

입찰함수에 의한 전력거래에서의 최적조류 계산에 의한 혼잡비용 처리연구

論 文
49A-8-2

A Study on the Congestion Management by OPF in the Electricity Power Market with the Bidding Function

李光浩* · 鄭在玉**
(Kwang-Ho Lee · Jae-Ok Jung)

Abstract - The nodal marginal cost and the congestion charge are used as the economic signals for the electricity price and new investments in deregulated power systems. In this paper, the nodal marginal cost and the congestion charge are calculated by using the shadow prices resulted from the calculation of Optimal Power Flow(OPF). Linearization of inequality constraints and piecewise linear cost functions make an OPF problem LP-based forms. In order to use the shadow price, the Interior Point(IP) algorithm is applied as a solution technique to the formulation. This paper proposes an algorithm to determine efficient initial points which are guaranteed to be interior points.

Key Words : Optimal Power Flow, 혼잡비용, 잠재가격, Interior Point Algorithm, 입찰함수

1. 서 론

오늘날 전 세계의 전력산업은 큰 변혁기에 직면하고 있다. 규모의 경제에 기초한 수직 통합 독점형 체제에서 기능 분할에 기초한 시장경쟁 체제로 변화하고 있는 것이다.[1] 전력산업의 규제완화(Deregulation)로 인한 송전선개방(Transmission Open Access)으로 말미암아 합리적인 가격 결정에 있어 송전선 혼잡(Transmission Congestion)과 송전손실이라는 두 가지 과제가 발생한다.[2,3]

송전망의 구성에 따라 모선별 송전손실에 대한 영향이 달라지는데 이러한 송전손실의 발생정도가 전력거래에 반영되어야 한다. 또한 혼잡이란 제한된 선로 용량 때문에 원하는 전력거래가 일어나지 못하는 결과를 초래하는 현상으로서 송전비용을 증가시키는 요인이 된다.[4] 따라서 경제적 전력거래를 위해서는 합리적인 혼잡비용의 산정이 이루어져야 한다.

경제급전(Economic Dispatch: ED)의 결과로 도출되는 단기한계비용이 소위 계통한계비용(시스템 λ)이며 여기에 송전손실과 선로용량 제약조건이 포함되면 재경제급전 과정을 거치게 된다. 이때에 비용증가가 발생하는데 송전손실비용과 혼잡비용의 형태로 계통한계비용에 추가되어 나타난다. 이를 모션한계비용(Nodal Marginal Cost)이라 한다.[5] 이러한 계산을 하는 비선형 최적화 기법이 최적조류계산(Optimal Power Flow: OPF)이다. OPF의 결과로 최적 발전

력과 각종 잠재가격(Shadow Price) 정보가 제공되는데 혼잡비용은 이때의 잠재가격 정보를 이용하여 계산된다.[6,7] 모션한계비용과 혼잡비용은 시장경제에서의 가격기능과 송전설비투자에 대한 적절한 신호제공도 하게 된다.

본 연구에서는 OPF 문제를 LP(Linear Programming) 최적화 문제로 변형하여 IP(Interior Point)기법을 적용한다. LP 최적화 문제는 simplex 기법 등을 이용해서 계산되지만 혼잡비용을 계산하는데 이용되는 라그랑지안 승수와 같은 잠재가격 정보가 제공되지 않는다. 따라서 라그랑지안 승수가 계산되는 IP 기법 중 선형의 문제에 대해 해법이 간결한 Barrier 함수 기법을 사용한다. 하지만 이 해법은 초기값에 따라 수렴성이 크게 달라지기 때문에 초기값 선정 문제에서 어려운 점이 있다.[8] 본 논문에서는 효과적인 초기값을 구하는 알고리즘을 제안하고, 사례연구 결과로 타당성을 입증하였다.

