 Case 1의 총 손실이 AC 조류계산을 통해 나온 총 손실에 가장 근접하게 나옴을 알 수 있다. 그리고 Case 4의 경우 전체 계통의 손실과 다소 큰 오차가 있음을 보여주고 있다.

Table 1 wsc9-bus의 각 모선 별 손실표

Case \ Bus	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1	0.280621	0.270924	0.301378	0.624301
2	-0.891636	-1.320350	-0.087916	-1.750757
3	-0.135658	0.382277	-0.870823	-0.241737
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	3.012090	3.012171	3.011973	6.286880
6	2.224691	2.224809	2.224521	4.563200
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.496346	0.496330	0.496370	1.039655
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Total	4.986455	5.066161	5.075503	10.521542
Total loss by power-flow algorithm	4.641021			



Case 3

Fig. 3 wsc9-bus system의 case별 전력 흐름도

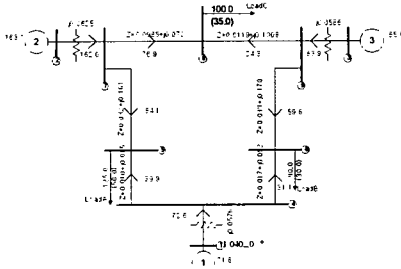
### 3. 결 론

제안된 알고리즘은 기존의 손실감도를 이용한 송전손실 배분 알고리즘에서 고려되지 않은 거래 전략을 적용하여 시장 시스템에 적용할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 또한 임의의 거래 전략과 최적화된 거래 전략을 적용하여 각모선의 송전 손실 배분을 계산하였다. 그 결과 어떠한 거래 전략(transaction strategy)을 구성하더라도 각 모선 별 손실의 합은 조류계산으로 계산한 계통의 전체 손실 보다 큰 값이 나오게 되어 있으며 거래 전략(transaction strategy)이 가장 최적화 될 때 각 모선 별 손실은 조류계산으로 계산한 전체 손실과 일치하게 됨을 입증할 수 있었다. 또한 모선 별로 계산된 손실의 합의 전체 계통의 손실에 대한 초과분은 전력의 공급 측에서 이익을 가져갈 수 있도록 하는 합리적인 방안을 제시하였다.

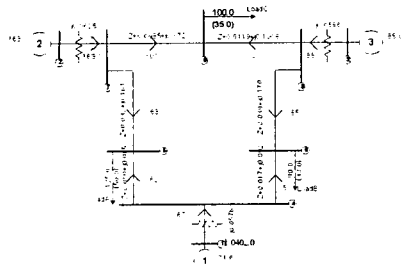
본 논문에서는 각 모선에서의 손실 계산식은 부하 파라미터  $\lambda$ 에 비례하는 증가 손실을 적용하는 방법으로 이루어 졌다. 이 때 부하 파라미터  $\lambda$ 은 0부터 1까지 선형적인 곡선으로 증가하도록 계산되었다. 하지만 실제 전력 시스템에서는 부하에서의 전력수요가 반드시 선형적으로만 증가하지는 않는다. 즉 시간대에 따라서 부하에서의 전력수요가 다르게 나타날 수 있다. 따라서 실제 전력계통에서 일어나는 상황에 더욱 가깝게 하기 위하여 부하 모선 마다 부하 파라미터  $\lambda$ 의 증가패턴을 다르게 하여 계산하는 알고리즘에 관한 연구를 앞으로 진행할 수 있을 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Armando M. Leite da Silve, Fellow, IEEE, and Joao Guilherme de Carvalho Costa, "Transmission Loss Allocation: Part I - Single Energy Market", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 18, NO. 4, NOVEMBER 2003
- [2] Antonio Gomez Exposito, Jesus Manuel Riquelme Santos, Tomas Gonzalez Garcia, and Enrique A. Ruiz Velasco, "Fair Allocation of Transmission Power Losses", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 15, NO. 1, FEBRUARY 2000
- [3] Y.H.Moon, J.S.Jung, H. S. Ryu, and B. K. Choi, "Buswise loss evaluation algorithm for local spot pricing", in Proc. Power Eng. Soc. Summer Meet., vol. 4, 2000, pp. 2127-2131
- [4] Y.H.Moon, J.S.Jung, H. S. Ryu, and H. M. Park, "Slack bus independent penalty factor for spot pricing", in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet., vol. 2, 2000, pp. 1017-1021
- [5] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr. "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc. pp. 329-356 1994



Case 1



Case 2