

결과는 평가지표 C_m 이 나타내는 답합의 조합에 대한 유인지수를 T_m 이라할 때 T_m/T_M 으로 계산하여 나타내었다. 따라서 평가지표가 정확하게 선택하면 1.0의 값을 갖고 최대 가능성은 아니지만 가능성이 높은 경우를 선택할수록 1.0에 가깝고 0에 가까울수록 부정확한 선택을 의미한다.

그림 (a)는 전체 500개의 경우에 대해 분석결과를 보이고 있으며 그림(b)는 이를 정확한 순서대로 재배열(큰 값을 앞쪽으로)해서 나타낸 것이다. 정확한 선택을 한 경우는 약 400회에 달하며 전체를 평균하면 0.9545로서 본 연구에서 제안한 답합의 평가지표가 95% 이상의 정확성이 있음을 알 수 있다.

그림(b)의 끝부분에 0의 값을 갖는 부분이 10회 정도 나타난다. 이는 C_{II} 가 0임에도 불구하고 답합의 가능성이 가장 높다고 평가한 것으로서 틀린 결과라고 할 수 있다. 이와 같이 2% 정도 틀린 결과가 나타나는 약점은 CMI를 정의함에 있어 전력거래에 대한 내쉬균형을 계산하지 않는 단순한 기법을 사용하기 때문으로 해석된다. 즉 평가지표를 단순히 정의하는 대신에 정확성이 다소 감소한 것이다.

6. 결 론

본 연구는 전력시장을 효과적으로 운영하는데 있어 중요한 키워드인 답합에 의한 시장지배력에 관한 것이다. 답합은 겉으로는 나타나지 않으면서 시장의 효율성에 큰 영향을 주기 때문에 주의 깊은 감시기법이 요구되며 답합의 가능성을 감시 지표로 계산하는 기법을 제안하였다.

전력시장에서 답합이 포함된 입찰의 결과를 공급함수모형을 기반으로 모형화하고 이에 대한 내쉬균형의 계산식을 유도하였다. 또한 협상의 원리를 이용하여 답합이 성사될 가능성에 대해서 답합유인지수를 정의하였으며 내쉬균형에 대한 계산 없이 발전기의 비용특성만을 가지고 계산하는 답합의 평가지표를 제안하였다.

답합의 평가지표를 사용함으로써 발생 가능성이 가장 높은 답합을 쉽게 찾아낼 수 있으며 500번의 사례적용 결과 약 95% 정도의 정확도를 보였다. 틀린 답을 찾는 확률이 2% 정도 나타났으나 이는 시장의 수요특성을 반영하는 등 평가지표에 대한 보완을 통해 개선할 수가 있을 것이다.

시장지배력이 가장 크게 나타나는 환경은 송전선 혼잡 등의 계통제약이 발생할 때이다. 이러한 조건에서는 제한한 평가지표가 적용되지 않으며 내쉬균형도 구하기 어렵기 때문에 이에 대해서는 지속적인 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2005학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] J.B. Cardell, C.C. Hitt, and W.W. Hogan, "Market Power and Strategic Interaction in Electricity Networks," Resource and Energy Economics, Vol. 19,

pp. 109-137, 1997.

[2] S.M. Harvey, and W.W. Hogan, "On the Exercise of Market Power Through Strategic Withholding in California," April 24, 2001. available at <http://ksghome.harvard.edu/~whogan/>

[3] 김남일, "경쟁적 전력시장에서의 입찰균형가격 예측을 위한 이론적 모델과 실증분석," 에너지경제연구원 기술 보고서, 2002. 4.

[4] V.Krishna, and VC Ramesh, "Intelligent Agents for Negotiations in Market Games," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 1103-1108 August 1998.

[5] S. Stoft, "Using Game Theory to Study Market Power in Simple Networks," IEEE Tutorial on Game Theory in Electric Power Market, IEEE Press TP-136, pp. 33-40, 1999.

