

# 전력소비자 특성을 고려한 최적조류계산

## The Optimal Power Flow Considering the Characteristics of Electric Power Consumers

金文永\* · 白榮植\*\* · 宋敬彬\*\*\*

(Moon-Young Kim · Young-Sik Baek · Kyung-Bin Song)

**Abstract** - In a deregulated electric power market, a demand function to consider the characteristics of electric power consumers should be required. It is essential that the optimal power flow algorithm with object function of social welfare maximization using the demand function for a competitive electric power market is applied to resolve in a point of economic benefits as well as the security of power systems. Therefore, in this paper, we implement the optimization problem based on linear programming to consider the characteristics of electric power consumers using the demand function and analyze not only the nodal cost for generations and demands but also the variation of demands as a function of the characteristics of electric power consumers through numerical studies.

**Key Words** - demand function, optimal power flow, social welfare maximization, nodal cost

### 1. 서 론

전통적인 최적조류계산(OPF : Optimal Power Flow)은 전력계통의 안전성과 경제성을 동시에 고려하는 계통 운용의 필수적인 도구이다. 최적조류계산은 전력방정식을 포함하는 등식제약과 발전용량 및 송전선 용량을 포함하는 부등식조건을 만족하는 발전비용을 최소화하는 최적화 문제로 정의된다. 전력시장이 독점에서 경쟁체제로 변화하면서 최적조류계산은 송전선 혼잡처리 뿐만 아니라 송전요금 산정 등의 계통의 최적운전을 위한 기법으로 널리 이용되고 있다.

전통적인 최적조류계산 문제에서 제어변수는 발전력, 탭 비율 등이 있으며, 전력수요는 알려진 상수로 취급되었다. 경쟁적 전력시장에서는 전력의 공급자와 수요자 모두가 전력의 공급과 수요를 조절 가능하다는 전제하에 운용되므로, 전력수요는 전력가격에 탄력적으로 변화하는 변수로써 수요함수로 표현 가능하고, 경쟁적 전력시장에 참여자인 전력소비자의 특성을 연구할 동기가 부여된다. 1990년 이후 전력산업의 구조개편과 관련하여 생산자의 잉여(producer surplus)와 소비자의 잉여(consumer surplus)의 집합으로 나타나는 사회후생(social welfare) 최대화를 목적함수로 하는 최적조류계산에 대한 연구가 최근 많이 보고되고 있다.[1,2,3,4]

국내의 연구는[3] 최적조류계산의 정식화와 더불어 신규 발전사업자의 모선 접속 유·무에 따른 송전선 사고나 혼잡

에 대한 모선가격 등을 분석하였다. 현재까지의 대부분의 연구는 모선가격의 분석을 발전사업자의 입장에서 연구의 초점 두었다.

따라서, 본 연구에서는 경쟁적인 전력시장 하에서 전력시장의 새로운 참여자인 전력소비자 특성을 고려하기 위해 수요자의 특성을 반영한 수요함수(demand function)를 고려하여 사회후생을 최적화 하는 문제를 연구하고 분석한다. 전력시장을 운용함에 있어 발전비용을 최소화함과 동시에 전력소비자에게 최소의 비용으로 안전하고 경제적인 전력을 공급하기 위해서는 전력소비자 특성을 반영하고 계통의 송전선 용량제약을 동시에 처리하는 최적화 방법에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 수요 탄력성(demand elasticity)을 도입하여 전력소비자의 성향을 포함하는 수요함수와 전력소비자에 대한 편익함수(benefit function)를 구성하고, 사회후생 최대화를 목적함수로 하는 연속적인 선형계획법(successively linear programming)을 이용한 최적화 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘을 다양한 연구사례에 적용해 각 모선의 발전력 및 전력수요와 모선비용의 변화를 분석하고, 전력소비자 특성에 따른 모선비용과 전력수요 변화율의 영향 등을 분석하여 전력소비자의 성향에 따른 전력시장 운용의 기본자료를 제공하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 전력소비자의 특성을 고려한 최적화 문제의 정식화

경쟁적 전력시장에 적합한 평가함수는 계통운영의 물리적, 기술적 제약조건을 만족하면서 전력소비자와 생산자의 잉여를 최대화 하는 즉, 시장 참여자들의 이익을 최대화 하는 사회후생 최대화를 목적함수로 하는 최적화 문제이다. 사회후

\* 正 會 員 : 韓國原子力安全技術員 先任研究員 · 工博

\*\* 正 會 員 : 慶北大學 電子電氣工學部 正教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 崇實大學 電氣制御工學部 專任講師 · 工博