2. 최적화와 한계비용

2.1 모션한계비용

발전력 최적화 문제에서는 비용최소화를 목적함수로 하고 제약조건에는 다음 식(1)과 같이 계통의 수급조건과 선로조류 및 발전력의 허용범위가 포함된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \\ & \text{Subject to} && \sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{k=1}^m P_{Dk} - P_L = 0 \\ & && P_i \leq P_i^{\max} \\ & && P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 C_i 는 발전비용함수이며, P_{Gi} 는 발전력, P_{Dk} 는

* 正會員 : 檀國大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

** 準會員 : 檀國大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2000年 1月 25日

最終完了 : 2000年 6月 26日

부하, 그리고 P_L 은 송전손실을 나타낸다. $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$ 는 각각 발전력의 하한과 상한값이고, P_l, P_l^{\max} 는 l 선로의 선로조류와 최대 허용용량이다. 식(1)을 라그랑지 방정식으로 표현하면, 다음 식(2)와 같다.

$$L(P_G) = \sum_{i=1}^M C_i(P_{Gi}) + v \left(\sum_{l=1}^N P_{Dl} + P_L - \sum_{i=1}^M P_{Gi} \right) + \sum_{i=1}^M u_i (P_i - P_i^{\max}) + \sum_{i=1}^M [u_i^{\min} (P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}) + u_i^{\max} (P_{Gi} - P_{Gi}^{\max})] \quad (2)$$

여기서 라그랑지안 승수 v 는 전력수급조건에 관련된 것이며, 최적의 v 값을 시스템 λ 라고 한다. u_i^{\min}, u_i^{\max} 는 i 모선 발전기의 하한(상한)값과 관련된 라그랑지안 승수이고, u_l 은 l 선로의 선로조류 한계용량에 관련된 라그랑지안 승수, 그리고 N_l 은 선로의 수를 나타낸다. 만약 송전손실을 무시하고 혼잡이 일어나지 않는다면 전체모선에서의 모선한계비용은 시스템 λ 로서 동일할 것이다. 하지만 송전망에 많은 부하가 걸린다면 병목현상이 혼잡을 야기하여 값싼 발전기의 이용에 제한을 받게 된다. 이러한 현상은 재경제급전(Redispatch)을 통해 해소되며 모선한계비용은 한계비용 이론에 의해 다음 식(3)과 같이 정의된다.[7]

$$MC_i = v - v \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - \sum_{l=1}^N u_l \frac{\partial P_l}{\partial P_i} \quad (3)$$

여기서 P_i 는 모선 i 에서의 주입전력이며, 라그랑지안 승수 u_l 이 포함된 마지막 항이 혼잡비용에 관한 부분이다. 발전기 모선에서는 다음 식(4)와 같이 정의되는데 (3)식과 동일한 결과를 가진다.

$$MC_i = \frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}} - u_i^{\min} + u_i^{\max} \quad (4)$$

2.2 IP 알고리즘

연료비 함수가 입찰 함수인 경우 비용함수는 구간별 선형 함수 형태가 되고, DC 조류계산 식을 사용함으로써 선로제약 조건식이 선형형태가 되어 일반적인 LP 최적화 문제로 표현된다. LP 최적화 문제를 풀기 위한 해법으로는 심플렉스법 등이 있지만 이러한 해법들은 라그랑지안 승수인 u, v 가 계산되지 않는다. 하지만 IP 알고리즘은 u, v 가 계산되는 것은 물론 수렴하는 과정에서 해의 존재영역이 보장된다.[8] 본 논문에서는 IP 알고리즘 중에서도 로그함수를 이용하여 변수가 존재영역 밖으로 이동하는 것을 방지하는 Barrier 함수 기법을 사용한다. 따라서 최적조건식에 대한 반복 계산식이 식(8)과 같이 간결하게 유도되는 장점을 갖는다.

다음과 같은 선형의 쌍대문제에 대해 KKT(Karush-Kuhn-Turker) 최적조건을 적용하면 식(5)와 같은 연립방정식이 된다.

기본문제(Primal Problem)	쌍대문제(Dual Problem)
Minimize $c'x$	Maximize $b'v$
subject to $Ax = b$	subject to $A'v + u = c$
$x \geq 0$	$u \geq 0$

$$\begin{aligned} Ax &= b & x &\geq 0 \\ A'v + u &= c & u &\geq 0 \\ u'x &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 v 와 u 는 각각 등식과 부등식 제약조건에 해당하는 라그랑지안 승수이다.

