

동적 게임 이론을 이용한 양수 발전의 최적 입찰전략

서근오, 김철호, 김진오
한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

The optimized bidding strategy of Pumped Storage Unit by Dynamic Game theory

Keun-Oh Seo, Chul-Ho Kim, Jin-O Kim
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University

Abstract - 현재와 같은 경쟁적 전력수급 시장에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 모든 발전사업자는 이득 극대화를 위한 전략이 필요할 것이다. 이에 여러 발전 방식 중에서도 타 에너지원의 발전 설비보다 에너지원의 생산, 저장, 소비 등 다양한 전략이 가능한 양수발전을 선택하여 효과적인 대응 방안을 찾아보고자 한다. 본 논문에서는 발전 경쟁 시장 체제하에서 동적 게임이론을 적용하여, 양수발전을 소유한 발전 사업자의 최적 입찰 전략 알고리즘을 제시한다.

1. 서 론

양수 발전 시설은 전력의 소비가 적은 심야 여분의 전력을 동력으로 하여, 하루 저수지의 물을 상부 저수지에 양수하였다가 전력 사용량이 많은 주간에 다시 하루 저수지로 유하시키면서 발전하는 방식이다.

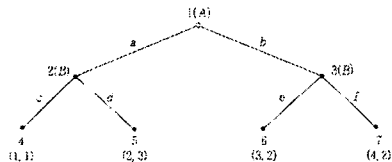
이러한 양수 발전 과정에서 최적화된 발전량을 구하고 전력시장 입찰 매커니즘을 분석하고자 동적 게임이론을 이용한다.

이 논문은 다음의 사항들에 중점을 두고 있다.

- 1) 양수 발전의 이익 최대화에 관련된 목적함수를 수립한다.
- 2) 완전 경쟁 하에서 입찰 전략 수립을 위한 게임 이론적 모델을 해석한다.
- 3) 두 사업자간의 이익을 사례 연구를 통해 구해서 본 논문에서 제시된 모델의 타당성을 확인한다.

2. 동적 게임 이론

완전한 정보공개 상태에서의 동적 게임 이론은 일회적으로 전략이 결정되는 것이 아니라, 다른 경쟁자가 취한 전략을 보고 다시 전략을 선택하는 게임으로서 다단계게임(multi-stage game)의 형태를 의미한다. 이미 취한 전략과 그에 따른 보상을 알 수 있기 때문에 과거 전략을 바탕으로 점차적으로 발전해 가는 모델 수립이 가능하다. 그중에서도 확장형 게임은 동적인 게임의 형태를 나타내기 적합한 형태로서 전략형 게임과는 달리 각각 선택한 전략의 이동과정을 알아보기 쉽도록 점과 선으로 표시한다.



〈그림 1〉 동적 게임의 확장형 게임

점 1에서 선수 A는 두 가지 전략 a, b를 취할 수 있고 선수 A가 전략 a, b를 택하면 점 2나 점 3에 도착하게 되며, 이 점에서는 선수 B가 할당되어 있다. 이 때 다른 선수가 전략을 취할 기회가 주어지는데, 점 2는 선수 A가 전략 a를 취했다는 정보가 포함되어 있으며, 점 3은 선수 A가 전략 b를 취했다는 것을 나타내고 있다. 점 2에서 선수 B는 선수 A가 전략 a를 택한 것을 알고 난후 전략 c나 d를 택하게 된다. 이와 같이 확장형 게임에서 모든 점들이 하나의 독립된 정보 집합을 갖고 있는 경우를 독립정보게임이라 한

다[1].

3. 양수 발전에서의 게임 이론

MCP(Market Clearing Price)는 하루 중 오후 12시~7시까지 peak를 이루기 때문에 이때 발전기를 가동해야 이익을 남길 수 있고, 오전 12시부터 다음날 오전 6시까지는 가격이 낮기 때문에 이때 pumping을 해야 한다. 본 논문에서는 낮 발전 시간은 12시부터 7시 사이, 심야 pumping하는 시간은 오전 12시부터 오전 6시 사이라고 가정하였고, 그 외 시간에는 offline 시간(pumping과 발전 모두 하지 않음)으로 가정하였다.

양수 발전 시설에서 주기적으로 행해지는 입찰 과정은 반복적인 경험을 통해 이득 극대화를 위한 최적 전략을 수립할 수 있게 된다. 이는 동적 게임이론을 적용시키기에 적합한 상황이다.

다음 목적함수는 운영시간 동안의 양수 발전 사업자의 이득을 나타낸다[2].