接受日字 : 2002年 6月 28日

最終完了 : 2002年 11月 27日

생 최대화를 평가함수로 하는 모델을 정식화하면 다음의 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Max : \sum_{j=1}^{ND} B_j(P_{Dj}) - \sum_{i=1}^{NG} C_i(P_{Gi}) \quad (1)$$

Subject to

$$P_{Gi} - P_{Di} - P_{Ti} = 0$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{Ti} = 0$$

$$P_{Di} = D_i(P_{Ci})^{E_i}$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}$$

$$LF_{ij} \leq LF_{ij}^{max}$$

$$P_{Di}^{min} \leq P_{Di} \leq P_{Di}^{max}$$

여기서, NG는 발전기 수이고 ND는 부하의 수이다.  $P_{Gi}$ 와  $Q_{Gi}$ 는 모선 i에서의 유·무효전력 발전량을 나타내며,  $P_{Dj}$ 와  $Q_{Dj}$ 는 모선 j에서의 유·무효전력 수요량을 나타낸다.  $C_i(P_{Gi})$ 는 발전기 i에서의 유효전력 발전에 대한 비용함수이고,  $B_j(P_{Dj})$ 는 모선 j에서의 유효전력 소비에 대한 편익함수이다.

$P_{Ti}$ 와  $Q_{Ti}$ 는 모선 i에서의 유·무효전력의 선로조류량을 나타낸다.  $D_i$ 는 개별 수요에 대한 수요 상수를 나타내며,  $E_i$ 는 수요 탄력성을 의미하고,  $P_{Ci}$ 는 모선 i에서의 전력비용을 나타낸다.  $P_{Gi}^{max}$ 와  $P_{Gi}^{min}$ 는 발전기의 유효전력 용량 상·하한,  $Q_{Gi}^{max}$ 와  $Q_{Gi}^{min}$ 는 발전기의 무효전력 용량 상·하한,  $P_{Di}^{max}$ 와  $P_{Di}^{min}$ 는 수요의 유효전력 용량 상·하한을 각각 나타낸다.  $LF_{ij}$ 는 모선 i, j 사이의 선로조류이고,  $LF_{ij}^{max}$ 는 모선 i, j 사이의 선로조류 용량 상한이다.

발전비용을 최소화하는 전통적인 최적조류계산의 정식화와 비교할 때, 목적함수에서 사회후생 최대화 목적함수로 변화될 뿐 아니라 수요함수가 등식 제약조건으로 포함되고, 수요의 상·하한 용량제약이 부등식 제약조건으로 포함되는 것이 큰 차이점이다.

전력수요는 부하차단(load shedding)과 같은 특정 경우를 제외하고는 비용 최소화 최적조류계산 문제에서 조정 가능한 제어변수가 되지 않는 상수로 취급된다. 그러나, 경쟁적 전력시장의 구조에서 전력소비자들도 전력시장에 참여하게 되므로 소비자들의 전력소비는 그들의 성향에 따라 변화될 수 있다. 전력소비자들은 특히 전력비용의 변화에 따라 탄력적으로 반응할 것이다. 따라서, 부하는 전력비용에 따라 변화되므로 최적조류계산 문제에서 잠재적인 제어변수가 될 수 있다. 그러므로, 사회후생 최대화 목적함수의 최적화 문제에서 수요함수의 고려는 중요하다. 또한, 전력소비자에 대한 편익함수의 수학적 표현식은 수요함수로부터 유도된다. 수요함수는 전력비용에 따라 변하는 비용의 함수로써 그림 1과 같이 일반적으로 나타낸다.

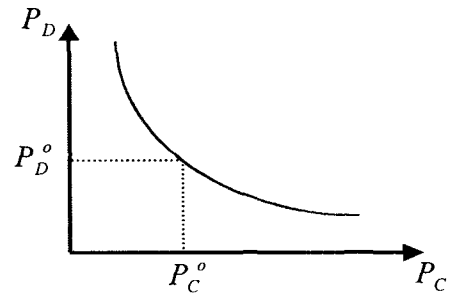


그림 1 수요 곡선  
Fig. 1 Demand curve

경쟁적 전력시장에서의 수요측 입찰모델은 계단형 단조감소 형태를 가지게되나, 본 논문에서는 수요함수 표현에 대하여 보고된 문헌[1,2,5,6]을 바탕으로 계단형 단조감소 형태를 지수함수 형태로 가정한다. 그림 1로부터 다음의 식(2)와 같은 지수함수 형태로 표현된다.

$$P_{Di} = D_i(P_{Ci})^{E_i} \quad (2)$$

그림 1에서 초기비용 점  $P_C^o$ 가 주어졌다고 가정하면 식(2)에서 지수형태의 수요함수를 식(3)과 같은 일차함수로의 근사화 표현이 가능하다.