위 식(5)에서 $x \geq 0$ 의 부등식을 Frisch's logarithmic barrier 함수[8]에 적용하면 다음과 같은 최적화 문제로 변경된다.

$$\text{Minimize } \{ c'x - \mu \sum_{j=1}^n \ln(x_j) : Ax = b, (x > 0) \}$$

여기에 KKT 최적조건식을 적용하면 다음 식(6)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ A'v + u &= c \\ u &= \mu X^{-1}e \text{ 또는 } XUe = \mu e \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 X 는 x 로 구성되는 대각 행렬, U 는 u 로 이루어진 대각행렬이다. e 는 1의 원소를 가진 열 벡터, μ 는 IP 알고리즘을 수렴시키는 과정에서의 파라미터이며 μ 가 영으로 접근 하면서 수렴이 된다. μ 의 갱신(update)은 다음 식 (7)과 같이 이루어진다.

$$\hat{\mu} = \beta \times \bar{\mu}, \quad (0 < \beta < 1) \quad (7)$$

(7)식에서 $\hat{\mu}$ 는 갱신 된 후 μ 값이며, $\bar{\mu}$ 는 갱신 전의 μ 값이다. 식(6)의 연립방정식은 뉴턴법으로 계산되는데 변수 x, u, v 에 대한 갱신은 다음 식(8)에 의해 이루어진다.[8]

$$\begin{aligned} d_v &= - [A \bar{U}^{-1} \bar{X} A']^{-1} A \bar{U}^{-1} [\hat{\mu} e - \bar{X} \bar{U} e] \\ d_u &= -A' d_v \\ d_x &= \bar{U}^{-1} [\hat{\mu} e - \bar{X} \bar{U} e - \bar{X} d_u] \end{aligned} \quad (8)$$

파라미터 μ 를 점차적으로 줄여가며 식(6)을 반복 계산함으로써 최적해로 수렴하게 된다. 수렴된 값 x 는 최적 발전력에 해당되며 u, v 는 잠재가격을 나타내는 라그랑지안 승수이다.

3. Interior 초기값 선정 알고리즘

3.1 x 의 초기값 선정

최적 조건인 비선형 연립방정식 식(6)을 계산하는데 뉴턴법을 사용하기 때문에 초기값에 영향을 받으며 식(6)의 분수함수 형태로 인해 초기값 설정에 따라 수렴하지 않는 경우도 발생된다.

식(6) 중 첫 번째 식에서 x 를 x_g, x_s, x_c 로 구분해서 행렬식으로 표현하면 다음 식(9)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_1 & 0 & A_2 \\ I & I & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_g \\ x_s \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 x_g 는 발전력이며, x_s 는 발전기의 부등식 제약조건을 등식제약 조건으로 변형하면서 생기는 슬랙변수, x_c 는 선로 조류의 부등식 제약조건을 등식제약 조건으로 변형 하면서 생기는 슬랙변수이다. b_1 은 계통에서의 총 부하량과 선로의 한계용량으로 이루어지며, b_2 는 각 발전기들의 최대 발전력으로 구성된다.

식(9)에서 각각의 크기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_1 &: (1 + N_c) \times N_g \\ A_2 &: (1 + N_c) \times N_c \\ I &: (N_g \times N_g) \\ x_g &: (N_g \times 1) \\ x_s &: (N_g \times 1) \\ x_c &: (N_c \times 1) \\ b_1 &: (1 + N_c) \times 1 \\ b_2 &: (N_g \times 1) \end{aligned}$$

(1은 수급조건 개수, N_c 는 선로제약에 걸린 선로의 수, N_g 는 발전기 개수)

식(6)의 두 번째 식에서 v, u 도 각각 v_1, v_2 그리고 u_g, u_s, u_c 로 구분해서 행렬식으로 표현하면 다음 식(10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_1^T & I \\ 0 & I \\ A_2^T & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_g \\ u_s \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 v_1 은 계통에서의 수급조건과 선로 조류의 한계용량에 해당하는 라그랑지안 승수, v_2 는 발전력의 최대값 조건에 해당하는 라그랑지안 승수이고, u_g 는 발전력의 최소값 조건, u_s 는 슬랙변수의 양수 조건, u_c 는 선로 조류 조건에서의 슬랙변수에 해당하는 라그랑지안 승수이다. 또한 c 는 각 발전기의 발전단가이다.

