

거래전략에 따른 송전손실배분의 경로의존성에 관한 연구

論 文

57-6-3

Path-dependency of Transmission Loss Allocation using Transaction Strategy

閔 庚 一* · 河 尚 賢** · 李 洙 原*** · 文 永 鉉†

(Kyung-Il Min · Sang-Hyeon Ha · Su-Won Lee · Young-Hyun Moon)

Abstract - This paper presents a buswise transmission loss allocation algorithm utilizing the transaction strategy. We prove that whatever calculated by any transaction strategy, the total of the allocated transmission losses of each bus, including no-load loss allocation, almost equals the total loss of AC power flow algorithm and the loss is perfectly slackbus-independent. In this paper, the allocated transmission losses of each bus is calculated by the method of integrating loss sensitivities using by the load level parameter λ . The performance of the proposed algorithm is evaluated by the case studies carried out on the WSCC 9-bus and IEEE 14-bus systems.

Key Words : Transmission Loss Allocation, Average Loss Sensitivity Factor, Marginal Loss Sensitivity Factor, Path-Dependency, Path-Independency, Transaction Strategy

1. 서 론

1990년대 이후 세계 각국에서는 전력산업의 효율성 제고를 위하여 전력거래에 경쟁적 시장시스템을 도입하여 운영해 오고 있다. 시장시스템의 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 송전 설비 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.

송전손실배분은 매우 난해한 과제로서 비선형성과 경로의존성을 가지고 있다. 기존의 이론은 대부분 감도해석법에 근거를 두고 있어 비선형성을 효과적으로 반영하지 못하고 있으며, 모션별 손실배분 총합이 실제 손실보다 2배 이상 커지는 등 상당한 문제점을 안고 있다[2-8].

본 논문에서는 비선형함수로 주어지는 총 송전손실을 각 모션전력에 대한 부분적분의 합으로 표시할 수 있다는 것을

보였다. 또한 각각의 모션전력의 부분적분이 감도계수에 의한 증분손실을 적분한 것과 같으며, 그 적분결과가 해당모션에 대한 비선형성을 고려한 정확한 손실배분이 됨을 보였다. 적분을 이용한 손실 분배법은 Galiana에 의해 제안된 바 있으나 [9, 10], 적분한 손실과 실제 손실 사이에 차이가 있어 이를 해결하기 위해 평준화 기법(normalizing technique)을 사용해야 했다. 또한 경로의존성이 손실분배에 중요한 요소임을 제기하였으나, 경로를 반영한 손실분배 적분식은 제시하지 못하였다. 본 논문에서는 선적분을 기반으로 한 손실분배법을 이용하여 경로에 의한 영향을 손실분배에 반영하였다. 한편 손실배분의 경로의존성은 적분경로에 따라 손실배분이 달라짐을 의미하며 경로에 따라 큰 폭의 변화를 보이고 있다. 이러한 변화 폭은 실제통운용에 큰 문제를 야기할 수 있으며 손실분배에 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 손실분배를 위해서 거래 당사자 간에 가상적 쌍방거래를 허용할 수 있음을 보인 바 있다[17]. 따라서 거래 당사자 간 합의에 의해 제출한 가상거래에 따라 적분경로를 결정할 수 있으며, 이에 따라 거래전략을 고려한 손실분배방안을 제안하였다.

2. 모션별 손실배분의 수학적 이론 개발

전력 계통 손실은 계통상태가 결정되면 조류 계산으로부터 일의적(unique)으로 결정된다. 따라서 계통손실은 부하증가와 발전 배분의 과거 경로와 상관없이 일정한 값을 갖게 되며 이것은 경로독립적(path-independent)이라는 것을 의미

† 교신저자, 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學科 教授 · 工博
E-mail : moon@yonsei.ac.kr

* 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學科 博士課程

** 正會員 : 國防科學研究所 研究員 · 碩士

*** 正會員 : 延世大 TMS 情報技術事業團 研究教授 · 工博

接受日字 : 2008年 2月 21日

最終完了 : 2008年 5月 9日

한다. 그러나 선로 저항에 의해 발생하는 손실 I^2R 이 비선형성을 갖고 있어 어느 지역 부하(또는 발전)가 먼저 증가하느냐에 따라 큰 폭으로 변화한다. 따라서 모선별 손실 배분은 경로의존적(path-dependent)이다. 이 두 가지 상반되는 결론은 손실배분의 이론 개발에 상당한 혼란을 불러 왔으며 모선별 손실배분의 합이 계통손실과 일치하는 이론개발이 불가능한 것으로 생각하게 했다.[1]-[14] 본 논문에서는 총 손실의 경로독립성과 모선별 손실배분의 경로의존성을 동시에 보여줄 수 있는 수학적 이론을 개발하였다.

2.1 경로의존성에 관한 수학적 고찰

먼저 송전손실배분에 관련된 경로의존성을 고려하기 위하여 일반적인 수학적 경로의존성을 고찰해보자. 독립변수 (x_1, x_2, \dots, x_n) 을 인자로 갖는 스칼라 함수 f 가 다음과 같이 표시된다고 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} (단, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$)에 의하여 일의적(unique)으로 결정되며 적분형태로 표시되더라도 전체 결과는 경로독립이 된다. 즉 P 의 전미분은 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.

$$P = \int_{x_0}^{\mathbf{x}} dP = \int_{(0,0,\dots,0)}^{(x_1, x_2, \dots, x_n)} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \right) \quad (3)$$

위 적분은 선적분으로 c 는 선적분의 경로(contour)를 표시한다. 위의 선적분에서 경로 독립의 조건은 다음과 같다.