[6] Y. He, and Y. H. Song, "The Study of the Impacts of Potential Coalitions on Bidding Strategies of GENCOs," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 1086-1093, August 2003.

[7] K.H. Lee, "Analysis on Market Power in Power Transaction with Transmission Constraints," Trans. on KIEE, Vol. 51A, No. 8, pp. 403-408, August 2002.

[8] J.D. Weber, and T.J. Overbye, "A Two-Level Optimization Problem for Analysis of Market Bidding Strategies," IEEE PES Summer Meeting, Vol. 2, pp. 682-687, 1999.

[9] A.J. Wood, and B.F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc. 1996.

[10] D.W. Carlton, and J.M. Perloff, Modern Industrial Organization, Addison-Wesley, 2000.

[11] M. Shahidepour, H. Yamin, and Z. Li, Market Operation in Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Inc. 2002.

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(공학박사). 1995년 전력연구원 위촉 연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~ 현재 단국대 공대 전기공학과 부교수.
Tel : 02-709-2868
E-mail : khlee@dku.edu

표 2 발전회사 비용함수의 기울기와 절편

Table 2 Marginal Cost Functions of 10 Gencos

	G1	G2	G3	G4	G5
기울기(m)	0.205	0.388	0.444	0.265	0.322
절편(b)	21.89	16.04	20.88	14.72	13.21
	G6	G7	G8	G9	G10
기울기(m)	0.371	0.347	0.239	0.377	0.470
절편(b)	19.07	24.83	22.02	21.68	15.41

표 3 비협조게임의 내쉬균형

Table 3 Nash Equilibrium of Non-cooperative Game

	G1	G2	G3	G4	G5
전략(k)	24.00	17.62	21.92	17.19	15.39
발전력(q)	57.53	46.83	31.23	70.18	63.36
이득(π)	460.75	499.7	249.3	826.51	784.69
	G6	G7	G8	G9	G10
전략(k)	20.47	25.81	23.81	22.84	16.76
발전력(q)	41.3	28.76	50.13	34.35	40.50
이득(π)	374.36	171.87	390.27	262.45	440.16

5.2 협조게임의 분석

담합에 2개 회사가 참여하는 것으로 가정하면 담합의 경우의 수는 ${}_{10}C_2=45$ 개가 된다. 발전회사 G_i 와 G_j 가 담합하는 각각의 경우에 대해서 협조게임 내쉬균형을 구하고 $CII(T_{ij})$ 와 $CMI(C_{ij})$ 를 계산하면 다음 표4와 같다. 식(12)에서의 경계값(ϵ)은 0.6으로 두었다.

$CII(T)$ 의 값이 0이 되는 경우는 담합으로 인해 한쪽의 이득이 오히려 감소하는 경우로서 식(11)에 의하면 음수로 계산되지만 여기서는 0으로 나타내었다. 예를 들면 G_1 과 G_7 이 협조하는 경우 G_1 의 이득은 증가하지만 G_7 의 이득은 171.87에서 171.10로 감소하게 된다. 담합유인지수가 가장 클 때는 G_4 와 G_5 가 담합할 때로써 $T_{45}=\sqrt{\{(840.55-826.51)*(796.78-784.69)\}}=13.029$ 이다.

$CMI(C)$ 는 시장의 거래결과를 분석하지 않고 발전기의 특성만을 사용하는 식(13)으로 계산한 것으로 가장 작은 값이 가장 높은 담합 가능성을 나타낸다. 따라서 $C_{45}=1.187$ 값을 갖는 G_4 와 G_5 의 담합이 가장 높은 것으로 평가되었고 이는 CII 에 의한 결과와 동일하다. 담합이 성사되지 않는 경우를 보면 $C_{ij}=2$ 가 될 때와 $T_{ij}=0$ 이 될 때가 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

5.3 통계적 사례 검토

표 4에서 CMI 에 의해서 가장 높은 담합의 조합을 정확히 찾을 수가 있었지만 이는 표2와 같은 특정 시장조건에 국한된 결과이다. 본 연구에서는 타당성을 높이기 위해 좀더 많은 시장 상황에 대해 검토를 하였다.

