

경쟁적 전력시장에서 적용 가능한 송전손실비용 산정기법에 관한 연구

김 경 민, 김 강 원, 김 종 만, 한 석 만, 김 발 호
 홍익대학교 전기·정보·제어공학과 전력경제연구실

A study of the method of computing Transmission cost in competitive market

Kim,kyung-min , Kim,kang-won , Kim,jong-man , Han,seok-man , Balho H, Kim
 Hongik University. Power-Economics Lab.

Abstract - When Power market is restructured, we have an argument with selecting Transmission loss factors. First, we determine the method of calculating Transmission loss factor using OPF (Optimal Power Flow) or PF (Power Flow Equation). Then, we decide that we applicate the factor which are identical value all the year or which are floating Transmission loss factor every each hour.

In this study, we accomplish the method of computing Transmission cost in competitive market.

1. 서 론

경쟁적 전력시장 개설이후 송전비용에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 현재 배전분할이 지연되고 있지만 발전경쟁, 배전경쟁을 통한 시장참여자의 이익증대와 시장의 효율성 증가는 학문적, 선진국의 경험으로 이미 증명되어 되었다. 따라서 본 연구진은 기존의 수직, 통합적인 전력시장에서 비효율적으로 산정되어 적용되던 송전손실비용에 관한 다양한 연구를 수행하여 왔다.

본 연구에서는 두가지 사항에 초점을 맞추어서 연구를 수행하였다.

우선, 시장에 적용할 송전손실지수 산정에 있어 계산방법에 관한 내용이다. 기존의 송전손실지수 산정은 전력조류방정식(Power Flow Equation : 이하 PF)을 이용하여 왔다. 전력조류 방정식은 각 모선에 위치한 발전기, 부하에 관하여 P, Q, V, θ 에 관한 정보를 이용하여 전력조류의 상태를 알아보는 방식이다. 미지수의 개수와 구성할 수 있는 방정식의 개수가 일치하지 않는 연립방정식의 형태이므로 불가피하게 슬랙모션을 지정하여 연립방정식을 구성하여 해를 찾는 방식이다. 이는 실제 시스템에서는 슬랙모션을 구성할 수 없기 때문에 계통오차가 필연적으로 발생한다. 따라서 본 논문에서는 기존의 계산상의 편의를 위하여 PF를 사용하던 방식에서 벗어나 실제 계통데이터를 이용하여 최적화 기법을 사용하는 최적조류계산(Optimal Power Flow : 이하 OPF)을 사용하여 송전손실지수 산정에 정확성을 추구하였다.

또한 전력산업구조조정을 단행한 해외사례를 분석하여 정적손실지수와 동적손실지수의 차이에 관한 장,단점을 분석함으로써 TWBP 시장 개설 초기에 있어 시장참여자의 입찰전략에 시그널을 줄 수 있고 시장의 혼란을 최소화할 수 있는 송전손실지수 방법에 관한 연구를 수행하였다.

2. 본 론

본 연구진이 송전손실지수 선정에 있어 주안점을 두고 있는 사항은 다음과 같다.

1. 계수선정의 공정성 (Volatility 고려)
2. 계통손실비용 최소화

송전손실지수를 산정함에 있어 다양한 외생변수가 존재한다. 변수로는 부하증분에 관한 문제, 슬랙모션의 위치에 관한 문제(PF를 이용하여 송전손실지수 산정할 경우), 부하증분을 하는 모션의 위치에 관한 문제를 생각할 수 있다.

PF과 OPF의 수식적 분석을 통한 각 외생변수의 영향을 분석해 본다.

2.1 전력조류방정식 (PF)

PF는 전력계통의 송전 계통 모델에 Kirchhoff의 법칙을 적용하여 얻어진 일련의 연립방정식 형태이다.

2.1.1 PF와 슬랙모션(slack bus)

전력계통이 n 개의 모션으로 구성되어 있다고 가정하자.