$$P_{Di} = \alpha_i P_{Ci} + \beta_i \quad (3)$$

식(3)의 수요함수로서 전력소비자 편익함수를 도출할 수 있다. 수요함수의 역함수는 전력소비의 한계이익(marginal benefit)을 나타내며, 이 함수의 적분형이 전력소비자의 특성함수인 편익함수가 된다. 따라서, 전력소비자의 편익함수는 다음의 식(4)와 같이 수학적으로 표현된다.

$$\begin{aligned} B_i(P_{Di}) &= \int_0^{P_{Di}} P_{Ci} dq \\ &= \frac{1}{2\alpha_i} P_{Di}^2 - \frac{\beta_i}{\alpha_i} P_{Di} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ 는 수요 상수( $D_i$ )와 수요 탄력성( $E_i$ )로부터 유도된 것이며 전력소비자의 특성을 나타내는 계수값들이다.

## 2.2 정식화된 문제의 선형화

본 논문에서는 유효전력과 무효전력부분을 분할하여 문제를 처리하며, 경제적인 부문에서 관심이 높은 유효전력 부문에 관심을 집중한다. 사회후생 최대화를 목적함수로 하는 정식으로부터 목적함수와 제약조건들을 선형화하고, 목적함수는 최소화 문제로 변형한다. 따라서, 연속적인 선형계획법을 이용하기 위해 전력소비자의 특성을 고려한 최적화 문제는 다음의 식(5)와 같이 선형화된다.

$$\text{Min} : \left( \sum_{i=1}^{NG} \frac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}} \cdot \Delta P_{Gi} \right) - \left( \sum_{j=1}^{ND} \frac{\partial B_j(P_{Dj})}{\partial P_{Dj}} \cdot \Delta P_{Dj} \right) \quad (5)$$

Subject to

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_i} \right] [\Delta \delta_i] &= [\Delta P_{Gi}] & \sum_{i=1}^{NG} \Delta P_{Gi} &= 0 \\ \left[ \frac{\partial P_{Dj}}{\partial P_{Ci}} \right] [\Delta P_{Ci}] &= [\Delta P_{Dj}] & \sum_{i=1}^{ND} \Delta P_{Di} &= 0 \\ [S^{(i,j)}]^T [\Delta P_{Gi}] &\leq [\Delta LF^{(i,j)}] \\ - [S^{(i,j)}]^T [\Delta P_{Dj}] &\leq [\Delta LF^{(i,j)}] \\ \Delta P_{Gi}^{\min} &\leq \Delta P_{Gi} \leq \Delta P_{Gi}^{\max} \\ \Delta \delta_i^{\min} &\leq \Delta \delta_i \leq \Delta \delta_i^{\max} \\ \Delta P_{Di}^{\min} &\leq \Delta P_{Di} \leq \Delta P_{Di}^{\max} \\ \Delta P_{Ci}^{\min} &\leq \Delta P_{Ci} \leq \Delta P_{Ci}^{\max} \end{aligned}$$

식(5)에서  $\Delta P_{Gi}$ ,  $\Delta P_{Dj}$  가 최적의 목적함수 상태를 조정하는 제어변수가 된다. 등식 제약조건에서 조류 방정식의 유효 전력에 대한 Jacobian 성분에서 유효 발전력은 모선 전압 위상각( $\delta_i$ )의 변화에 대부분 민감하므로 유효전력 성분만에 대한 최적화 문제를 다룬다. 또한, 유효전력 수요는 비용에 대한 함수이므로 비용변화에 대한 유효전력 수요의 변화량으로 선형화 된다. 부등식 제약조건에서  $[\Delta LF^{(ij)}]$ 는 모선 i, j 사이의 송전 선로 최대 유효전력 용량에서 현재 선로에 흐르고 있는 유효전력 선로 조류량의 차이로써 모선 i, j 사이의 송전 선로 유효전력 여유 용량을 나타낸다.  $[S^{(ij)}]$ 는 선로조류 민감도 행렬로서 발전기 출력의 변화량에 대한 각 송전선로에 대한 영향 정도를 나타내는 행렬이다.[7,8]

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \frac{\partial P_{G1}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{G2}}{\partial \delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \frac{\partial P_{G1}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{G2}}{\partial \delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{D1}}{\partial P_{C1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{D1}}{\partial P_{C2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{D2}}{\partial P_{C1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \frac{\partial P_{D2}}{\partial P_{C2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{G2} \\ \Delta P_{G3} \\ \Delta \delta^2 \\ \Delta \delta^3 \\ \Delta P_{D1} \\ \Delta P_{D2} \\ \Delta P_{D3} \\ \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \\ \Delta P_{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)은 식(5)의 등식제약조건을 행렬로 표현한 것이다.

