

마이크로그리드 활성화를 위한 정책 의사결정 문제 연구: 마이크로그리드의 잉여·부족 전력의 가격을 중심으로

김학진* · 이삼열**

요 약

현대 산업에 근간이 되는 전력의 분배·소비 효율화를 위한 스마트그리드의 성패는 구성 노드들의 지능적 상호작용에 좌우된다. 특히 구성요소 중 하나인 마이크로그리드는 네트워크의 유연성과 효율적 전력생산에 중요한 역할을 한다. 이 논문은 마이크로그리드에서 생산되는 전력의 잉여와 부족을 해결하기 위한 전력의 판매 및 구매의 의사결정이 상위의 전력 생산이나 판매회사(혹은 배전회사)와의 쌍무적 계약에서 정책적으로 어떻게 결정되어야 하는지를 연구했다. 두 계약 당사자들의 의사결정 모형을 비용함수를 통해 제시하고 비협조적 게임이론을 통하여 분석하여 해를 도출하였으며, 해를 통해 나타나는 전력 거래가격과 마이크로그리드의 전력 생산의 관계를 밝힘으로써 마이크로그리드 활성화를 위한 정책적 함의를 제시하였다.

주요 단어 : 마이크로그리드, 스마트그리드, 게임이론, 가격 모형

* 연세대학교 경영대학 교수(주저자). hakjin@yonsei.ac.kr

** 연세대학교 행정학과 부교수(교신저자). samyoul@yonsei.ac.kr

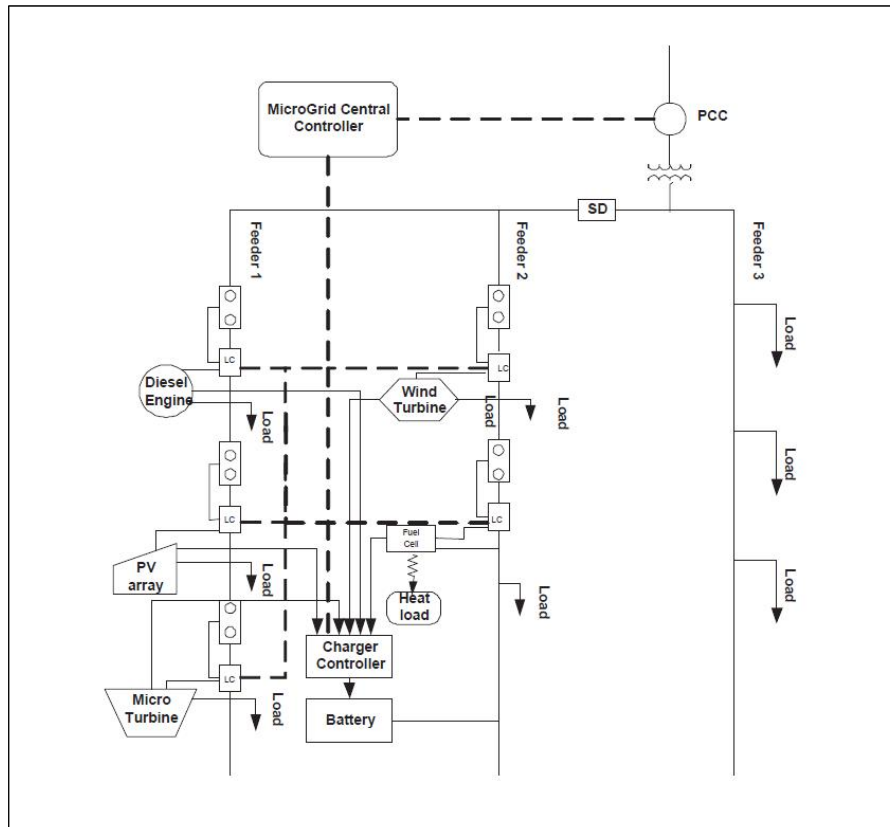
I. 서 론

지난 수년간 전 세계 경제가 금융위기로 인해 불황에 빠진 가운데 이를 타개하기 위해 많은 정부들은 재정적으로 사회간접자본에 많은 자원을 투입하였다. 특히 사회간접자본으로서의 전력은 산업의 근간으로서 가장 중요한 부분 중 하나로 간주되어, 전력산업 고도화를 통해 경제상황의 변화에 따른 경쟁력 있는 적정 전력 생산 규모를 유지하는 것이 매우 중요한 과제다. 전력생산의 고도화는 지구온난화로 인한 청정에너지 생산 비중의 확대와 정보기술의 발전(The Economist, 2013) 모두를 그 과제로 포함하고 있다.