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{Y}_{11}V_1 + \bar{Y}_{12}V_2 + \dots + \bar{Y}_{1n}V_n \\ &\vdots \\ \bar{I}_i &= \bar{Y}_{i1}V_1 + \dots + \bar{Y}_{ij}V_j + \dots + \bar{Y}_{ii}V_i + \dots + \bar{Y}_{in}V_n \\ &\vdots \\ \bar{I}_n &= \bar{Y}_{n1}V_1 + \bar{Y}_{n2}V_2 + \dots + \bar{Y}_{nn}V_n \end{aligned}$$

이 식에서 \bar{Y}_{ii} 는 i 번째 모션에 연결된 자기 어드미턴스의 합이고, \bar{Y}_{ij} 는 모션 i 와 j 간에 연결된 모든 상호 어드미턴스의 합을 음수화한 것이다.

이 식에서 1번 모션은 슬랙모션(slack bus)을 의미한다. 전체 전력 계통에 걸쳐 전력 평형 조건을 만족하기 위해서는 발전모션과 부하모션 이외의 또다른 형태의 모션이 필요하다. 부하에서 필요로 하는 총 전력량은 알고 있는 것이 대부분의 경우인데 부하에서 필요로 하는 총 전력량이 발전기의 고정 전력량과 정확하게 일치하는 것은 불가능하다. 따라서 각 발전기 모션에서 생산되는 유효전력을 고정시키는 것보다는 발전기 중에서 어느 하나만 그 전력을 고정시키는 것이 보다 실질적인 방법이다. 이렇게 제외된 발전기는 전체 계통의 전력평형을 이루기 위하여 사용된다. 이와 같은 역할을 하는 형태의 모션을 슬랙모션이라고 하고 통상적으로 1번 모션으로 지정한다.

2.1.2 PF에서의 슬랙모션의 변화

PF에서 슬랙모션의 변화에 대한 영향에 대한 논란이 있어왔지만 실제 계통시뮬레이션의 결과를 살펴보면 지정된 슬랙모션에 따른 변화는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 하지만 반드시 정규화(normalize)과정을 거쳐야지 지정된 슬랙모션에 따라 변동을 최소화 할 수 있다.

본 연구진이 IEEE 14-Bus 계통을 이용하여 페널티 계수의 변동을 살펴본 데이터는 다음과 같다.

[표 1] 슬랙모선의 변경에 따른 페널티 계수의 변화

| 모선 | s1 | s2 | s3 | s4 | s5 | s6 | s7 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 1.0 | 1.05504 | 1.13875 | 1.11060 | 1.09174 | 1.09220 | 1.10974 |
| 2 | 0.94783 | 1.0 | 1.07745 | 1.05267 | 1.03478 | 1.03617 | 1.05185 |
| 3 | 0.87970 | 0.92812 | 1.0 | 0.97702 | 0.96038 | 0.95168 | 0.97624 |
| 4 | 0.90047 | 0.95003 | 1.02261 | 1.0 | 0.98309 | 0.98439 | 0.99929 |
| 5 | 0.91594 | 0.96635 | 1.04120 | 1.01721 | 1.0 | 1.00130 | 1.01646 |
| 6 | 0.91475 | 0.96509 | 1.03564 | 1.01589 | 0.99863 | 1.0 | 1.01514 |
| 7 | 0.90111 | 0.95071 | 1.02434 | 1.00071 | 0.98380 | 0.98509 | 1.0 |
| 8 | 0.90111 | 0.95071 | 1.02434 | 1.00071 | 0.98380 | 0.98509 | 1.00000 |
| 9 | 0.90145 | 0.95106 | 1.02472 | 1.00108 | 0.98416 | 0.98546 | 1.00037 |
| 10 | 0.89997 | 0.94951 | 1.02305 | 0.99949 | 0.98256 | 0.98385 | 0.99874 |
| 11 | 0.90506 | 0.95488 | 1.02883 | 1.00512 | 0.98812 | 0.98941 | 1.00439 |
| 12 | 0.90197 | 0.95161 | 1.02332 | 1.00170 | 0.98474 | 0.98603 | 1.00096 |
| 13 | 0.89945 | 0.94895 | 1.02245 | 0.99883 | 0.98199 | 0.98327 | 0.99816 |
| 14 | 0.88567 | 0.93441 | 1.00678 | 0.98357 | 0.96693 | 0.96521 | 0.98286 |