발전회사는 10개로 하고 각각 한계비용특성의 기울기를 0.2~0.5, 절편을 10~30 사이의 값으로 난수 발생시키면서 500개의 시장조건에 대해 적용하였다. 각각의 경우에서 최대의 유인지수, $T_M=\max(T_{ij})$ 를 담합 가능성이 가장 높은 것으로 두고 과연 최소의 평가지표, $C_m=\min(C_{ij})$ 가 그것을 찾

아내는지를 분석하였다. 그림 1은 분석 결과를 나타낸다.

표 4 협조게임의 내쉬균형과 담합의 지수

Table 4 Nash Equilibrium and Collusion Indices

순번	G_i	G_j	π_i	π_j	T_{ij}	C_{ij}
1	1	2	468.64	508.43	8.295	1.394
2	1	3	470.1	250.63	3.521	1.551
3	1	4	466.14	853.38	12.03	2
4	1	5	466.06	805.15	10.429	2
5	1	6	470.44	379.76	7.231	1.437
6	1	7	473.54	171.1	0	1.528
7	1	8	475.1	399.64	11.596	1.356
8	1	9	471.56	264.44	4.638	1.496
9	1	10	467.92	445.89	6.409	1.469
10	2	3	505.04	249.98	1.895	1.628
11	2	4	503.28	840.75	7.134	1.314
12	2	5	503.1	795.54	6.067	1.344
13	2	6	505.29	377.21	3.993	1.514
14	2	7	506.96	171.42	0	2
15	2	8	508	395.24	6.421	1.433
16	2	9	505.87	263.49	2.524	1.573
17	2	10	503.87	443.18	3.549	1.546
18	3	4	247.47	840.75	0	1.471
19	3	5	248.17	795.67	0	2
20	3	6	250.69	378.23	2.321	1.671
21	3	7	251.97	173	1.74	1.762
22	3	8	251.16	396.74	3.463	1.590
23	3	9	251.28	264.74	2.126	1.730
24	3	10	250.16	443.89	1.787	1.703
25	4	5	840.55	796.78	13.029	1.187
26	4	6	842.45	375.17	3.599	1.357
27	4	7	845.3	167.58	0	2
28	4	8	850.71	392.26	6.952	2
29	4	9	843.12	260.64	0	1.416
30	4	10	838.76	441.95	4.685	1.388
31	5	6	796.91	375.5	3.725	1.387
32	5	7	799.22	168.83	0	2
33	5	8	803.2	392.66	6.655	2
34	5	9	797.49	261.41	0	2
35	5	10	794.06	442	4.151	1.419
36	6	7	379.77	172.3	1.524	1.648
37	6	8	379.85	396.71	5.944	1.476
38	6	9	378.8	264.34	2.893	1.616
39	6	10	377.08	443.95	3.211	1.589
40	7	8	172.14	399.25	1.567	1.567
41	7	9	173.08	265.84	2.028	1.707
42	7	10	171.89	445.29	0.331	2
43	8	9	397.7	265.01	4.359	1.535
44	8	10	394.93	445.74	5.107	1.508
45	9	10	263.66	444.45	2.278	1.648

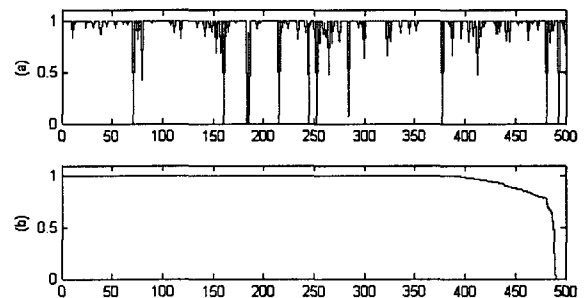


그림 1 다양한 시장조건에서의 담합평가지표 적용 결과

Fig. 1 Collusion Monitoring Indices at Various Market Conditions

2. 비협조게임의 내쉬균형

2.1 시장참여자의 최적화

발전력시장에서의 참여자는 다수의 발전회사와 시장운영자로 구분되고 전력수요는 일반적으로 가격탄력성을 갖는 1차의 수요함수로 가정한다. 본 연구에서 발전력의 입찰은 공급함수모형을 사용하여 1차함수로 가정하고 입찰 파라미터는 1차함수의 절편으로 정의한다.