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

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

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

위 적분은 x_i 에 관한 적분이지만 경로 c 를 고려해야 한다. 왜냐하면 $\partial f/\partial x_i$ 가 여전히 상태변수 \mathbf{x} 의 함수이기 때문이다. 이에 따라 각각의 부분적분 $P^{(i)}$ 는 경로 c 에 의존적이 된다.

2.2 전력손실 및 모선별 손실배분 해석

전력계통의 전체 송전손실은 각 발전소 발전량과 모선전력(bus injection power)이 주어지면 조류계산 결과에 따라 총 손실이 계산되며 다음과 같은 함수로 표시할 수 있다.

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

이 때, 모선 1, 2, ..., m 은 전압 조정 모선이라고 하고, 1번 모선을 slack 모선으로 취하였다고 가정하였다. 위 식에서 유효전력 중 슬랙모선의 유효전력 P_1 은 종속변수가 되어 독립변수에서 제외되어 있고, 발전기 모선전압 V_{G1}, \dots, V_{Gm}^S 은 지정치로 유지되므로 상수로 취급되므로 제외되었다. 여기서 P_{loss} 을 명백하게 찾을 수는 없지만 식(3)에서 요구되는 편미분 값은 쉽게 계산할 수 있음에 유의해야 한다. 또한 함수 P_{loss} 는 독립변수가 결정되어 일의적으로(unique) 함수값이 결정되므로 well-defined 함수가 된다. 이는 함수를 수식으로 표현할 수 없는 것과는 별개의 문제이다.

$$P_{loss,ttl} = P_{loss}(P_2, P_3, \dots, P_N, Q_{m+1}, \dots, Q_N) \quad (7)$$

그러면 위 식은 식(3)에 의하여 부분적분의 합으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{loss,ttl} &= \int_c \int_{(0,0,\dots,0,0,\dots,0)}^{(P_2^0, P_3^0, \dots, P_N^0, Q_{m+1}^0, \dots, Q_N^0)} dP_{loss} \\ &= \int_c \int_{(0,0)}^{(P_0, Q_0)} \sum_{i=2}^m \frac{\partial P_{loss}(P, Q)}{\partial P_i} dP_i \\ &\quad + \sum_{i=m+1}^N \left(\frac{\partial P_{loss}(P, Q)}{\partial P_i} dP_i + \frac{\partial P_{loss}(P, Q)}{\partial Q_i} dQ_i \right) \end{aligned} \quad (8)$$

단, $\mathbf{P}^0 = [P_2^0, \dots, P_N^0]^T$, $\mathbf{Q}^0 = [Q_{m+1}^0, \dots, Q_N^0]^T$

위 식에서 부분적분의 총합은 경로 c 에 독립적이지만 각각의 부분적분은 경로 c 에 의존적이며, 각각의 미분 계산은 경로 상의 (P, Q) 에서의 계산된 값을 사용해야 한다는 것을 유의할 필요가 있다.

한편 위 식을 살펴보면 각각의 미분 항들이 모선별 손실 감도계수로 나타나 있음을 알 수 있다.

$$K_{P_i}^{loss} = \frac{\partial P_{loss}(P, Q)}{\partial P_i} : \text{모선 } i \text{에서의 유효전력 변화에 대한 손실 감도} \quad (9)$$

$$K_{Q_i}^{loss} = \frac{\partial P_{loss}(P, Q)}{\partial Q_i} : \text{모선 } i \text{에서의 무효전력 변화에 대한 손실 감도} \quad (10)$$

위의 손실감도계수를 사용하면 모선 i 에 대한 손실배분은

$$\begin{aligned} P_{loss(i)} &= \int_c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} dP_{loss(i)} = \int_c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} \left(K_{P_i}^{loss} dP_i + K_{Q_i}^{loss} dQ_i \right) \\ &= \int_c \int_{(0,0)}^{(P^0, Q^0)} \left(\frac{\partial P_{loss}(P, Q)}{\partial P_i} dP_i + \frac{\partial P_{loss}(P, Q)}{\partial Q_i} dQ_i \right) \end{aligned} \quad (11)$$

로 주어지며, 이것은 식(5)의 부분적분에 해당하므로 경로의 존재성이 된다. 그러나 총 손실을 모선별 손실 배분의 총합과 같으며, 그 결과 식(8)이 되고 경로독립이 된다.

2.3 거래전략을 고려한 손실배분 및 평균손실계수 계산

앞 절에서는 손실감도계수를 사용함으로써 모선별 손실배분을 함수의 부분적분으로 표시할 수 있음을 보였다. 그러나 이 방법에서는 특정의 슬랙모선을 지정하고 있기 때문에 슬랙모선이 바뀌면 감도계수가 상당 폭의 변화를 보일 수 있으므로 이에 대한 개선책이 필요하다. 뿐만 아니라 부하모선의 경우 모선전력은 독립적으로 변하지 않고 부하역률에 따라 무효전력이 종속적으로 변한다. 따라서 계통 손실에 대한 최종 독립변수는 모선유효전력이 된다. 슬랙모선에 독립적인 손실감도 계산이 이미 연구된 바 있으며[15], 그 결과를 적용하면 모선 i 에서의 손실감도는 발전기모선과 부하모선에 대하여 각각 다음과 같이 계산된다.