식(10)에서 각각의 크기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_1 &: (1 + N_c) \times 1 \\ v_2 &: (N_g \times 1) \\ u_g &: (N_g \times 1) \\ u_s &: (N_g \times 1) \\ u_c &: (N_c \times 1) \\ c &: (N_g \times 1) \end{aligned}$$

IP 기법에 의해 계산된 x_g^* 는 LP 해법에 의해 구해진 값과 일치할 것이다. 따라서 IP 기법 적용시의 x_g 초기값은 LP 해법의 결과값을 이용하는 것이 수렴성 측면에서 바람직하다. 하지만 IP 알고리즘에서 반복계산을 할 때 변수의 초기값은 해의 존재영역 내부에 있어야 하는데 LP 적용시 결과값 x_g^* 는 존재영역의 경계선에 위치하므로 interior가 아니다. 따라서 IP 알고리즘이 수렴하지 않을 수도 있다. 본 연구에서는 변수의 초기값을 interior 영역으로 이동시키는 알고리즘을 제안함으로써 IP 기법의 수렴성을 높이고자 한다.

우선, 발전력의 초기값 x_{g0} 를 interior로 만들기 위해서 다음 식(11)과 같이 x_g^* 에 Δx 만큼의 변위를 가한다.

$$x_{g0} = x_g^* + \Delta x \quad (11)$$

위 식(11)에서 변위 Δx 는 다음과 같이 정한다. 만약에 $x_{g_i}^*$ 가 발전력 상한값이면 $\Delta x_i = -\epsilon$, 즉 임의의 작은 양만큼 감소시키고, 그렇지 않을 경우는 다음 식(12)와 같이 균등 분배하여 증가시킨다.

$$\Delta x_i = -\frac{\sum \Delta x_i}{N_+} \quad (12)$$

여기서 N_+ 는 최대 발전력에 걸리지 않는 발전기의 수이다. x_{g0} 가 정해지면 x_s 의 초기값 x_{s0} 는 식(9)에서 $b_2 - x_{g0}$ 로 구할 수 있으며, x_c 의 초기값 x_{c0} 또한 식(9)에 의해서 구할 수 있다.

3.2 라그랑지안 승수, v, u 의 초기값 선정

x 의 interior 초기값을 가지고 라그랑지안 승수인 v, u 의 초기값을 구하는 알고리즘은 앞 식(10)과 최소 자승법을 이용해서 구할 수가 있다. 초기값 x_{g0}, x_{s0} 를 이용하여 v 의 초기값은 식(10)으로부터 다음 식(13)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A_1^T \cdot v_{10} + v_{20} + u_{g0} &= c \\ v_{20} + u_{s0} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 u_{g0}, u_{s0} 의 i 번째 값은 각각 $\mu/x_{g0}(i), \mu/x_{s0}(i)$ 이다. 식(13)으로부터 v_{10} 는 다음 식(14)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} A_1^T \cdot v_{10} &= c - u_{g0} + u_{s0} \\ v_{20} &= -u_{s0} \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)에서 A_1^T 행렬의 크기는 $N_g \times (1 + N_c)$ 이고 일반적으로 overdetermined ($N_g > 1 + N_c$)이므로 v_{10} 는 다음 식(15)와 같이 최소 자승법에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{10} &= (A_1 A_1^T)^{-1} \cdot A_1 (c - u_{g0} + u_{s0}) \\ v_{20} &= -u_{s0} \end{aligned} \quad (15)$$

이와 같이 구한 v 의 초기값을 식(10)에 대입하여 다음 식(16)과 같은 u 의 초기값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_{g0} &= c - A_1^T v_{10} + v_{20} \\ u_{s0} &= -v_{20} \\ u_{c0} &= -A_2^T v_{10} \end{aligned} \quad (16)$$

이상과 같이 구해진 x, u, v 의 초기값은 interior 조건을 만족하며 IP 알고리즘의 뉴턴해법에 적용할 때 수렴성이 향상됨을 사례연구를 통해 확인하였다.

4. 사례연구

4.1 혼잡비용계산

그림 1과 같이 선로의 리액턴스 값이 모두 0.1 pu인 3기 3모선에 대해 OPF를 수행하여 잠재가격을 분석하였다. 발전력의 하한과 상한은 모두 0과 1000MW이며, 발전단가는 각각 15, 20, 18 이다. 선로의 한계용량은 모든 선로에 200MW를 가정한다.