전력소비자의 특성을 고려한 최적화 문제를 연속적인 선형계획법[9,10,11]을 이용하여 풀기 위해 다음의 절차를 수행한다.

- 1 발전기 및 부하의 초기 발전량과 수요량을 입력한다.
- 2 초기 발전량과 수요량으로 조류계산을 수행한다.

- 3 부등식 제약을 검사하여 위반사항이 발견되면 제거한다.
- 4 제약조건 위반 없는 조류계산을 수행한다.
- 5 최적화 문제의 초기 목적함수를 계산한다
- 6 선형계획법을 이용하여 전력소비자의 특성과 제약조건을 포함한 식(5)의 최적화 문제를 푼다.
- 7 발전량과 수요량의 최적화 해를 갱신한다.
- 8 새로운 수요량과 발전량으로써 목적함수를 계산한다.
- 9 목적함수의 변화량이 수렴되면 결과를 출력하고, 그렇지 않으면 조류계산을 수행하여 선형화 오차를 개선하고, 연속적인 선형계획법을 적용하기 위해 새로운 운전점에서 다시 선형화하여 4) ~ 9)의 절차를 반복한다.

그림 2는 전력소비자의 특성을 고려한 최적화 문제에 대한 알고리즘을 나타낸 것이다.

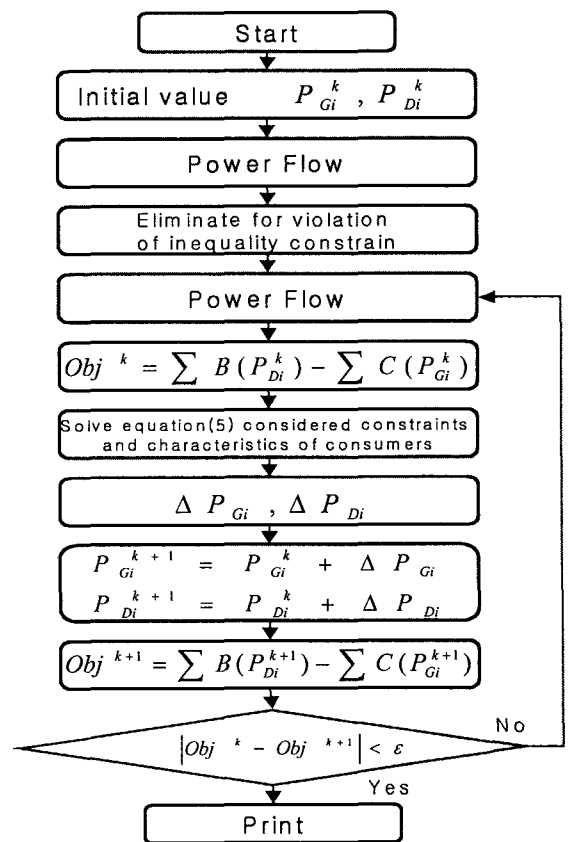


그림 2 전력소비자 특성을 고려한 최적화 문제 알고리즘  
Fig. 2 The optimization algorithm considering the characteristics of electric power consumers

### 2.3 사례 연구

전력소비자의 특성을 고려한 최적화 문제에 대한 사례연구를 위해 4모선 4선로 계통을 이용하여 모선의 발전력 및 전력수요의 변화와 모선비용을 분석하였다. 사례연구의 모선 데이터는 표 1에 제시하고, 선로 데이터는 표 2에 나타낸다.

표 1 사례연구에 사용된 모선 데이터

Table 1 Bus data for case studies

Generation Data					
Bus No	a	b	c	$P_G^{min}$ [MW]	$P_G^{max}$ [MW]
1	561	7.0	0.001562	5	50
3	78	9.0	0.00482	5	30
Load Data					
Bus No	D	E	$P_c^\circ$	$P_D^{min}$ [MW]	$P_D^{max}$ [MW]
2	20.0	-0.2	7	5	20
4	35.0	-0.3	9	5	35

표 2 사례연구에 사용된 선로 데이터

Table 2 Line data for case studies

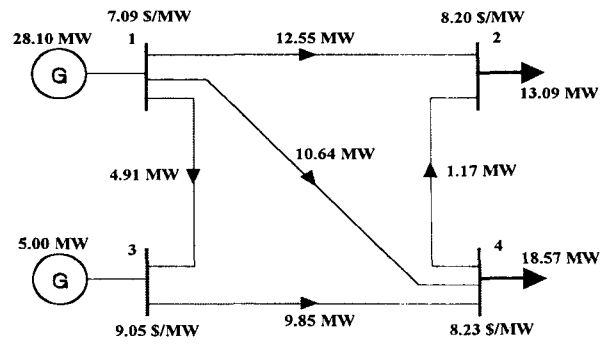
Between Buses	R	X	$LF^{max}$ [MW]
1 - 2	0.4	0.5	20
1 - 3	0.3	0.45	12
1 - 4	0.45	0.55	20
2 - 4	0.25	0.33	13
3 - 4	0.2	0.4	15

