

전력산업 구조개편 환경에서 비선형 내점법의 최적조류계산에 의한 전력조류 및 한계계수에 관한 연구

정민화* · 남궁재용** · 권세혁***

*산업자원부 기술표준원, **산업자원부 전기위원회, ***고려대학교 전기공학과

A Study on Power Flow and Marginal Factor based on Optimal Power Flow using Nonlinear Interior Point Method under Restructuring Environment

Min-Hwa Jeong*, Jae-Yong Namkung** and Sae-Hyuk Kwon***

*Agency for Technology and Standards, MOCIE

**Korea Electricity Commission, MOCIE

***Department of Electrical Engineering, Korea University

요 약

본 연구에서는 전력산업 구조개편 환경에서 최적조류계산에 의한 전력조류 및 한계계수를 해석할 수 있는 실용적인 방법론을 제시한다. 먼저, 유용한 한계계수의 산정을 위해 전압제약, 선로과부하 제약, 발전 출력 제약 등의 각종 계통제약이 고려된 연료비 및 송전손실 최소화 비선형 최적화 문제가 정식화되고 비선형 주·쌍대 내점법에 의한 해법이 제시된다. 또한, 최적조류계산에 의해 계산된 감도에 기초하여 한계가격 및 한계송전손실의 산정방법이 제시된다. 특히, 경쟁적 전력시장에서 송전손실에 관한 가격을 반영하기 위해 한계손실계수의 해석방법이 제안된다. 본 연구의 결과를 IEEE RTS 24모선에 적용하여 전력시장가격의 해석에 대한 그 유용성을 검증하였다.

Abstract — This paper presents a practical methodology that can analysis power flow and marginal factors based on optimal power flow (OPF) of power systems under restructuring environment. First of all, to evaluate useful marginal factors, nonlinear optimization problems of minimum fuel cost and minimum transmission loss are formulated and solved by nonlinear primal-dual interior point method. Here, physical constraints considered in the optimization problems are the limits of bus voltage, line overloading, and real & reactive power generation. Also, an evaluation method of marginal price and marginal transmission loss is presented based on sensitivities calculated by the two OPF problems. Especially, to reflect the cost related to transmission losses in the competitive electricity market, an analysis method of MLF (marginal loss factor) is proposed. Numerical results on IEEE RTS 24 show that the proposed algorithm is effective and useful for analysis of power market price.

1. 서 론

최근까지, 국내 전력에너지 공급사업은 한국전력이 발전, 송전, 배전을 모두 독점하고 일관적인 체제로 유지 및 관리하여 왔으나 발전부문의 경쟁도입으로 구조개편이 가속화되고 있다. 그 동안 전기요금은 독점사업자에 대한 규제 목적과 물가 등 경제전반에 미치는 영

향을 고려하여 정책적으로 일정 수준을 유지하여 왔으나, 전력산업 구조개편이 진행되어 전력산업 구조가 경쟁체제로 전환되어 가면서 전력입찰가격, 배전가격 등의 산정에 있어 전력조류를 합리적으로 평가해서 다각적으로 검토해야 하는 전력계통 해석문제가 중요한 과제로 부각되고 있다¹⁾.

전력계통을 최적으로 계획 및 운용하기 위하여 다양

하게 적용되고 있는 최적화 문제는 동적 및 정적 안전도 특성이나 계산의 고속성, 수렴성 등에 의해 전력계통의 모든 조건을 이상적으로 한번에 고려할 수 없다. 그러나, 최적성의 원칙 하에 전력계통의 해석모델은 과거의 경제부하배분이라는 기본 경제운용 모델^[2]에서부터 최근 대규모 전력계통의 해석을 가능하게 하는 최적조류계산^[3]의 최적화 모델이 활발히 제안되고 있다. 최적조류계산은 기본적으로 특정목적에 맞는 전력계통의 조류 계산 단면을 최적으로 구하는 문제로서 각종 정식화^[4], 고속해법^[5,6], 감도해석^[8,9] 등에서 다양한 연구가 이루어져 왔다. 이들 연구들은 대부분 최적조류계산의 기본 개념을 응용한 연구들로서 최근의 전력산업 구조개편 환경으로의 적용을 위해서는 경쟁환경에서 필요한 각종 요소를 고려해서 그 해석방법의 전환이 필요하다. 특히, 국내에서 최근 중요성이 인식되고 있는 계통 한계손실계수^[10]의 해석문제를 보다 효율적으로 다루기 위해서는 고속해법의 최적조류계산에서 그 계산이 요구된다.

