

거래전략 및 Quadratic 혼잡비용을 고려한 LMP산정에 대한 연구

논 문
60-2-5

LMP Calculation with Consideration of Transaction Strategy and Quadratic Congestion Cost Function

김 재 옥* · 정 성 훈* · 민 경 일** · 문 영 현†
(Jae-Wook Kim · Sung-Hun Jung · Kyung-Il Min · Young-Hyun Moon)

Abstract - As the competitive market system has been introduced to the electrical power trade, the priority concern would be that the price of electrical power should be reasonable. It is because, when this rule is solid, we can avoid the distortion of competition and assure the greater efficiency in management. LMP(Locational Marginal Price) means marginal price at each bus. This components consist of energy, loss and congestion cost. At this point, the LMP result that is calculated by traditional model is changeable by the location of the slack and can not be used in bilateral Transaction.

This paper proposed algorithm is proved its rationality and credibility by comparing the result of the simulation of virtual 6 bus system that is calculated by traditional method, and showed that the LMP components are changed according to the Transaction Strategy. Furthermore, It shows the effect of additional congestion cost on the transmission line that has bottle neck frequently by simulation.

Key Words : Competition market system, LMP, Transaction strategy, Quadratic congestion cost

1. 서 론

전력거래에서 시장시스템이 도입되면서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 전력의 가격이 합리적으로 책정되어야 한다는 것이다. 이 사항이 지켜질 때 자유경쟁이 왜곡되지 않고 경영효율을 극대화시킬 수 있기 때문이다.

LMP(Locational Marginal Price)는 모선 별 한계가격을 나타내며 가격의 구성은 에너지비용뿐만 아니라 손실 및 혼잡현상 비용도 포함하여 구성된다[1]. 이런 가격정보는 시장 참여자들에게 장·단기적인 경제신호를 보여준다. 단기적인 정보는 경제급전과 전력거래에 사용되며 장기적인 정보는 장기수급계획과 시장정책결정에 효과적으로 사용된다[3]. 그러나 기존방법으로 계산된 LMP결과는 여러 가지의 한계점을 가지고 있다. 먼저 슬랙선택에 대하여 독립적이지 못하였다. 슬랙이 변경될 때마다 계수들이 변경되었기 때문에 슬랙선택에 따라 그 결과값이 변경되었기 때문이다[1]-[3].

두 번째로 공급자와 수요자의 쌍방거래시 거래로 인한 영향을 고려할 수 없었다. 이로 인하여 LMP값은 거래전략과 별개로 산정되어 가격에 의한 합리적 시장 정책 수립이 어려웠다. 따라서 본 논문에서는 LMP산정에 사용되는 계수를 슬랙에 독립적인 방법을 사용하여 슬랙선택의 영향을 최소화 하였으며, 미소증분값을 사용하여 쌍방거래 시 거래전략

이 적용가능한 동시에 계약량과 사용량의 차이 발생시 기존 LMP결과식에 증분량을 반영하여 증분된 LMP값을 계산하는 알고리즘을 제시하였다. 나아가 상시적으로 선로혼잡현상이 생기는 선로에 대하여 추가적인 비용을 부가함으로써 선로사용을 억제하는 효과가 나타나도록 하였다. 이 알고리즘은 가상 6모선에 대해서 시뮬레이션하여 기존방식으로 계산된 결과와 비교함으로써 본 논문에서 제시한 알고리즘이 슬랙선택에 대한 독립성을 보였다. 또한 거래전략이 변경될 때 마다 LMP구성값들이 그에 따라 변경됨을 보였으며 계통이 크게 흔들리지 않는 범위에서 전력 사용량의 증분 발생시 추가혼잡비용 및 LMP결과식에 의하여 증분된 LMP값이 계산됨을 보였다.

2. 본 론

2.1 송전손실계수 및 GSF(Generation Shift Factor)의 계산

슬랙에 독립적인 송전손실계수의 계산은 참고문헌[4],[5]에서 찾아볼 수 있다. 여기서는 간단히 결과식들만 언급한다. 발전과 부하측면에서의 송전손실계수는 각각 다음 식으로 구할 수 있다.

- 발전단 측면

$$LF_{G_i}(P) = \left[\left(\frac{\partial P_{slack}(\theta, \mathbf{V})}{\partial \theta} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{slack}(\theta, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathbf{J}^{-1}(\theta, \mathbf{V}) \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i - \alpha_L^{(i)} \\ -\beta_L^{(i)} \end{bmatrix}$$

$$(\alpha = [\alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_M]^T \text{ with } \alpha_i = P_{G_i} / \sum_{i=1}^M P_{G_i}, \mathbf{u}_k = [0 \cdots 1 \cdots 0]^T,$$

$$\beta_i = \alpha_i \tan \theta_{Li}) \quad (1)$$

* 준 회원 : 연세대 공대 전기전자공학과 석사과정

** 정 회원 : 연세대 공대 전기전자공학과 박사과정

† 교신저자, 펠로우회원 : 연세대 공대 전기전자공학과 교수

E-mail : moon@yonsei.ac.kr

접수일자 : 2010년 8월 19일

최종완료 : 2010년 1월 4일

- 부하단 측면

$$LF_{L_i}(P) = \left[\left(\frac{\partial P_{slack}}{\partial \theta} \right)^T, \left(\frac{\partial P_{slack}}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathbf{J}^{-1}(\theta, \mathbf{V}) \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_i + \boldsymbol{\alpha}_G^{(i)} \\ -\tan\theta_{L_i} \cdot \mathbf{u}_L^{(i)} \end{bmatrix} - \frac{P_{G_i}}{P_{GT}}$$

$$(\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_N]^T \text{ with } \alpha_i = P_{G_i} / \sum_{i=1}^N P_{G_i}, \mathbf{u}_k = [0 \cdots 1 \cdots 0]^T) \quad (2)$$

GSF는 전력변화에 따른 조류의 민감도를 나타내는 계수이다. 이 계산은 Appendix에서 증명하였다. 여기서는 간단히 결과식들만 언급하였다. 발전과 부하측면에서의 GSF는 각각 다음 식으로 구할 수 있다.

- 발전단 측면

$$GSF_{L_i}^{G_i} = \frac{\partial F_{L_i,m}}{\partial P_{G_i}} = \left[\left(\frac{\partial F_{L_i,m}}{\partial \theta} \right)^T, \left(\frac{\partial F_{L_i,m}}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_i - \boldsymbol{\alpha}_G \\ -\boldsymbol{\beta}_G \end{bmatrix}$$

$$(\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_M]^T \text{ with } \alpha_i = P_{G_i} / \sum_{i=1}^M P_{G_i}, \mathbf{u}_k = [0 \cdots 1 \cdots 0]^T,$$

$$\boldsymbol{\beta}_i = \alpha_i \tan\theta_{L_i}) \quad (3)$$

- 부하단 측면

$$GSF_{L_i}^{L_i} = \frac{\partial F_{L_i,m}}{\partial P_{L_i}} = \left[\left(\frac{\partial F_{L_i,m}}{\partial \theta} \right)^T, \left(\frac{\partial F_{L_i,m}}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_i - \boldsymbol{\alpha}_L \\ -\tan\theta_{L_i} \cdot \mathbf{u}_i \end{bmatrix}$$

$$(\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_M]^T \text{ with } \alpha_i = P_{G_i} / \sum_{i=1}^M P_{G_i}, \mathbf{u}_k = [0 \cdots 1 \cdots 0]^T) \quad (4)$$

위 식(1)-(4)를 이용하여 계수들을 슬랙에 독립적으로 계산하여 LMP에 적용함으로써 슬랙변경에 대한 영향을 최소화 할 수 있다.