| 모선 | s1 | s2 | s3 | s4 | s5 | s6 | s7 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 1.0 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 |
| 2 | 0.94783 | 0.94783 | 0.94783 | 0.94784 | 0.94783 | 0.94783 | 0.94784 |
| 3 | 0.87970 | 0.87970 | 0.87970 | 0.87972 | 0.87968 | 0.87969 | 0.87970 |
| 4 | 0.90047 | 0.90047 | 0.90047 | 0.90041 | 0.90048 | 0.90047 | 0.90047 |
| 5 | 0.91594 | 0.91594 | 0.91594 | 0.91591 | 0.91597 | 0.91594 | 0.91594 |
| 6 | 0.91475 | 0.91474 | 0.91475 | 0.91472 | 0.91477 | 0.91475 | 0.91476 |
| 7 | 0.90111 | 0.90111 | 0.90111 | 0.90105 | 0.90113 | 0.90111 | 0.90111 |
| 8 | 0.90111 | 0.90111 | 0.90111 | 0.90105 | 0.90113 | 0.90111 | 0.90111 |
| 9 | 0.90145 | 0.90145 | 0.90145 | 0.90139 | 0.90146 | 0.90145 | 0.90145 |
| 10 | 0.89997 | 0.89998 | 0.89998 | 0.89992 | 0.89999 | 0.89997 | 0.89998 |
| 11 | 0.90506 | 0.90507 | 0.90506 | 0.90502 | 0.90508 | 0.90506 | 0.90507 |
| 12 | 0.90197 | 0.90197 | 0.90198 | 0.90195 | 0.90199 | 0.90197 | 0.90198 |
| 13 | 0.89945 | 0.89945 | 0.89945 | 0.89942 | 0.89947 | 0.89944 | 0.89945 |
| 14 | 0.88567 | 0.88566 | 0.88567 | 0.88562 | 0.88568 | 0.88567 | 0.88567 |

[표 2] 정규화된 각 모선 기준의 페널티 계수

2.1.3 PF에서의 부하증분의 변화

송전손실지수를 계산하기 위하여 base-case 상태에서 추가해주는 부하증분에 관한 논란 또한 오랫동안 계속되어 왔다.

| 모선 | 초기 발전력 | 변동률 발전력 | 전기 | 송전손실계수 | 총 발전력 | 손실 |
|----|---------|---------|--------|--------|----------|---------|
| 1 | 232.366 | 243.583 | 11.197 | 1.1970 | 283.583 | 14.5834 |
| 2 | 40.0 | 50.601 | 10.601 | 1.0601 | 282.966 | 13.9667 |
| 3 | 0.0 | 9.836 | 9.836 | 0.9836 | 282.2219 | 13.2220 |
| 4 | 0.0 | 10.055 | 10.055 | 1.0055 | 282.4415 | 13.4416 |
| 5 | 0.0 | 10.234 | 10.234 | 1.0234 | 282.6200 | 13.6201 |
| 6 | 0.0 | 10.226 | 10.226 | 1.0226 | 282.6116 | 13.6117 |
| 7 | 0.0 | 10.060 | 10.060 | 1.0060 | 282.4455 | 13.4456 |
| 8 | 0.0 | 10.058 | 10.058 | 1.0058 | 282.4439 | 13.4440 |
| 9 | 0.0 | 10.069 | 10.069 | 1.0069 | 282.4551 | 13.4552 |
| 10 | 0.0 | 10.071 | 10.071 | 1.0071 | 282.4568 | 13.4569 |
| 11 | 0.0 | 10.154 | 10.154 | 1.0154 | 282.5396 | 13.5397 |
| 12 | 0.0 | 10.209 | 10.209 | 1.0209 | 282.5947 | 13.5948 |
| 13 | 0.0 | 10.093 | 10.093 | 1.0093 | 282.4789 | 13.4790 |
| 14 | 0.0 | 9.947 | 9.947 | 0.9947 | 282.3031 | 13.3032 |

