2007년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집 (2007. 11. 2 ~ 3)

송전비용할당에 대한 사례연구

김종혁, 이천호, 한석만, 정구형, 강동주*, 김발호
홍익대학교, 한국전기연구원*

A case study on the transport cost allocation

jong-hyuk Kim, cheon-ho Lee, seok-man Han, koo-hyung Chung, dong-joo Kang*, bal-ho Kim
Hong-ik unversity, KERI*

Abstract - 전력산업의 효율성 증가를 목적으로 경쟁적 전력시장의 도입을 활발히 추진하고 있다. 이와 관련하여 계통운영의 효율성 확보, 합리적인 요율체계의 확립 등을 필요로 함에 따라 송전비용 산정방법에 관한 정확하고 공정성을 확보한 기준정립이 필요하다. 게임이론의 해 중에서 비용배분방법으로 주목받고 있는 샤플리밸류와 중핵을 송전비용 산정방법으로 제시하고, 전력산업의 특성을 고려하여 계통을 두 가지 사례로 나누어 사례 연구하여 보았다.

1. 서 론

전 세계적으로 전력산업의 효율성 증가를 목적으로 경쟁적 전력시장의 도입을 활발히 추진하고 있다. 이와 관련하여 계통운영의 효율성 확보, 합리적인 요율체계의 확립 등을 필요로 함에 따라 송전비용 산정방법에 관한 정확하고 공정성을 확보한 기준정립이 필요하다.

송전비용은 많은 시장참여자들이 공유하는 송전설비에 대한 비용을 회수하기 위해 시장참여자에게 할당하는 요금으로 송전회사는 이를 합리적인 방법으로 산정함으로써 시장 참여자들에게 적절한 경제적인 신호를 제공하여 그들의 의사결정에 왜곡을 주지 않아야 한다. 또한 송전비용은 시장 참여자들이 동등한 조건에서 전력거래에 참여할 수 있는 환경을 제공하여야 한다.

본 연구에서는 송전비용을 협력적 게임이론을 응용하여 효율성과 공평성의 관점에서 시장참여자들에게 합리적으로 배분하는 방법을 연구한다.

2. 본 론

2.1 비용할당방법

협조적 게임이론에서는 시장참여자들의 이해관계가 상충된 상황에 대해 주어진 자료들을 기초로 하여 공평하면서도 효율적인 해결방안을 제시한다. 그 중 비용할당 문제에 널리 응용되고 있는 샤플리밸류(Shapley value)와 중핵(nucleolus)를 소개한다.

2.1.1 샤플리밸류 (Shapley value)

샤플리밸류 (Shapley value)는 각 경기자가 어떠한 연합에 가입할 경우 각 연합이 추가적으로 부담하게 되는 한계비용에 근거하여 비용을 배분하는 방법이다. 샤플리밸류에서 각 경기자에게 배분되는 비용은 각 연합에 대하여 그 경기자에 의하여 추가적으로 발생하는 한계비용의 가중 평균치로 계산된다.

최초의 진입자는 생산량 $\sigma^{-1}(1)$ 을 생산하고 다음 진입자는 $\sigma^{-1}(2)$ 그리고 마지막 진입자는 $\sigma^{-1}(n)$을 생산한다. 생산량 i를 선행하는 생산량의 집합은 다음과 같다.

$$P_i^{\sigma,N}=\{\sigma^{-1}(1),\sigma^{-1}(2),\cdots,\sigma^{-1}(\sigma^{-1}(i)-1)\}$$

따라서 생산 i에 대한 증분비용으로 조건부 수열 σ는

$$IC_i^{\sigma,N}=C(q_{P_i^{\sigma,N}+\{i\}})-C(q_{P_i^{\sigma,N}})$$

생산량 i에 대한 샤플리밸류(SV_i)는 n!에 대한 수, 모든 가능한 순차 σ에 대하여 추가증분비용을 평균하여 다음과 같은 일반식을 얻을 수 있다.

$$SV_i=\frac{1}{n!}\sum_{\sigma}IC_i^{\sigma,N}=\frac{1}{n!}\sum_{\sigma}[C(q_{P_i^{\sigma,N}+\{i\}})-C(q_{P_i^{\sigma,N}})]$$

이를 전력시장과 같이 계층적 구조에 적용하기 위하여 계층적 비용할당과정으로 설명한다.