이러한 전력산업구조개편 환경에서 필요한 최적조류계산의 해석방법을 효과적으로 다루기 위하여 본 연구에서는 먼저, 연료비 최소화 및 송전손실 최소화의 기본적인 최적화 문제를 제시하고 이를 효율적인 비선형 주·쌍대내점법의 최적화 알고리즘을 적용하여 산정하도록 하였다. 이러한 최적조류계산의 최적화 문제로부터 전력시장에서의 가격산정 문제를 해석하기 위한 한계가격, 한계송전손실, 한계손실계수와 같은 한계계수 산정방식을 해석적으로 제시하기로 한다. 마지막으로, 본 연구에서 제안한 최적조류계산에 의한 전력조류 및 한계계수의 산정법을 IEEE 신화도시시험계통(IEEE RTS 24모선)에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 최적조류계산에 의한 전력조류 해석 문제

전력계통의 비선형 제약조건을 고려해서 유효전력 및

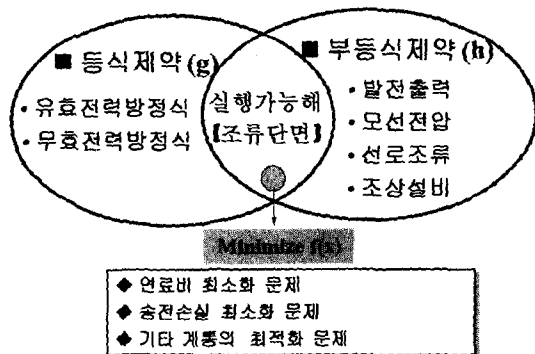


Fig. 1. The concept of optimal power flow.

무효전력의 최적상태를 도출해 내는 조류해석 문제는 비선형 최적조류계산(Nonlinear Optimal Power Flow)의 최적화 문제로서 정식화할 수 있다. 이것은 다음 그림 Fig. 1과 같이 최적상태의 전력조류 단면을 구하는 문제이다.

Fig. 1과 같이 이 문제는 전력계통에서 상정된 계통의 각종 제약조건 하에서 다양한 목적함수를 최소화 하는 전력계통의 최적조류계산 문제를 적용하여 정식화할 수 있으며 다음과 같이 식(1)~식(3)의 형태로 간단히 표현할 수 있다.

□ 목적함수 : Min f(x) (1)

□ 제약조건 : g(x)=0 (2)

h^{min} ≤ h(x) ≤ h^{max} (3)

여기서, f(x)는 전력계통의 계획 또는 운영에 있어 요구되는 각각의 전력조류 단면을 최적으로 구하기 위한 목적함수이고 g(x)는 유효전력 및 무효전력의 각각에 관한 전력조류방정식의 등식제약이며 h(x)는 선로조류제약, 발전기 유효 및 무효전력 출력제약, 모선 전압제약 등의 부등식 제약을 나타낸다.

2-1. 연료비 최소화 문제의 최적조류계산

현재, 우리나라는 전력산업 구조개편에 의해 발전경쟁형 전력입찰시장을 운영하고 있다. 그 운영방식은 각 발전소의 변동비를 기준으로 시장가격을 결정하고 급전을 시행하는 변동비 반영 풀 방식 형태이다. 이것은 발전계통만을 고려한 경제부하배분의 개념을 갖고 있다. 일반적으로 경제부하배분은 전력수요+전력손실=총발전량식에 의해 발전계통의 연료비가 최소가 되도록 최적화법에 의해 화력발전소의 출력배분을 구하는 것이다. 이러한 경제부하배분 문제에서 대규모 계통방정식을 고려해야 하는 송전계통의 제약은 최적화방정식의 계산부담을 줄이기 위해 고려하지 않게 된다.

본 연구에서는 전력산업 구조개편 환경에서 계통제약을 고려하여 전력입찰가격과 전력가격에 관한 감도해석이 가능한 기본 Tool을 제공하는 최적조류계산 문제를 다루는 것으로 한다. 이를 위해 계산특성이 좋은 비선형 최적화법을 도입하여 발전계통뿐만 아니라 송전계통의 대규모 특성을 반영하여 송전선로제약, 무효전력제약, 전압제약, 송전손실 등을 모두 고려한 연료비 최소화의 최적조류계산 문제를 정식화한다. 이것은 다음 식 (4), (5)와 같이 벡터형식으로 표현할 수 있다.

Min f(x)=a+bP_G+cP_G² (4)

s. t. P(x)-P_G+P_L=0

Q(x)-Q_G+Q_L=0 (5)

h^{min} ≤ h(x) ≤ h^{max}

여기서,

- a, b, c : 2 차식으로 표현되는 발전기의 연료비 계수
- P_G, Q_G : 발전기의 유효전력 및 무효전력 출력
- P_L, Q_L : 부하의 유효전력 및 무효전력의 지정치
- h^{max}, h^{min} : 선로조류, 발전기 유효 및 무효 전력 출력, 모선 전압 등의 상하한 제약

2.2. 송전손실 최소화 문제의 최적조류계산

송전손실 최소화 문제는 경제부하배분에 의해 발전기의 최적 유효전력출력을 구하고 이를 지정치로 하여 발전기 전압, 조상설비 등의 무효전력 수급에 관한 조정치를 계통 송전손실이 최소로 되도록 최적화하는 것이다.

이러한, 송전손실 최소화의 최적조류계산 문제는 다음 식 (6), (7)과 같이 벡터형으로 정식화할 수 있다. 벡터형으로 나타낸 목적함수 $P_{ij}+P_{ji}$ 는 모든선로에 대한 유효 전력 손실의 합을 나타낸다[11].