$$S_{pGi}(\mathbf{P}) = \frac{\partial P_{loss}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial P_{Gi}} = \left[\left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial P_{Gi}} \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P_{Gi}} \\ \frac{\partial P_{Gi}}{\partial P_{Gi}} \end{bmatrix}$$

$$= \left[\left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathcal{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i^P - \boldsymbol{\alpha}_L^{(i)} \\ -\boldsymbol{\beta}_L^{(i)} \end{bmatrix} \quad (12.a)$$

$$S_{pLi}(\mathbf{P}) = \frac{\partial P_{loss}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial P_{Li}} = \left[\left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial P_{Li}} \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P_{Li}} \\ \frac{\partial P_{Li}}{\partial P_{Li}} \end{bmatrix}$$

$$= \left[\left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{slack}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathcal{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_i + \boldsymbol{\alpha}_G^{(i)} \\ -\boldsymbol{\beta}_{Li} \mathbf{u}_i^Q \end{bmatrix} \quad (12.b)$$

- 단, \mathbf{u}_i^P : 단위 벡터로서 조류계산 유효 전력 벡터의 P_{Gi} 위치에 1이 들어감
- \mathbf{u}_i^Q : 단위 벡터로서 조류계산 무효 전력 벡터의 Q_{Li} 위치에 1이 들어감
- $\boldsymbol{\beta}_L^{(i)} = [\tan\theta_{L1}\alpha_{L1}^{(i)}, \tan\theta_{L2}\alpha_{L2}^{(i)}, \dots, \tan\theta_{LN}\alpha_{LN}^{(i)}]$
- $\boldsymbol{\alpha}_L^{(i)}$: i 번 모선의 발전증가에 대응하는 부하증가배분 비율
(단 $\sum_{k=1}^N \alpha_{Lk}^{(i)} = 1$ 임)
- $\boldsymbol{\alpha}_G^{(i)}$: i 번 모선의 부하증가에 대응하는 발전력 증가배분 비율
($\boldsymbol{\alpha}_L^{(i)}$ 와 유사하게 결정됨)
- θ_{Li} : 모선 i 의 부하에 대한 역률각 즉, $\theta_{Li} = \cos^{-1} pf_i$ 로 주어짐

위의 두 식은 문헌[15]에서 주어진 결과를 이용하여 얻은 것이며, i 번 모선의 발전증가분 ΔP_{Gi} 에 대응하여 증가하는 부하배분율이 반영되었다.

위 식에서 감도계수의 독립변수가 모선유효전력임에도 불구하고 계산식에는 \mathbf{P} 가 직접 포함 되어 있지 않지만, 감도계수는 \mathbf{P} 만 결정되면 일의적(unique)으로 계산될 수 있다. 감도계수의 계산 과정을 설명하면 다음과 같다.

i) 각 모선에 대한 발전량(유효전력)과 부하의 유효전력이 결정되면 부하의 무효전력은 부하역률에 의하여 결정되며

이것으로 조류 계산에 필요한 모든 모선전력이 결정된다.

ii) 위 과정에서 결정된 \mathbf{P}, \mathbf{Q} 를 사용하여 조류계산을 행하여 $\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}$ 를 결정한다. 이 때, slack 모선은 임의로 택하여도 계산 결과에 거의 영향이 없다.

iii) i 번 모선의 발전증가에 대한 부하증가배분을 $\boldsymbol{\alpha}_L^{(i)}$ 을 결정한다. 여기서 i 번 모선에서의 전력거래전략이 있으면, 거래 내용에 의거 배분율이 쉽게 결정되며, 거래 전략이 없으면 $\boldsymbol{\alpha}_L^{(i)}$ 는 각 모선의 부하의 크기에, $\boldsymbol{\alpha}_G^{(i)}$ 는 발전 용량 크기에 비례 배분하는 것을 원칙으로 한다.

iv) 조류계산으로 구해진 $\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}$ 를 이용하여 감도계수를 계산한다.

이상과 같이 유효전력을 독립변수로 하여 손실감도가 계산될 수 있으며, 이를 이용하여 모선별 손실배분을 계산할 수 있다. 모선 i 에 배분되는 계통손실은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$P_{loss(i)} = \int_{(0,0,\dots,0)}^{(P_1^0, P_2^0, \dots, P_N^0)} S_{pGi}(\mathbf{P}) dP_{Gi} \quad \text{for } i \in \text{Generator Buses} \quad (13.a)$$

$$P_{loss(i)} = \int_{(0,0,\dots,0)}^{(P_1^0, P_2^0, \dots, P_N^0)} S_{pLi}(\mathbf{P}) dP_{Li} \quad \text{for } i \in \text{Load Buses} \quad (13.b)$$

위의 손실배분 계산에서 유의할 점은 모선별 손실이 경로 c 에 따라 다른 값을 갖게 된다는 것이다. 적분경로는 각 모선의 유효전력 P_i 가 어떻게 변하는가에 따라 결정되며, 계통의 과거 경력이나 부하, 발전기 특성 등 여러 가지 요소가 고려될 수 있으므로 매우 복잡한 양상을 가진다. 그러나 모든 부하와 발전량이 비례적으로 증가한다고 가정하면 문제는 상당히 단순화 될 수 있으며, 이 경우에는 전력 거래전략이 적분경로를 결정해 준다.

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

$$P = P^0 \lambda \quad (14)$$

$$P_{Gi} = P_{Gi}^0 \lambda \quad (15.a)$$

$$P_{Li} = P_{Li}^0 \lambda \quad (15.b)$$

위의 관계식을 식(12.a), (12.b)에 대입하면, 모선의 종류에 따라 한계손실감도가 계산된다. 그러면 모선의 종류에 관계없이 한계손실감도는 λ 의 함수가 된다.

