

소비자의 가격탄력성을 고려한 최적조류계산

정상현* 신영균 김발호
홍익대학교

Optimal Power Flow Considering Price Elasticity of Customer

Sang Houn Joung* Young Gyun Shin Balho H. Kim
HONGIK UNIVERSITY

Abstract - The Optimal Power Flow(OPF) is the optimization model that has different constraints and the specified objective function, which is very useful tool for efficient system and market operation in the competitive electricity market. The existed OPF models focus on the minimization of generation fuel cost under informed demand values at each bus. Recently, the studies of OPF model with demand function considering the response behavior of customers in the deregulated electricity market have been executed. This paper implements the OPF model using demand function with specified price elasticity, and provides the analysis of related results.

1. 서 론

전력산업에 "경쟁(competition)"의 개념이 도입된 이후, 보다 효율적인 계통운용과 규제완화된 전력시장의 진보를 위한 다양한 연구가 시도되고 있다. 이러한 경쟁의 효과는 다양한 시장참여자에게 공정하고 투명한 결과를 제공함으로써 궁극적으로 사회후생(social welfare)의 극대화 및 전력요금의 안정을 유도하는 것이다. 경쟁적 전력시장에서 이용가능한 많은 도구 가운데 최적조류계산(Optimal Power Flow)은 그 활용성과 성능면에서 단연 우수한 도구임이 분명하며, 많은 전력분야에서 다양한 응용을 통해 적극적인 연구가 활발히 수행되고 있다.

발전, 송전, 배전(판매) 및 소비의 경계가 명확히 구분될 수 있는 경쟁적 전력시장에서 공급자측의 시장특성과 더불어 무엇보다도 중요한 것이 바로 소비자의 경쟁적 행동이라 할 수 있다. 과거 대부분의 최적조류계산 연구에서는 소비자(혹은 부하)의 수요를 고정된 값으로 처리하였으나, 최근에는 소비자의 가격응답특성을 고려한 최적조류계산의 응용연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다[1,2,3].

본 연구에서는 소비자의 가격탄력성이 일정한 수요함수를 도입하여 최적조류계산을 구현하고, 계통혼잡과 가격탄력성에 따른 소비자의 가격응답특성 결과를 분석함으로써, 경쟁시장에서의 OPF 활용성에 대해 살펴보고자 한다.

2. 본 론

편익함수(benefit function)

경쟁적 전력시장에서 소비자가 가격에 대해서 일정한 가격탄력성을 가지고 응답한다고 가정하고, 수요함수를 다음과 같이 가격탄력성이 일정한 가격에 대한 함수로 정의하자[1,3].

$$D = \alpha (P)^{-\beta}$$

여기서, D 는 수요량, P 는 가격, α 는 수요함수 계수, β 는 수요의 가격탄력성을 나타낸다.

이러한 수요함수를 다음과 같이 역수요함수(inverse demand function)의 형태로 표현할 수 있다. 이 역수요함수는 소비자의 한계편익을 나타낸다.

$$P = \left(\frac{D}{\alpha}\right)^{-\frac{1}{\beta}}$$

소비자 j 의 편익함수는 다음과 같이 역수요함수의 적분을 통해서 얻을 수 있다.

$$B_j(D_j) = \int_0^{D_j} \left(\frac{D_j}{\alpha}\right)^{-\frac{1}{\beta}} dD_j$$

여기서, D_j^* 는 최적조류계산을 통한 최적 부하량을 나타낸다.

발전기비용함수(generation cost function)

발전기의 비용함수는 다음과 같은 2차 함수의 형태로 가정하고, 각 발전기는 자신의 한계비용(생산비용)으로 입찰한다고 가정한다.

$$C_i(G_i) = A + B \cdot G_i + C \cdot G_i^2$$

여기서, $C_i(G_i)$ 는 i 발전기의 비용함수, G_i 는 i 발전기의 발전량, A, B, C 는 발전기의 비용함수계수를 나타낸다.

사회후생(social welfare)

사회후생은 일반적으로 소비자잉여와 공급자잉여의 합으로 표현한다. 본 연구에서는 다음과 같이 시장참여자의 총이익 즉, 소비자의 편익함수에서 발전회사의 비용함수를 차감한 값으로 나타내기로 한다[1,2,3].

$$\begin{aligned} \text{사회후생} &= \sum_{j \in D} B_j(D_j) - \sum_{i \in G} C_i(G_i) \\ &= \text{소비자잉여} + \text{발전회사잉여} + \text{혼잡비용} \end{aligned}$$

최적 발전량 또는 수요량이 발전기 출력제약, 송전선 선로제약, 모선별 전압제약 등의 제약에 구속되지 않은 경우에는 각 모선별 가격은 동일하게 되어 그림 1과 같이 단일의 균형점이 나타나며, 사회후생은 소비자잉여와 발전회사잉여의 합이 된다. 이 때, 만약 전력계통의 선로제약에 구속되어 있다면 발전회사 및 소비자의 각 모

선별 가격(nodal price)은 달라지게 되어 그림 2에서 보는 바와 같이 자중손실(dead weight loss)만큼의 사회후생이 감소한다.

