

거래전략에 따른 송전 손실 배분의 경로 의존성에 관한 연구

하상현, 민경일, 이수원, 문영현
연세대학교

Study on Path-dependency of Transmission Loss Allocation using Transactions Strategy

Sang-hyeon Ha, Kyung-Il Min, Su-won Lee, Young-hyun Moon
Yonsei University

Abstract - 본 논문에서는 모션별로 송전 손실을 배분하는 방법에 대하여 연구하였다. 특히 거래 전략 행렬을 통한 송전 손실 배분 이론을 제시하였고, 제안된 송전 손실 이론이 수학적으로 경로 의존성을 가짐을 증명하였다. 또한 총 전송 손실량이 거래 전략에 독립적임을 밝혀 합리적인 손실 배분 방법임을 증명하였다. 본 논문에서 제시된 알고리즘은 IEEE 계통에서 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서 론

1990년대 이후 세계 각국에서는 전력 산업의 효율성 제고를 위하여 전력 거래에 경쟁적 시장 시스템을 도입하여 운영해 오고 있다. 이 시장 시스템의 효율성은 전력 생산자와 전력 수요자 사이의 공정한 경쟁을 보장할 수 있는 합리적인 가격책정에 근거하고 있다. 전력거래의 대부분은 현물거래로 이루어지므로 합리적인 현가산정(spot pricing)이 매우 중요하며, 이를 위해서는 발전비용뿐만 아니라 송전손실과 송전선비 이용분담금 등 여러 가지 측면이 고려되어야 한다. 송전손실배분은 총 전력생산량의 3~4%가 되어 그 자체로서도 현가산정에 무시할 수 없는 요소이며, 또 한편으로는 송전비용 역시 송전손실 배분량에 비례하여 할당되기 때문에 발전사업자의 경쟁력에 상당한 영향을 미칠 수 있어 전력시장운영에 있어서 매우 중요한 의미를 갖는다.[1-3]

본 논문에서는 비선형함수로 주어지는 총 송전손실을 모션별 주입전력에 대한 부분적분의 합으로 표시할 수 있다는 것을 보였다. 또한 각각의 모션전력관련 부분적분이 감도계수에 의한 증분손실을 적분한 것과 같으며, 그 적분결과가 해당모션에 대한 비선형성을 고려한 정확한 손실배분이 됨을 보였다. 한편 손실 배분의 경로의존성은 적분경로에 따라 손실배분이 달라짐을 의미하며 경로에 따라 큰 폭의 변화를 보이고 있다. 이러한 변화 폭은 실제통운용에 큰 문제를 야기할 수 있으며 손실배분에 관한 이론정립을 어렵게 하는 주된 원인이다. 적분경로결정에는 몇 가지 고려 사항이 있지만 그 주된 요소는 쌍방 간 전력거래전략이 된다. 그러나 풀제를 도입하고 있는 경우는 쌍방거래가 존재하지 않으며 이러한 문제해결을 위하여 본 연구팀에서는 손실 배분을 위해서 거래 당사자 간에 가상적 쌍방거래를 허용할 수 있음을 보인 바 있다[4]. 따라서 거래 당사자 간 합의에 의해 제출한 가상거래에 따라 적분경로를 결정할 수 있으며, 이에 따라 거래전략을 고려한 손실배분방안을 제안하였다.

2. 모션별 손실 배분 수학적 개발

전력 계통 손실은 계통상태가 결정되면 조류 계산으로 부터 일의적(unique)으로 결정된다. 따라서 계통손실은 부하증가와 발전 배분의 과거 경로와 상관없이 일정한 값을 갖게 되며 이것은 경로 독립적(path-independency)이라는 것을 의미한다. 그러나 선로 저항에 의해 발생하는 손실 $R^2 I^2$ 이 비선형성을 갖고 있어 어느 지역 부하(또는 발전)가 먼저 증가하느냐에 따라 큰 폭으로 변화한다. 따라서 모션별 손실 배분은 경로 의존적(path-dependency)이다. 이 두 가지 상반되는 결론은 손실배분의 이론 개발에 상당한 혼란을 불러 왔으며 모션별 손실배분의 합이 계통손실과 일치하는 이론개발이 불가능한 것으로 생각하게 되었다.[1-3] 본 논문에서는 총 손실의 경로 독립성과 모션별 손실 배분의 경로 의존성을 동시에 보여줄 수 있는 수학적 이론을 개발하였다.