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) &= P_{ij} + P_{ji} & (6) \\ \text{s. t. } P(x) - P_G + P_L &= 0 \\ Q(x) - Q_G + Q_L &= 0 & (7) \\ h^{min} \leq h(x) \leq h^{max} \end{aligned}$$

여기서,

- P_{ij} : 선로 i에서 선로 j로의 선로조류 벡터
- P_{ji} : 선로 j에서 선로 i로의 선로조류 벡터

본 연구에서는 전절 2.1절의 연료비 최소화의 최적화 문제에서 이미 무효전력에 관한 계통특성을 함께 반영한 최적조류계산 문제를 풀어 무효전력 수급과 관계된 제어량을 구하고 있기 때문에 계통운용에서 필요한 별도의 송전손실 최소화 문제가 필요하지 않게 된다.

그러나, 전력계통 구조개편이 보다 가속화되어 부하분포에 의한 송전손실의 영향을 별도로 평가하여 이를 입찰 및 정산과정에 반영하기 위해서는 한계송전손실(또는 한계손실계수)에 대한 사전조사 및 분석이 가능할 수 있도록 송전손실 최소화 문제의 최적조류계산의 연구가 요구된다. 이를 위해, 본 연구에서는 식 (6), (7)의 최적화 문제에 대한 비선형 최적화 해법을 이용하여 한계송전손실을 고속으로 계산하고 이에 관한 특성을 제시하기로 한다.

3. 비선형 내점법의 해법과 한계계수의 해석

3-1. 비선형 주·쌍대내점법에 의한 해법

부하공급능력의 산정을 위한 전절의 비선형 최적화 문제는 비선형 주·쌍대 내점법(nonlinear primal-dual interior point method)^{[5][7]}의 해법을 적용하여 최적화하는

것으로 하였다. 먼저, 주·쌍대 내점법을 적용하기 위해 2.절의 식 (1)~식(3)으로 표현되는 부하공급능력 문제는 슬랙변수 벡터(l, u) $\in R^n$ 를 각각 상하한의 부등식에 도입하여 부등식제약을 등식제약으로 변환한 후 배리어 파라미터 μ 를 목적함수에 도입하면 다음 식 (8)~식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{min } f(x) - \mu \sum \ln(1 - \mu) - \mu \sum \ln \mu \quad (8)$$

$$\text{s. t. } g(x) = 0 \quad (9)$$

$$h(x) - 1 - h^{min} = 0 \quad (10)$$

$$h(x) + u - h^{max} = 0 \quad (11)$$

$$(l, u) \geq 0 \quad (12)$$

여기서, $\mu : \mu > 0$ 으로 내점법의 배리어 파라미터

상기 식의 최적화 문제에 대해 라그랑지 미정승수법을 적용하면, 다음 식 (13)과 같은 라그랑지 함수 L이 얻어진다.

$$\begin{aligned} L(x, l, u, \lambda, z, w) &= f(x) - \mu \sum \ln(1 - \mu) - \mu \sum \ln \mu - \lambda^T g(x) \\ &\quad - z^T (h(x) - 1 - h^{min}) - w^T (h(x) + u - h^{max}) \\ &\quad l \in R^n, (z, w) \in R^m \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

- λ, z, w : 라그랑지 승수벡터
- n, r : 각각 등식제약 및 부등식제약의 수

x, l, u 와 라그랑지 승수벡터의 합성벡터를 $p = (x, l, u, \lambda, z, w)$ 라 하면, 최적화 문제는 라그랑지 함수 L(p)를 최소화하는 p를 찾는 것이 된다. 여기서, p*를 최적점이라고 가정하면, 쿤터커 정리로부터 다음 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial L(p^*)}{\partial p} = 0 \quad (14)$$

식 (14)에 대해 뉴턴법을 적용하여 풀면, 수정방정식은 식 (15)와 같이 표현할 수 있다. 즉, 반복해 P*가 최적해 P*의 근방에 있다고 가정해서 테일러 전개 1차까지의 근사를 수행하여 뉴턴 수정량 Δp^k 를 풀고 반복과정을 수행하면 최적해를 얻게된다.

$$\frac{\partial L(p^k)}{\partial p} + \frac{\partial^2 L(p^k)}{\partial^2 p} \cdot \Delta p^k = 0 \quad (15)$$

상기와 같은 수정방정식은 전력계통의 부등식 제약에 의해 고차원 방정식이 되므로 대규모 전력계통을 적용하여 효율적으로 계산하기 하기 위해 부등식 제약에 관