우리나라 정부도 ‘스마트그리드2030’ 계획을 수립하고 ‘스마트그리드 국가로드맵’을 작성하여, 이를 통해 ‘스마트그리드 구축을 통한 저탄소 녹색성장 기반 조성’이라는 목표를 달성하려고 노력하고 있다. 특히 2030년까지 정부가 2조7천억 원, 민간 24조 8,000억 원을 투자할 것으로 전망했다(지식경제부, 2010). 특히 제주도에서 스마트그리드 실증단지 사업을 추진하여 스마트그리드 관련 기술의 테스트 장을 제공하고 관련 기술의 발전을 도모하였다. 이러한 정책적 관심과 기술의 유망성을 고려할 때 스마트그리드의 핵심을 이루고 있는 마이크로그리드에 대한 수리모형에 기반을 둔 분석은 매우 의미가 있다고 할 수 있다. 스마트그리드(smart grid)는 소비자에게 효과적으로 전력을 전달하도록 자체적으로 작동하고 서로 간에 통신하며 상호작용하는 지능형 노드들의 전력 네트워크를 의미한다. 전통적인 전력망과는 다르게, 전력생산·분배 시스템과 정보시스템의 결합으로 전력의 생산·분배·소비의 네트워크 구조에서 각 노드간의 정보 소통을 활용해 생산 분배 소비를 보다 효과적, 효율적으로 만든다. 차세대 전력시스템으로서의 스마트그리드가 제기하는 많은 이슈들 중에서 마이크로그리드에 관한 문제들은 해결하여야 할 중요한 문제들 중

하나이다. 왜냐하면, 마이크로그리드는 전통적인 전력시스템에서 다루지 않는 지역적 차원에서의 전력 생산·소비를 위한 소규모의 전력시스템으로서 전체 스마트그리드의 부분 네트워크를 구성하기 때문이다. 특히 소규모의 태양광 발전, 풍력 발전, 연료 및 디젤 발전과 전력 저장을 통해 지역의 전력 소비를 감당하고, 생산되는 잉여의 전력을 전체 네트워크와의 거래를 통해 전체 네트워크의 전력 생산 및 소비를 뒷받침하는 중요 전력 생산 단위다.

[그림 1] 마이크로그리드의 일반적인 구조의 예



자료: (Mohamed and Koivo, 2007)

[그림 1]은 Mohamed and Koivo(2007)가 제시한 마이크로그리드의 일반적인 구조의 예를 보여준다. 전력을 공급하기 위해, 태양광패널(PV Array)과 풍력터빈(Wind Turbine)에 의한 발전 모듈들은 신재생 에너지를 사용하여 전력을 생산하고, 디젤엔진(Diesel Engine)과 소규모 터빈(Micro Turbine) 그리고 연료전지(Fuel Cell) 등은 소규모의 전통적인 화석 연료를 사용하여 전력을 생산한다. 이렇게 생산된 전력 중 잉여 전력은 전지(Battery)를 통해 저장되어 미래의 수요에 대비하게 된다. 전체 마이크로그리드를 총괄하는 제어장치(Microrgrid Central Controller)가 있고 국부적인 설비를 제어하는 국부제어장치(LC)가 설비와 네트워크 사이에 위치한다. 전력통제점(Power Control Center: PCC)은 전체 마이크로그리드와 전국적인 전력망을 연결하는 유일한 연결점이다. 전체 전력 네트워크와의 전력 교환은 이 점을 통과하게 된다.

스마트그리드 상의 전력의 거래에 있어서는 많은 모형이 있는데 이를 크게 분류하면 쌍무거래(bilateral contract) 모형과 풀(pool) 모형으로 나눌 수 있고, 후자는 의무 풀모형, 강제 풀모형, 자발적 풀모형으로 나뉜다(조창현, 2002). 이 논문은 쌍무거래를 전제로 전력 거래에서의 가격이 정책적으로 결정될 때, 마이크로그리드의 전력 생산과의 메카니즘적 연계성을 게임이론을 이용한 수리적인 모형을 통해 살펴본다. 그리고 이에 따른 마이크로그리드의 활성화를 위한 가격 구조에 대한 정책을 제안한다.