생산자 1의 단독비용을 f_1라 하고 생산자2의 단독비용을 f_2라 하자. 그리고 이 둘이 연합을 이루어 드는 비용을 F_2라 하면 공리가 존재한다면 이들이 지불하는 비용은 단독비용의 합보다 작아진다.

즉 코어(Core)특징을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_1\le F_1, f_1+f_2\le F_2,\ldots, f_1+f_2+..f_{n-1}\le F_{n-1}, f_1+f_2+..f_n\le F_n=F_n$$

즉 전체 비용 F_n을 만족하며, 각각의 생산자는 연합의 이득을 얻게 된다. 따라서 생산자들은 샤플리밸류에 의해 다음의 비용만을 지불하면 된다.

$$f_i^{Sh}=\sum_{k=0}^{i-1}\frac{1}{n-k}\cdot(F_{k+1}-F_k)$$

이는 다음과 같이 간단한 비용할당체계를 형성한다.

$$f_1^{Sh}=\frac{1}{n}\cdot F_1$$

$$f_2^{Sh}=\frac{1}{n}\cdot F_1+\frac{1}{n-1}\cdot(F_2-F_1)$$

....

$$f_i^{Sh}=\frac{1}{n}\cdot F_1+\frac{1}{n-1}\cdot(F_2-F_1)+.....+\frac{1}{n-i+1}\cdot(F_i-F_{i-1})$$

....

$$f_n^{Sh}=\frac{1}{n}\cdot F_1+\frac{1}{n-1}\cdot(F_2-F_1)+.....+\frac{1}{n-i+1}\cdot(F_i-F_{i-1})+....+(F_n-F_{n-1})$$

2.1.2 중핵 (nucleolus)

중핵에 의한 비용배분은 롤즈의 분배정의에 의한 방법으로 할당의 절차에서 가장 비선호적인 연합을 가능한 작게 부담하게 만드는 방법이다. 다시 말해서 가장 심하게 불평할 만한 연합에서 가능한 많이 만족하게 만든다. 특정 할당액 f에 대하여 만족도를 S라 하면 어떤 연합의 비용에 따른 만족도를 다음과 같이 나타낸다.

$$b(S,f) = F(S) - \sum_{i \in S} f_i$$

중핵의 알고리즘은 모든 연합에 대하여 b(S,f)를 고려하고 가장 작은 이익을 최대화하는 것이다.
즉 모든 비용함수 b를 작은 값부터 큰 값의 순서로 나열한 후 이를 다른 연합의 비용함수를 고려하여 가장 잉여가 많은 부분을 선택하여 비용 배분하는 것이다.
이 최적화 해를 구하는 논리는 다음과 같다.

$$b_1 = Max[b_1(f)\,\text{for}\, f \in E_0], E_1 = f : b_1(f) = b_1$$
$$b_2 = Max[b_2(f)\,\text{for}\, f \in E_1], E_2 = f : b_1(f) = b_1, b_2(f) = b_2$$
......
$$b_{n-1} = Max[b_{n-1}(f)\,\text{for}\, f \in E_{n-2}],$$
$$E_{n-1} = f : b_1(f) = b_1, b_2(f) = b_2, ..., b_{n-1}(f) = b_{n-1} = f^N$$

이를 계층적 할당 체계로 나타내면 다음과 같다.

$$f_1^{Nu} = \frac{1}{2} \cdot F_1$$
$$f_2^{Nu} = \frac{1}{4} \cdot F_1 + \frac{1}{2} \cdot (F_2 - F_1)$$
....
$$f_i^{Nu} = \frac{1}{2^i} \cdot F_1 + \frac{1}{2^{i-1}} \cdot (F_2 - F_1) + ... + \frac{1}{2} \cdot (F_i - F_{i-1})$$
....
$$f_{n-1}^{Nu} = \frac{1}{2^{n-1}} \cdot F_1 + \frac{1}{2^{n-2}} \cdot (F_2 - F_1) + ... + \frac{1}{2} \cdot (F_{n-1} - F_{n-2})$$
$$f_n^{Nu} = \frac{1}{2^{n-1}} \cdot F_1 + \frac{1}{2^{n-2}} \cdot (F_2 - F_1) + ... + \frac{1}{2} \cdot (F_{n-1} - F_{n-2}) + F_n - F_{n-1}$$