표 1에서 a, b, c는 발전기 연료비용 함수( $a+bP_{Gi}+cP_{Gi}^2$ )의 각각 계수를 나타내며, D, E,  $P_c^\circ$ 는 수요함수의 계수를 결정하는 상수항으로 수요 상수, 수요 탄력성 및 초기 비용을 각각 나타낸다.

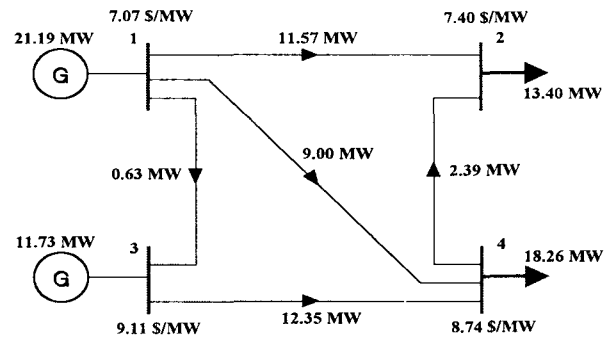
선로용량제약을 고려한 사례연구

그림 3은 제시한 최적화 문제 수행 결과를 모선 1번과 모선 4번 사이의 선로용량이 20MW인 경우와 9MW인 경우를 비교하여 나타낸 그림이다. 최적화 문제의 수행 결과로 나타나는 발전력과 전력수요 및 선로조류 그리고 모선비용을 비교한다. 계통의 제약에 도달하게 되면 수요공급 곡선의 일치점으로부터 얻어지는 최적값이 존재하지 못하므로, 본 연구에서는 최적화 문제의 결과로 나타나는 잠재적인 비용 (shadow cost)인 모선비용으로써 비교한다. 모선비용은 발전기 i에서의 한계비용을 발전단 모선비용으로, 부하 i에서의 한계편익을 부하단 모선비용으로 설정한다.

그림 3의 (a)는 모선 1번과 모선 4번 사이의 선로용량이 20MW인 경우 최적조류계산 결과를 나타낸다. 1번 모선의 발전력은 28.10MW이고, 3번 모선의 발전력은 5MW로써 발전력 하한에 도달한 결과를 알 수 있으며, 2번 모선의 수요는 13.09MW이고, 4번 모선의 수요는 18.57MW이다. 모선 1



(a) 모선 1 - 4 선로용량 20MW



(b) 모선 1 - 4 선로용량 9MW

그림 3 4 모선 계통

Fig. 3 4 bus system

번과 모선 4번 사이의 선로에 10.64MW의 전력조류가 흐르고 있는데, 이 선로에 선로용량제약을 9MW로 현재 전력조류에 비해 낮추어 설정하고 다시 최적화 문제를 수행한다.

그림 3의 (b)는 모선 1번과 모선 4번 사이의 선로용량이 9MW인 경우 최적조류계산의 결과를 나타낸다. 모선 1번과 모선 4번 사이의 선로에 9MW의 전력조류로써 선로용량 상한에 도달한 결과를 알 수 있다. 1번 모선의 발전력은 21.19MW이고, 3번 모선의 발전력은 11.73MW이며, 2번 모선의 수요는 13.40MW이고, 4번 모선의 수요는 18.26MW이다.

그림 3의 (a)와 (b)를 비교해보면, 선로용량제약에 도달하지 않은 경우(a) 4번 모선의 수요는 18.57MW 이지만, 선로용량제약에 도달한 경우(b) 4번 모선의 수요는 18.26MW으로 1.7% 전력소비가 감소되었다. 이는 선로용량 상한에 도달함에 따라 4번 모선의 모선비용이 8.23 [\$/MW]에서 8.74 [\$/MW]로 6.2% 증가된 결과에 따른 전력소비자가 모선비용 증가에 반응하여 4번 모선의 전력수요가 감소된 결과이다. 상대적으로, 2번 모선은 8.20 [\$/MW]에서 7.40 [\$/MW]으로 9.8% 모선비용 감소에 따라 13.09 [MW]에서 13.40 [MW]으로 전력수요의 2.4% 증가를 보였다. 전체적인 전력소비는 동일하나 전력소비자의 특성이 비용에 민감하게 반응하므로 전력소비자의 편익이 최대가 되는 방향으로 전력수요의 재분배가 형성된다.