2.2 기존의 LMP계산 방식

기존 LMP를 계산하는 방식은 다음과 같다[1]-[2].

$$\text{Min } \sum c_i(P_{G_i}) \quad (5.1)$$

$$\text{s.t } \mathbf{1}^T(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_L) = \text{Loss} \quad (5.2)$$

$$\text{Loss} = \mathbf{LF}^T(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_L) - \text{offset} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{GSF}^T(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_L) \leq \mathbf{F}_{\max} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{P}_G^{\min} \leq \mathbf{P}_G \leq \mathbf{P}_G^{\max} \quad (5.5)$$

위 식으로 Lagrangian방정식을 세우면 다음과 같다.

$$L = \sum c_i(P_{G_i}) - \lambda \{ \mathbf{1}^T(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_L) - \mathbf{LF}^T(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_L) + \text{offset} \}$$

$$- \mu \{ \mathbf{GSF}^T(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_L) - \mathbf{F}_{\max} \}$$

$$- \gamma_{\max}^T(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_G^{\max}) - \gamma_{\min}^T(-\mathbf{P}_G + \mathbf{P}_G^{\min}) \quad (6)$$

식(6)으로 LMP를 계산하면 다음과 같다.

$$LMP = \frac{\partial L}{\partial P_L} = \lambda \mathbf{1} - \mathbf{LF}\lambda + \mathbf{GSF}\mu \quad (7)$$

이 결과에 따라 LMP는 아래와 같이 구분되어 정의된다.

$$LMP^{Energy} = \lambda \mathbf{1} \quad (8.1)$$

$$LMP^{Loss} = -\mathbf{LF}\lambda \quad (8.2)$$

$$LMP^{Congestion} = \mathbf{GSF}\mu \quad (8.3)$$

기존방식의 LMP식(5)을 고찰해보면 손실계수 및 GSF를 이용하여 계산한 손실 및 조류는 실손실 및 실조류보다 크게 계산된다. 따라서 손실부분은 부수적인 off-set이라는 상수항을 추가하여 손실에 의한 차이를 보정하였다. 그러나 조류에 대한 차이를 보정하지 못함에 따라 계산된 LMP값은 부정확하게 된다. 따라서 이런 계수에 따른 오차를 최소화하기 위해서는 LMP식을 미소증분에 대하여 재정리하여야

한다.

식(7), (8)을 살펴보면 기존방식은 거래전략을 고려할 수 없음을 알 수 있다. 즉 공급자, 수요자의 쌍방거래를 체결하여 비용 상 이득을 얻으려고 하여도 LMP계산 자체가 쌍방거래를 고려하지 못하고 산정되기 때문에 쌍방거래 자체가 의미를 상실하게 된다. 이로 인하여 공급자, 수요자 모두 전력시장 참여에 대하여 관심을 잃게 되며 시장시스템의 둔화로 이어질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 계수에 의한 오차를 최소화하고 동시에 쌍방거래전략을 고려할 수 있는 LMP계산 알고리즘을 제시하였다.

2.3 제안된 LMP계산 방식(1)

앞 절에서 언급했듯이 계수들에 의한 오차 및 쌍방거래전략을 고려하기 위해서는 미소증분에 대하여 식을 정리하여야 한다. 먼저 발전량이 ΔP_{G_i} 만큼 증가하였다고 하면 목적함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Min } \sum c_i(P_{G_i} + \Delta P_{G_i}) \quad (9)$$

ΔP_{G_i} 만큼 증가에 따른 손실에 대한 제약조건식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{1}^T(\mathbf{P}_G + \Delta \mathbf{P}_G - \mathbf{P}_L - \Delta \mathbf{P}_L) = \text{Loss} + \Delta \text{Loss}$$

$$\mathbf{1}^T(\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L) = \Delta \text{Loss} \quad (10)$$

손실계수에 의한 손실제약식은 다음과 같다.

$$\Delta \text{Loss} = \text{Loss}(\mathbf{P}_G + \Delta \mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L + \Delta \mathbf{P}_L) - \text{Loss}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L) \quad (11.1)$$

$$= \mathbf{LF}^T(\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L) - \Delta \text{offset_Loss} \quad (11.2)$$

식(11.1)을 Taylor급수로 전개하면 다음과 같다.

$$\text{Loss}(\mathbf{P}_G + \Delta \mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L + \Delta \mathbf{P}_L) = \text{Loss}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L) + \Delta \text{Loss}$$

$$= \text{Loss}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L) + \frac{1}{1!} \frac{\partial \text{Loss}}{\partial \mathbf{P}_{Bus\,ij}} (\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L)$$

$$+ \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \text{Loss}}{\partial \mathbf{P}_{Bus\,ij}^2} (\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L)^2 \cdots$$

$$= \text{Loss}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L) + \mathbf{LF}^T(\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L)$$

$$+ \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \text{Loss}}{\partial \mathbf{P}_{Bus\,ij}^2} (\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L)^2 \cdots \quad (12)$$

식(12)를 식(11.1)에 대입하여 나온 결과를 식(11.2)와 비교하면 $\Delta \text{offset_Loss}$ 는 $+\frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \text{Loss}}{\partial \mathbf{P}_{Bus\,ij}^2} (\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L)^2$ 식 이상의 고차항으로 표현되며 따라서 $\Delta \mathbf{P}_G, \Delta \mathbf{P}_L$ 이 한없이 0으로 간다면 1차 근사식에서는 무시될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 식(11.2)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \text{Loss} = \mathbf{LF}^T(\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L) \quad (13)$$

선로제약 조건식에 대해서도 유사한 방법으로 1차 근사식을 얻을 수 있다.

$$\Delta \text{Flow} = \text{Flow}(\mathbf{P}_G + \Delta \mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L + \Delta \mathbf{P}_L) - \text{Flow}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L) \quad (14.1)$$

$$= \mathbf{GSF}^T(\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L) - \Delta \text{offset_Flow} \quad (14.2)$$

식(14.1)을 Taylor급수로 전개하면 다음과 같다.