[표 3] 부하증분 10MW에 대한 결과

| 모선 | 초기 발전력 | 변동률 발전력 | 전기 | 송전손실계수 | 총 발전력 | 손실 |
|----|---------|----------|--------|--------|----------|---------|
| 1 | 232.366 | 252.4961 | 0.1121 | 1.121 | 272.4981 | 13.5979 |
| 2 | 40.0 | 40.1082 | 0.1082 | 1.082 | 272.4322 | 13.3620 |
| 3 | 0.0 | 0.0396 | 0.0396 | 0.396 | 272.4946 | 13.3644 |
| 4 | 0.0 | 0.0395 | 0.0395 | 0.395 | 272.4955 | 13.3693 |
| 5 | 0.0 | 0.1057 | 0.1057 | 1.057 | 272.4917 | 13.3615 |
| 6 | 0.0 | 0.1024 | 0.1024 | 1.024 | 272.4884 | 13.3682 |
| 7 | 0.0 | 0.1007 | 0.1007 | 1.007 | 272.4867 | 13.3695 |
| 8 | 0.0 | 0.1008 | 0.1008 | 1.008 | 272.4968 | 13.3666 |
| 9 | 0.0 | 0.1018 | 0.1018 | 1.018 | 272.4878 | 13.3676 |
| 10 | 0.0 | 0.1020 | 0.1020 | 1.020 | 272.4890 | 13.3678 |
| 11 | 0.0 | 0.1016 | 0.1016 | 1.016 | 272.4876 | 13.3674 |
| 12 | 0.0 | 0.1021 | 0.1021 | 1.021 | 272.4881 | 13.3679 |
| 13 | 0.0 | 0.1047 | 0.1047 | 1.047 | 272.4907 | 13.3905 |
| 14 | 0.0 | 0.0977 | 0.0977 | 0.977 | 272.4837 | 13.3606 |

[표 4] 부하증분 0.1MW에 대한 결과

본 연구진이 수행한 결과에 의하면 부하증분에 따른 극심한 변동성이 있음이 확인되었으며 시장참여자들의 합의를 통한 정확한 기준이 요구되는 부분이다.

2.2 최적조류계산 (OPF)

OPF는 정태 최적화 문제로 경제급전과 PF를 병행하여 사용하는 기법이다. 계산의 복잡함 때문에 자주 사용되어 오지 않았지만 컴퓨터의 발달에 힘입어 계통을 분석하고 운영하는데 새로운 대안으로 떠오르고 있다.

2.2.1 OPF의 Formulation

정태 최적화 문제이기 때문에 목적함수와 제약조건에 따라 다양한 형태가 가능하지만 본 논문에서는 가장 빈번하게 쓰이는 연료비용 최소화에 대하여 알아본다.

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & g(x) = 0 \\ & h(x) \leq 0 \end{aligned}$$

여기서 x 는 시스템 상태변수와 제어변수의 벡터를 나타내는데, 먼저 시스템 상태 변수는 다음과 같다.

- 전압 크기
- 전압 위상각
- 부하의 유효전력 및 무효전력
- 발전기 유효전력 및 무효전력

본 내용에서 보는 바와 같이 슬랙변수를 이용한 연립방정식이 아닌 주어진 제약조건을 만족하는 범위에서 최적의 값을 구하는 최적화 문제로 전환되는 과정에서 슬랙의 지정에 따른 함수값의 변화를 미연에 방지할 수 있다.

2.3 동적손실지수(DLF) 와 정적손실지수(SLF)

2.3.1 동적손실지수

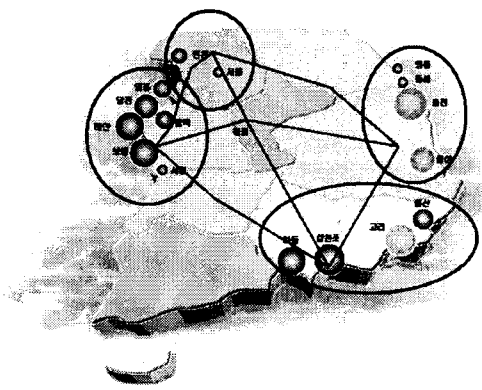
동적손실지수(Dynamic Loss Factor : 이하 DLF)는 전력거래가 이루어지는 시점마다 계통을 분석하여 손실지수를 산정하는 기법이다. DLF는 실시간으로 송전손실지수가 산정되기 때문에 계통상황을 충실히 반영한다는 장점이 있지만 실시간으로 적용되는 지수가 변화되기 때문에 시장참여자에게 경제적 시그널을 제공할 수 없다는 단점이 있다.