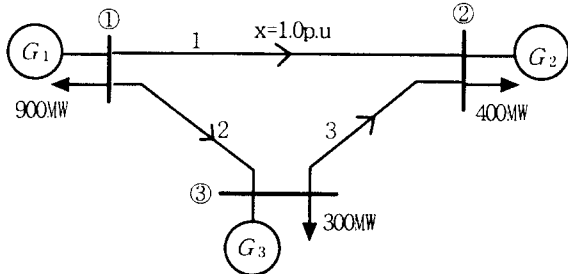


그림 1 잠재가격 분석을 위한 사례 계통도
Fig. 1 Network diagram for analysis of shadow price

주어진 계통에 대한 경제급전 결과, $P_{G1}=1000\text{MW}$, $P_{G2}=0\text{MW}$, $P_{G3}=600\text{MW}$ 가 되어 선로3에 233.33MW의 혼잡현상이 발생한다. 발전력 변수 x_1, x_2, x_3 에 대해 선로제약조건을 반영하여 OPF의 정식화로 나타내면 다음 식(17)과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } 15x_1 + 20x_2 + 18x_3 \\ &\text{subject to } x_1 + x_2 + x_3 = 1600 \\ &0 \leq x_1 \leq 1000 \\ &0 \leq x_2 \leq 1000 \\ &0 \leq x_3 \leq 1000 \\ &-0.3333x_2 + 0.3333x_3 + 33.33 \leq 200 \end{aligned} \quad (17)$$

마지막 부등식 조건은 선로3의 선로조류 허용범위를 나타내며 DC 조류계산 식으로 유도된 것이다. 이와 같은 혼잡을 해결하기 위해 LP를 수행하여 구한 발전력은 $P_{G1}=1000\text{MW}$, $P_{G2}=50\text{MW}$, $P_{G3}=550\text{MW}$ 이다.

앞 절에서 언급했던 바와 같이 LP 해법을 통해 구해진 발전력은 interior가 아니기 때문에 이 값에 변위 $\epsilon(=0.2)$ 를 주어 interior로 만든 다음 그 값에 의해서 v, u 의 초기값을 구하면 다음 표1과 같다.

표 1 x, v, u 의 interior 초기값
Table 1 Initial points of x, v, u in interior area

\hat{x}	x_g	999.8, 50.1, 550.1
	x_s	0.2, 949.9, 449.9
	x_c	0.0167
\hat{u}	u_g	4.0087, 3.0182, 3.0024
	u_s	5, 0.0011, 0.0022
	u_c	2.9748
\hat{v}	v_1	15.9913, -2.9748
	v_2	-5, -0.0011, -0.0022

이렇게 해서 구한 초기값을 가지고 식(17)의 문제에 Barrier 함수 기법을 적용하여 해를 구하면 다음 표2와 같은 결과를 얻는다.

표 2 Barrier 함수기법을 이용한 OPF 수행결과
Table 2 OPF results by barrier function method

\hat{x}	x_g	1000, 50, 550
	x_s	0, 950, 450
	x_c	0
\hat{u}	u_g	0, 0, 0
	u_s	4, 0, 0
	u_c	3
\hat{v}	v_1	19, -3
	v_2	-4, 0, 0

표2에서 u_g 는 발전기의 하한값에 해당하는 라그랑지안 승수이고, u_s 는 슬랙변수의 라그랑지안 승수에 해당한다. v_1 의 첫 번째 항은 전력수급조건에 해당하는 라그랑지안 승수, 즉 계통한계비용(시스템 λ)이고, v_1 의 두 번째 항은 선로 조류 한계용량에 해당된다. v_2 는 발전기의 상한값에 해당하는 라그랑지안 승수이다. 선로조류 부등식 조건에서의 슬랙변수인 $x_c=0$ 이므로 선로3에서의 조류는 한계용량과 일치하는 200MW임을 알 수 있다.