이 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에 지금까지 있었던 게임이론적인 연구에 대한 간단한 설명이 나오고, 그 뒤에 3장에서는 이 글에서 다루는 모형의 비용함수에 대한 설명과 함께 연구 모형의 소개와 이에 대한 설명이 이어진다. 4장에서 모형의 해의 해석적인 유도를 통해 이 연구에서 가장 핵심적인 내쉬의 비협조적 균형점이 어떻게 도출되는지를 보인다. 5장에서는 이 내쉬 균형점을 마이크로그리드의 정책 의사결정에서 어떻게 해석되는지를 설명하고 이로부터 정책적인 함의를 논하여 본다. 마지막으로 6절에서 논문의 결론과 앞으로의 연구이슈에 대한 논의를 한다.

II. 문헌 연구

스마트그리드와 관련하여 게임이론을 적용한 연구가 유럽에서는 비교적 활발히 이루어졌다. 아직 전력시장이 완전히 성립되지 않았기 때문에 게임이론을 사용하여 주로 풀모형을 전제로 연구를 진행하였다.

Saad et al (2012)은 게임이론을 전력 스마트그리드에 적용한 사례들을 정리하여 적용된 분야를 크게 세 가지로 분류하였다.

첫째는 마이크로그리드 분배 네트워크에 이용한 경우다. 여기서 분배 네트워크라 함은 전체 스마트그리드 전력 네트워크에서 일부인 전력회사와 다수의 마이크로그리드들을 연결하는 네트워크를 의미한다. 이는 자유롭게 경쟁하는 전력시장이 존재한다는 가정 하에 이 자유 전력시장에서 마이크로그리드들 간에 혹은 전력회사들과의 관계에서 발생하는 전력의 거래의 문제를 다루는 것으로 Saad et al.(2011)은 마이크로그리드들 간의 협력적 관계를 협조적 게임이론으로 분석하였다. Friedman et al.(1993)과 Weaver and Krein(2009)는 이중 경매를 통한 전력거래시장에서의 관계를 분석하였다. Kasbekar and Sarkar(2012)는 경쟁적인 전력시장의 상황에서 한 지역에 위치하는 여러 개의 독립적인 마이크로그리드들의 전력 잉여와 부족이 확률적으로 나타날 때 잉여 전력을 갖고 있는 마이크로그리드가 전력 부족을 겪는 마이크로그리드에 전력을 파는 경쟁적인 시장에서의 시장가격 결정을 게임 이론을 사용해 분석했다. 이는 가격 결정의 측면에서 본 연구와 가깝지만 본 연구가 마이크로그리드를 장려하기 위해 정부가 주도적인 전력정책을 실시하는 것에 초점을 맞추고 있기 때문에 차이점을 보인다.

둘째는 스마트그리드 수요 관리 측면에 적용한 것이다. 시간에 따른 가격결정이나 전력 사용 시기의 조정을 통해 수요량을 관리함으로써 스마트그리드의 전력 생산자의 입장에서 전력 생산을 효율화하는 분야다. Mohsenian-Rad

et al.(2010)에서 소비자들의 가정 전자기기들 간의 전력 수요에 대한 스케줄링의 문제, 즉 어떤 기기를 어느 시간대에 작동하고 전력 수요가 많을 시에는 어느 시간대로 이동할 것인가 하는 스케줄링 문제를 해결하기 위해 비협조적 게임이론을 이용하였다. 또한 Vytelingum et al.(2010)에서는 가정마다 소비자 개인이 스마트 전력 저장장치를 소유하고 있다고 가정하고 비협조적 게임이론을 활용하여 분석하였다. 소비자가 언제 얼마만큼의 전력을 구매·저장하고 직접 전력 공급을 이용하여 사용하는지를 분석하였고, 모든 가정이 동시에 전력 저장 수요를 발생시킬 때 초래되는 전력공급 회사에 대한 부하를 어떻게 조정하는지 등의 문제들을 분석하였다.