표 3에서 그림 3의 4모선 사례연구 계통에 대한 최적화 문제의 실행 결과들을 비교한다. 표 3에서 그림 4의 (a)인 경우 최적조류계산 실행에 대해 총 발전비용은 882.02 [\$/MW]

표 3 사례 연구 결과

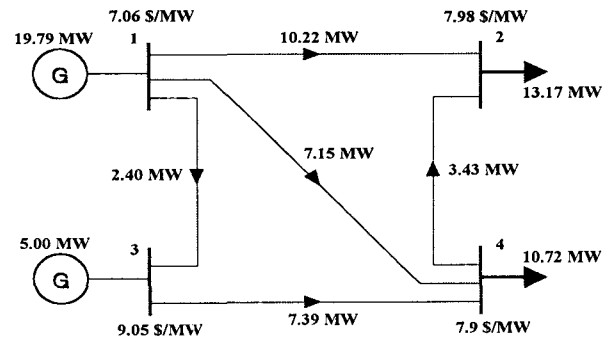
Table 3 Numerical results

Between Buses	(a) 모선 1 - 4 선로용량 20MW		(b) 모선 1 - 4 선로용량 9MW	
	LF <sup>max</sup> [MW]	LF[MW]	LF <sup>max</sup> [MW]	LF[MW]
1 - 2	20	12.55	20	11.57
1 - 3	12	4.91	12	0.63
1 - 4	20	10.64	9	9
2 - 4	13	1.17	13	2.39
3 - 4	15	9.85	15	12.35
Gen. Bus	P <sub>G</sub> [MW]	Marginal Cost	P <sub>G</sub> [MW]	Marginal Cost
1	28.1	7.09	21.19	7.07
3	5.0	9.05	11.73	9.11
Load Bus	P <sub>D</sub> [MW]	Marginal Benefit	P <sub>D</sub> [MW]	Marginal Benefit
2	13.09	8.20	13.40	7.40
4	18.57	8.23	18.26	8.74
Total Gen. Cost	882.02		894.34	
Total Load Benefit	767.02		766.81	

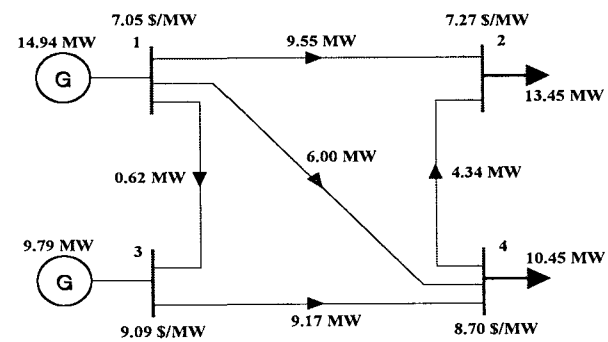
이고, 총 수요편익은 767.02 [\$ /MW]이었으며, 그림 4의 (b)인 경우 총 발전비용은 894.34 [\$ /MW]이고, 총 수요편익은 766.81 [\$ /MW]이다. (b)의 경우는 (a)의 경우와 비교해서, 선로용량의 감소에 따라 선로용량 상한제약에 도달하였으므로 전체 발전비용은 증가되었으며 전체 수요편익은 감소되었다.

표 3에서와 같이 최적화 문제의 수행 결과에서 선로조류가 송전선로의 용량제약에 도달하게 되면 선로조류를 유발하는 모선의 모선비용이 증가하게 된다. 모선비용의 증가는 전력비용에 민감한 전력소비자 입장에서는 전력소비를 줄이려는 노력을 하게 된다. 전력소비의 감소는 용량제약에 도달한 선로의 전력조류를 줄이게 되므로 계통 전체의 유기적인 전력조류에 효율적인 영향을 주게 된다. 따라서, 전력수요는 발전 전력의 변화와 더불어 최적화 문제의 제어변수가 된다. 최적화 문제의 제어변수로서의 전력수요는 그 변화량이 전력소비자의 특성에 따라 달라지게 된다. 즉, 소비자 성향이 비용변화에 대해 민감한 정도가 서로 다를 것이며 비용에 대한 민감도가 큰 수요특성을 가지는 전력소비자일수록 비용정책을 이용하면 더 효율적이고 계통운영에 있어 경제적이고 합리적인 전력공급을 이룰 수 있다.