보다 간단히 표현하면:

$$f_i^{Nu} = \sum_{k=0}^{i-1} \frac{1}{2^{i-k}} \cdot (F_{k+1} - F_k)$$
$$f_n^{Nu} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{2^{n-k-1}} \cdot (F_{k+1} - F_k) + F_n - F_{n-1}$$

가장 약자인 계층, 즉 다시 말해서 계층에서 1위를 차지하는 계층은 단독 비용 F_1보다 많이 지불해서는 안 되고, nucleolus는 정확히 같은 양만큼 지불해야 함을 나타낸다. 따라서 상위계층으로 올라갈수록 연합을 통한 이득은 작아지게 될 것이다. 즉 중핵에 의한 비용배분은 가장 빈곤한 연합을 가장 부유하게 만들게 되며, 이는 곧 모든 연합에 대한 잉여의 최소치를 최대로 해주는 비용배분을 찾는 것과 동일하게 된다. 이는 가능한 한 코어의 경계로부터 가운데 방향으로 멀리 있는 코어의 중심점을 찾는 것이라 볼 수 있다.

2.1.3 샤플리벨류와 중핵

협조적 게임이론에서 제시한 두 방법을 간단히 비교 설명하면 다음과 같다.

<표 1> 샤플리벨류 vs 중핵

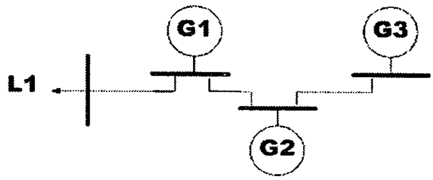
	샤플리벨류에 의한 비용 배분	중핵에 의한 비용 배분
정의	한계비용에 대한 가중평균에 의한 배분	핵의 중심점에 의한 비용배분
장점	· 동적 인센티브 제공 · 한계주의적 입장	· 정적 인센티브 제공 · 평등주의적 입장 · 지속성을 가짐
단점	· 비용 배분이 핵의 내부에 있음을 담보하지 못함	· 전체적 단조성을 만족하지 못함

위 장단점을 살펴보면, 샤플리벨류의 경우 효율성을 중핵의 경우는 형평성을 좀 더 강조했다고 볼 수 있다.

2.2 사례연구

2.2.1 샤플리벨류에 의한 비용할당

계산의 편의를 위해 다음과 같이 가정한다.
- 각 발전기가 단독으로 부하까지 송전설비를 건설 비용
  G1: 900억
  G2: 1500억
  G3: 1800억
- 전체 송전설비 건설비용 1800억
- 세 발전기가 단일 송전선을 이용하여도 송전제약은 발생하지 않는다.



<그림 1> 사례계통

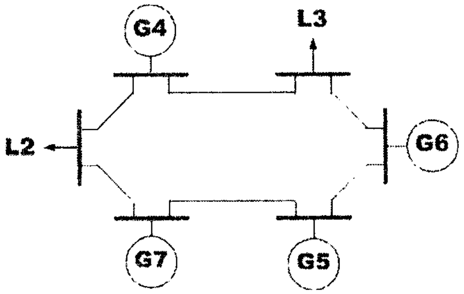
위 사례와 비용을 샤플리벨류에 의해 할당 결과는 다음과 같다.

<표 2> 비용할당액 <억원>

건설순서 \ 발전소	1	2	3
1-2-3	900	600(1500-900)	300(1800-1500)
1-3-2	900	0	900(1800-900)
2-1-3	0	1500	300(1800-1500)
2-3-1	0	1500	300(1800-1500)
3-1-2	0	0	1800
3-2-1	0	0	1800
	300억 (900×1/3)	600억 (900×1/3) +(1500-900)×1/2	900억 (900×1/3) +(1500-900)×1/2 +(1800-1500)