한 변수를 축약하도록 한다. 이를 적용하여 축약된 수
정방정식은 다음 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} HJ^T \\ J^T 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Psi(p, \mu) \\ g(x) \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$\begin{aligned} H &\equiv (\nabla^2 g(x) \cdot \lambda + \nabla^2 h(x) \cdot (z+w) - \nabla^2 f(x)) \\ &\quad + \nabla h(x) \cdot S \cdot \nabla h(x)^T \\ S &\equiv U^{-1} \cdot W - L^{-1} \cdot Z \\ J &\equiv \nabla g(x)^T \\ \Psi(p, \mu) &\equiv -L_{x0} + \nabla h(x) \cdot [U^{-1} \cdot (W \cdot L_{w0} - L_{u0}) \\ &\quad - L^{-1} \cdot (Z \cdot L_{z0} + L_{i0})] \end{aligned}$$

여기서, $(L, U, Z, W) \in R^{(n \times n)}$ 은 모두 대각행렬이며, $L_{x0}, L_{z0}, L_{w0}, L_{u0}, L_{i0}$ 는 각각 x, λ, z, w, u, i 에 대한 쿤터커 방정식의 오차(residual)가 된다.

상기와 같은 과정을 통해 비선형 주·쌍대 내점법의 최적화법은 비선형성이 강하고 대규모 행렬식을 수반하는 대규모 전력계통을 고속, 고수렴성으로 풀 수 있게 하는 해법이다.

3.2. 연료비 최소화 문제에서의 한계가격 해석

전력산업 구조개편 환경에서 활용될 수 있는 한계가격(Marginal Price)은 대상기간 중의 전력계통의 각종 제약 및 송전손실을 고려해서 전력가격을 해석할 수 있는 유용한 감도지수라고 할 수 있다. 이러한 전력계통의 각종 제약조건 하에서 구해져야 하는 한계가격은 본 연구에서 제시한 비선형 주·쌍대 내점법의 최적화 방법에 의한 최적조류계산 문제로부터 유도되며 입찰방식을 사용하는 전력시장 등에서 전력입찰가격에 대한 분석 및 활용 등에 유용하게 적용될 수 있다.

한계가격의 계산은 연료비 최소화 문제의 최적조류계산 문제에서 유도된다. 즉, 한계가격은 발전기 출력이 최적화된 상태에서 부하의 단위량 변동에 따라 목적함수인 연료비의 변동을 의미하며 이것은 주·쌍대 내점법 과정에서 다음 식 (17)과 같이 라그랑지 함수 L로부터 계산되고 무효전력 및 무효전력 부하에 대해 각각 식 (18)과 식 (19)와 같이 정의된다¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} L(x, l, u, \lambda, z, w) &= [a + bP_G + cP_G^2] \\ &\quad - \lambda_{P_G} [P_G - P_L - P(x)] - \lambda_{Q_G} [Q_G - Q_L - Q(x)] \\ &\quad - z^T (h(x) - l - h^{min}) - w^T (h(x) + u - h^{max}) \\ &\quad - \mu \sum \ln l - \mu \sum \ln u \end{aligned} \quad (17)$$

$$MP_{P_i} = \frac{\partial L(p^*)}{\partial P_{L_i}} = \lambda_{P_i} \quad (18)$$

$$MP_{Q_i} = \frac{\partial L(p^*)}{\partial Q_{L_i}} = \lambda_{Q_i} \quad (19)$$

상기 식 (18)과 식 (19)로부터 임의모선 i의 유효전력에 대한 한계가격 MP_{P_i} 는 제약조건 하에서 모선 i에서 유효부하가 단위량 변화할 때 총 연료비의 변동분을 나타내고 무효전력에 대한 한계가격은 MP_{Q_i} 는 제약조건 하에서 모선 i에서 무효전력 부하가 단위량 변화할 때 총 연료비의 변동분을 나타낸다.

3.3. 송전손실 최소화 문제에서의 한계손실계수 해석

전력산업 구조개편으로 향후 배전부문이 배전회사(전력소매회사)로 나누어 진다면, 지역별로 전기요금에 달라질 수 있다. 이 경우, 송전손실에 의해 송배전 비용이 많이 드는 부하집중권의 전기요금이 발전소 집중지역에 비해 비싸지게 된다. 이 같은 지역별 송배전 원가를 반영해 전기가격을 차별화해서 송전손실을 입찰 및 정산 과정에 반영하기 위해서는 한계손실에 대한 사전조사 및 연구분석이 수행되어야 한다.

한계손실(Marginal Loss)이란 임의의 모선에서 유효전력 부하수요가 단위량 변화할 때 계통전체의 손실 변동량을 나타내며 이것은 실제 다음 식 (20)과 같이 정의한 한계손실계수(Marginal Loss Factor)의 계산에 적용되어 전력시장에서의 가격요소로서 연구되고 있다¹⁰⁾.

$$MLF_i = 1 + \frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_i} \quad (20)$$