수요 탄력성을 고려한 사례연구



(a) 모선 1 - 4 선로용량 20MW



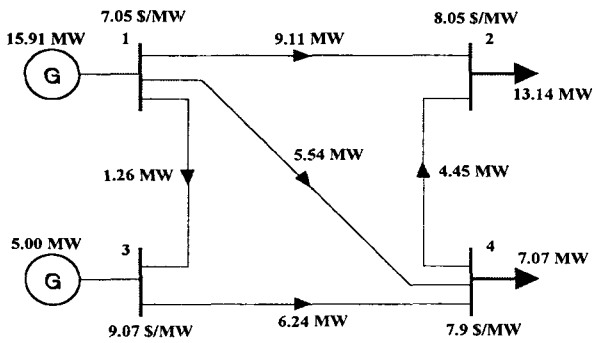
(b) 모선 1 - 4 선로용량 6MW

그림 4 모선4에서 수요탄력성이 -0.3인 경우 최적화 결과  
Fig. 4 The results of the optimization in a case of -0.3 demand elasticity at bus 4

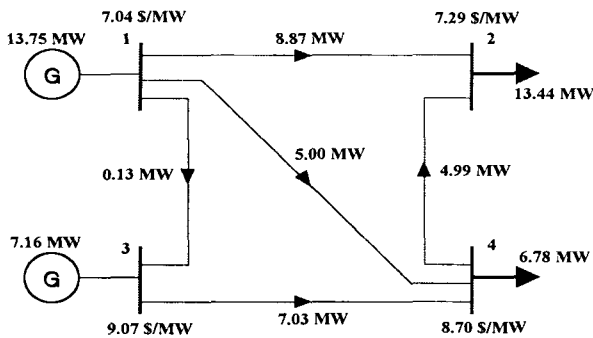
비용에 대한 전력소비자특성을 수요 탄력성으로 설정하고 최적화 문제를 수행하여 전력수요의 변화를 분석한다. 표 1에서 제시한 모선 입력 데이터에서 다른 외생변수들은 일정한 것으로 가정하기 위해 4번 모선의 수요 상수 값을 20으로 설정한다. 따라서, 수요 상수 값은 모두 20으로 동일하고 수요 탄력성 값이 서로 다른 소비자 특성을 가지게 된다. 그림 4와 그림 5는 소비자 성향에 따른 특성을 분석하기 위해 수요 탄력성의 값에 따른 최적화 문제의 수행 결과를 비교하여 나타낸다.

그림 4와 5에서 (a)는 모선 1번과 모선 4번 사이의 선로용량이 20MW인 경우이고, (b)는 모선 1번과 모선 4번 사이의 선로용량을 (a)의 선로조류를 참조하여 선로용량제약에 도달하도록 설정하였다. 그림 4에서 -0.3의 수요 탄력성 값을 가지는 4번 모선의 경우, (a)의 최적화 결과는 모선비용이 7.9 [\$ /MW]이고 (b)의 최적화 결과는 모선비용이 8.7 [\$ /MW]로써 10.13%의 모선비용 증가가 나타났다. 그 결과, 4번 모선의 전력수요는 10.72MW에서 10.45MW로 2.52%의 수요 감소가 발생됨을 볼 수 있다.

그림 5는 -0.5의 수요 탄력성 값을 가지는 4번 모선의 경우를 나타낸다. (a)의 최적화 결과는 모선비용이 7.9 [\$ /MW]



(a) 모선 1 - 4 선로용량 20MW



(b) 모선 1 - 4 선로용량 5MW

그림 5 모선4에서 수요탄력성이 -0.5인 경우 최적화 결과  
Fig. 5 The results of the optimization in a case of -0.5 demand elasticity at bus 4

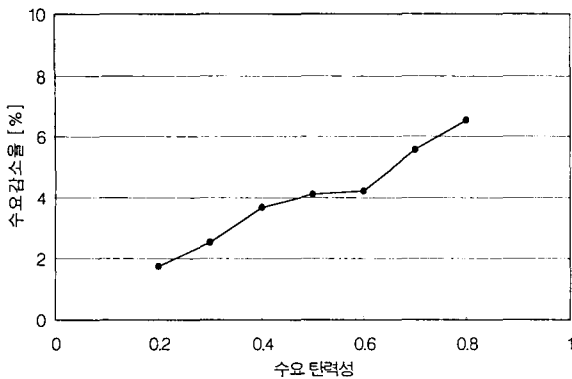


그림 6 수요 탄력성 변화에 따른 4번 모선의 수요감소율  
Fig. 6 The variation of the rate of demand reduction as a function of the demand elasticity at bus 4

이고 (b)의 최적화 결과는 모선비용이 8.7 [\$ /MW]로써, 그림 4의 경우와 같이 10.13%의 같은 모선비용 증가가 나타날 때, 4번 모선의 전력수요는 7.07MW에서 6.78MW로 4.10%의 수요 감소가 발생됨을 볼 수 있다. 이와 같이, 모선비용의 같은 증가 변화에도 불구하고 수요 감소의 변화율이 서로 다른 이유는 비용에 대해서 서로 다른 탄력성을 갖는 다른 서로 다른 수요특성을 가진 전력소비자이기 때문이다.