각 모선의 한계비용은 식(3), (4)에서와 같이 혼잡비용이 계통한계비용(λ)에 추가되어 나타나는데 계산 예로써 3번 모선의 모션한계비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} MC_3 &= \text{발전단가}_3 - u_g(3) + v_2(3) \\ &= v_1(1) - 0 - (v_1(2) \times \frac{\partial P_{\beta}}{\partial P_{inj}}) \\ &\Rightarrow 18 - 0 + 0 = 19 - (3 \times 0.3333) = 18 \end{aligned}$$

모션1과 2에 대해서도 같은 방법으로 구해보면 $MC_1=19$, $MC_2=20$ 이다. 혼잡비용은 수용가에서 지불해야 하는 비용과 발전소에서 수령해야 하는 금액의 차이로 계산된다. 다음 표3은 각 모션에서의 혼잡비용 계산과정을 나타낸다.

표 3 각 모션에서의 혼잡비용
Table 3 Congestion charge of each bus

모션	수용가 지불 금액	발전소 수령 금액	혼잡비용
1	$19 \times 900 = 17100$	$19 \times 1000 = 19000$	$17100 - 19000 = -1900$
2	$20 \times 400 = 8000$	$20 \times 50 = 1000$	$8000 - 1000 = 7000$
3	$18 \times 300 = 5400$	$18 \times 550 = 9900$	$5400 - 9900 = -4500$
합계	30500	29900	$30500 - 29900 = 600$

계산결과, 전체 혼잡비용은 600이며, 모션 2에서 혼잡비용 7000으로 혼잡을 발생시키고 있음을 알 수 있다.

혼잡비용은 각 선로에 대해서도 계산할 수 있다. 선로양단 모션에서의 모션한계비용의 차이와 선로조류의 곱으로 계산된다.[9] 선로1에서는 조류 150MW와 한계비용 차이 1(=

20-19)의 값으로 150의 혼잡비용이 발생하며, 선로 2에서는 $50\text{MW} \times (19-18)=50$, 선로3에서는 $200\text{MW} \times (20-18)=400$ 을 발생시킨다. 따라서 전체혼잡비용은 $600(=150+50+400)$ 이 되어 모선에서 계산된 값과 일치함을 알 수 있다. 이러한 모선 한계비용과 혼잡비용은 전력가격요소에 대한 정보뿐만 아니라 송전 시스템의 새로운 투자를 위한 신호로도 이용 될 수 있다. 혼잡비용을 토대로 혼잡을 해결하기 위한 새로운 투자를 하거나 전력거래의 전략에 이용하여 보다 경제적인 운영을 할 수가 있다.

4.2 초기값 계산에 의한 수렴성 향상

사례연구 4.1과 동일한 계통에 그림 2와 같은 계단함수 형태의 입찰함수를 고려한다. 전체 부하 $2000\text{MW}(900\text{MW}, 800\text{MW}, 300\text{MW})$ 에 대해 전체 8개의 구간이 존재한다. 이러한 구간별 선형함수의 경우는 일반적으로 각각의 구간을 독립적인 가상발전기로 가정하여 8개의 발전기로 보고 OPF를 계산한다.

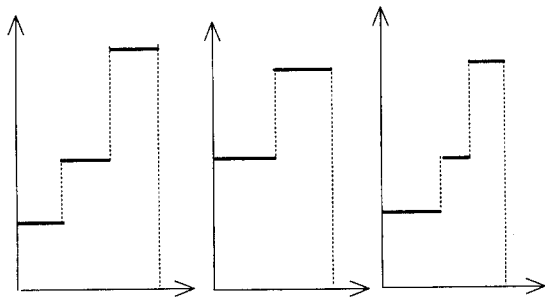


그림 2 각 발전기의 불연속 입찰함수
Fig. 2 Discrete bidding function of each generator

LP 해법을 통해 구해진 최적 발전력은 $300\text{MW}, 300\text{MW}, 0\text{MW}, 500\text{MW}, 150\text{MW}, 400\text{MW}, 350\text{MW}, 0\text{MW}$ 이다. 사례연구 4.1에서와 같이 이 값에 변위 $\epsilon(=1.0)$ 를 주어 interior로 만든 다음 그 값에 의해서 v, u 의 초기값을 구하면 다음 표4 와 같다.