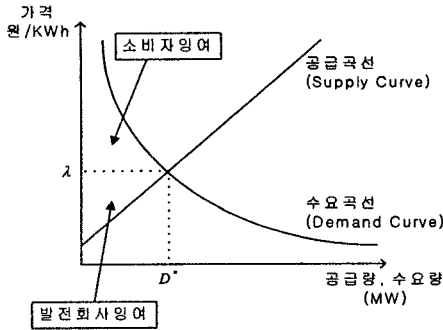


그림 1

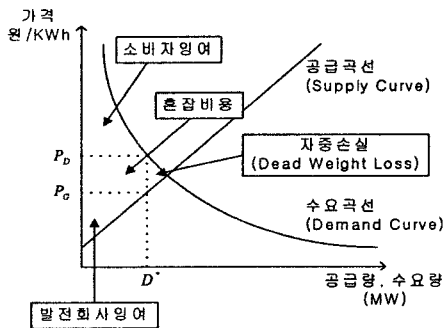


그림 2

정식화(formulation)

본 연구에서는 가격탄력성이 일정한 수요함수 하에서 사회후생을 최대화하는 최적조류계산 모델을 다음과 같이 정식화하였다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{j \in D} B_j(D_j) - \sum_{i \in G} C_i(G_i) \quad (\text{사회후생}) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in D} D_j = \sum_{i \in G} G_i \quad (\text{전력수급균형 제약}) \\ & G_i^{\min} \leq G_i \leq G_i^{\max} \quad (\text{발전기 출력계약}) \\ & D_j^{\min} \leq D_j \leq D_j^{\max} \quad (\text{수요 용량계약}) \\ & PF_k \leq PF_k^{\max} \quad (\text{선로 송전용량계약}) \\ & V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \quad (\text{모선별 전압 제약}) \end{aligned}$$

3. 사례연구

본 연구에서는 GAMS 최적화 프로그램을 사용하여 최적조류계산을 수행하였으며, 다음의 그림 3과 같은 3 모선 계통을 이용하여 계통의 선로계약으로 인한 혼잡 발생시, 소비자의 가격탄력성 변화에 따른 계통의 모선별 한계가격의 변화를 살펴보고 이를 분석하였다.

사례연구 계통에서는 경제적인 관점에서 중점을 두어 소비자의 유효전력 소비량에 대해 함수로 정의하였고, 무효전력에 대해서는 상수로 취급하였고, 계통손실은 고려하지 않았다.

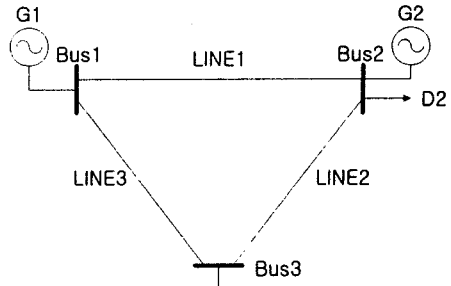


그림 3 사례연구계통

사례연구계통에서의 발전기 비용함수 및 최소·최대 발전량은 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} G1 : C_1(G_1) &= 2.0 \cdot G_1 + 0.005 \cdot G_1^2 \\ G2 : C_2(G_2) &= 1.9 \cdot G_2 + 0.011 \cdot G_2^2 \\ G_{1,2}^{\min} &= 0 \text{ [MW]}, \quad G_{1,2}^{\max} = 30 \text{ [MW]} \end{aligned}$$

또한, 각 부하모선(D2, D3)의 최소·최대 부하량은 다음과 같이 설정하였다.

$$D_{2,3}^{\min} = 0 \text{ [MW]}, \quad D_{2,3}^{\max} = 30 \text{ [MW]}$$

다음 표 1은 각 CASE별 소비자 수요함수계수를 나타낸 것이다.

표 1 CASE별 소비자 수요함수

	CASE 1,2		CASE 3		CASE 4	
	α	β	α	β	α	β
D2	20	0.3	20	0.4	20	0.5
D3	30	0.4	30	0.5	30	0.3

- CASE 1 : 선로용량제약을 고려하지 않았을 때, 소비자 가격탄력성이 낮을 때
 - CASE 2 : 선로용량계약에 구속시 ($TC_3 = 10$ [MW]), 소비자 가격탄력성이 낮을 때
 - CASE 3 : 선로용량계약에 구속시 ($TC_3 = 10$ [MW]), 소비자 가격탄력성이 보통일 때
 - CASE 4 : 선로용량계약에 구속시 ($TC_3 = 10$ [MW]), 소비자 가격탄력성이 높을 때
- TC_3 : 선로3의 송전용량

다음의 그림 4는 CASE1에서의 최적조류계산결과를 보인 것이고, 그림 5는 CASE 2와 같이 선로 3(LINE3)의 용량계약(10[MW])에 구속된 경우의 최적조류계산 결과를 보인 것이다.