여기서,

- ΔP_{loss} : 전체손실의 단위 변화량
- ΔP_i : 유효전력 부하의 단위 변화량

이 경우 종래의 연구는 한계손실을 조류계산에 기초하여 모선마다 부하를 단위량 증가시켜 가면서 반복계산하기 때문에 수많은 계산이 요구되어 계산효율이 많이 떨어지게 된다. 따라서, 모든 시간대별 부하를 검토해야 하는 전력계통 해석문제에 효과적으로 적용하기에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 비선형 주·쌍대법에 의한 최적조류계산으로부터 한계손실계수의 효과적인 계산을 제안하기로 한다. 먼저, 한계손실은 전질의 연료비 최소화 문제의 최적조류계산에서 한계가격과 같은 개념으로 송전손실 최소화 문제의 최적조류계산 문제에서 유도된다. 즉, 임의모선 i의 한계손실 ML_{P_i} 는 다음 식 (21)과 같이 송전손실 최소화 문제에 대한 최적화 문제의 라그랑지 함수 L로부터 계산되어 식 (22)와 같이 구해진다.

$$L(x, I, u, \lambda, z, w)=[P_{ij}+P_{ji}] -\lambda_{pi}^T[P_G-P_L-P(x)]-\lambda_{Qi}^T[Q_G-Q_L-Q(x)] -z^T(h(x)-I-h^{min})-w^T(h(x)+u-h^{max}) -\mu \sum \ln I -\mu \sum \ln u \quad (21)$$

$$MP_{pi}=\frac{\partial L(p^*)}{\partial P_{Li}}=\lambda_{pi} \quad (22)$$

따라서, 한계손실계수 MLF_i는 다음 식 (23)과 같이 표현된다.

$$MLF_i=1+\frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_i}=1+ML_{pi} \quad (23)$$

한계손실계수는 부하가 많고 전원이 부족한 부하집중 지역에서 크게 되고 반대로 발전집중지역에서 작게 되어 전력시장의 입찰가격, 정산 등에서 경제학적으로 활용될 수 있는 중요한 지표가 된다. 본 연구의 범위는 이러한 한계손실계수를 비선형 최적화법에 의해 효율적으로 계산하여 활용할 수 있는 기반을 제시하는 것으로 하고 실제 전력시장에서의 직접적인 활용방법은 정책적인 문제도 고려되어야 하므로 다루지 않는 것으로 한다.

4. 사례연구

4-1. 시험계통과 시뮬레이션 조건

본 연구의 시험계통은 24모선 38선로의 IEEE 신뢰도 시험계통(IEEE RTS)¹²⁾으로 3,405[MW]의 설비용량을 가지고 있고 년 최대부하가 2,850[MW]이며 본 사례연구는 년 최대부하의 계통조건에서 수행하는 것으로 한다. 이 계통은 북쪽의 발전단 계통과 남쪽의 부하단 계통으로 구분되어 년 최대부하 시 북쪽계통에서 남쪽계통으로 전력조류가 흘러가는 특성을 가지고 있다. 년 최대부하 단면에서 북쪽의 발전단 계통은 발전설비용량 2,721 MW, 부하 1,518 MW이며 남쪽의 부하단 계통은 발전 설비용량 684 MW, 부하 1,332 MW이다.

Table 1은 RTS 24모선의 각 발전기에 대한 연료비 계수, 유효전력 상하한 출력제약, 무효전력 상하한 출력제약을 정리하여 나타낸 것이다. 연료비는 본 연구의 명확한 해석을 위하여 1차식으로 설정하고 가격단위로 표

시하지 않고 편의상 계수로 표현하는 것으로 하였다. 또한, 해석상 편의를 위하여 부하모선의 전압제약은 0.9[p.u]~1.1[p.u], 발전기 모선의 전압제약은 0.98[p.u]~1.02[p.u]로 비교적 큰 값을 설정하였고 발전기 유효전력 및 무효전력 제약 등은 문헌¹¹⁾의 값을 그대로 사용하는 것으로 하였다.

4-2. 연료비 최소화 문제와 한계가격 해석

Table 2는 RTS 계통에 대한 연료비 최소화 문제의 최적조류계산의 결과와 이로부터 도출된 한계가격을 나타낸 것이다. RTS 계통은 송전계통이 매우 견고하기 때문에 최적조류계산 문제에서 송전선 제약에 의한 영향이 나타나지 않는다. 따라서, 송전제약에 의한 한계가격의 해석을 수행할 수 있도록 본 연구에서는 연료비 최소화 문제에 대해 2가지 사례 Case를 상정하여 사례연구를 수행하였다. Case 1은 원래의 RTS 계통을 나타내며 Case 2는 RTS 계통의 5개의 연계선 중 모선 3과 모선 24 사이 연계선의 선로제약을 240 MW로 엄격히 부과한 경우를 나타낸다.

먼저, Table 2의 결과로부터 Case 1의 최적조류계산은 2,850 MW의 부하에 대해 총발전량 2,921.9 MW, 총손실 71.91 MW, 총연료비 49,756.9의 결과가 얻어졌다. 여기서, ㉠, ㉡는 각각 제약 상한치, 하한치를 표시한 것이다.