$$\text{Flow}(\mathbf{P}_G + \Delta \mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L + \Delta \mathbf{P}_L) = \text{Flow}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L) + \Delta \text{Flow}$$

$$= \text{Flow}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_L) + \frac{1}{1!} \frac{\partial \text{Flow}}{\partial \mathbf{P}_{Bus\,ij}} (\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 Flow}{\partial P_{BusInj}^2} (\Delta P_G - \Delta P_L)^2 \dots \\
= & Flow(P_G, P_L) + GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \\
& + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 Flow}{\partial P_{BusInj}^2} (\Delta P_G - \Delta P_L)^2 \dots \quad (15)
\end{aligned}$$

손실부분 계산과 같은 방식으로 식(15)를 식(14.1)에 대입하여 나온 결과를 식(14.2)와 비교하면 $\Delta offset_Flow$ 는 $+\frac{1}{2!} \frac{\partial^2 Flow}{\partial P_{BusInj}^2} (\Delta P_G - \Delta P_L)^2$ 식 이상의 고차항으로 표현되며 따라서, ΔP_G , ΔP_L 이 한없이 0으로 간다면 1차 근사식에서는 무시될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 식(14.2)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta Flow = GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \quad (16)$$

따라서 선로제약 조건식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \leq F_{max} - F^0 \quad (17)$$

발전제약 조건식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
P_G^{\min} & \leq P_G^0 + \Delta P_G \leq P_G^{\max} \\
P_G^{\min} - P_G^0 & \leq \Delta P_G \leq P_G^{\max} - P_G^0 \quad (18)
\end{aligned}$$

위 식들을 정리하여 LMP식을 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Min} \sum c_i (P_{G_i} + \Delta P_{G_i}) \quad (19.1)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{1}^T (\Delta P_G - \Delta P_L) = \Delta Loss \quad (19.2)$$

$$\Delta Loss = LF^T (\Delta P_G - \Delta P_L) \quad (19.3)$$

$$GSF^T (\Delta P_G - \Delta P_L) \leq F_{max} - F^0 \quad (19.4)$$

$$P_G^{\min} - P_G^0 \leq \Delta P_G \leq P_G^{\max} - P_G^0 \quad (19.5)$$

따라서 Lagrangian함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
L = & \sum c_i (P_{G_i} + \Delta P_{G_i}) - \lambda \{ \mathbf{1}^T (\Delta P_G - \Delta P_L) - LF^T (\Delta P_G - \Delta P_L) \} \\
& - \mu \{ GSF^T (\Delta P_G - \Delta P_L) - F_{max} + F^0 \} \\
& - \gamma_{max}^T (\Delta P_G - P_G^{\max} + P_G^0) - \gamma_{min}^T (-\Delta P_G + P_G^{\max} - P_G^0) \quad (20)
\end{aligned}$$

식(20)에 거래전략을 고려하기 위해서 미소부하증가에 대응하는 비소발전증가가 기존발전량에 비례하여 배분되었다고 가정한다[4]. 즉

$$\Delta P_{G_i} = \frac{P_{G_i}}{P_{GT}} \Delta P_{LK} \quad (\text{여기서 } \Delta P_{GT} = \sum_{i=1}^N P_{G_i}) \quad (21)$$

$\Delta P_G - \Delta P_L$ 를 ΔP_{Lk} 로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta P_G - \Delta P_L = \alpha \Delta P_{LK} - \mathbf{u}_k \Delta P_{LK} \quad (22)$$

(여기서 $\alpha = [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_i \dots \alpha_M]^T$ with $\alpha_i = P_{G_i} / \sum_{i=1}^N P_{G_i}$, $\mathbf{u}_k = [00 \dots 1 \dots 0]^T$)

이 때 식(19.2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
\mathbf{1}^T (\Delta P_G - \Delta P_L) & = \sum_{i=1}^N \frac{P_{G_i}}{P_{GT}} \Delta P_{LK} + \sum_{i=1}^N \frac{P_{G_i}}{P_{GT}} \Delta P_{LK} \cdot LF_{G_i} \\
& \quad - \Delta P_{Lk} - \Delta P_{Lk} \cdot LF_{Lk} \\
& = \sum_{i=1}^N \frac{P_{G_i}}{P_{GT}} \Delta P_{LK} \cdot LF_{G_i} - \Delta P_{Lk} \cdot LF_{Lk} \\
& = LF^T (\alpha - \mathbf{u}_k) \Delta P_{Lk} \quad (23)
\end{aligned}$$

위 식들을 이용하여 식(20)을 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$L = \sum c_i (P_{G_i} + \Delta P_{G_i}) - \lambda \{ \mathbf{1}^T (\Delta P_G - \Delta P_L) - LF^T (\Delta P_G - \Delta P_L) \}$$

$$\begin{aligned}
& - \mu \{ GSF^T (\Delta P_G - \Delta P_L) - F_{max} + F^0 \} \\
& - \gamma_{max}^T (\Delta P_G - P_G^{\max} + P_G^0) - \gamma_{min}^T (-\Delta P_G + P_G^{\max} - P_G^0) \\
= & \sum c_i (P_{G_i} + \frac{P_{G_i}}{P_{GT}} \Delta P_{LK}) \\
& - \lambda \{ LF^T (\alpha - \mathbf{u}_k) \Delta P_{Lk} \} + \lambda \{ LF^T (\alpha \Delta P_{Lk} - \mathbf{u}_k \Delta P_{Lk}) \} \\
& - \mu \{ GSF^T (\alpha \Delta P_{Lk} - \mathbf{u}_k \Delta P_{Lk}) - F_{max} + F^0 \} \\
& - \gamma_{max}^T (\alpha \Delta P_{Lk} - P_G^{\max} + P_G^0) \\
& + \gamma_{min}^T (\alpha \Delta P_{Lk} - P_G^{\max} + P_G^0) \quad (24)
\end{aligned}$$

이 Lagrangian함수를 ΔP_{Lk} 로 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
LMP = & \frac{\partial L}{\partial \Delta P_{Lk}} = \sum \frac{\partial c_i}{\partial \Delta P_{G_i}} \frac{\partial \Delta P_{G_i}}{\partial \Delta P_{Lk}} \\
& - \lambda \{ LF^T (\alpha - \mathbf{u}_k) \} + \lambda \{ LF^T (\alpha - \mathbf{u}_k) \} \\
& - \mu \{ GSF^T (\alpha - \mathbf{u}_k) \} - \gamma_{max}^T \alpha + \gamma_{min}^T \alpha \quad (25)
\end{aligned}$$

식(25)을 정리하면 LMP는 다음과 같이 구분되어 정리할 수 있다.

