

Cournot Model을 적용한 다중재화의 전력거래 해석

김선교, 손성인, 김진오
 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

Power Transactoin Analysis of Multicommodity using Cournot Model

Sun-Kyo Kim, Sung-In Sohn, Jin-O Kim
 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University

Abstract - 게임이론에서의 기본적인 Cournot Model과 같은 형태는 실제 전력 시장에서의 복잡성을 모두 반영하지는 못한다. Pool 기반 전력시장에서의 송전과 가격 결정은 명백하게 전송 제약뿐만 아니라 ancillary service의 상호간의 최적화도 고려되어야하기 때문이다. 이 논문은 다중재화의 상호간 최적화를 다루는 다중시장의 Cournot Model을 확장시킨 모델의 해석과 사례연구를 논한다. 사례연구로는 제주도 전력 시장의 형태를 적용시켜 2개 발전사업자가 2개의 상품을 가지고 경쟁할 때의 최적화를 MATLAB을 이용하여 구현해본다.

$$\pi^i(q_i, q_j) = q_i f(q_i, q_j) - C_i(q_i) \quad (1)$$

여기서, π^i : 회사 i 의 이득
 q_i : i 의 생산량
 P : 모든 q 의 함수로서의 가격
 C_i : q_i 함수로서의 비용

이 게임의 해는 각 회사 i 에 대한 최적의 조건으로 표현된 동시적인 목적함수 집합을 푸는 것에 의해서 얻어진다. Cournot model은 광범위하게 전기시장 경쟁분석을 위해 사용되어진다. Cournot model은 market share를 할당받기 위한 개인의 발전 회사에 의해 또한 채택되어질 수 있다. 또한 Cournot model은 주어진 시장에서의 상품 가격과 경쟁 회사의 규모와 생산 비용 뿐만 아니라 시장에서 요구하는 특성과 특정 상품의 가격을 목표로 삼는다.

1. 서 론

전력산업은 전력이라는 상품이 갖는 특성과 전력을 생산하는데 있어 발생하는 규모의 경제로 인해 전통적으로 수직적으로 통합된 독점 공기업이나 독점 민간 기업 체제로 유지되어 왔다. 그런데 최근 들어 전력시장은 전세계적으로 단일독점 또는 수직 통합된 환경에서 탈피해 민영화, 규제완화 더 나아가 경쟁적 환경으로 변화하고 있다. 이러한 환경의 전력시장에서 가격이 형성되는 메커니즘을 분석하고자 게임이론이 도구로서 연구되고 있으며, 경쟁적인 전력거래가 전력시장에서 이루어지는 전력산업은 국내에서도 하나의 이슈가 되고 있다. 이 논문은 다음의 사항들에 중점을 둔다:

- 1) 목적함수 및 제약조건의 비선형 프로그램에 대한 분석,
- 2) 다중재화의 상호간 최적화를 다루는 다중시장의 Cournot Model을 확장시킨 모델의 해석과,
- 3) 완전경쟁 하에서 두개 이상의 입찰자가 두개의 상품(에너지, 예비력)을 교역하는 모델을 제공하고,
- 4) 제주도 전력 시장에서 2개의 발전회사가 총 6개의 발전기를 통해 에너지와 예비력 두 가지 상품을 이용한 사례연구를 통해 본 논문에서 제시된 모델의 타당성을 확인한다.

2. Cournot Model

Cournot Game 이론에서 주요한 논지는 회사(발전회사)가 생산의 한계비용을 상회하도록 가격을 증가시키기 위해 생산을 억제하는 방법으로 이익을 최대화시키려고 한다는 것이다. 각 회사는 충분히 시장가격 영향을 미칠 수 있을 정도로 크다. 그리고 회사 각각은 다른 회사들에 의해 선택된 자신의 이익을 최대화 시킨다.

3. 송전제약에서 다중상품 Cournot model

에너지와 예비력 두가지 상품에 대한 최적화와, 독점이나 과점 형태가 아닌 완전경쟁일 때의 에너지와 예비력 가격분석이 본 논문의 목적이라 할 수 있다.