2.3.2 정적손실지수

정적손실지수(Static Loss Factor : 이하 SLF)는 일년 동안 계통상황을 분석하여 의미있는 몇 개의 데이터를 이용하여 시장에 적용할 송전손실지수를 산정하는 방법이다. 샘플링된 값을 사용하기 때문에 통계학적 오차가 있을지라도 시장참여자들에게 시장행위에 있어 일정한 시그널을 줄 수 있고 특히, 경쟁적 전력시장 개척 초기에는 적용의 간편성으로 인하여 시장참여자들의 혼란을 방지할 수 있다는 장점이 있다. 또, 통계학적인 오차는 시간가중치, 지역가중치, 부하가중치 등을 이용한 가중평균치법을 이용하여 감소할 수 있으며 통계학적 신뢰도가 확보될 수 있다면 SLF는 시장에 적용하는 것이 간편성과 정확성을 인정받을 수 있다.

2.4 사례연구

2.4.1 사례계통



본 연구진이 한전전력통계를 바탕으로 구성된 부하데이터를 바탕으로 1년동안 주요 송전손실지수를 최적조류계산을 통하여 계산한 결과이다. 부하증분을 취하는 모선은 모든 모선에 걸쳐서 계산을 하였다.

2.4.2 Simulation 결과

1) Bus 1에서 부하증분 10MW

| | 평균 | 편차 제곱 | Lower Limit(%) | Upper Limit(%) | GAP |
|-----|--------|----------|----------------|----------------|--------|
| PF | 1.1390 | 2.8951 | 94.67% | 105.33% | 10.67% |
| TLF | 1.1390 | 2.8951 | 94.67% | 105.33% | 10.67% |
| MLR | 0.0370 | 0.0192 | 86.63% | 113.37% | 26.74% |
| MLF | 1.1090 | 0.9686 | 96.83% | 103.17% | 6.34% |
| ALF | 1.0821 | 0.1008 | 98.88% | 101.12% | 2.24% |
| ALR | 0.0251 | 0.0018 | 93.97% | 106.03% | 12.07% |

2) Bus 2에서 부하증분 10MW

| | 평균 | 편차 제곱 | Lower Limit(%) | Upper Limit(%) | GAP |
|-----|--------|----------|----------------|----------------|--------|
| PF | 1.1432 | 3.0125 | 94.58% | 105.42% | 10.84% |
| TLF | 1.1432 | 3.0125 | 94.58% | 105.42% | 10.84% |
| MLR | 0.0370 | 0.0615 | 76.07% | 123.93% | 47.86% |
| MLF | 0.8946 | 1.0940 | 95.83% | 104.17% | 8.35% |
| ALF | 1.0852 | 0.1854 | 98.48% | 101.52% | 3.03% |
| ALR | 0.0287 | 0.0021 | 94.30% | 105.70% | 11.40% |

3) Bus 3에서 부하증분 10MW

| | 평균 | 편차 제곱 | Lower Limit(%) | Upper Limit(%) | GAP |
|-----|--------|----------|----------------|----------------|--------|
| PF | 1.1385 | 3.0001 | 94.57% | 105.43% | 10.86% |
| TLF | 1.1385 | 3.0001 | 94.57% | 105.43% | 10.86% |
| MLR | 0.0370 | 0.1104 | 67.94% | 132.06% | 64.12% |
| MLF | 0.8971 | 1.3549 | 95.37% | 104.63% | 9.26% |
| ALF | 1.0872 | 0.1457 | 98.66% | 101.34% | 2.68% |
| ALR | 0.0225 | 0.0013 | 94.28% | 105.72% | 11.44% |