$$LMP^{Energy} = \sum \frac{\partial c_i}{\partial \Delta P_{G_i}} \frac{\partial \Delta P_{G_i}}{\partial \Delta P_{Lk}} - \lambda \{ LF^T (\alpha - \mathbf{u}_k) \} - \gamma_{max}^T \alpha + \gamma_{min}^T \alpha \quad (26.1)$$

$$LMP^{loss} = \lambda \{ LF^T (\alpha - \mathbf{u}_k) \} \quad (26.2)$$

$$LMP^{Congestion} = -\mu \{ GSF^T (\alpha - \mathbf{u}_k) \} \quad (26.3)$$

위 식을 보면 LMP^{Energy} 는 연료비용함수를 ΔP_{Lk} 로 미분한 결과에 손실에 의한 추가 발전분을 제외한 결과를 나타낸다. 즉 LMP^{Energy} 에 이미 손실에 따른 추가 발전비용이 포함되어 있으므로 LMP^{Loss} 를 따로 구분하기 위해서는 LMP^{Energy} 에 LMP^{Loss} 를 제거해 주어야 순수한 에너지 비용이 된다는 것이다. 이 결과는 기존방식의 LMP^{Energy} 와는 차이가 있으며, 기존방식에서 주장하는 LMP^{Energy} 와 비교했을 때 제안방식이 논리적으로 더 타당하다고 할 수 있다. 그리고 위 식에서 알 수 있듯이 LMP^{Loss} , $LMP^{Congestion}$ 값 역시 거래행렬을 포함하고 있으므로 거래전략을 고려되어 도출된 결과라고 할 수 있다.

2.4 제안된 LMP계산 방식(II)

계통 운전 시 특정선로는 상시적으로 혼잡현상이 일어나게 된다. 따라서 이 선로에는 부가적인 비용을 더 책정하여 이 선로의 사용을 억제해야 하겠다. 이 선로에 대하여 부가적인 비용을 산정하기 위해서는 다음과 같이 위의 LMP식의 목적함수에 혼잡비용을 추가하여야 한다.

기존 : 혼잡비용 미포함

$$\text{Min} \sum c_i (P_{G_i} + \Delta P_{G_i}) \quad (27)$$

변경 : 혼잡비용 포함

$$\begin{aligned}
\text{Min} \sum c_i (P_{G_i} + \Delta P_{G_i}) \\
+ b^T \{ GSF^T (\Delta P_G - \Delta P_L) \} \\
+ \{ (\Delta P_G - \Delta P_L)^T GSF \cdot B \cdot GSF^T (\Delta P_G - \Delta P_L) \} \quad (28)
\end{aligned}$$

이 목적함수에서 연료비용함수 이하의 식은 선로혼잡현상이 일어났을 때 작용한다. 즉 혼잡현상이 일어난 후 추가적인 부가가 발생하였을 때 이 선로의 예비율을 통하여 전력

을 공급받는다면 이 식이 작용하여 추가적인 비용이 더 부담되는 것이다. 이 식은 연료비용함수와 마찬가지로 2차함수로 표현되고 부하량이 증가할수록 그 역할이 증가하게 된다. 이 때 b, B계수는 경험적 혹은 정책적으로 결정할 수 있다. 본 논문에서는 b계수는 혼잡비용함수를 제거하고 계산된 LMP값 중 $-\mu$ 값을 사용하였으며 B계수는 b계수의 0.1 배로 하여 사용하였다.

이 혼잡비용을 추가한 목적함수로 LMP식을 정리하면 다음과 같다.

$$\text{Min } \sum c_i(P_{G_i} + \Delta P_{G_i}) + b^T \{ GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \} + \{ (\Delta P_G - \Delta P_L)^T GSF \cdot B \cdot GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \} \quad (29.1)$$

$$\text{s.t } \mathbf{1}^T(\Delta P_G - \Delta P_L) = \Delta Loss \quad (29.2)$$

$$\Delta Loss = \mathbf{L}F^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \quad (29.3)$$

$$GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \leq F_{\max} - F^0 \quad (29.4)$$

$$P_G^{\min} - P_G^0 \leq \Delta P_G \leq P_G^{\max} - P_G^0 \quad (29.5)$$

위 식으로 Lagrangian방정식을 세우면 다음과 같다.

$$L = \sum c_i(P_{G_i} + \Delta P_{G_i}) + b^T \{ GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \} + \{ (\Delta P_G - \Delta P_L)^T GSF \cdot B \cdot GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \} + \lambda \{ \mathbf{L}F^T(\Delta P_G - \Delta P_L) - \mathbf{L}F^T(\Delta P_G - \Delta P_L) \} - \mu \{ GSF^T(\Delta P_G - \Delta P_L) - F_{\max} + F^0 \} - \gamma_{\max}^T (\Delta P_G - \Delta P_G^{\max} + P_G^0) - \gamma_{\min}^T (\Delta P_G - \Delta P_G^{\min} - P_G^0) \quad (30)$$

Lagrangian방정식을 ΔP_{Lk} 로 미분하여 LMP값을 구하면 아래와 같이 표현된다.

$$LMP = \frac{\partial c_i}{\partial \Delta P_{Lk}} = \sum \frac{\partial c_i}{\partial \Delta P_{G_i}} \frac{\partial \Delta P_{G_i}}{\partial \Delta P_{Lk}} + b^T \{ GSF^T(\alpha - u_k) \} + 2 \{ (\alpha - u_k)^T GSF B GSF^T(\alpha - u_k) \Delta P_{Lk} \} - \lambda \{ \mathbf{L}F^T(\alpha - u_k) \} + \lambda \{ \mathbf{L}F^T(\alpha - u_k) \} - \mu \{ GSF^T(\alpha - u_k) \} - \gamma_{\max}^T \alpha + \gamma_{\min}^T \alpha \quad (31)$$

위식을 정리하면 LMP는 다음과 같이 구분되어 정리할 수 있다.

$$LMP^{Energy} = \sum \frac{\partial c_i}{\partial \Delta P_{G_i}} \frac{\partial \Delta P_{G_i}}{\partial \Delta P_{Lk}} - \lambda \{ \mathbf{L}F^T(\alpha - u_k) \} - \gamma_{\max}^T \alpha + \gamma_{\min}^T \alpha \quad (32.1)$$

$$LMP^{Loss} = \lambda \{ \mathbf{L}F^T(\alpha - u_k) \} \quad (32.2)$$

$$LMP^{Congestion} = b^T \{ GSF^T(\alpha - u_k) \} + 2 \{ (\alpha - u_k)^T GSF B GSF^T(\alpha - u_k) \Delta P_{Lk} \} - \mu \{ GSF^T(\alpha - u_k) \} \quad (32.3)$$

위식에서 보면 식(32.1), 식(32.3)은 ΔP_{Lk} 에 따라 변화됨을 알 수 있다. 즉 특정부하가 계약량보다 ΔP_{Lk} 만큼 변화하면 거래전략에 따라 추가 혼잡비용과 에너지비용이 부과된다는 것이다. 이 때 추가 혼잡비용은 해당선로를 많이 사용할수록 증가하며 에너지비용은 연료단가가 높을수록 증가하게 된다. 이런 방식으로 증분된 LMP값을 계산하는 이유는 ΔP_{Lk} 만큼 증분에 따라 증분된 LMP값을 사용하지 않고 기존 LMP값을 사용하여 요금을 정산하면 공급자나 수요자가 그 만큼의 부담을 감수해야 하기 때문이며, 또 다른 이유는 특정부하가 ΔP_{Lk} 만큼 변할 때 마다 OPF를 실행시키는 것

은 시간적으로 비효율적이기 때문이다.