그림 6은 수요특성을 포함하는 수요 탄력성의 변화에 따른 4번 모선의 수요감소율을 나타낸다. 그림 6에서와 같이, 수요 탄력성이 증가할수록 수요감소율의 변화는 높게 나타남을 볼 수 있다. 그러므로, 최적화 문제의 제어변수로써의 전력수요는 그 변화량이 전력소비자의 특성에 따라 달라짐을 확인할 수 있다. 결국, 전력소비자들에 대해 비용정책을 이용한다면 비용에 대한 민감도가 큰 수요특성을 가지는 전력소비자일수록 더 효율적이고 계통을 운영하는데 있어 보다 경제적이고 안정적인 뿐만 아니라 합리적인 전력공급을 이룰 수가 있다.

### 3. 결 론

수요함수와 전력소비자에 대한 편익함수의 수학적 표현식으로부터 전력소비자 특성이 고려된 경쟁적 전력시장에 적합한 사회후생 최대화를 목적함수로 하는 최적화 모델을 정식화하고 선형화하였으며 연속적인 선형계획법을 이용하여 사례연구를 수행하였다. 사례연구의 결과를 분석하면, 송전선로의 용량제약을 야기하는 모선의 모선비용이 증가하여 비용에 민감한 소비자 입장에서는 전력소비를 줄이는 현상이 발견되었다. 전력소비자 특성을 포함하는 수요 탄력성의 값에 따른 최적화 알고리즘 수행 결과의 비교 분석에서는 수요 탄력성이 클수록 수요감소율의 변화는 높게 나타났으며, 알고리즘 수행 시, 변수로써의 전력수요는 그 변화량이 전력소비자의 특성에 의존함을 확인하였다. 사례연구의 결과를 종합해 볼 때, 전력소비자도 시장의 참여자로서 계통의 조류흐름에 변화를 주며 모선비용 등에 영향을 주어 송전요금과 전력요금에 발전사업자에 대해 역의 영향을 행사한다. 본 연구의 방법을 보다 체계화하여 가격정책의 규칙이나 수요관리 등에 이용하면 사회후생을 크게 개선할 것으로 예측된다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. D. Weber and T. J. Overbye, "Inclusion of price dependent load models in the optimal power flow", Proceedings of International Conference on System Sciences, Vol. 3, pp. 62-70, 1998
- [2] J. Y. Choi, "Optimal real time pricing of real and reactive powers", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 1226-1231, 1998
- [3] 허돈, 박종근, 김발호, "경쟁적 전력시장 하에서의 최적조류계산 응용에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 제50권, 8호, pp. 379-387, 2001. 8.
- [4] A. K. David, "Effect of inter-temporal factors on the real time pricing of electricity", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 44-52, 1993
- [5] M. L. Baughman and S. N. Siddiqi, "Real-time pricing of reactive power: theory and case study results", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 23-29, 1991
- [6] M. L. Baughman and S. N. Siddiqi, "Advanced pricing in electrical systems. I. Theory", IEEE Transactions on

- Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 489-495, 1997
- [7] D. Richard, "Transmission management in the deregulated environment", Proceedings of IEEE, Vol. 88, pp. 170-195, 2000
- [8] N. Y. Chin, "Congestion cluster based markets for transmission management", Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, pp. 821-832, 1998
- [9] G. Huang, K. Song, "A simple two stage optimization algorithm for constrained power economic dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1818-1824, 1994
- [10] O. Alsac, "Further developments in LP-based optimal power flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 697-711, 1990
- [11] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control", Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1996

## 저 자 소 개



### 김 문 영 (金文永)

1970년 6월 28일생. 1996년 경북대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국원자력안전기술원 선임연구원.

Tel : (042) 868 - 0585

E-mail: k491kmy@kins.re.kr



### 백 명 식 (白榮植)

1950년 7월 8일생. 1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1977년 명지대 전기공학과 조교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수.

Tel : (053) 950 - 5602

E-mail : ysbaek@bh.knu.ac.kr



### 송 경 빈 (宋敬彬)

1963년 9월 15일생. 1986년 연세대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 Texas A&M 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 LG-EDS 시스템 전문과장. 1996년 한전전력연구원 선임연구원. 1998년 대구효성가톨릭대학교 전임강사.

2002년 계명대학교 공학부 전임강사. 현재 숭실대학교 전기제어시스템공학부 전임강사

Tel : (02) 820 - 0648

E-mail : kbsong@ee.ssu.ac.kr