2.1 경로 의존성에 관한 수학적 고찰

먼저 송전손실 배분에 관련된 경로 의존성을 고려하기 위하여 일반적인 수학적 경로 의존성을 고찰해보자. 독립 변수가 (x_1, x_2, \dots, x_n) 를 인자로 갖는 스칼라 함수 f 가 다음과 같이 표시

된다고 하자.

$$P = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

(단 $f(0, 0, \dots, 0) = 0$ 으로 가정함)

그러면 P 는 상태 $\mathbf{x}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 에 의하여 일의적(unique)으로 결정되며 적분형태로 표시 되더라도 전체 결과는 경로 독립이 된다. 즉 P 의 미분은 다음과 같이 주어지며

$$dP = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \quad (2)$$

이 미분치(dP)를 적분함으로서 P 를 재구성 할 수 있다.

$$P = \int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{x}} dP = \int_{(0,0,\dots,0)}^{(x_1,x_2,\dots,x_n)} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \right) \quad (3)$$

위 적분은 선적분으로 c 는 선적분의 경로(contour)를 표시한다. 위의 선적분에서 다음의 경로 독립의 조건을 살펴보자.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \text{ for all } i, j \quad (4)$$

위 식에서 $f(\mathbf{x})$ 는 상태 \mathbf{x} 에 의하여 일의적으로 결정되는 well-defined 함수이므로 위식은 모든 i, j 에 대하여 당연히 성립하며 따라서 식(3)의 적분은 경로 독립이 된다. 한편 식(3)에서 부분적분에 해당하는 적분 항 하나를 고찰해 보자.

$$P^{(i)} = \int_0^x \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i} dx_i \quad (5)$$

위 적분은 x_i 에 관한 적분이지만 적분 path c 를 고려해야 한다. 왜냐하면 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 가 여전히 상태변수 \mathbf{x} 의 함수이기 때문이다. 이

에 따라 각각의 부분 적분 $P^{(i)}$ 는 path c 에 의존적이 된다.

2.2 전력손실 및 모션별 손실 배분 해석

전력계통의 전체손전 손실은 각 발전소 발전량과 모션 주입 전력(bus injection power)가 주어지면 조류 계산 결과에 따라 총 손실이 계산 되며 따라서 다음과 같은 함수로 표시할 수 있다.

$$P_{loss,ttl} = Loss(\theta_2, \dots, \theta_N, V_{G1}^S, \dots, V_{Gm}^S, V_{m+1}, \dots, V_N) \quad (6)$$

(모션 1, 2, ..., m 을 전압조정 모션이라고 하고 1번 모션을 slack 모션으로 취하였다 가정 함)

한 편, 계통이 정상 운전 상태에 있을 경우 상태변수 θ, V 는 모두 모션 주입 전력에 의해 결정 되므로 다음과 같이 함수 관계로 표시할 수 있다.

$$P_{loss,ttl} = f_{loss}(P_2, \dots, P_N, Q_{m+1}, \dots, Q_N) \quad (7)$$

위 식에서 유효 주입 전력 중 슬랙모션의 유효 전력 P_1 은 종속 변수가 되어 독립 변수에서 제외되었고, 또한, 발전기 모션 전압 $V_{G1}^S, \dots, V_{Gm}^S$ 은 지정치로 유지되므로 상수로 취급되어 이 또한 제외되었다. 여기서 f_{loss} 를 양명적으로 찾을 수는 없지만, 독립변수가 결정되면 일의적으로(unique) 함수값이 결정되므로 well-defined 함수가 된다.(함수를 수식으로 표현할 수 없는 별개의 문제임), 또한 식(3)에서 요구되는 편미분 값은 쉽게 계산할 수 있음에 유의해야 한다.