2.5 사례연구 및 결과고찰

이 번절에서는 가상 6모선계통을 이용하여 기존 LMP 계산방식과 제안된 LMP계산방식으로 계산된 결과를 비교하였으며 거래전략 및 특정부하 증분에 따른 LMP결과를 시뮬레이션하였다. 그림 1은 가상6모선계통이며 연료비용함수 및 제약조건은 다음과 같다.

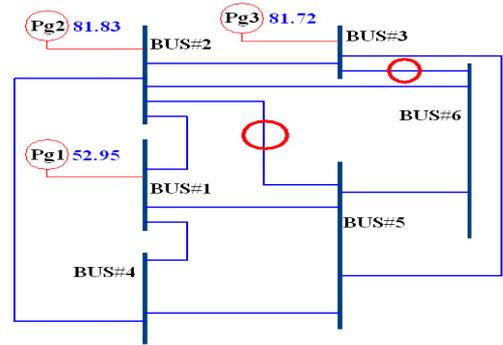


그림 1 가상6모선의 계통도
Fig. 1 6 BUS System Diagram

- 연료비용함수

$$F_1(P_1) = 231.1 + 11.669P_1 + 0.00533P_1^2 \quad (33.1)$$

$$F_2(P_2) = 200.1 + 10.333P_2 + 0.00889P_2^2 \quad (33.2)$$

$$F_3(P_3) = 240.0 + 10.833P_3 + 0.00741P_3^2 \quad (33.3)$$

- 발전제약

$$50.0MW \leq P_1 \leq 200MW \quad (33.4)$$

$$37.5MW \leq P_2 \leq 150MW \quad (33.5)$$

$$45.0MW \leq P_3 \leq 180MW \quad (33.6)$$

- 조류제약

$$P_{25} \leq 19MW \quad (33.7)$$

$$P_{36} \leq 55MW \quad (33.8)$$

제안된 방식의 거래전략은 다음과 같으며 case1은 혼잡 현상이 발생하는 선로에 연결된 모선간의 거래를 최대로 가정하고 작성한 거래전략이며 case3는 case1과 반대의 경우이다. 그리고 case2는 case1과 case3의 중간으로 부하비용에 따라 작성한 거래전략이다.

표 1 가상6모선 계통에서의 가상적 거래전략
Table 1 Arbitrary Transaction Strategy at 6 BUS System Case1

(거래전략 : 혼잡비용 발생 선로 연결 모선간 거래 최대)
(Transaction Strategy : Maximum Transaction at T/L imposed Congestion Cost)

부하	4	5	6
발전			
1	52.95650502	0	0
2	8.90386133	72.170427	0.7594743
3	0	0	81.721014

Case2(거래전략 : 부하비율)
(Transaction Strategy : Proportional to Load)

발전 \ 부하	4	5	6
1	15.13043	17.65217	20.17391
2	23.38108	27.27792	31.17477
3	23.34886	27.24034	31.13181

Case3
(거래전략 : 혼잡비용 발생 선로 연결 모션간 거래 최소)
(Transaction Strategy : Minimum Transaction at T/L imposed Congestion Cost)

발전 \ 부하	4	5	6
1	0	52.95651	0
2	0	0	81.83376
3	61.86037	19.21392	0.646725

2.5.1 사례연구 1

사례연구 1은 슬랙에 의존적인 계수들을 사용하여 기존 LMP계산방식으로 계산한 결과로써 슬랙변경에 따라 LMP 값이 변경됨을 나타낸 결과이다.

- 슬랙변경에 따른 기존 LMP계산결과

표 2 슬랙변경에 따른 LMP 결과(기존 LMP 계산방식)
Table 2 LMP Result at different Slack BUS(Existing Method)
 $\lambda : 12.4795, \mu_1 : -8.9652, \mu_2 : -2.2773$ slack모션: 1번모션

No	LMP	LMP Energy	LMP Lost	LMP Congestion
4	12.61947103	12.47953186	0.438889159	-0.2989499
5	14.83290209	12.47953186	0.595409936	1.757960295
6	13.9008124	12.47953186	0.430059738	0.991220802

$\lambda : 11.5796, \mu_1 : -8.5911, \mu_2 : -2.2187$ slack모션: 2번모션

No	LMP	LMP Energy	LMP Lost	LMP Congestion
4	12.59743	11.57957	0.39569	0.62944
5	14.69956	11.57957	0.54078	2.60935
6	14.66306	11.57957	0.38750	1.88373

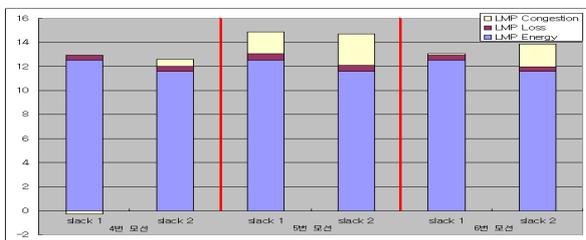


그림 2 슬랙변경에 따른 기존 LMP결과
Fig. 2 LMP Result at different Slack BUS(Existing Method)

2.5.2 사례연구 2

사례연구 2은 슬랙에 독립적인 계수들을 사용하여 제안된 LMP계산방식으로 계산한 결과이며 이 때 거래전략은

거래전략 및 Quadratic 혼잡비용을 고려한 LMP산정에 대한 연구

Case1을 이용하였다. 슬랙에 독립적인 계수를 사용함으로써 슬랙에 따라 LMP값이 변화지 않음을 나타낸 결과이다.

- 슬랙변경에 따른 제안된 LMP계산결과

표 3 슬랙변경에 따른 LMP 결과(제안된 LMP 계산방식)
Table 3 LMP Result at different Slack BUS(Proposed Method)
 $\lambda : 13.080, \mu_1 : -8.640, \mu_2 : -1.720$ slack모션: 1번모션

No	LMP	LMP Energy	LMP Lost	LMP Congestion
4	12.69644	11.24147	0.92792	0.52706
5	13.70717	10.72605	1.06196	1.91917
6	13.27869	11.18537	0.85638	1.23694

$\lambda : 13.080, \mu_1 : -8.640, \mu_2 : -1.720$ slack모션: 2번모션

No	LMP	LMP Energy	LMP Lost	LMP Congestion
4	12.69644	11.24147	0.92792	0.52706
5	13.70717	10.72605	1.06196	1.91917
6	13.27869	11.18537	0.85638	1.23694

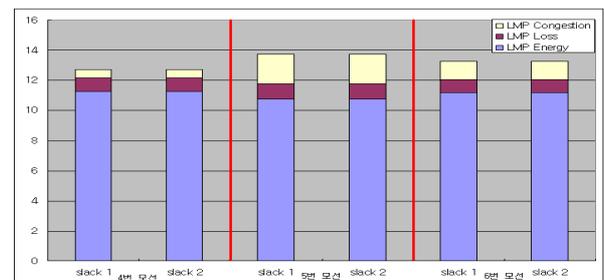


그림 3 슬랙변경에 따른 제안된 LMP결과
Fig. 3 LMP Result at different Slack BUS(Proposed Method)

2.5.3 사례연구 3

사례연구 3은 거래전략에 따라 전체 LMP값 및 LMP구성 성분들이 그에 따라 계산됨을 보였다. 특히 혼잡비용은 해당선로를 많이 이용할수록 그 비용이 증가함을 알 수 있다.