에너지와 예비력에서 이익을 최대화시키는 것의 문제점은 그것이 다른 시장에서 팔리는 같은 상품을 다루고 있을지라도 다중시장에서의 단일재화 완전경쟁 모델[1]과 유사점을 가지고 있다는 것이다. 에너지와 예비력 생산의 최적화는 다수 상품의 공통적인 생산과 생산을 제약하는 상황에서 이익을 최대화시키기 위한 이 두 서비스 사이에서 생산량을 나누는 것이라고 말할 수 있다. 또한 기본적인 거래는 지역의 예비 수요에 대한 하부조적이 연결되어있을 때 전송 흐름에 적용될 수 있으며, 예비력은 이 하부조직 사이에서 거래된다. 에너지 흐름에 적용할 수 있는 일반적인 흐름제약과 우발적인 상황에 적용될 수 있는 다른 제약들이 있다. 다른 제약은 에너지와 예비력 거래 제약과 결합된 제약조건으로서 나타난다.

Maximize

$$\sum_{i,c} a_{i,c} - \frac{1}{2} \beta_{i,c} Y_{i,c}] Y_{i,c} - \sum_{i,c} a_{i,c} C_{i,c} \quad (2)$$

Subject to

$$\sum_{(i,j) \in \Theta} X_{i,j,c} + \sum_{(j,i) \in \Theta} F_{j,i,c} + \sum_{(j,i) \in \Theta} F_{i,j,c} = Y_{i,c} \quad (3)$$

$$q_{i,c} = \sum_{j=1}^M X_{i,j,c} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M X_{i,j,c} \leq X_{i,c}^{\max} \quad (5)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^M X_{i,j,c} \leq X_i^{\max} \quad (6)$$

$$q_{i,c}, X_{i,j,c}, Y_{i,c}, F_{i,j,c} \geq 0 \quad (7)$$

- 여기서, c : 상품 $c=1, \dots, C$
 $Y_{i,c}$: c 의 j 모선으로의 net injection
 $q_{i,c}$: 발전자 i 의 c 생산량
 $X_{i,j,c}$: j 모선의 공급자 i 로부터의 c 의 공급
 $F_{i,j,c}$: 모선 j 에서 i 로 c 에 대한 물리적 흐름
 $\alpha_{i,c}, \beta_{i,c}$: c 에 대한 선형적인 요금함수
 $C_{i,c}$: 공급자 i 의 c 에 대한 한계비용
 $X_{i,c}^{\max}$: 최대 생산/예비 용량(MW)
 X_i^{\max} : 최대 생산용량(MW)

위의 전송제약이 있는 Cournot의 확장된 모델은 각 상품과 연결된 복합적인 Cournot model을 가지고 있는 것의 하나로 보여 질 수 있다. 방정식 (6)은 우발적인 생산 과부하와 에너지 및 예비력의 전송과 생산을 제한하는 전송흐름 제약조건을 나타낸다[2].

4. 사례연구

본 연구에서 송전제약에서 다중상품 Cournot model을 검증하기 위해 본 논문에서는 제주도의 두 발전회사가 에너지와 예비력 두가지 전력상품을 완전경쟁이 보장되는 환경 하에서 거래할 때 어떻게 입찰자들이 시장에서 자신의 생산량을 할당하게 되는지를, MATLAB Program을 활용하여 수치해석적인 방법으로 에너지와 예비력에 대한 총 이득과 각 발전기별 에너지와 예비력 생산량을 구해보았다.

사례연구를 통해 알 수 있는 사실은 다음과 같다.

- 제약조건이 있는 완전경쟁 하에서 입찰자들이 자신의 이익을 최대화시키기 위해 필요한 생산량
- 에너지와 예비력을 동시에 제어할 경우, 입찰자들이 이익을 최대화 시킬 수 있는 양
- 단일 제화를 다루는 시장과 다중제화를 제어하는 시장의 최적화 차이점

식 (2)에서 식 (7)까지는 일반적인 전송제약이 있는 Cournot model에서 적용시킬 수 있는 수식들이다. 본 사례연구에서는 완전경쟁을 가정하였고, 전송제약을 포함하고 있다. 현재 제주도에는 중부발전과 남부발전 2개의 발전회사가 있다. 사례연구를 위해 중부발전이 가지고

있는 발전기 중에서 2개(제주기력, 제주GT)의 발전기와 남부발전의 4개(남제주 화력, 한림GT, 한림GC, 남제주 내연)의 발전기를 선별하여 이용하였다.