그러면 위 식은 식(3)에 의거 부분 적분의 합으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{loss,ttl} &= \int_{(0,0,\dots,0,0,\dots,0)}^{(P_2^0, P_3^0, \dots, P_N^0, Q_{m+1}^0, \dots, Q_N^0)} df_{loss} \\ &= \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} \left[\sum_{i=2}^m \frac{\partial f_{loss}(P, Q)}{\partial P_i} dP_i + \sum_{i=m+1}^N \left(\frac{\partial f_{loss}(P, Q)}{\partial P_i} dP_i + \frac{\partial f_{loss}(P, Q)}{\partial Q_i} dQ_i \right) \right] \\ \text{단 } P^0 &= [P_2^0, \dots, P_N^0, Q_{m+1}^0, \dots, Q_N^0]^T \end{aligned} \quad (8)$$

위 식에서 부분 적분의 총합은 경로 C 에 독립적이지만 각각 부분적분은 경로 의존적임은 한번 더 지적해 두고자 한다. 또한

미분 계산은 경로 상의 (P, Q) 에서의 계산된 값을 사용해야 한다는 것도 유의할 필요가 있다.

한편 위 식을 관찰해 보면 각각의 미분 항들이 모션별 손실 감도 계수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이를 이용할 경우 모션별 손실 배분은 다음과 같이 계산할 수 있다. 즉 모션 i 에 대한 손실 배분은

$$P_{loss(i)} = c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} dP_{loss(i)} = c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} (K_{P_i}^{loss} dP_i + K_{Q_i}^{loss} dQ_i) \\ = c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} \left(\frac{\partial f_{loss}(P, Q)}{\partial P_i} dP_i + \frac{\partial f_{loss}(P, Q)}{\partial Q_i} dQ_i \right) \quad (9)$$

로 주어지며 이것은 식(5)의 부분적분에 해당한다. 따라서 경로 의존적이 된다. 그러나 총 손실을 모션별 손실 배분의 총합과 같으며, 그 결과 식(8)이 되고 경로 독립이 된다.

2.3 전력 거래 전략을 고려한 손실 배분 및 평균 손실 계수 계산

앞 절에서는 손실 감도 계수를 사용함으로써 모션별 손실 배분 방법을 함수의 부분적분으로 표시할 수 있음을 보였다. 여기서는 문제를 간단하게 하기 위하여 계통손실을 발전회사에서만 분담하는 것으로 가정하고 손실 배분을 계산한다. 모션 i 에서의 손실 감도는 발전기 모션에 대하여 각각 다음과 같이 계산된다.

$$S_{pGi}(\mathbf{P}) = \frac{\partial Loss(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial P_{Gi}} = \left[\left(\frac{\partial P_{stack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{stack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Gi}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \\ \frac{\partial P_{Gi}}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} \quad (10) \\ = \left[\left(\frac{\partial P_{stack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{stack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathcal{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i^P - \boldsymbol{\alpha}_i^P \\ -\boldsymbol{\beta}_i^Q \end{bmatrix}$$

단, \mathbf{u}_i^P : 단위 벡터로서 조류 계산유효 전력 벡터의 P_{Gi} 위치에 1이 들어감

$$\boldsymbol{\beta}_i^Q = [\tan \theta_{L1} \alpha_{L1}^{(i)}, \tan \theta_{L2} \alpha_{L2}^{(i)}, \dots, \tan \theta_{LN} \alpha_{LN}^{(i)}]$$

$\boldsymbol{\alpha}_i^P$: i 번 모션의 발전력 증가에 대응하는 부하 증가 배분비율 (단 $\sum_{k=1}^N \alpha_{Lk}^{(i)} = 1$ 임)

θ_{Li} : 모션 i 의 부하에 대한 역률각 즉, $\theta_{Li} = \cos^{-1} p f_i$ 로 주어짐

위 식에서 두 번째 식은 문헌[1]의 주어진 결과를 이용하여 얻은 것이며 i 번 모션 발전 증가분 ΔP_{Gi} 에 대응하여 증가하는 부하 배분율이 반영되어 다소 복잡해졌다.