2.2.2 중핵에 의한 비용할당

계산의 편의를 위해 다음과 같이 가정한다.
- 각 발전기의 설비용량은 동일하다.
- 각 발전기가 단독으로 부하까지 송전설비를 건설비용은 다음과 같다.
  G4: 2000억
  G5: 3000억
  G6: 2500억
  G7: 1500억
- 두 발전기가 연합을 이루어 부하에 전원공급시 송전설비 건설비용
  G4+G5= 4000억, G4+G6= 3800억, G4+G7= 2900억
  G5+G6= 4500억, G5+G7= 4200억, G6+G7= 3000억
- 세 발전기가 연합을 이루어 부하에 전원공급시 송전설비 건설비용
  G4+G5+G6= 5100억, G4+G5+G7= 4900억
  G5+G6+G7= 4700억, G4+G6+G7= 4800억
- 모든 발전기가 연합을 결성하여 송전설비 건설시
  G1+G2+G3+G4=5200억
- 모든 발전기가 송전선을 이용하여도 송전제약은 발생하지 않는다.



<그림 2> 사례계통

위 사례와 비용을 중핵에 의해 할당 결과는 다음과 같다. (단위 억원)

$$G_5 = 3000 \times \frac{1}{2} = 1500$$

$$G_6 = 3000 \times \frac{1}{4} + (4500 - 3000) \times \frac{1}{2} = 1500$$

$$G_4 = 3000 \times \frac{1}{8} + 1500 \times \frac{1}{4} + (5100 - 4500) \times \frac{1}{2} = 1050$$

$$G_7 = 1050 + (5200 - 5100) = 1150$$

즉 연합을 이루어 단일 송전설비를 이용함으로써 얻는 이익은 다음과 같다.

<표 3> 발전기별 송전설비 공유를 통한 이득

	단독 설비시	중핵에 의한 비용	이득
G4	2000	1050	1000
G5	3000	1500	1500
G6	2500	1500	1050
G7	1500	1150	350

중핵에 의한 비용배분은 사회적 약자를 보호하고, 비용을 평준화 시키는 것을 다시 한번 확인할 수 있다. 동일 설비용량의 발전기이었기 때문에 송전비용을 가장 많이 드는 G5는 이들 중 가장 약자에 속했고 중핵에 의한 비용할당으로 가장 많은 이익을 얻을 수 있었다. 또한 모든 발전기가 연합을 이루어 송전설비를 이용하는 것이 모두 자신의 이익을 발생할 수 있기에 위와 같은 연합은 결성될 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 협조적 게임의 해 중 비용배분방법으로 주목받고 있는 샤플리밸류와 중핵을 송전비용의 할당문제에 적용하여 보았다. 이는 이해관계가 상충된 상황에서 주어진 자료들을 기초로 하여 공평하면서도 효율적인 해결 방안을 제시할 수 있기에, 경제주체들의 비용의 분담에 관하여 각기 다른 의견을 갖고 있는 현 상황에서도 적용 가능하다고 생각된다.

또한 계통의 특성을 고려하여 두 가지 사례별로 나누어 적용 가능한 게임이론의 해를 제시함으로써 추후 송전비용 할당문제에 있어서 쉽게 응용 할 수 있을 것이다.

사례 2의 경우는 편익을 이용한 비용배분이 좀 더 현실적인 해가 될 수 있으며, 전력산업의 경우 편익 산정은 각 발전기의 발전량이 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부에서 시행하는 2단계 BK21 사업(과제명: 신 에너지원 개발 및 전력시스템 연계기술 연구팀)의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] Francois Leveque, "Transport Pricing of Electricity Networks", p73-101, 2003
[2] S. Hart, A. Mas-Colell, Bargaining and value, Econometrica 64, 357-380, 1996
[3] T. M. Liggett, An invariance principle for conditioned sums of independent random variables, J. Math. Mech. 18, 559-570, 1968
[4] L.S. Shapley, M. Shubik, Pure Competition, Coalitional Power, and Fair Division, International Econ. Review 10 337-362, 1969
[5] 전영섭, "샤플리 밸류를 이용한 비용배분의 공평성",경제논집,30.2, 231-244, 1991
[6]이상원외 2명,"게임이론적 접근법에 의한 공항이착륙시설의 비용배분", 경제논집 36.1, 79-105 ,1997
[7] 권오규, "Family of values를 이용한 비용배분문제에 대한 게임이론적 접근", 경제학석사학위논문 2006
[8] 허가형, "기후변화협약과 온실가스저감에 관한 게임 이론적 접근",경제학박사학위논문, 2005