표 4 x, v, u 의 interior 초기값
Table 4 Initial points of x, v, u in interior area

\hat{x}	x_g	299, 299, 1, 499, 160, 399, 342, 1
	x_s	1, 1, 499, 1, 340, 1, 158, 599
	x_c	5.6694
\hat{u}	u_g	-9.585, -2.285, 16.465, -5.303, 7.699, -5.868, -3.861, 13.1337
	u_s	1, 1, 0.002, 1, 0.0029, 1, 0.0063, 0.0017
	u_c	5.1532
\hat{v}	v_1	23.5855, -5.1532
	v_2	-1, -1, -0.002, -1, -0.0029, -1, -0.0063, -0.0017

x_g 의 초기값을 구하는 과정에서 선로조류의 부등식 제약 조건을 등식제약조건으로 변형하면서 생기는 슬랙변수 x_c

가 양의 값을 갖도록 x_g 초기값을 조정하였다. 이렇게 해서 구한 초기값을 가지고 식(17)의 문제에 Barrier 함수 기법을 적용하여 해를 구하면 다음 표5와 같은 결과를 얻는다.

표 5 Barrier 함수기법을 이용한 OPF 수행결과
Table 5 OPF results by barrier function method

\hat{x}	x_g	300, 300, 0, 500, 150, 400, 350, 0
	x_s	0, 0, 500, 0, 350, 0, 150, 600
	x_c	0
\hat{u}	u_g	0, 0, 14.5, 0, 0, 0, 0, 17
	u_s	12.5, 5.5, 0, 14, 0, 3, 0, 0
	u_c	22.5022
\hat{v}	v_1	25.5, -22.5022
	v_2	-12.5, -5.5, 0, -14, 0, -3, 0, 0

즉 1번 모선에 연결되어 있는 발전기의 출력은 600MW , 2번 모선에 연결되어 있는 발전기의 출력은 650MW , 3번 모선에 연결되어 있는 발전기의 출력은 750MW 가 된다. 표 5에서 선로조류 부등식 조건에서의 슬랙변수인 $x_c=0$ 이므로 선로3에서의 조류는 한계용량과 일치하는 200MW 임을 알 수 있다. 본 사례연구에서 사용한 파라미터 μ 의 변화는 다음 그림 3과 같이 1.0에서 시작해서 $\beta=0.95$ 로 하여 μ 값을 감소시키면서 300회 계산하였다.

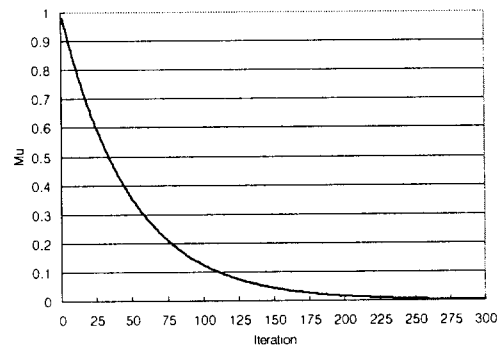


그림 3 반복에 따른 파라미터 μ 값
Fig. 3 μ -parameter at each iteration

이렇게 해서 구한 라그랑지안 승수 중 시스템 λ 는 25.5, 선로조류 한계용량에 해당하는 라그랑지안 승수인 22.5022를 이용하여 각 모선에서의 한계비용을 계산하면 각각 $25.5(=25.5-0-0)$, $33(=25.5-0+7.5)$, $18(=25.5-0-7.5)$ 이 된다. 각 모선에서의 혼잡비용은 각각 $7650(=25.5 \times 900 - 25.5 \times 600)$, $4950(=33 \times 800 - 33 \times 650)$, $-8100(=18 \times 300 - 18 \times 750)$ 으로 계산되어 전체 혼잡비용은 3900이고 1번 모선에서 가장 많이 혼잡을 발생시킴을 알 수 있다. 만약 제안한 최소 자승법의 v_0 대신에 임의로 정한[8] $v_0 = -1$ 을 사용하고 동일한 x 의 초기값을 가질 때 식(16)에 의해 u_0 를 구하면 다음 표6과 같고, 그에 대한 계산결과는 표7과 같다.