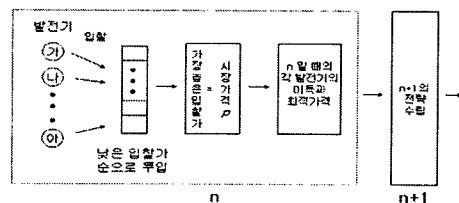
Maximize

$$pf(Q_g) = Q_g P_g(Q_g) + Q_g P_{nr}(T - t_p - t_g) + Q_{sr} P_{sr} t_p - Q_p P_p - C_{mo} \quad (1)$$

- T : 전체 시간(hour), t_g : 발전 시간(hour)
- t_p : pumping 시간(hour), $T - t_g - t_p$: offline 시간(hour)
- Q_g : t_g 동안의 발전량(MW), Q_p : pumping 량(MW)
- P_g : t_g 동안의 시장가격(\$/MW), P_p : pumping 비용(\$/MW)
- Q_{sr} : 예비력 시장에 판 양(MW), C_{mo} : 운영, 유지비용(\$)
- P_{sr} : 순동예비력(spining reserve) 가격(\$/MWh),
- P_{nr} : 대기예비력(nonsynchronous reserve) 가격(\$/MWh),

수익은 발전 모드일 때 전기를 팔아서 얻은 이익과 offline 모드일 때 대기예비력 시장에서 얻게 되는 이익, pumping 모드일 때 순동예비력 시장에서의 수익을 포함한다. 비용은 pumping 시 드는 비용과 운영 및 유지비로 이루어진다.

각 발전기의 n번째 입찰 전략 수립을 위해 n-2, n-1번째 획득한 data들 간의 한계증분이익(ΔPF)의 변화를 분석한다. 이익이 증대되는($\Delta PF > 0$) 양까지는 발전량을 계속 증가시키지만 한계증분이익이 감소하면($\Delta PF < 0$) 발전량을 일정량 감소시키고, 두 발전기의 입찰가를 비교한 후 큰 입찰가를 바탕으로 다시 이득을 구하는 feedback과정을 되풀이한다[3].



〈그림 2〉 동적 입찰 과정

4. 사례연구

본 논문은 일주일중 평일 부하특성에 가장 가까운 화요일에 대해 사례연구를 수행하였다. 매주 화요일마다 두 발전기가 하루의 발전량을 두고 경쟁하게 되고 n=2(둘째주 화요일)은 n=1(첫째주 화요일)보다 발전량을 일정량 증가시켜 입찰가를 구한 후, n=3(셋째주 화요일)은 n=2(둘째주 화요일)보다 증가한 발전량으로 입찰가를 구하는 과정이 되풀이 된다. 이런 과정을 거쳐 수렴하는 입찰가를 찾는다. 그러면 총수요에서 두 양수 발전기가 각각 얼마만큼 발전량을 선택해야 하는지 가동시 입찰가는 어느 정도가 적절한지의 결과가 도출된다.

해석의 간소화를 위해 다음의 가정을 취한다.

- 1) 입찰 참여 발전기는 2대이고, 완전 경쟁 체제하에서 두 사업자는 서로의 선택 가능한 전략들에 대한 정보를 가진다.
- 2) 양수 발전의 아래의 parameter는 일정하다.

$$t_p : 6 \text{ hour} \quad t_g : 7 \text{ hour} \quad \text{offline time} : 11 \text{ hour}$$

$$P_{nr} : 0.5 \text{ \$/MWh} \quad P_{sr} : 5 \text{ \$/MWh}$$

$$Q_g = 0.9Q_p \text{ (pumping한 물의 90\%만이 발전에 이용된다.)}$$

하루(24 hour)동안 입찰에 참여한 (가), (나) 두 양수발전기의 입찰전략을 세우기 위해 위의 parameter를 바탕으로 아래와 같이 설정한다.

〈표 1〉 양수 발전기 parameters

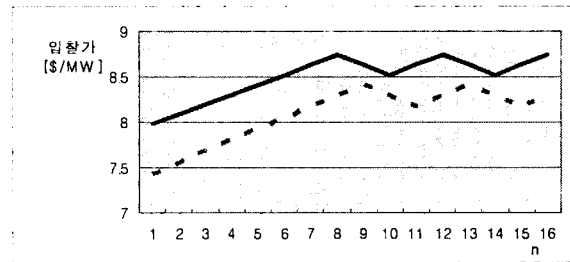
	(가)양수 발전기	(나)양수 발전기
입찰가(\$)	$6.9 + 0.0108Q_{g(g)}$	$6.2 + 0.0082Q_{g(n)}$
대기 상태의 이익	$5.5Q_{g(g)}$	$5.5Q_{g(n)}$
Q_p, P_{sr} (\$/hour)	50	50
pumping 비용	$360 + 10.66Q_{p(g)} + 0.00308Q_{p(g)}^2$	$480 + 9.99Q_{p(n)} + 0.00308Q_{p(n)}^2$
운영, 유지비(\$)	60	70
발전용량(MW)	$70 \leq Q_{g(g)} \leq 200$	$70 \leq Q_{g(n)} \leq 300$
발전단위	10[MW]	15[MW]
초기치(MW)	$Q_{g(g)} = 100$	$Q_{g(n)} = 150$

화요일 하루 동안의 총수요는 400MWh로 가정하고 입찰가격은 두 발전기들이 제출한 가격 중 높은 가격으로 한다. 또한 계통 중 낮은 입찰가의 발전기가 유입 우선권을 가지며 발전량이 총수요에 미치지 못하였을 때의 부족분은 가상의 발전기에서 충당하기로 한다. 위의 표 1에서 제시된 조건 하에서 주기별(매주 화요일)로 실행 후 얻어지는 결과를 아래 표 2와 같이 정리하였다.