발전회사의 목적은 발전력 판매에 따른 이득의 극대화이고 시장운영자의 목적은 전력거래가치의 극대화, 즉 사회적 후생(Social Welfare)의 극대화이다. 사회적 후생은 사용자 편익(Benefit)에서 발전비용을 뺀 수치로 정의되는데 수요함수에서 시장가격을 꼭지점으로 하는 면적이 사용자 편익에 해당되고 공급함수에서 시장가격을 꼭지점으로 하는 면적이 발전비용에 해당된다[5].

수요함수를 $b_0 - m_0 Q$, 발전회사 G_i 의 공급함수를 $k_i + m_i q_i$ 라 두는데, 여기서 q 는 발전력이고 Q 는 $Q = \sum_i q_i$ 로서 전체 발전량이며 k_i 는 G_i 의 입찰 파라미터이다. 이에 대한 사회적 후생은 $(b_0 Q - 0.5 m_0 Q^2) - \sum_i (k_i q_i + 0.5 m_i q_i^2)$ 이고 목적함수가 최대가 되는 상태를 유도하면 모든 공급함수와 수요함수가 같은 값을 가질 때이다[5]. 송전선 한계용량 등의 제약조건을 반영하면 이러한 조건이 되지 않지만 본 연구에서는 계통계약은 고려하지 않는다.

시장운영자 최적 조건을 세 개의 발전회사 G_1, G_2, G_3 가 참여하는 모형에 적용하면 다음 식(1)과 같이 유도된다[7].

$$\begin{pmatrix} m_0 + m_1 & m_0 & m_0 \\ m_0 & m_0 + m_1 & m_0 \\ m_0 & m_0 & m_0 + m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 - k_1 \\ b_0 - k_2 \\ b_0 - k_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

위의 식에 의해 발전회사 G_i 가 k_i 의 입찰 파라미터를 선택했을 때 시장운영자가 결정하는 발전량 q_i 가 계산되며 이를 행렬과 벡터 표현인 $Mq = b_0 \mathbf{1} - \mathbf{k}$ 으로 나타낸다.

2.2 내쉬균형의 조건

발전회사 G_i 의 이득은 시장가격(p)에 의한 판매금액($p q_i$)과 발전비용($b_i q_i + 0.5 m_i q_i^2$)의 차이로 계산되는데 여기서 b_i 는 발전기(G_i) 한계비용함수에서의 절편이다. 이득을 극대화하는 조건은 $\partial \pi_i / \partial k_i$ 로 계산되며 정리하면 식(2)와 같다.

$$q_i + (k_i - b_i + m_i q_i) \partial q_i / \partial k_i = 0 \quad (2)$$

여기서 $\partial q_i / \partial k_i$ 는 입찰 파라미터에 대한 발전력의 민감도(sensitivity)로서 식(1)로부터 다음 식(3)과 같이 유도된다.

$$M \partial q / \partial k_1 = [-1, 0, 0]^t \quad (3.1)$$

$$M \partial q / \partial k_2 = [0, -1, 0]^t \quad (3.2)$$

$$M \partial q / \partial k_3 = [0, 0, -1]^t \quad (3.3)$$

식(3)을 정리하면 다음 식(4)와 같은 각 발전회사에서의 발전력 민감도가 유도된다.

$$\partial q_1 / \partial k_1 = -(m_0 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_0) / \Delta = -\beta_1 / \Delta \quad (4.1)$$

$$\partial q_2 / \partial k_2 = -(m_0 m_1 + m_1 m_3 + m_3 m_0) / \Delta = -\beta_2 / \Delta \quad (4.2)$$

$$\partial q_3 / \partial k_3 = -(m_0 m_1 + m_1 m_2 + m_2 m_0) / \Delta = -\beta_3 / \Delta \quad (4.3)$$

여기서 β_i 는 m_i 를 제외한 수요와 공급함수 기울기들의 조합으로 각각 (4.1)~(4.3)과 같이 정의하며 Δ 는 행렬 M 의 행렬식(determinant)을 표시한다.