이상과 같이 유효 전력을 독립 변수로 한 손실 감도가 계산될 수 있으며, 이를 사용하여 모션별 계통 손실 배분을 계산할 수 있다. 즉 모션 i 에 대한 계통 손실 배분은

$$P_{loss, G1} = c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} S_{pGi}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) dP_{Gi} \text{ for } i \in \text{Generator Buses} \quad (11.a)$$

$$P_{loss, L1} = c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} S_{pLi}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) dP_{Li} \text{ for } i \in \text{Load Buses} \quad (11.b)$$

로 계산할 수 있다. 위의 손실 배분 계산에서 유의할 점은 이 역시 부분적분으로 경로 c 에 따라 다른 값을 갖게 된다는 것이다. 적분 경로는 각 모션 유효 전력 P_i 가 어떤 관계를 갖고 변화하는가에 따라 결정되며 여기에는 계통의 과거 경력을 고려해야 하는 등 매우 복잡한 양상을 띄고 있다. 그러나 모든 부하와 발전량이 비례적으로 증가한다고 가정하면 문제는 상당히 단순화 될 수 있으며 이 경우에는 전력 거래 전략이 적분 경로를 결정해 준다.

즉 직선 적분 \bar{c} 상의 한 점은 경로 파라미터 λ 에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^0 \lambda \quad (12)$$

위의 관계를 식(10)에 대입하면, 모션의 종류에 따라 한계 손실 감도가 계산된다. 그러면 모션의 종류에 관계없이 한계 손실 감도는 λ 의 함수가 된다.

한편 평균 손실 계수는 부하 수준의 변화에 따라 변화하는 한계 손실 계수의 평균을 취한 것이며 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{S}_{pi} = \int_0^1 S_{pi}(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

또한 모션별 손실 배분은 다음과 같이 계산된다.

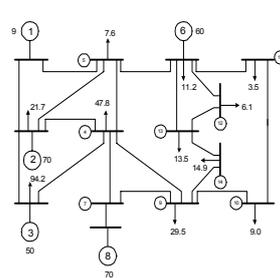
$$P_{Loss, Bus i} = \bar{S}_{pi} P_i^0 \quad (14)$$

2.4 시뮬레이션 결과치

아래의 IEEE14 모션도와 표 1~3에서의 거래전략을 이용하여 손실감도 계수를 계산한 결과 표 4를 얻을 수 있었다. 이 결과는 거래전략에 따라 발전기 모션에서의 한계/평균 손실계수가 달라짐을 보여준다. 거래전략이 적분경로를 결정하기 때문에 여기서도 역시 손실 배분의 경로 의존성을 확인할 수 있으며, 거래 전략에 따른 3가지 Case에서 발전기별 손실 배분이 상당히 달라짐을 알 수 있으며, 거래 전략을 고려하지 않고는 정확한 손실 배분이 이루어 질 수 없음을 보인다.

또한 여기서 특기할 것은 제안된 방법에 의한 손실 배분 결과는 이론적 배분의 총합이 실제 계통손실과 정확히 일치한다는 것이다.[표 4] 이것은 기존의 어떠한 방법에서도 불가능한 것

알려진 사실이다. 또한, 제시된 방법에서는 이론적 손실 배분의 합이 거래전략에 상관없이 항상 일정하다는 것을 보임으로써 발전/소비자 양자간의 가상적 거래를 허용할 수 있는 이론적 기초를 마련하였다. (풀제를 도입하고 있는 시장 시스템에서는 실제 거래전략이 없으며 이에 대한 대안임)



<그림 1> IEEE14모션 계통도

<표 1> IEEE14모션 계통에서의 가상적 상호거래전략(case I)

L/G	1	2	3	6	8
2	42.5	32.0	0	0	0
3	0	39.0	100	0	25.0
4	0	19.0	0	18.0	18.0
5	57.5	10.0	0	0	0
6	0	0	0	20.0	0
7	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	41.0
10	0	0	0	10.0	6.0
11	0	0	0	6.0	0
12	0	0	0	10.0	0
13	0	0	0	23.0	0
14	0	0	0	13.0	10.0