저가 연료비의 우선순위법 개념으로 검토하면, 모선 13의 발전기(연료비 계수 : 35)가 상한치가 되고 모선 7의 발전기(연료비 계수 : 40)가 한계가격을 결정하는 한계발전기로 되어야 하지만, 비선형 최적조류계산법에 의해 송전손실을 고려하고 있기 때문에 이와 같이 2개 발전기가 최적으로 조절된다. 즉, 저가 발전기인 13번 발전기가 상한치까지 출력하지 않고 송전손실 유발이 적은 부하단의 7번 발전기가 어느 정도 출력을 더 해주는 것이 연료비 최소화 관점에서 최적이라는 것을 나타낸다. 한편, 유효전력에 대한 한계가격(MP_{pi})은 각 모선에 대해 31.82에서 41.18 사이에서 계산되며 7번과 13번 모선은 유효전력출력에 여유가 있기 때문에 단위부하 증가 시 자체 발전기가 그 부하를 공급하게 되어 자신의 연료비 계수가 한계가격이 된다. 무효전력에 대한 한계가격(MP_{Qi})은 발전기 모선에서 무효전력출력의 여유가 있

Table 1. Power output limits and cost coefficients.

구분	G1	G2	G7	G13	G15	G16	G18	G21	G22	G23
연료비계수	55	55	40	35	16	14	5	5	0	14
P _G 상한[MW]	192	192	300	591	215	155	400	400	300	660
P _G 하한[MW]	62.4	62.4	75.0	206	66.3	54.2	100	100	0	248
Q _G 상한[MVar]	80	80	180	240	110	80	200	200	96	155
Q _G 하한 [MVar]	-50	-50	0	0	-50	-50	-50	-50	-60	-125

Table 2. The results of OPF and marginal price related to fuel cost problem.

모선	Case 1				Case 2	
	P_{Gi} [MW]	Q_G [MVar]	MP_{Pi}	MP_{Qi}	P_{Gi} [MW]	MP_{Pi}
1		70.8	39.01	0.000		46.89
2		55.7	39.08	0.000		46.61
3	-	-	36.27	1.645	-	54.54
4	-	-	38.79	0.978	-	45.24
5	-	-	38.82	0.696	-	44.44
6	-	-	38.94	1.012	-	43.26
7	138.8	95.79		0.000	251.6	
8	-	-	40.18	0.955	-	41.84
9	-	-	36.60	1.253	-	41.83
10	-	-	37.15	1.073	-	40.13
11	-	-	36.17	0.797	-	36.36
12	-	-	36.05	0.752	-	37.17
13	528.3	232.5		0.000	408.6	
14	-	-	35.35	0.791	-	31.92
15			33.69			24.67
16			33.82			27.06
17	-	-	33.06	0.142	-	25.67
18		106.3	32.83	0.000		25.13
19	-	-	33.99	0.247	-	28.92
20	-	-	33.81	0.099	-	30.20
21		38.8	32.70	0.000		24.71
22		-31.9	31.82	0.000		24.30
23		66.8	33.60	0.000		30.77
24	-	-	35.17	1.151	-	15.95

는 경우 그 한계가격은 0이 되지만, 15번과 16번 모선과 같이 무효전력출력이 상한이 되면, 한계가격이 발생된다. 15번 발전기의 예로 설명하면, 15번에 무효전력부하가 1MVar 만큼 증가되면, 이로부터 손실증가가 유발되어 총연료비가 0.373 만큼 증가된다는 것을 의미하게 된다.

다음 Case 2는 송전선 제약을 엄격히 부과한 경우를 상정하여 계산한 결과로서 송전선 제약의 영향을 평가하기 위해 유효전력의 P_{Gi} 와 MP_{Pi} 에 초점을 맞추어 설명하기로 한다.

Case 1의 결과와 비교하면, 모선 3과 모선 24 사이의 조류제약 상한치 240 MW에 의해 발전모선 7과 13 사이에서 발전 shift가 발생하게 되고 그 결과 총발전량 2,915.0 MW, 총손실 65.03 MW, 총연료비 50,080.3의 결과가 얻어졌다. 즉, Case 1에 비해 손실은 감소하였지만, 고가발전기로의 출력 shift에 의한 송전선 혼잡비용이 발생하여 총연료비는 증가하게 되었다. 이 때, 유효전력에 대한 한계가격은 각 모선에 대해 15.95에서 46.89 사이의 범위를 갖게 된다. 15.95의 최소 한계가격을 갖고 있는 모선 24에 대해 설명하면, 모선 24의 부하가

1 MW 증가할 경우, 송전제약에 의해 모선 7과 13의 발전출력이 각각 247.3 MW, 414 MW로 shift되어 총연료비는 15.95 만큼 증가하게 된다.

상기의 사례연구로부터 연료비 최소화 및 최적조류계산은 전력시장에서 유용하게 해석할 수 있는 계통해석 데이터를 제공하고 있음을 알 수 있다.

4-3. 송전손실 최소화 문제와 한계손실계수 해석

Table 3은 IEEE RTS 계통에 대한 송전손실 최소화 문제의 최적조류계산의 결과와 이로부터 도출된 한계손실계수(MLF)를 나타낸 것이다. 이것은 전철의 연료비 최소화의 최적조류계산의 결과를 입력자료로 하고 RTS의 발전기 모선 10개에 대해 각각 슬랙모선(기준모선) 발전기로 상정해서 송전손실 최소화의 최적조류계산을 수행하여 얻어진 결과를 비교하여 정리한 것이다.