(가)발전기의 경우, n=8까지는 (나)발전기보다 입찰가가 높기 때문에 이 입찰가로 시장가격이 결정되고 발전할수록 이익이 된다. 그러나 8번째 화요일인 n=8에서는 (가)발전기가 $\Delta PF < 0$ 이 되었기 때문에 n=9에서 발전량을 10MW만큼 낮춘 다음 (나)발전기와 경쟁을 진행하게 되고, (나)발전기의 경우 n=10에서 $\Delta PF < 0$ 이 되었기 때문에 n=9에서 발전량을 15MW만큼 낮춘 다음 feedback과정이 진행된다. 이 과정에 의해 식 (1)에 나타난 발전사업자의 이익이 최대값 근처에서 진동한다. 위의 방법에 따라 입찰가에 관한 추이를 그리면 아래의 그래프와 같다.

〈표 2〉 두 양수발전 사업자의 동적 입찰과정

n	(가)양수 발전기				(나)양수 발전기			
	$Q_{g(g)}$	$PF_{(g)}$	$\Delta PF_{(g)}$	$\rho_{(g)}$	$Q_{g(n)}$	$PF_{(n)}$	$\Delta PF_{(n)}$	$\rho_{(n)}$
1	100	6	/	7.98	150	21.5	/	7.43
2	110(+10)	26.3	+20.7	8.09	165(+15)	57.40	+35.9	7.55
3	120(+10)	48	+21.7	8.20	180(+15)	94.88	+37.48	7.68
4	130(+10)	71.1	+23.1	8.30	195(+15)	132.01	+37.13	7.80
5	140(+10)	9.6	+24.5	8.41	210(+15)	172.52	+40.51	7.92
6	150(+10)	121.5	+25.9	8.52	225(+15)	214.63	+42.11	8.05
7	160(+10)	148.8	+27.3	8.63	240(+15)	258.32	+43.69	8.17
8	170(+10)	147.53	-1.27	8.74	255(+15)	303.61	+45.29	8.29
9	160(-10)	113.22	-34.31	8.63	270(+15)	291.08	-12.53	8.41
10	150(-10)	116.21	+2.99	8.52	255(-15)	247.51	-43.57	8.29
11	160(+10)	148.8	+32.59	8.63	240(-15)	258.32	+10.81	8.17
12	170(+10)	147.53	-1.27	8.74	255(+15)	303.61	+45.29	8.29
13	160(-10)	113.22	-34.31	8.63	270(+15)	291.08	-12.53	8.41
14	150(-10)	116.21	+2.99	8.52	255(-15)	247.51	-43.57	8.29
15	160(+10)	148.8	+32.59	8.63	240(-15)	258.32	+10.81	8.17
16	170(+10)	147.53	-1.27	8.74	255(+15)	303.61	+45.29	8.29



실선: (가) 발전기, 점선: (나) 발전기
〈그림 3〉 두 양수발전 사업자의 입찰가

위의 그래프에서와 같이 주기를 반복할수록 최적화된 이윤과 이에 따른 입찰가를 얻을 수 있다. 그리고 이를 바탕으로 양수 발전의 최적화 입찰 전략 수립이 가능하다.

5. 결론

본 논문에서는 하루(24시간)동안 2대의 양수발전기에 동적 게임 이론을 적용하여 최적의 입찰가를 도출해 보았다. 한계이득 변화량의 증감에 따라 발전량을 일정량 늘렸다가 줄이는 과정을 반복한 결과 일정한 입찰가로 수렴함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 두 발전기의 하루 동안 최적 입찰가를 구할 수 있었고, 이때 각 양수발전 사업자의 이익이 최대가 됨을 보였다.

〈참고 문헌〉

- [1] 박주현, "게임이론의 이해", 해남출판사, 2001.
- [2] Alan A. Desrochers, "Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market", IEEE Trans. on Power System, vol. 19, pp. 834-841, 2004.
- [3] Kang, Dong-Joo, "An Optimal Bidding Strategy Solution using Dynamics Game Theory", 대한전기학회 논문집, vol. 51, no. 4, pp. 202-208, 2002.