발전력 민감도를 식(2)에 대입하고 여기에 식(1)로부터 $k_i = b_0 - m_0 Q - m_i q_i$ 관계를 대입하여 정리하면 $\Delta \cdot q_i = (b_0 - b_i - m_0 Q) \beta_i$ 식이 된다. 이를 전체 발전력에 대한 식으로 표현하면 다음 식(5)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \Delta + m_0 \beta_1 & m_0 \beta_1 & m_0 \beta_1 \\ m_0 \beta_2 & \Delta + m_0 \beta_2 & m_0 \beta_2 \\ m_0 \beta_3 & m_0 \beta_3 & \Delta + m_0 \beta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1 (b_0 - b_1) \\ \beta_2 (b_0 - b_2) \\ \beta_3 (b_0 - b_3) \end{pmatrix} \quad (5)$$

식(5)는 각 발전회사들의 이득 극대화 조건과 시장운영자의 극대 조건이 결합된 식으로서 2단계(bi-level) 최적화의 해(solution)인 내쉬균형 상태에 해당된다[8]. 발전회사가 선택하는 입찰 파라미터의 균형상태는 식(1)과 결합하여 다음 식(6)과 같이 정리된다.

$$\mathbf{k} = b_0 \mathbf{1} - M \mathbf{q} \quad (6)$$

이러한 결과는 시장운영자와 3개의 발전회사가 비협조적 이면서 경쟁적으로 자신의 목적함수를 극대화시키는 게임에서의 균형상태를 나타낸다. 만약 발전회사간의 카르텔이나 담합이 나타나면 일부 회사간의 협조적인 목적함수가 형성되어 내쉬균형 입찰전략이 달라진다.

3. 협조게임의 내쉬균형

3.1 담합시의 이득 최적화

회사간의 담합은 여러 가지 형태가 존재하지만 본 논문에서는 공동의 이득을 극대화하도록 협력하여 입찰전략을 세우는 것으로 정의한다. 공동의 이득에 대한 최적화 조건을 분석하기 위해 2장에서와 같이 3개의 발전회사로 구성되는 시장조건을 가정하며 편의상 G_1 과 G_2 가 담합하는 것으로 한다.

공동의 목표는 두 회사 이득의 합을 극대화하는 것이며 목적함수는 다음 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \pi_{12} (= \pi_1 + \pi_2) &= p q_1 - (b_1 q_1 + 0.5 m_1 q_1^2) \\ &+ p q_2 - (b_2 q_2 + 0.5 m_2 q_2^2) \end{aligned} \quad (7)$$

경쟁형 전력시장에서 입찰담합의 유인에 대한 분석 기법 연구

論 文

55A-6-7

Analysis Technique on Collusive Bidding Incentives in a Competitive Generation Market

李 光 浩[†]
(Kwang-Ho Lee)

Abstract - This paper addresses the collusive bidding that functions as a potential obstacle to a fully competitive wholesale electricity market. Cooperative game is formulated and the equation of its Nash Equilibrium (NE) is derived on the basis of the supply function model. Gencos' willingness to selectively collude is expressed through a bargain theory. A Collusion Incentive Index(CII) for representing the willingness is defined through computing the Gencos' profits at NE. In order to keep the market non-cooperative, the market operator has to know the highest potentially collusive combination among the Gencos. Another index, which will be called the Collusion Monitoring Index(CMI), is suggested to detect the highest potential collusion and it is calculated using the marginal cost functions of the Gencos without any computation of NE. The effectiveness of CMI for detecting the highest potential collusion is verified through application on many test market cases.