한편 평균손실계수는 부하 수준의 변화에 따라 변화하는 한계손실계수의 평균을 취한 것이며 다음과 같이 주어진다.

$$\overline{S_{pi}} = \int_0^1 S_{pi}(\lambda) d\lambda \quad (16)$$

또한 모선별 손실배분은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{loss(i)} = \overline{S_{pi}} P_i^0 \quad (17)$$

특기사항 : 무부하 손실에 대한 손실배분 보정

전력계통에서 무부하시 계통손실이 0이라면 손실보정이 필요없다. 그러나 대부분의 계통에서 무부하시 송전선 충전 용량에 따른 무효전력이 흐르고 있어 이에 해당하는 송전손실이 발생하고 있으며 이에 따른 손실 배분보정이 필요하다. 무부하 계통 손실은 양이 매우 적으므로 발전소별 배분에서는 발전량에 비례하여 배분하도록 하였다. 즉 모선 i 에 대한 보정된 손실배분은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{loss(i)}^{Mod} = P_{loss(i)} + \frac{P_{Gi}}{\sum P_{Gk}} P_{loss}^{NoLoad} = \overline{S_{pi}} P_i^0 + \alpha_{Gi} P_{loss}^{NoLoad} \quad (18)$$

단, P_{loss}^{NoLoad} : 무부하시 계통손실

2.4 거래전략을 고려한 손실감도 계산

계통 손실배분을 가상적인 거래전략을 이용하면 보다 합리적인 손실배분이 이루어질 수 있다. 거래전략은 쌍방 간의 거래로 표시될 수 있으며 그림 1의 계통을 예로 들어 설명하고자 한다.

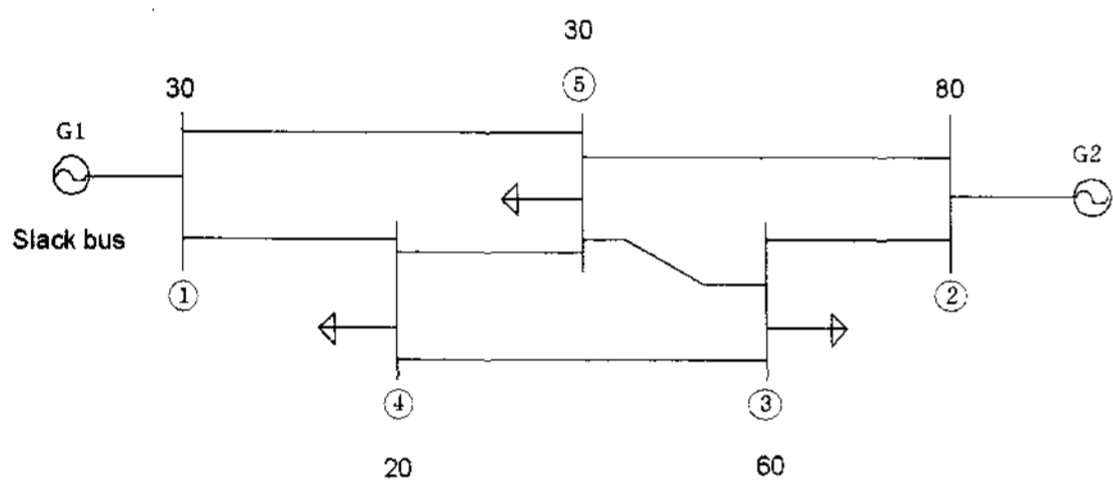


그림 1 5모선 계통도

Fig. 1 Single Diagram of 5-Bus system

발전소 1, 2가 부하모선 3, 4, 5의 수용가와 거래계약을 맺은 결과가 다음과 같다고 하자.

표 1 5모선 계통의 거래계약 명세표

Table 1 Power Transaction Table of 5-Bus system

발전소 \ 부하	모선 3 (60MW)	모선 4 (20MW)	모선 5 (30MW)
G1 (30MW)	0	20 MW	10 MW
G2 (80MW)	60 MW	0	20 MW

이 표는 발전소 G1 에서는 30 MW 를 생산하여 모선 4 에 20 MW, 모선 5에 10 MW 를 공급하기로 계약되어 있고 발전소 G2 에서도 80 MW 를 생산하여 모선 3, 5에 각각 60 MW, 20 MW 를 공급한다는 것을 의미한다.

그림 1의 5모선 계통에서 선로에 흐르는 조류는 무효전력이 없으므로 정확히 표현할 수 없다. 그러나 거래 명세서로부터 손실감도를 구하고자 하는 발전기 모선에서 나오는 전력이 어느 부하 모선에 얼마만큼 흘러 들어가는 가를 알 수 있으며 그 때의 부하분담비율을 행렬 형태로 나타낸 것이 거래행렬(Transaction Matrix)이다. 예로서 모선 1에 대한 부하비율은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{G1} \left\langle \begin{matrix} P_{L4}^{(1)} = 20: 4\text{번 모선부하 } P_{L4} \text{가 발전기 } G1 \text{에서 공급받는 전력} \\ P_{L5}^{(1)} = 10: 5\text{번 모선부하 } P_{L5} \text{가 발전기 } G1 \text{에서 공급받는 전력} \end{matrix} \right\rangle$$

$$\alpha_4^{(1)} = \frac{\Delta P_{L4}^{(1)}}{\Delta P_{G1}} = 0.67 \quad (19)$$

$$\alpha_5^{(1)} = \frac{\Delta P_{L5}^{(1)}}{\Delta P_{G1}} = 0.33$$

$$\alpha_3^{(1)} = \frac{\Delta P_{L3}^{(1)}}{\Delta P_{G1}} = 0$$

마찬가지로 발전기 G2의 전력이 부하에 공급되는 비율은 다음과 같이 결정된다.