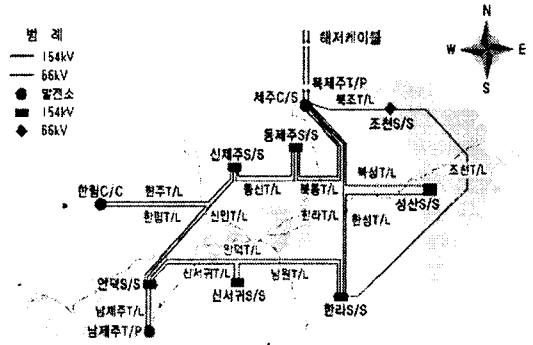


그림 1. 제주도의 한전계통

KPX(전력거래소)의 전력거래와 관련한 여러 자료 중에 2003년 6월의 제통상황과 거래가격 등에 관한 자료를 바탕으로 하여 생산비용과 전력요금 함수를 산출하였다. 그 중 2003년 6월 한달 간 평균 SMP와 평균 수요량을 하루 24시간에 나타내면 그림 2, 3와 같다. 자료에는 에너지 비용만을 명시하고 있기 때문에, 예비력의 비용은 참고문헌 [2]의 사례연구 데이터를 이용하여 비례적으로 가정하여 사용하였다.

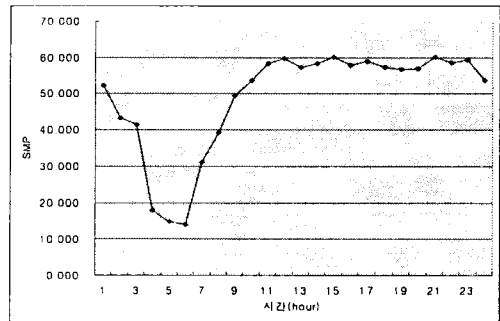


그림 2. 2003년 6월 제주도 평균 SMP

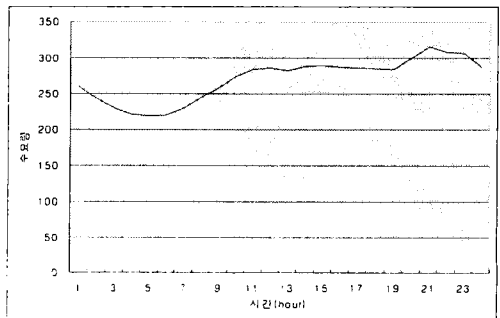


그림 3. 2003년 6월 제주도 평균 수요량

에너지 가격 = $(a+bx)-0.0125*(\text{nodal energy supply})$
 예비력 가격 = $(a'+b'y)-0.025*(\text{nodal reserve supply})$

2003년 6월 제주도 SMP 및 수요량 data를 토대로 요금함수의 상수를 구하였고 그 값은 다음과 같다.

$a = 218.5750, b = -0.7567$

하지만, 총 6개의 발전기는 1차 연료로서 중유와 보일러 등유를 사용하고 있는데, 사례연구에 사용하기에는 발전기의 전력생산 비용에 비해 가격이 너무 낮게 나오는 현상이 발생하여, SMP값을 두 배를 취하여 a 값을 수정하였다. 이렇게 나온 a의 값은 437.1228이었다. 참고문헌 [2]에서 에너지 가격과 예비력 가격의 비율을 a, b 값에 그대로 적용하여 예비력에 대한 a'와 b'의 값을 각각 다음과 같이 가정하였다.

$a' = 124.8922, b' = -1.5134$

위 식을 이용한 결과 Table 1에 각 발전기별 예비력 비용을 나타내었고, Table 1의 결과와 가격함수를 수치해석적 방법을 통해 에너지와 예비력에 대한 총 이득을 각각 60,000,000[원]과 2,572,000[원]으로 결정지을 수 있었다. 또한 발전기별 에너지와 예비력에 대한 생산량의 값은 Table 2와 같이 구할 수 있다.