표 4 가상6모션계통에서 거래전략을 고려한 LMP결과
Table 4 LMP Result at 6 BUS System Considering Transaction Strategy

Case1) $\lambda : 13.080, \mu_1 : -8.640, \mu_2 : -1.720$

No	LMP	LMP Energy	LMP Lost	LMP Congestion	
				2-5	3-6
4	12.69644	11.24147	0.92792	0.30238	0.22468
5	13.70717	10.72605	1.06196	1.72019	0.19898
6	13.27869	11.18537	0.85638	0.39548	0.84146

Case2) $\lambda : 13.080, \mu_1 : -8.640, \mu_2 : -1.720$

No	LMP	LMP Energy	LMP Lost	LMP Congestion	
				2-5	3-6
4	12.71169	11.08097	0.91267	0.37616	0.34190
5	13.71703	10.94153	1.05211	1.40345	0.31994
6	13.25864	11.11720	0.87644	0.61730	0.64770

Case3) $\lambda : 13.080, \mu_1 : -8.640, \mu_2 : -1.720$

No	LMP	LMP Energy	LMP Lost	LMP Congestion	
				2-5	3-6
4	12.73203	11.15177	0.89233	0.14934	0.53859
5	13.71059	11.12454	1.05855	1.24074	0.28675
6	13.24902	10.90396	0.88605	0.92978	0.52923

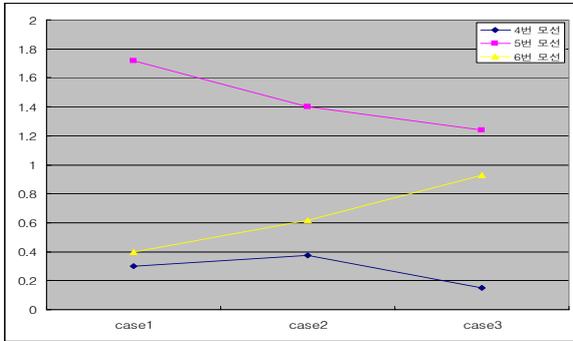


그림 4.1 거래전략 변경에 따른 $LMP^{Congestion}$ 값 변화 (2-5 선로)

Fig. 4.1 $LMP^{Congestion}$ Variation at different Transaction Strategy(2-5 T/L)

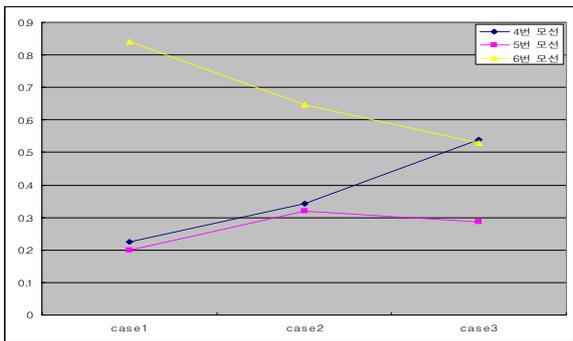


그림 4.2 거래전략 변경에 따른 $LMP^{Congestion}$ 값 변화 (3-6 선로)

Fig. 4.2 $LMP^{Congestion}$ Variation at different Transaction Strategy(3-6 T/L)

그림 4.1과 그림 4.2는 거래전략에 따른 혼잡비용의 성향을 나타낸 그래프이다. 여기서 (2-5선로)의 5번모선, (3-6)선로의 6번모선의 성향을 보면 혼잡현상이 발생하는 선로를 많이 이용하는 모선의 비용이 그렇지 않은 모선에 비해 비용이 크게 산정됨을 알 수 있다. 즉 case1(혼잡선로 최대이용)에서 case3(혼잡선로 최소이용)로 갈수록 그 비용이 적게 산정된다는 것이다.

2.5.4 사례연구 4

사례연구 4는 추가혼잡비용을 고려한 시뮬레이션 결과이다. 추가혼잡비용을 고려하기 위해서는 계약량과 사용량의 차이가 발생해야 하므로 각 부하모선에 3MW가 충분되었다고 가정하였다. 이번 시뮬레이션을 통하여 발전단가가 비교

적 타 발전단가에 비해 클수록, 혼잡현상이 발생하는 선로를 많이 사용할수록 증분되는 비용이 커짐을 알 수 있다.

표 5 가상6모선계통에서 혼잡비용 및 거래전략을 고려한 LMP결과

Table 5 LMP Result at 6 BUS System Considering Transaction Strategy and Quadratic Congestion Cost Function

Case1) $\lambda : 13.080, \mu_1 : 0, \mu_2 : 0$

No	LMP	LMP Energy		LMP Loss	LMP Congestion			
					2-5		3-6	
		기존	추가		기존	추가	기존	추가
4	12.95	11.08	0.0159	0.9127	0.376	0.0626	0.342	0.1562
5	14.11	10.94	0.0159	1.0521	1.403	0.2336	0.320	0.1462
6	13.67	11.12	0.0159	0.8764	0.617	0.1028	0.648	0.2960

Case2) $\lambda : 13.080, \mu_1 : 0, \mu_2 : 0$

No	LMP	LMP Energy		LMP Loss	LMP Congestion			
					2-5		3-6	
		기존	추가		기존	추가	기존	추가
4	12.95	11.08	0.0159	0.9127	0.376	0.0626	0.342	0.1562
5	14.11	10.94	0.0159	1.0521	1.403	0.2336	0.320	0.1462
6	13.67	11.12	0.0159	0.8764	0.617	0.1028	0.648	0.2960

Case3) $\lambda : 13.080, \mu_1 : 0, \mu_2 : 0$

No	LMP	LMP Energy		LMP Loss	LMP Congestion			
					2-5		3-6	
		기존	추가		기존	추가	기존	추가
4	13.06	11.15	0.0444	0.8923	0.149	0.0240	0.539	0.2546
5	14.07	11.12	0.0204	1.0586	1.240	0.1998	0.287	0.1356
6	13.70	10.90	0.0525	0.8861	0.929	0.1498	0.529	0.2502

위 결과를 살펴보면 위에서 언급했듯이 선로혼잡현상이 일어나는 선로를 통하여 전력을 많이 공급할수록 추가혼잡비용을 더 커짐을 알 수 있다. 이 관계를 그래프로 나타내면 아래와 같으며 그림 6의 5번 모선, 그림 7의 6번모선의 성향을 살펴보면 추가혼잡비용과 거래전략과의 관계를 확실히 알 수 있다.