$$\alpha_3^{(2)} = \frac{\Delta P_{L3}^{(2)}}{\Delta P_{G2}} = 0.75$$

$$\alpha_4^{(2)} = \frac{\Delta P_{L4}^{(2)}}{\Delta P_{G2}} = 0 \quad (20)$$

$$\alpha_5^{(2)} = \frac{\Delta P_{L5}^{(2)}}{\Delta P_{G2}} = 0.25$$

위의 결과를 사용하면 거래행렬(Transaction Matrix) T 는 다음과 같이 주어진다.

$$T = \begin{matrix} & G1 & G2 \\ \begin{matrix} P_{L3} \\ P_{L4} \\ P_{L5} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.00 & 0.75 \\ 0.67 & 0.00 \\ 0.33 & 0.25 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (\text{단 } T_{ij} = \alpha_i^{(j)}) \quad (21)$$

위의 거래 행렬로부터 각 발전기에 대한 부하 배분 벡터가 구해질 수 있다.

$$\alpha_4^{(1)} = [0.0, 0.0, 0.0, 0.67, 0.33]^T \quad (22)$$

$$\alpha_4^{(2)} = [0.0, 0.0, 0.75, 0.00, 0.25]^T$$

그러면 손실감도계수는 식 (12.a)을 사용하여 계산된다.

식(19)에서 볼 수 있듯이 일반적으로 부하비율을 $\Delta P_{Lj} / \Delta P_{Gi}$ 와 같은 식으로 표현할 수 있다. 이 때, 전력계통에서의 전력의 흐름은 그 계통의 거래당사자간의 거래전략(transaction strategy)에 따라 결정되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 각 모선의 손실을 합리적으로 배분하기 위해서는 거래당사자 간의 가상적 거래를 제출하게 하여 그에 의거 거래전략(transaction strategy)을 구성해야한다.

각 발전소에 대한 모선별 거래량이 결정되면 거래행렬 T 가 구성될 수 있으며 발전모선 또는 부하모선에 대한 모선별 손실감도계수를 식(12.a)과 식(16)에 의하여 간단히 계산될 수 있다.

이 방법의 특징은 만약 발전소 i 에서의 발전량에 대한 거래가 모선 i 에 연결된 수용가와 100% 거래가 이루어진다면,

$$\alpha_i = u_i \quad (23)$$

(단 $u_i = [0 \ 0 \ \dots \ 0, 1, 0 \ \dots \ 0]^T$; i 번째 요소가 1인 단위 벡터)

가 되어 발전소 i 에서의 유효 전력 손실감도계수가 0이 된

다는 것이다. 이것은 실제 상황에 꼭 맞는 결과이며 기존의 방법으로는 이러한 결과를 제시하지 못했었다. 또한 쌍방 간 거래가 지역적으로 가까운 곳에서 이루어지면 그만큼 손실감도계수도 적어진다.

WSCC 9모선 계통에 대한 손실감도 계산 예

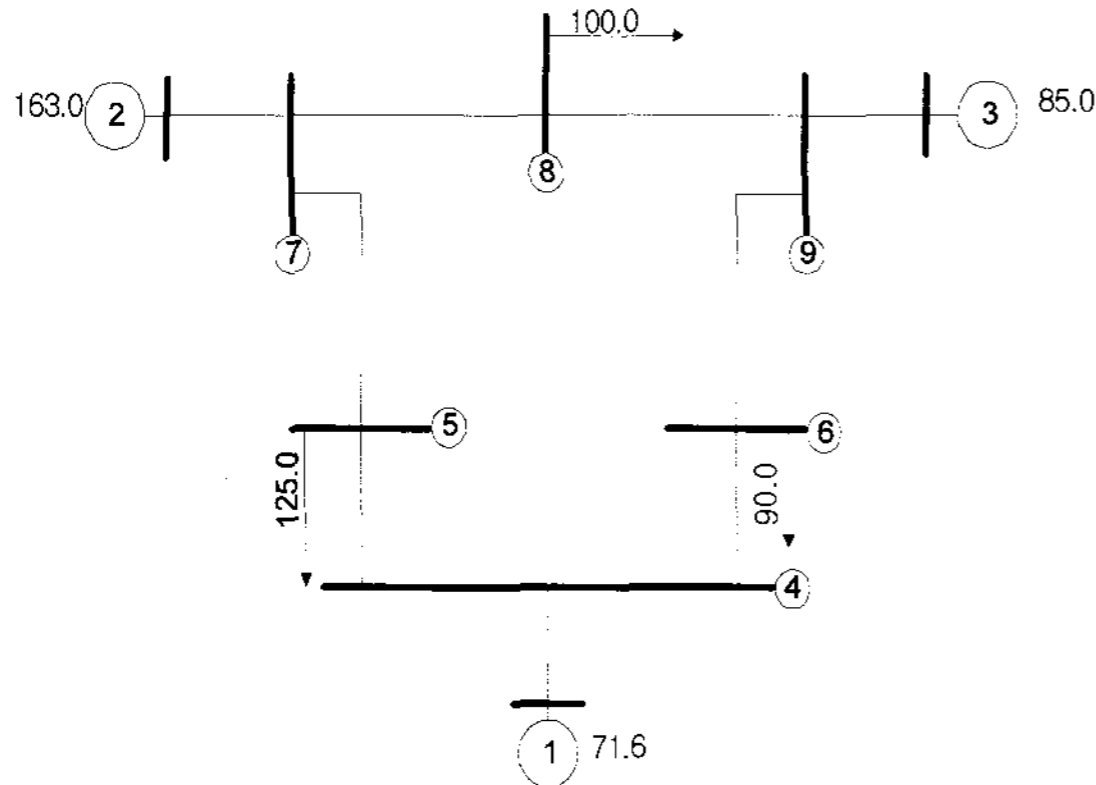


그림 2 WSCC 9모선의 계통도

Fig. 2 Single diagram of WSCC 9-Bus system

그림 2의 계통에 대한 전력 거래명세표가 표 2와 같이 주어졌다고 하자.