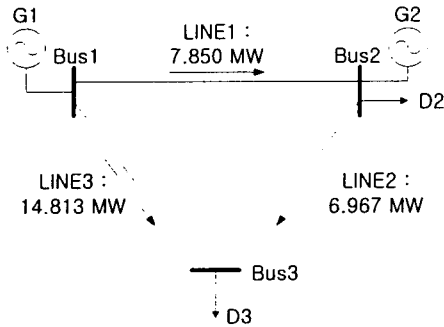


그림 4 CASE 1

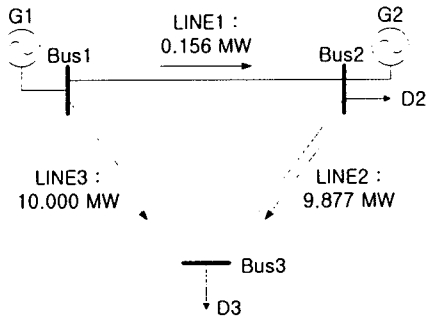


그림 5 CASE 2

다음 표 2, 3은 각 CASE별 최적조류계산 수행 결과를 요약한 것이다. CASE 1에서는 혼잡이 발생하지 않으므로 모선별 한계가격이 동일하다. 표 2 및 표 3에서 알 수 있듯이, 계통혼잡으로 인한 모선별 가격과 수요의 변동에서 가격탄력성이 증가할수록, CASE 1에 대한 CASE 2, 3, 4의 모선가격차이 $\Delta NP(I)$ 가 점차 감소한다. 이는 결국 수요의 가격응답특성이 향상될수록, 혼잡비용은 감소한다는 것을 의미한다. 마찬가지로 표 3에서 가격탄력성의 증가에 따라 비싼 발전기의 출력이 감소하고, 부하의 감소량 ΔD_J 또한 커진다는 것을 확인할 수 있다.

표 2 CASE별 모선가격 및 변화량

	NP(1)	NP(2)	NP(3)	$\Delta NP(2)$	$\Delta NP(3)$
CASE 1	2.227	2.227	2.227		
CASE 2	2.102	2.450	2.789	0.223	0.562
CASE 3	2.115	2.367	2.618	0.140	0.391
CASE 4	2.126	2.297	2.468	0.070	0.241

NP(1) : I모선의 한계가격(₩/KWh), I=1,2,3
 $\Delta NP(I)$ = 각 CASE의 NP(1) - CASE 1의 NP(1), I=2,3

표 3 CASE별 발전량과 수요량

	G_1	G_2	D_2	D_3	ΔD_2	ΔD_3
CASE 1	22.663	14.847	15.730	21.780		
CASE 2	10.156	25.006	15.285	19.877	0.455	1.903
CASE 3	11.492	21.218	14.170	18.540	1.560	3.24
CASE 4	12.586	18.055	13.196	17.455	2.534	4.325

ΔD_J = CASE 1의 D_J - 각 CASE의 D_J , J=2,3

4. 결 론

본 연구에서는 경쟁적 전력시장에 적합하도록 수요를 일정한 가격탄력성을 가지는 가격에 대한 함수로 두고 사회후생을 최대화하는 비선형 최적화 모델을 정식화하고, GAMS 최적화 프로그램을 이용하여 사례연구를 수행하였다. 그리고 사례연구를 통해 선로용량제약에 구속되어 혼잡이 발생하는 경우와 소비자 가격탄력성 변화시, 최적전력거래량과 각 모선 가격의 변화가 수요에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 또한, 소비자의 가격탄력성이 수요에 미치는 영향과 혼잡비용과의 관계에 대해서도 검토하였다. 본 연구에서와 같이 각 모선 가격이 소비자에게 가격신호를 줄 수 있을 경우에는 선로제약으로 인한 혼잡 발생시 신뢰도 측면에서 전력계통의 보다 효율적인 운영과 소비형태를 기대할 수 있을 뿐만 아니라, 경쟁적 전력시장에서의 전력수요예측, 발전회사 및 배전회사 그리고 기타 전력회사들의 전략적 고려요소, 수요관리(DSM) 측면에서의 적극적인 에너지 관리, 수요의 가격탄력성 확보를 통한 시장지배력 완화 방안 연구, 전력요금 및 송전요금 모델의 확장 등에 활용될 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Balho H. Kim, "The Economic Efficiency Impacts of Alternatives for Revenue Reconciliation", IEEE Transactions on Power System, Vol. 12, No. 3, 1998
- [2] Don Hur, "The Uses of Optimal Power Flow in a Competitive Electric Power Market", 대한 전기학회 논문지, 제 50A권, 2001년
- [3] J. Y. Choi, "Optimal Real Time Pricing of Real and Reactive Powers", IEEE Transactions on Power System, Vol. 13, No. 4, pp.1226-1231, 1998
- [4] S. N. Siddiqui, "Reliability Differentiated Real Time Pricing of Electricity", IEEE Transactions on Power System, Vol. 8, No. 2, 1993
- [5] Xing Wang, "A Coordinated Real Time Optimal Dispatch Method for Unbundled Electricity Markets", IEEE Transactions on Power System, Vol. 17, No. 2, 2002