4) Bus 4에서 부하증분 10MW

| | 평균 | 편차 제곱 | Lower Limit(%) | Upper Limit(%) | GAP |
|-----|--------|----------|----------------|----------------|---------|
| PF | 1.1546 | 2.8964 | 94.74% | 105.26% | 10.52% |
| TLF | 1.1546 | 2.8964 | 95.02% | 104.98% | 9.96% |
| MLR | 0.0372 | 0.2750 | 49.67% | 150.33% | 100.65% |
| MLF | 0.8947 | 1.2248 | 95.58% | 104.42% | 8.83% |
| ALF | 1.0830 | 0.1986 | 98.43% | 101.57% | 3.14% |
| ALR | 0.0269 | 0.0009 | 96.02% | 103.98% | 7.96% |

90% 신뢰도 구간을 이용한 결과를 살펴보면 부하증분을 적용하는 모선의 종류와, 부하데이터에 관계없이 MLF와 ALF의 volatility가 작음을 알 수 있다.
따라서 MLF, ALF의 경우는 90% 신뢰수준에서 고려할 경우 SLF를 사용해도 된다는 결론을 얻을 수 있었다.

3. 결 론

2004년도에 발간된 TWBP시장 운영규칙에 의하면 송전비용을 구성하고 있는 3가지 요소에 의한 정산은 다음과 같이 할 예정이다.
· 유지,보수비용 : 발전사업자와 부하사업자가 1:1 비율
· 혼잡비용 : conon/off 정산금 이용
· 손실비용 : SMTLF 이용 정산

송전손실비용 정산의 구체적인 방법은 "가격/(1-손실지수)"의 공식에 의하여 산출될 예정이다.
따라서 시장에 적용되는 손실지수의 종류와 산정방법에 대한 논란이 예상되며 각 시장참여자들 이 자신들의 이익 추구를 위하여 행동하므로 합의점을 찾는 것도 쉽지 않다. ISO의 입장에서는 계통손실최소화로 시장정책을 구성한다고 할지라도 각 시장참여자의 합의 없이는 정책을 시행할 수 없다.

본 연구에서는 송전손실지수 산정방안으로 우선, PF와 OPF의 비교를 통하여 슬랙모션의 허용성을 지적하였으며, 정태 최적화인 OPF를 이용하여 송전손실지수 산정방법에 대한 연구를 수행하였다.

또한, 여러 손실지수 중 부하의 영향을 적게 받는 손실지수를 T-test를 이용한 양측검정기법을 이용하여 Upper Limit 와 Lower Limit를 비교하여 산정하였다. 아울러, T-test를 통한 양측검정기법을 이용하여 SLF의 가장 커다란 단점인 부정확성에 대한 논란을 일축시킬 수 있는 지수산정방안을 제시하였다.

SLF를 적용함은, 시장에 적용이 간편하고 시장개설 초기 시장참여자들의 입찰전략에 대한 혼돈을 방지함과 더불어 신규투자 입지문제에 관한 지역적 신호(locational signal)를 줄 수 있는 대안이 될 것이다.

현재 본 연구진은 base case-OPF를 계산한 후 송전손실지수를 산정하기 위하여 각 모선에서 행하여 지는 부하증분 후 계산에 있어 부하증분의 크기에 관한 연구를 수행하고 있다. 전체 시스템 부하에 대한 상한 비율을 산정함으로써 인하여 시장에 적용가능한 송전손실지수 산정의 완벽한 기준을 정립하기 위함이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(02-전-01) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] 홍익대학교 전력경제연구실, "주요 송전손실 관련 지수 분석"
- [2] 박정식, 윤영선, "현대통계학", 다산출판사, 제4판
- [3] 문영현 외 4인, "전력시스템공학", 사이텍미디어
- [4] 김강원 외 3인, "경쟁적 전력시장에서 적용 가능한 합리적 송전손실지수에 관한 연구", 2004년 추계학술대회
- [5] 김발호, 박종배, "송전선 이용료 산정기법", 2000
- [6] 전력연구원, "현물시장에의 적용을 위한 한계송전손실계수 산정 알고리즘 개발에 관한 연구", 전력산업기반사업보고서
- [7] Vincent Del Toro, "Electric Power Systems", Prentice Hall