표 2 WSCC 9모선 계통 가상거래전략명세 (Case 1)

Table 2 Virtual transaction strategy for WSCC 9-Bus system (Case 1)

발전모선 부하모선	모선 1 (69.0)	모선 2 (163.0)	모선 3 (85.0)
4	0	0	0
5 (125.0)	55.7 (39.4)	52.5 (85.6)	0
6 (90.0)	44.3 (29.6)	0	71.0 (60.4)
7	0	0	0
8 (100.0)	0	47.5 (77.4)	29.0 (24.6)
9	0	0	0

* 괄호 속 숫자는 전력량(MW)을 표시함.

그러면 이 경우에 대한 거래행렬(Transaction matrix) T는 다음과 같이 주어진다.

$$T = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} \\ \textcircled{4} & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \textcircled{5} & 0.557 & 0.525 & 0.00 \\ \textcircled{6} & 0.443 & 0.00 & 0.71 \\ \textcircled{7} & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \textcircled{8} & 0.00 & 0.475 & 0.29 \\ \textcircled{9} & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{matrix} \quad (13)$$

거래행렬 T에 대한 발전기별 손실감도 계산 결과는 표 3과 같다.

여기서는 문제를 간단히 하기 위하여 계통손실은 발전회사 측에서만 부담한다고 가정하고 손실배분율을 계산하였다.

표 3 손실 감도 계산 결과

Table 3 Results of sensitivity factors

발전기 감도	G1	G2	G3
한계 손실 감도 S_{pGi}	0.0115	0.0374	0.0361
평균 손실 감도 $\overline{S_{pGi}}$	0.0038	0.0170	0.0163

3. 샘플 계통에 대한 수치적 검증

WSCC 9모선 계통, IEEE 14모선 계통에 대해서 제안된 알고리즘을 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 또한 부가적으로 일반적으로 인지되어 온 계통의 총 손실이 경로에 독립적임을 거래전략을 통하여 입증하였다. WSCC 9모선 계통과 IEEE 14모선 계통에 대하여 거래전략을 3가지로 구성하여 시뮬레이션 하였다. 계산 결과를 보면 WSCC 9모선이나 IEEE 14모선 계통에서 모두 거래전략에 따라 손실감도가 달라지며 또한 모선별 손실배분 역시 달라지지만 모선별 손실배분의 합은 일정함을 보여 주고 있다. 여기서 모선별 손실배분이 거래전략에 따라 크게 다르게 된 것은 주목할 만한 결과로서 가상적 거래전략을 도입하는 배경이 된다.

한편 모선별 손실배분의 총합은 전계통 손실과 같아짐을 보일 수 있어야 하는데 이를 위해서는 무부하 손실($\lambda = 0$ 경우의 손실)을 반드시 고려해야 하며 무부하 손실보정을 거치면 총 손실과 거의 비슷한 값을 가지게 된다. 여기서 약간의 오차를 가지게 되는 이유는 계통의 비선형성에 기인하는 것으로 생각된다. 이것은 일반적으로 인지되어 온 계통손실의 경로독립성을 잘 입증해 주고 있다고 할 수 있다.

그림 2에 보인 바 있는 WSCC 9모선 계통에 대한 수치검정에는 3가지 경우의 가상거래전략을 임의로 구성하여 사용하였으며 Case 1에 대한 데이터는 이미 표 2에 주어진 바 있고, 나머지 두 가지 경우에 대한 데이터는 다음 표에 주어 져 있다.

표 4 WSCC 9모선 계통에서의 가상거래전략명세 (Case 2)

Table 4 Virtual transaction strategy for WSCC 9-Bus system (Case 2)

발전모선 부하모선	1	2	3
4	0	0	0
5	92.5	38.7	0
6	7.5	0	100
7	0	0	0
8	0	61.3	0
9	0	0	0

표 6의 WSCC 9모선 계통의 경우를 보면 표 2, 표 4, 표 5에서의 거래전략을 각각 다르게 잡으면 발전모선에서의 손실감도계수가 달라지게 된다. 이는 각각의 발전모선에서 부담하는 손실이 달라짐을 의미하며, 거래전략에 따른 경로의 의존성을 보이는 결과라 할 수 있겠다.

표 5 WSCC 9모선 계통에서의 가상거래전략명세 (Case 3)
Table 5 Virtual transaction strategy for WSCC 9-Bus system (Case 3)

발전모선 부하모선	1	2	3
4	0	0	0
5	0	76.7	0
6	100	0	27.0
7	0	0	0
8	0	23.3	73.0
9	0	0	0

표 6 손실감도 계수 계산결과 (WSCC 9모선 계통)
Table 6 Loss sensitivity factor of WSCC 9-Bus system

방법 모선	평균 손실 계수에 의한 배분			한계 손실 계수에 의한 배분		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
G1	0.2934 (0.2514)	0.3074 (0.2653)	0.2725 (0.2304)	0.7736	0.8061	0.7240
G2	2.8697 (2.7674)	2.4332 (2.3308)	3.6354 (3.5331)	6.0988	5.1378	7.7846
G3	1.4378 (1.3844)	1.9024 (1.8490)	0.7329 (0.6795)	3.0645	4.0848	1.5156
Total	4.6010 (4.4032)	4.6429 (4.4451)	4.6408 (4.4430)	9.9369	10.0287	10.0241
조류 계산에 의한 계통 총 손실 : 4.6410 (무부하 손실 : 0.1978)						

(괄호속의 수치는 보정되기 전의 값임)

그리고 각각의 거래전략에서의 전 계통 손실은 거의 비슷한 값을 가지게 됨을 확인할 수 있으며, 무부하 손실 고려 시 조류 계산에 의한 계통 손실과 거의 같은 값을 가지게 된다.