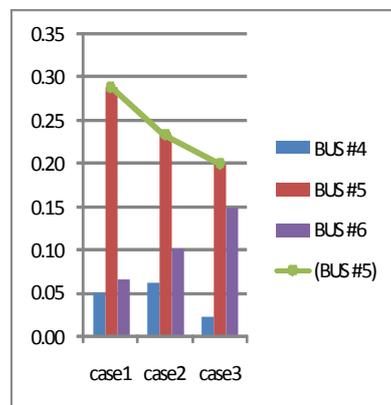


그림 5.1 거래전략 변경에 따른 추가혼잡비용 증분 변화 (2-5선로)

Fig. 5.1 Additional $LMP^{Congestion}$ Variation at different Transaction Strategy(2-5 T/L)

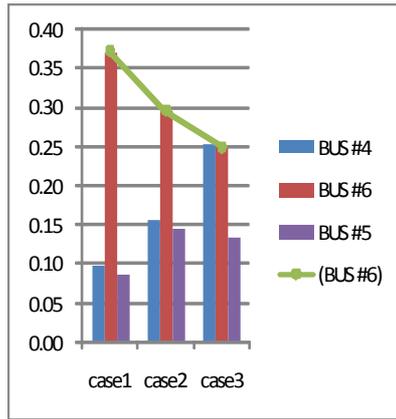


그림 5.2 거래전략 변경에 따른 추가혼잡비용 증분 변화 (3-6선로)

Fig. 5.2 Additional $LMP^{Congestion}$ Variation at different Transaction Strategy(3-6 T/L)

3. 결 론

본 논문은 전력시장에서의 LMP 산정 시 상호 거래전략을 고려하였으며, 선로혼잡현상이 자주 일어나는 선로에 대해서는 추가적인 비용을 부담하는 LMP 계산 알고리즘을 제시하였다. 기존방법에서는 손실계수 및 GSF가 부정확하여 그에 따른 오차가 발생하였으며 이를 보정하기 위해 보정상수나 변수를 사용하였다. 또한 슬랙이 변경될 때마다 계수들이 달라져 그에 따라 총 LMP값 및 구성성분의 값이 변경되었으며 거래전략에 관계없이 계산되었다.

위 사항들과 비교하여 본 연구에서 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 슬랙에 독립적인 계수를 계산함으로써 슬랙변동에 영향이 없는 LMP값을 계산하였다. 슬랙의 선정은 전력시장에서 중요 고려사항 중 하나이다. 슬랙의 선정에 따라 계수들이 달라지며 이로 인하여 슬랙모션은 물론이고 슬랙에 가까운 모선은 비용산정에 대해서 이득을 취하게 되며 이격 될수록 손해를 입게 되기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 슬랙의 영향을 최소화하기 위해 슬랙에 독립적인 계수를 사용하였으며 이로 인하여 슬랙의 영향을 최소화 하였다.

2) 미소증분값을 사용하여 보정상수를 생략하여 식을 간단하게 정리하였고, 미소증분값의 사용으로 연료비용을 P_G 성분에서 P_L 성분으로 변환해 미분함으로써 거래전략을 적용할 수 있게 하였다. 기존방식의 LMP계산은 거래전략과 관계없이 계산되었다. 즉 거래전략과 관계없이 OPF 실행 후 계산된 결과값을 가지고 비용을 산정함으로써 시장참여자들은 가격결정에 미치는 영향은 미비하였다는 것이다. 따라서 본 논문에서 제시한 방식으로 전력시장에 쌍방거래전략이 고려된 LMP를 계산하는 것은 시장참여자들에게 가격결정에 대한 영향을 증가시켜 줌으로써 시장에 좀 더 활발한 참여를 유도할 수 있게 된다는 것을 의미한다. 이로 인하여 전력시장에 활기를 넣어 줄 수 있으며, 효율 및 가격경쟁에서 뒤처진 발전회사의 자발적인 설비보수 및 개선을 유도할 수 있게 될 것이다.

3) 나아가 선로혼잡현상이 일어나는 선로에 대해서는 추

가적인 비용을 부담하도록 연료비용식에 추가 혼잡비용계산식을 추가하였다. 선로혼잡현상의 발생은 LMP값의 증가와 직접적으로 연관이 된다. 선로혼잡현상이 발생된 상황에서 자신의 이익을 위하여 해당선로의 예비력을 이용할 시에는 자신뿐만 아니라 다른 모선의 LMP값 증가에도 영향을 미치게 되기 때문이다. 따라서 이를 억제하기 위해서 추가적으로 해당선로에 대하여 추가비용을 부가하였으며 이 때 추가 혼잡비용을 부가하는 비율을 거래전략에 따라 부가하였다. 즉 해당선로를 사용하는 비율이 클수록 그에 대한 부담도 크게 함으로써 자발적인 선로사용 억제를 이끌어 내도록 하였다.

이상의 결과로 볼 때 이 알고리즘은 전력시장에 시장참여자들의 역할을 증가시켜줌으로써 전력시장의 활발한 참여를 유도할 수 있을 것이다. 이로 인하여 수요자들은 공급자들에게 끊임없이 설비보수 및 개선을 요구할 수 있을 것이며 공급자들은 시장에서 생존하기 위하여 수요자의 요구를 반영하고 경쟁사에 대하여 상대적 우위를 점하기 위하여 자발적인 노력을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0014817).

참 고 문 헌

- [1] E. Litvinov, T. Zheng, G. Rosenwald, and P. Shamollahi, "Marginal Loss Modeling in LMP Calculation," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp, 880-888, May 2004.
- [2] Fangxing Li, Jiuping Pan and Henry Chao, "Marginal Loss Calculation in Competitive Spot Market," Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Deregulation, Restructuring and Power Technologies(DRPT), vol. 1, pp205-209
- [3] Cardell, J.B., " Marginal Loss Pricing for Hours With Transmission Congestion", IEEETransactionsonPower Systems, Vol. 22, No. 4, pp. 1466-1474, Nov 2007.
- [4] 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. IEEEPESSummerMeeting, vol.4, pp.1017-1021, 2000
- [5] Kyung-il Min, Sang-Hyeon Ha, Su-Won Lee, Young-Hyun Moon, "Transmission Loss Allocation Algorithm using Path-Integral based on Transaction Strategy" IEEE Transactions on Power Systems, to be published
- [6] Allen J.Wood. Bruce F.Wollenberg. "Power generation Operation and Control", John Wiley & Sons, 1996.