Table에서 G1~G23까지 10개의 발전기는 각각 슬랙모선이 된 경우를 나타낸 것이다. 슬랙모선이란 송전손실 최소화의 최적화 문제에서 송전손실의 변화를 수급할 수 있도록 발전기유효전력 출력제약이 부과되는 발전기 모선이다. 따라서, 슬랙모선이 되는 발전기 모선은 한계손실이 0이 되기 때문에 한계손실계수는 1이 된다.

Table 3과 같이 최적조류계산에서 슬랙모선의 선정에 따라 MLF는 상대적인 값을 가지게 된다. 예를 들어, 슬랙모선을 발전기 G1으로 하여 송전손실 최소화 문제를 다루는 경우, 모선 1의 MLF가 1이 되며 이것을 기준으로 나머지 23개 모선의 MLF가 모선 1의 값에 대해 상대적인 값으로 분포된다. 즉, 모선 24의 MLF가 0.902라는 것은 모선 24에서 부하가 1 MW 증가할 때, 계통 전체송전손실이 슬랙모선으로 상정한 모선 1의 MLF 1과의 차이 0.098 MW 만큼 감소한다는 것이다.

반대로, 모선 23(G23)의 발전기를 슬랙모선으로 하여 최적조류계산의 결과를 비교해 보면, 모선 1의 MLF는 1.158이며 이것은 모선 1에서 부하가 1 MW 증가할 때, 계통 전체송전손실이 0.158 MW 증가한다는 것을 나타낸다. 이로부터, MLF는 슬랙모선 발전기의 선정에 따라 변화하는 특성을 가지고 있어 적용할 수 있는 MLF의 선정은 해석적인 방법에 의해 도출되어야 한다.

한편, 본 결과는 문헌¹⁰⁾에 의한 조류계산 기반의 한계손실계수 계산법을 적용하여 얻은 결과와 완전히 동일하며 이로부터 최적화법에 의한 결과를 검증하였다.

다음 Fig. 2는 Table 3의 슬랙모선(기준모선) 중 모선 1, 13, 18, 23에 대한 MLF를 도식적으로 비교한 것이다. 이 그림에서 평균치는 10개의 슬랙모선에 대한 모선별 MLF값을 평균하여 나타낸 것이며 이것은 슬랙모선 13(G13)의 MLF값과 정확히 일치하고 있다. 이것은 MLF를 해석적으로 도출하는 하나의 방법으로 제시한 것

Table 3. The results of OPF and MLF related to transmission loss problem.

No	G1	G2	G7	G13	G15	G16	G18	G21	G22	G23
1	0.999	0.999	0.976	1.113	1.155	1.151	1.183	1.187	1.220	1.158
2	1.001	0.999	0.977	1.114	1.157	1.153	1.184	1.188	1.221	1.160
3	0.928	0.927	0.905	1.033	1.072	1.068	1.097	1.102	1.132	1.075
4	0.994	0.993	0.969	1.106	1.148	1.144	1.175	1.180	1.212	1.151
5	0.995	0.993	0.970	1.107	1.149	1.145	1.176	1.181	1.213	1.152
6	0.998	0.997	0.973	1.111	1.153	1.149	1.180	1.184	1.217	1.156
7	1.025	1.024	1.000	1.141	1.184	1.180	1.212	1.217	1.250	1.187
8	1.030	1.028	1.004	1.146	1.189	1.185	1.218	1.222	1.256	1.193
9	0.938	0.937	0.915	1.044	1.084	1.080	1.109	1.113	1.144	1.087
10	0.952	0.951	0.929	1.060	1.100	1.096	1.126	1.130	1.161	1.103
11	0.928	0.927	0.905	1.033	1.072	1.068	1.097	1.101	1.131	1.074
12	0.925	0.924	0.902	1.030	1.069	1.065	1.094	1.098	1.128	1.071
13	0.898	0.897	0.876	1.090	1.038	1.034	1.062	1.066	1.096	1.041
14	0.906	0.905	0.884	1.009	1.047	1.043	1.072	1.076	1.105	1.050
15	0.866	0.865	0.844	0.963	1.000	0.996	1.024	1.027	1.056	1.003
16	0.869	0.868	0.847	0.967	1.004	1.000	1.027	1.031	1.060	1.006
17	0.851	0.850	0.830	0.947	0.983	0.980	1.006	1.010	1.038	0.986
18	0.846	0.845	0.825	0.941	0.977	0.973	1.000	1.004	1.031	0.979
19	0.873	0.872	0.852	0.972	1.009	1.005	1.032	1.036	1.065	1.011
20	0.869	0.868	0.847	0.967	1.004	1.000	1.027	1.031	1.060	1.006
21	0.842	0.841	0.822	0.938	0.973	0.970	0.996	1.000	1.028	0.976
22	0.820	0.819	0.800	0.913	0.947	0.944	0.970	0.973	1.000	0.950
23	0.863	0.862	0.842	0.961	0.997	0.994	1.021	1.025	1.053	1.000
24	0.902	0.901	0.880	1.004	1.042	1.038	1.067	1.071	1.100	1.045