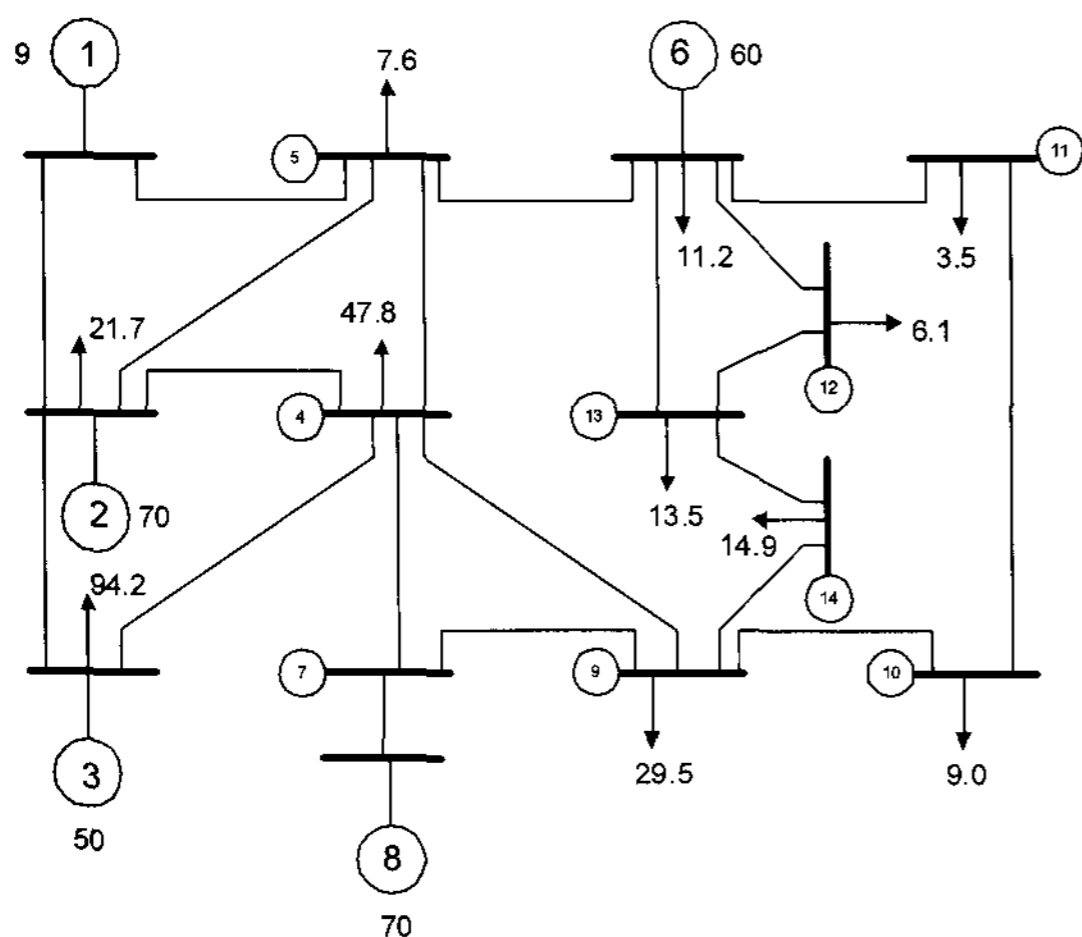


그림 3 IEEE 14모선의 계통도
Fig. 3 Single diagram of IEEE 14-Bus system

표 7 IEEE 14모선 계통에서의 가상거래전략명세 (Case 1)
Table 7 Virtual transaction strategy for IEEE 14-Bus system (Case 1)

발전 부하	1	2	3	6	8
2	42.5	32.0	0	0	0
3	0	39.0	100.0	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 8 IEEE 14모선 계통에서의 가상거래전략명세 (Case 1)
Table 8 Virtual transaction strategy for IEEE 14-Bus system (Case 2)

발전 부하	1	2	3	6	8
2	100.0	18.1	0	0	0
3	0	39.0	0	0	24.1
4	0	42.9	100.0	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 9 IEEE 14모선 계통에서의 가상거래전략명세 (Case 1)
Table 9 Virtual transaction strategy for IEEE 14-Bus system (Case 3)

발전 부하	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	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 10 손실감도 계수 계산결과 (IEEE 14 모선 계통)
Table 10 Loss sensitivity factor of IEEE 14-Bus system

방법 모선	평균 손실 계수에 의한 배분			한계 손실 계수에 의한 배분		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
G1	0.01749 (-0.0004)	-0.0033 (-0.0213)	0.0168 (-0.0011)	0.0260	-0.0166	0.0246
G2	0.5338 (0.3946)	0.6061 (0.4669)	0.4701 (0.3309)	0.9640	1.1185	0.7182
G3	0.0994 (0.0000)	0.0994 (0.0000)	0.09944 (0.0000)	0.0000	0.0000	0.0000
G6	0.6550 (0.5357)	0.6764 (0.5571)	0.7820 (0.6627)	1.1165	1.1596	1.3858
G8	0.3810 (0.2417)	0.3345 (0.1952)	0.3446 (0.2053)	0.6743	0.5689	0.7018
Total	1.6867 (1.1716)	1.7131 (1.1980)	1.7130 (1.1979)	2.7808	2.8304	2.8304
조류 계산에 의한 계통 총 손실 : 1.7335 (무부하 손실: 0.5151)						