APPENDIX

A. 발전단측에서의 GSF

조류의 변화량은 각 모선의 전압크기와 위상각의 함수로 나타낼 수 있으므로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta F_{l,m} &= \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq slack}}^n \left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial F_{l,m}}{\partial V_i} \Delta V_i \right) \\ &= \left[\left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (A.1)$$

위식의 우변에서 전압 및 위상각의 변화벡터는 조류계산의 자코비안 및 i번째 발전모선의 변화량으로 표시될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

i번째 발전모선의 미소변화에 대한 특정선로의 조류변화량을 구하는 것이 목적이므로 좌변의 $\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L$ 를 i번째 발전기의 발전량 P_{G_i} 로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L &= \mathbf{u}_i \Delta P_{G_i} - \boldsymbol{\alpha}_L^{(i)} \Delta P_{G_i} \\ &= (\mathbf{u}_i - \boldsymbol{\alpha}_L^{(i)}) \Delta P_{G_i} \end{aligned} \quad (A.3)$$

where,

$$\mathbf{u}_k = [00 \cdots 1 \cdots 00]^T, \quad \boldsymbol{\alpha}_L^{(i)} = [\alpha_{L1}^{(i)} \alpha_{L2}^{(i)} \cdots \alpha_{Lj}^{(i)} \cdots \alpha_{L(n-1)}^{(i)}]^T$$

$$\text{with } \alpha_{Lj} = P_{Lj} / \sum_{k=1}^n P_{Lk}$$

이 때, i번째 발전기의 발전증분은 각 부하 크기의 비율로 모두 흡수된다고 가정하였다. 만약 i번째 발전기와 j번째 부하 사이에 $P_{L_j}^{(i)}$ 만큼 거래가 이루어진다고 가정하면 $\alpha_{L_j}^{(i)}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_{L_j}^{(i)} = \frac{\Delta P_{L_j}^{(i)}}{\Delta P_{G_i}} \approx \frac{P_{L_j}^{(i)}}{P_{G_i}} \quad (A.4)$$

한편 무효전력 변화분을 고려하기 위하여 reactive load distribution vector $\boldsymbol{\beta}_L^{(i)}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\beta}_L^{(i)} &= [\beta_{L1}^{(i)} \beta_{L2}^{(i)} \cdots \beta_{L(n-1)}^{(i)}]^T \text{ with } \beta_{L_j}^{(i)} = \alpha_{L_j}^{(i)} \tan \theta_{L_j} \\ \text{where } \theta_{L_j} &= \cos^{-1}(pf_j) \text{ (} pf_j \text{는 } j \text{번 모선의 부하역률)} \\ \text{그러면 } \Delta Q &\text{는 다음과 같이 주어진다.} \end{aligned}$$

$$-\Delta Q_L = -\beta_L \Delta P_{G_i} \quad (A.5)$$

위 식을 이용하면

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i - \boldsymbol{\alpha}_L \\ -\boldsymbol{\beta}_L \end{bmatrix} \Delta P_{G_i} \quad (A.6)$$

따라서

$$\Delta F_{l,m} = \left[\left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i - \boldsymbol{\alpha}_L \\ -\boldsymbol{\beta}_L \end{bmatrix} \Delta P_{G_i} \quad (A.7)$$

GSF는 다음과 같이 구해진다.

$$GSF_{l,m}^{G_i} = \frac{\partial F_{l,m}}{\partial P_{G_i}} = \left[\left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i - \boldsymbol{\alpha}_L \\ -\boldsymbol{\beta}_L \end{bmatrix} \quad (A.8)$$

B. 부하단측에서의 GSF

부하단측에서의 GSF도 발전단 측과 동일한 방법으로 전개하면 된다. 먼저 $\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L$ 를 i번째 부하에 대해서 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L = (\boldsymbol{\alpha}_G - \mathbf{u}_i) \Delta P_{L_i} \quad (A.9)$$

$$\text{where } \boldsymbol{\alpha}_G^{(i)} = [\alpha_{G1}^{(i)} \alpha_{G2}^{(i)} \cdots \alpha_{Gj}^{(i)} \cdots \alpha_{G(n-1)}^{(i)}]^T$$

$$\text{with } \alpha_{Gj} = P_{Gj} / \sum_{k=1}^n P_{Gk}$$

이 때, i번째 부하의 부하증분은 각 발전기출력 크기의 비율로 모두 공급된다고 가정하였다. 만약 i번째 부하와 j번째 발전기 사이에 $P_{G_j}^{(i)}$ 만큼 거래가 이루어진다고 가정하면 $\alpha_{G_j}^{(i)}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_{G_j}^{(i)} = \frac{\Delta P_{G_j}^{(i)}}{\Delta P_{L_i}} \approx \frac{P_{G_j}^{(i)}}{P_{L_i}} \quad (A.10)$$

ΔQ_{L_i} 는 다음과 같이 주어진다.

$$-\Delta Q_{L_i} = -\tan \theta_{L_i} \Delta P_{L_i} \quad (A.11)$$

위 식을 이용하면

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_G - \Delta \mathbf{P}_L \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_i + \boldsymbol{\alpha}_G \\ -\tan \theta_{L_i} \cdot \mathbf{u}_i \end{bmatrix} \Delta P_{L_i} \quad (A.12)$$

따라서

$$\Delta F_{l,m} = \left[\left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_i + \boldsymbol{\alpha}_G \\ -\tan \theta_{L_i} \end{bmatrix} \Delta P_{G_i} \quad (A.13)$$

GSF는 다음과 같이 구해진다.

$$GSF_{l,m}^{L_i} = \frac{\partial F_{l,m}}{\partial P_{G_i}} = \left[\left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T, \left(\frac{\partial F_{l,m}}{\partial \mathbf{V}} \right)^T \right] \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_i + \boldsymbol{\alpha}_G \\ -\tan \theta_{L_i} \end{bmatrix} \quad (A.14)$$

저 자 소 개



김 재 욱 (金宰郁)

1981년 10월 31일생. 2008년 연세대 전기 전자공학부 졸업. 2009년~현재 동대학원 석사 과정.

Tel : 02-2123-2771

E-mail : trubird@yonsei.ac.kr



정 성 훈 (한문 저자명)

1980년 11월 19일생. 2010년 연세대 전기 전자공학과 졸업(석사).

Tel : 02-2123-2771

E-main : yel8872@yonsei.ac.kr



민 경 일 (한문 저자명)

1978년 5월 9일생. 2001년 홍익대 공대 전자전기공학과 졸업. 2003년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2010년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박). 현재 삼성전자 반도체사업부 전기 제어기술팀 과장.

Tel : 031-208-5156

E-mail : ki78.min@samsung.com



문 영 현 (文永鉉)

1952년 3월 11일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기 공학화 졸업(석사). 1978~1979년 한국전기통신연구소 연구원. 1979년~1983년 미국 Oregon 주립대학(공학박).

현재 연세대 전기공학과 교수

Tel : 02-2123-2771

E-mail : moon@yonsei.ac.kr