Key Words : Collusion, Cooperative Game, Generation Bidding, Market Power, Nash Equilibrium

1. 서 론

전력산업 규제완화는 각국의 기술적 문화적 정치적 등의 사정으로 추진의 속도에는 차이가 있지만 국내외에서 꾸준히 진행되고 있다. 전력시장 체제를 형성하고 운영하는데 있어서 가장 관심과 우려를 받는 부분은 시장지배력(Market Power)이다. 전력산업의 특성상 과점구조가 나타나게 되고 따라서 경쟁 대신에 협조와 담합을 통해 시장의 효율성을 해치는 현상이 발생할 수 있기 때문이다[1].

시장지배력이 작용하는 원인으로는 전력시스템에서 송전선 한계용량 등의 물리적 제약과 전력공급에 대한 시장점유율의 집중 등이 있지만 발전력 경쟁에서 담합으로 인한 시장지배력 현상이 가장 우려되고 있는 것 중 하나이다. 미국 캘리포니아에서 발생한 지난 2000년의 전력난과 요금폭등 사태도 경쟁의 담합입찰과 발전기 보수시기에 대한 담합이 원인인 것으로 조사된 바 있다[2].

전력시장에서 시장운영규칙을 통해 입찰 담합이 나타나지 않도록 제어하고는 있지만 규정만으로는 방지할 수가 없기 때문에 시장운영자의 지속적인 감시가 요구된다. 이를 위해서는 담합의 발생 가능성이 높은 상황을 미연에 찾아내는 기법이 필요하며 본 연구에서는 이를 입찰담합에 대한 평가

지수(Collusion Monitoring Index; CMI)로 정의하고 사용하는 기법을 제안한다.

발전기업의 담합에 대한 연구는 국내외에서 시도된 바가 있다. 에너지경제연구원에서의 연구는 국내 발전사업자의 현황을 모델로 하여 회사간 담합을 시뮬레이션하여 양수발전기의 퇴장과 기저발전기 출력 감소 등의 현상을 사례분석하였다[3]. 하지만 이는 특정 상황에서 담합의 결과를 해석한 것이며 일반적인 담합의 가능성과 유인에 대한 분석은 아니다. 외국에서도 대리인(agent) 모형을 이용하여 전력시장에서의 협조와 담합의 분석을 시도한 바가 있다[4]. 이는 경쟁 참여자 사이의 경제적 상관관계를 미시적 관점에서 분석하지 못한 지적을 받고 있다. 또한 게임이론적 접근방식으로 협조게임을 시도한 연구[5]도 있지만 이는 이론적 초기 단계에 머물러 전력산업에 응용하기에는 아직 거리가 멀다. 최적조건에서의 민감도를 이용하여 담합에 따른 시장결과를 계산하는 연구[6]도 있지만 발생 가능한 담합의 조합에 대해 시장결과를 비교하는 정도이다.

입찰담합을 해석하기 위해 협조게임의 이론을 이용하는 것은 바람직하나 담합이 포함되는 게임에서의 내쉬균형의 조건과 계산기법이 우선 연구되어야 한다. 본 연구에서는 전력거래해석에서 주로 사용되는 공급함수모형에 대해 이러한 관계식을 유도하여 협조게임의 내쉬균형을 계산한다. 또한 담합에 대한 유인을 정량적으로 나타내기 위해 교섭(bargain)의 원리를 이용하여 담합의 유인지수(Collusion Incentive Index; CII)를 제안한다. 이와 함께 담합의 평가지수(CMI)를 이용함으로써 전력시장의 주어진 상황에서 담합의 가능성이 가장 높은 조합을 찾아내는 기법도 소개한다.

[†] 교신저자, 正會員 : 檀國大 電氣工學科 副教授 · 工博
E-mail : khlee@dku.edu

接受日字 : 2006年 3月 10日

最終完了 : 2006年 5月 9日