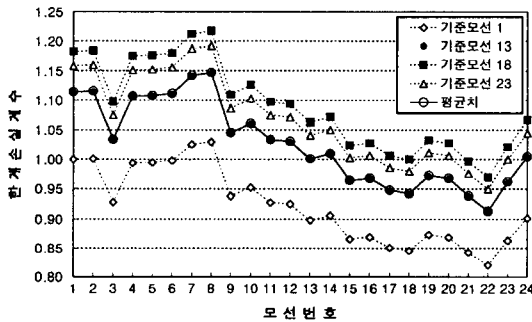


Fig. 2. Variation of the MLF by slack bus.

이다.

상기의 결과로부터 MLF는 송전손실을 크게 유발하는 부하집중지역에서 상대적으로 큰 값을 갖게 되며 반대로 발전집중지역에서 작은 값을 갖게 됨에 따라 송전손실 유발에 대한 가격적인 패널티로서 활용될 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 전력산업 구조개편 단계에서 전력시장의 가격을 해석적으로 산정하기 위해 유용한 정보로 활용될 수 있는 한계손실계수 MLF를 계산하는 방법론을 제시하기로 하며 이에 대한 전력시장으로의 구체적인 적

용은 향후의 연구로 남기로 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 전력산업구조개편 환경에서 요구되는 전력시장의 가격 해석정보를 도출하기 위하여 연료비 및 송전손실 최소화의 최적조류계산 문제를 제시하고 이를 효율적인 비선형 주·쌍대내점법의 최적화 알고리즘을 적용하여 산정해서 최종적으로 한계가격, 한계손실계수와 같은 유용한 가격 해석정보를 구하는 연구를 수행하였다.

그 결과, 연료비 및 송전손실 최소화의 최적조류계산 문제를 계통의 필요한 각종제약을 고려해서 비선형 최적화법에 의하여 실용적으로 산정하였고 이로부터 전력시장에서 유용하게 적용될 수 있는 한계가격, 한계손실, 한계송전손실의 가격해석 정보를 제시하여 비선형 최적화 알고리즘 상에서 체계적으로 산정하였다.

마지막으로, IEEE RTS 계통에서의 수치적 검토를 통하여 비선형 주·쌍대 내점법에 의한 최적조류계산 문제와 관련 가격정보들의 산정결과를 검토하여 본 연구의 적용성 및 유용성 등에 대하여 검증하였다.

본 연구의 결과는 전력산업 구조개편 단계에서 전력

시장 운용을 위한 다양한 가격체계의 설계문제에서 기초적인 자료로 검토될 수 있을 것으로 기대되며 향후에는 전력시장으로의 구체적인 활용방법을 제시할 수 있도록 관련 연구를 수행해 나갈 계획이다.

감사의 글

본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. 김영창: "전력산업 구조개편 추진", 대한전기학회지, 제 49권, 6호 (2000).
2. 김용하, 정민화, 송길영: "대기환경오염물질의 배출량 제어를 위한 경제부하배분의 해석", 한국에너지공학회 논문지, 제 6권, 2호 (1997).
3. Sun, D.I., Ashley, B., Brewer, B., Hughes, A. and Tinney, W.F., "Optimal Power Flow by Newton Approach", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 10 (1984).
4. 국경수, 정민화, 남궁재용, 이병준, 송길영: "연속선형 계획법을 사용한 전력계통의 최대전력수송능력 및 계통여유율의 산정", 대한전기학회논문지, 제47권, 4호 (1998).
5. Granville, S.: "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1 (1994).
6. Wu, Y.C., Debs, A.S. and Marsten, R.E.: "A Direct Nonlinear Predictor-Correct or Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 3 (1994).
7. Jeong, M.H., Kubokawa, J., Yorino, N., Sasaki, H., Lee, B. and Song, K.Y.: "Evaluation of Transfer Capability based on Load Supplying Capability Calculation Using Primal-Dual Interior Point Method", Trans. IEE of Japan, Vol. 120-B, No. 8/9 (2000).
8. Baughman, M.L. and Siddiqi, S.N.: "Real-Time Pricing of Reactive Power : Theory and Case Study Results", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 1 (1991).
9. Xie, K., Song, Y.-H., Stonham, J., Yu, E. and Liu, G.: "Decomposition Model and Interior Point Methods for Optimal Spot Pricing of Electricity in Deregulation Environments", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 1 (2000).
10. 남궁재용, 최홍관, 문영환, 오태규, 임성환, 한용희: "한계손실제수에 의한 한전 예상첨두계통 송전손실 특성 분석", 전기학회 논문지, 제 50권, 6호 (2001).
11. 송길영: "전력계통의 해석 및 운용", 동일출판사 (1984).
12. IEEE Committee Report: "IEEE Reliability Test System", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 6 (1979).