표 6 x, v, u 의 초기값 ($v_o = -1$ 일 경우)
Table 6 Initial points of x, v, u at $v_o = -1$

\hat{x}	x_g	299, 299, 1, 499, 160, 399, 342, 1
	x_s	1, 1, 499, 1, 340, 1, 158, 599
	x_c	5.6694
\hat{u}	u_g	15, 22, 42, 20.667, 34.667, 17.333, 20.333, 37.333
	u_s	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
	u_c	1
\hat{v}	v_1	-1, -1
	v_2	-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1

표 7 Barrier 함수기법을 이용한 OPF수행결과 ($v_o=-1$)
Table 7 OPF results by barrier function method at $v_o=-1$

\hat{x}	x_g	300.15, 299.96, 0, 500.178, 500.144, 399.924, 0, 0
	x_s	0, 0, 500, 0, 0, 0, 500, 600
	x_c	233.313
\hat{u}	u_g	0, 0, 11.551, 0, 0, 0, -10.449, 6.551
	u_s	15.45, 8.45, 0, 9.45, -4.55, 13.45, 0, 0
	u_c	0
\hat{v}	v_1	28.45, 0
	v_2	-15.45, -8.45, 0, -9.45, 4.55, -13.45, 0, 0

표 7에서 계산된 발전력 값이 허용범위를 벗어나는 등 최적값으로 수렴되지 않았음을 알 수 있다. 이와 같이 본 논문에서 제안한 초기값 계산 알고리즘으로 수렴성이 향상됨을 확인하였다.

4. 결 론

송전망이 개방된 전력계통에서 합리적인 송전가격 결정과 새로운 투자전략을 위해서는 혼잡비용의 계산은 필수적이다. 본 연구에서는 각 모선과 선로에서의 혼잡비용을 잠재가격과 모선한계비용을 이용하여 계산하는 방법과 의미를 분석하였다. 또한 초기값에 따라 수렴성이 크게 달라지는 IP 알고리즘에서의 Barrier 함수 기법에서 수렴성을 향상시키는 초기값 계산 알고리즘을 제안하였고 사례연구를 통해 그 타당성을 입증하였다. 본 연구 결과는 경쟁적 전력거래에서 OPF와 모선한계비용, 혼잡비용을 계산하는데 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구(관리번호: 99-012)는 한국전력공사의 지원에 의한 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

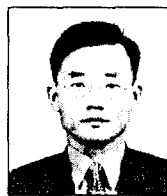
참 고 문 헌

[1] S. Hunt, G. Shuttleworth, *Competition and choice in Electricity*, John Wiley & Sons, 1996.
[2] H. Singh, A. Papalexopoulos, "Transmission

Congestion Management in Competitive Electricity Markets," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.2, pp.672-680, May 1998.

[3] R. S. Fang, A. K. David, "Transmission Congestion Management in an Electricity Market," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No.3, pp.877-883, August 1999.
[4] A. Papalexopoulos, H. Singh, G. Angelidis, "Congestion Management by an Independent System Operator," Pacific Gas and Electric company, San Francisco, California, pp.1-19, 1998.
[5] M. Einhorn, R. Siddiqi, *Electricity Transmission Pricing and Technology*, Kluwer Academic Publishers, 1996.
[6] T. W. Gedra, "On Transmission Congestion and Pricing," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No.1, pp.241-248, February 1999.
[7] A. A. El-Keib, X. Ma, "Calculating Short-Run Marginal Cost of Active and Reactive Power Production," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.2, pp.559-565, May 1997.
[8] M. S. Bazarra, H. D. Sherali, C. M. Shetty, *Nonlinear Programming*, John Wiley & Sons, 1993.
[9] H. Glavitsch, F. Alvarado, "Management of Multiple Congested Conditions in Unbundled Operation of a Power System," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.3, pp.1013-1019, August 1998.
[10] J. D. Finney, H. A. Othman, W. L. Rutz, "Evaluation Transmission Congestion Constraints in System Planning," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, No.3, pp.1143-1148, August 1997.

저 자 소 개



이 광 호 (李光浩)

1965년 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 단국대 공대 전기공학과 조교수

Tel : 02-709-2868

E-Mail : mania49d@ns.dankook.ac.kr



정 재 옥 (鄭在玉)

1976년 6월 10일생. 1999년 안양대 공대 전기공학과 졸업. 현재 단국대 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 02-709-2583

E-Mail : jjo7946@ns.dankook.ac.kr