Table 1. 제주도 발전기별 예비력 비용 계산결과

회사명 발전기 명	중부발전		남부발전			
	제주 기력	제주 GT	남제주 화력	한림 GT	한림 GC	남제주 내연
예비력 비용	0.1066	0.2302	0.1161	0.3474	0.1156	0.5439

단일 시장에서 완전경쟁을 가정한 상태에서 모델을 만들었기 때문에, 생산 비용이 가장 적게 소요되는 발전기가 최우선적으로 발전되는 것을 표에서 확인할 수 있다.

Table 2. 발전기별 에너지 및 예비력 생산량

발전기명	제주 기력	제주 GT	남제주 화력	한림 GT	한림 GC	남제주 내연
에너지	5	150	26	41	29	38
예비력	11.2	0	30	0	0	0

중부발전의 제주 GT 발전기를 살펴보면 생산비용이 가장 낮다. 그리고 수요함수에서 산출된 에너지의 가격은 제주 GT의 SMP보다 높기 때문에, 최대치인 150MW로 발전되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 생산 비용이 낮은 순으로 에너지 공급량을 늘려나가는 것을 확인할 수 있다.

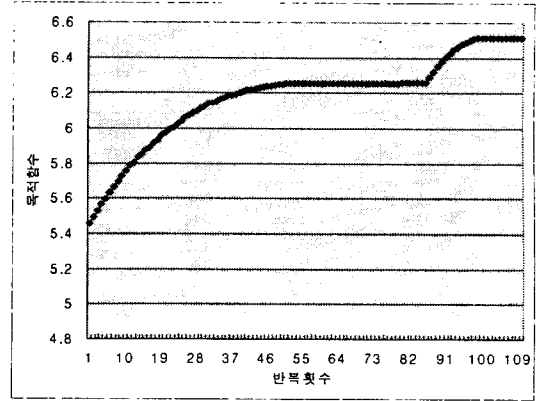


그림 4. 목적함수 최적화 과정

본 논문에서 결과 값을 산출하기 위해 에너지 총생산에 대한 각 발전기의 에너지 생산량을 할당시킨 후에, 예비력을 거래한다고 가정하고 사례연구를 수행하였다. 그 결과치를 그래프로 표현하면 위의 그림 4와 같이 나타난다.

x축으로 표시된 반복횟수가 90회까지는 에너지 생산에 대한 내쉬 균형점을 찾는 행동을 반복한다. 그 결과 값이 수렴된 후에 예비력에 대한 균형점을 찾기 위해 반복수행이 시작된다. 그 결과 우리가 원하는 전력 거래 균형점을 찾을 수 있었다.

5. 결 론

전력산업 분야에서 전력거래에 시장경제원리를 도입하여 경쟁을 통한 효율성의 증대와 비용의 감소로 전력요금의 인하를 유도하려는 전력산업 구조개편이 현재 국내외에서 진행 중에 있다. 이에 따라 발전기업이 전력판매를 통해 이득을 극대화하기 위해서는 전력소비자의 특성은 물론 경쟁 발전기업의 전략에 대한 분석이 필요하게 된다.

입찰 참여자의 전략변수로서 발전가능 용량제약을 고려하였고 완전경쟁 하에서의 가격함수가 다른 여러 발전기가 2가지 상품을 교역하는 모형에서의 Cournot 균형을 나타내었다.

발전 회사가 각각의 이득을 최대화시키기 위해, 입찰함수에 따른 적정값을 취하면서 에너지와 예비력을 동시에 고려하여서 발전 가능용량을 전략적으로 선택할 것이라는 결론을 내릴 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.Bulow, J.Geanakoplos, and P.Klemperer, "Multi-market oligopoly : strategic substitutes and complements," J.Pol. Econ., vol. 93, pp.488-511
- [2] Deb Chattopadhyay, "Multicommodity Spatial Cournot Model for Generator Bidding Analysis", IEEE Trans. Power, VOL. 19, NO.1, pp.271, FEB. 2004
- [3] Harry Singh, "Introduction to Game Theory and Its Application in Electric Power Markets", IEEE Computer Application in Power, pp.18
- [4] KPX(한국전력거래소 제주지사) www.kpxj.or.kr