(괄호속의 수치는 보정되기 전의 값임)

위의 IEEE 14 모선도 표 7~9에서의 거래전략을 이용하여 손실감도 계수를 계산한 결과 표 10을 얻을 수 있었다. 이 결과를 보면 거래전략에 따라 발전기모선에서의 한계/평균 손실계수가 달라짐을 알 수 있다. 거래전략이 적분경로를 결정하기 때문에 여기서도 손실배분의 경로의존성을 확인할 수 있으며, 또한 발전기모선에 대한 손실배분의 총합이 조류계산에 의한 계통 총 손실의 값과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는 본 논문에서 증명하고자 한 바의 손실배분은 경로의존성을 갖지만 반면에 전 계통손실은 경로에 독립적임을 잘 입증하고 있다.

여기서 특기할 것은 제안된 방법에 의한 손실배분 결과는 이론적 배분의 총합이 실제 계통손실과 일치한다는 것이다. 이러한 결과는 기존의 어떠한 방법에서도 불가능하였고 한계손실계수를 사용하는 방법에서는 통상 배분손실의 총합이 실제 총 손실의 2배 가까운 값을 가지게 되어 여러 가지 보정계수를 사용하여 배분량을 감소시켜야 하는 불합리점이 있었다. 그러나 제시된 방법에서 이론적 계산치가 총 손실과 일치됨을 보임으로써 손실배분의 신뢰성을 크게 향상 시켰다.

4. 결 론

본 논문에서의 시뮬레이션 결과는 거래전략과 송전손실배분과의 관계를 재해석 하도록 해주었으며 거래전략은 모선별 손실계산에서 적분경로를 나타낸다는 것을 입증하였다. 즉, 거래전략이 바뀌면 손실배분계산에서 적분경로 c가 바뀌게 된다는 것이다. 이는 본 논문에서 주장하는 거래전략에 따른 손실배분이 경로의존적(Path-dependent)이라는 것을 입증한다. 또한 시뮬레이션 결과를 보면 거래전략변화는 모선별 손실배분에는 영향을 미치지만 손실배분의 총합, 즉 전체 계통손실은 불변이 되는 것을 확인할 수 있다.

이것은 앞서서도 언급한 바 전계통 손실이 경로독립(Path-independent)이라는 사실을 실제로 입증한 것으로 본 논문에서 채용한 모선별 손실배분 분석법이 매우 정확하다는 반증이 된다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] R. Nadira et al., "Bulk Transmission System Loss Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 405-417, May 1993.
- [4] Q. Ding and A. Abur, "Transmission loss Allocation in a Multiple-Transaction Framework", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, February 2004.
- [5] A. J. Conejo, F. D. Galiana, and I. Kockar, "Z-bus Loss Allocation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 1, February 2001
- [6] J. J. Grainger and W.D. Stevenson, Jr. "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc. pp. 329-356 1994.
- [7] A. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A. L. Guijarro, "Transmission Loss Allocation: A Comparison of Different Practical Algorithms", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, August 2002.
- [8] A. G. Exposito, J. M. R. Santos, T. G. Garcia, and E.A. R. Velasco, "Fair Allocation of Transmission Power Losses", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 1, February 2000 .
- [9] F. D. Galiana and M. Phelan, "Allocation of transmission losses to bilateral contracts in a competitive environment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 143-150, February 2000.
- [10] F. D. Galiana, A. J. Conejo, I. Kockar, "Incremental transmission loss allocation under pool dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 26-33, 2002
- [11] A. Fradi, S. Brignone and B. F. Wollenberg, "Calculation of Energy Transaction Allocation Factors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 2, pp. 266-272, May 2001.
- [12] F. D. Galiana, A. J. Conejo, and I. Kockar, "Incremental Transmission Loss Allocation Under Pool Dispatch", IEEE Transactions on Power

- Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 26-33, February 2002.
- [13] F. Gubina, D. Grgic, and I. Banic, "A Method for Determining the Generators' Share in a Consumer Load", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000.
- [14] D. Kirschen, R. Allan, and G. Strbac, "Contributions of Individual Generators to Loads and Flows", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997.
- [15] 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.
- [16] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control", Wiley, pp. 122-123.
- [17] 기초전력연구보고서 [과제번호: R-2005-B-118], "지역별 현가산정(spot pricing)을 위한 모선별 계통 손실배분"



문영현 (文永鉉)

1952년 3월 11일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 Oregon State Univ. 대학원 졸업(공박). 현재 연세대 공대 전기전자공학과 교수.
Tel : 02-2123-2771
E-mail : moon@yonsei.ac.kr

저 자 소 개



민경일 (閔庚一)

1978년 5월 9일생. 2001년 홍익대 공대 전자전기공학과 졸업. 2003년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.
Tel : 02-2123-2771
E-mail : kimin@yonsei.ac.kr



하상현 (河尙賢)

1981년 4월 25일생. 2006년 연세대 전기전자공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 국방과학연구소 근무.
Tel : 042-821-3688
E-mail : shha@add.re.kr



이수원 (李洙原)

1968년 5월 4일생. 1991년 전북대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 연세대학교 BK21 TMS정보기술사업단 연구교수.
Tel : 02-2123-2771
E-mail : swon@yonsei.ac.kr