<표 2> IEEE14모션 계통에서의 가상적 상호거래전략(case II)

L/G	1	2	3	6	8
2	100	18.1	0	0	0
3	0	39.0	0	0	24.1
4	0	42.9	100	0	25.4
5	0	0	0	12.7	0
6	0	0	0	18.7	0
7	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	42.1
10	0	0	0	15.0	0
11	0	0	0	5.8	0
12	0	0	0	10.1	0
13	0	0	0	22.5	0
14	0	0	0	15.2	8.4

<표 3> IEEE14모션 계통에서의 가상적 상호거래전략(case III)

L/G	1	2	3	6	8
2	44.4	25.3	0	0	0
3	0	5.7	0	0	57.4
4	0	68.3	100	0	0
5	55.6	0.7	0	3.5	0
6	0	0	0	18.7	0
7	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	42.1
10	0	0	0	14.5	0.5
11	0	0	0	5.8	0
12	0	0	0	10.1	0
13	0	0	0	22.5	0
14	0	0	0	24.9	0

<표 4> 손실감도 계수 계산결과 (IEEE14 모션 계통)

발전기 모션번호	제시된 방법에 의한 배분 (관호속의 수치는 보정되기전의 값임)			한계 손실 계수에 의한 배분		
	CASE I	CASE II	CASE III	CASE I	CASE II	CASE III
G1	0.017494 (-0.000405)	-0.00336 (-0.021262)	0.016806 (-0.001093)	0.02601	-0.01663	0.024606
G2	0.533851 (0.394634)	0.606095 (0.466879)	0.470148 (0.330932)	0.96397	1.11853	0.7182
G3	0.09944 (0.000000)	0.09944 (0.000000)	0.09944 (0.000000)	0.000000	0.000000	0.000000
G6	0.654998 (0.535670)	0.676426 (0.557098)	0.78201 (0.662682)	1.11648	1.15962	1.38582
G8	0.380954 (0.241738)	0.334453 (0.195237)	0.344554 (0.205338)	0.67431	0.56889	0.70182
Total	1.686737 (1.171637)	1.713052 (1.197952)	1.712959 (1.197859)	2.78077	2.830408	2.830446

조류 계산에 의한 계통 총 손실: 1.7335 (부부하 손실: 0.5151)

3. 결 론

본 논문에서의 시뮬레이션 결과는 거래전략과 송전손실 배분과의 관계를 재해석 하도록 해주었으며 거래전략은 모션별 손실계산에서 적분경로를 나타낸다는 것을 입증하였다. 즉 거래전략이 바뀌면 손실배분계산에서 적분경로 C가 바뀌게 된다는 것이다. 이는 본 논문에서 주장하는 거래전략에 따른 손실 배분이 경로 의존적(path-dependency)하다는 것을 입증한다. 또한 시뮬레이션 결과를 보면 거래전략변화는 모션별 손실 배분에는 영향을 미치지 않지만 손실배분의 총합, 즉 전체 계통손실은 불변이 되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 앞에서 언급한 바 전체계통 손실을 경로독립이라는 사실을 실제로 입증한 것으로 본 논문에서 채용한 모션별 손실배분 분석법이 매우 정확하다는 반증이 된다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. J. Wood and B.F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control", Wiley, pp. 122-123.
- [2] Y. H. Moon, B. K. Choi, H. S. Ryu, J. S. Jung, and H. M. Park "Slack-Bus Independent Penalty Factor for Spot Pricing under Deregulation", in Proc. IEEE PES Summer Meeting, vol. 4, pp. 1017-1021, 2000.
- [3] A. M. Leite da Silve and J. G. de Carvalho Costa, "Transmission Loss Allocation: Part I - Single Energy Market", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 4, November 2003.
- [4] 기초전력연구보고서 [과제번호: R-2005-B-118], "지역별 현가산정(spot pricing)을 위한 모션별 계통 손실배분"
- [5] G. Gross and S. Tao, "A Physical-Flow-Based Approach to Allocating Transmission Losses in a Transaction Framework", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000.