마지막은 게임이론을 스마트그리드 네트워크에서의 정보 교환 문제에 초점을 맞추어 네트워크를 어떤 기술을 통해 구현할 것인가에 적용하였다. 일단 네트워크 구성에 있어서 전력선통신 (Power Line Communication, PLC), 와이파이, 이동통신망 혹은 유선인터넷망 등의 여러 선택의 수단이 존재한다. Saad et al.(2012)에서는 전력선이 비용적인 측면에서 단기적으로 가장 유망하지만 기술적으로 많은 한계가 따른다고 분석했다. 특히 용량의 제한과 거리에 비례한 급속도의 통신 용량감소 등이 원활한 전력망의 상호 정보 교환과 지능형 의사결정에 장애가 되고 있으며 이를 극복하기 위한 기술적인 도전에 직면하고 있다고 지적했다. 이를 극복하기 위한 제안으로 다중 홉(multi-hop) 네트워크 구조와 기술을 들고 있다 (Pavlidou et al., 2011; Ferreira et al., 2010; Dugas, 2005; Park et al., 2010; Zhang et al., 2011; Rusitschka et al., 2009; Niyato et al., 2011; Zhu et al., 2011; Lampe et al., 2005). Saad et al.(2012)은 스마트그리드의 네트워크 설정문제를 비협조적 게임을 활용해 해결하려 했다. Gamma et al.(2007)은 마이크로그리드 내에서 분산된 발전기 간의 협력을 통해서 얻을 수 있는 이득을 협력적 게임이론을 통해서 분석하였다. 3개의 디젤 발전기를 가정하고 전력 부하 곡선, 전력 소모 곡선, 부하의 경제적인 분산배치 그리고 협력을 통한 비용과 이익을 분석하였다. 또한 협력적인 망 구축을 위한 여러 기술적인 부분도 논의하였다

이상에서 Saad et al.(2012)가 분류한 스마트그리드와 관련하여 게임이론을 적용한 연구들을 살펴보았다. 앞에서 언급한 바와 한국적 상황에서 스마트그리드 시장의 가격정책 등을 수리모형을 사용해 분석한 논문은 찾기 어려우며 스마트그리드 시장에 대한 관심과 투자를 고려할 때 이에 대한 수리모형을 활용한 분석은 매우 유용하다고 판단된다.

III. 연구 모형

이 연구는 전력 거래에서 쌍무적인 계약관계를 전제로 한다. 거래의 양 편 중 한 편은 마이크로그리드가 되고 다른 한편은 마이크로그리드의 잉여 전력을 구매하거나 마이크로그리드의 전력 생산이 불충분할 때 마이크로그리드의 초과 전력 수요를 충족하기 위해 추가적인 전력을 공급하는 전력회사 혹은 전력을 유통 혹은 분배하는 회사가 존재한다. 이 연구에서는 마이크로그리드의 거래 상대방을 파워그리드로 명명하기로 한다.

먼저 연구 모형을 제시하기에 앞서 이전에 연구된 문헌을 통해 전력을 생산하는데 발생하게 되는 비용 요소들이 중요하게 생각되는지를 볼 필요가 있다. Mohamed and Koivo(2007)의 분석에 따르면 전력생산비용은 생산전력량과 선형적 관계를 지닌다고 보고 있다. 이를 자세히 보면 다음과 같다. N 개의 발전설비가 주어지고 M 가지의 환경가스가 배출된다고 가정했을 때 비용은 다음과 같이 주어졌다.

$$\sum_{i=1}^N (F_i C_i + \kappa_i P_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha_j (EF_{ij} P_i) + p \cdot P_{PG}$$

식에서 보이는 것처럼 비용은 세 개의 항으로 나뉘었다. 첫째 항은 전력 생산에 소요되는 비용이다. 이 생산비용은 다시 두 부분으로 나뉘어, 첫 부분에

서 C_i 는 디젤과 천연가스를 사용하여 발전할 시에 단위당 연료의 비용을 의미하고 F_i 는 연료소모율을 의미하여 그 곱이 고정비로서의 연료비를 차지하고 있음을 보인다. 두 번째 부분은 변동비로 단위당 변동비를 나타내는 일정한 계수 κ_i 에 생산된 전력량 P_i 를 곱함으로써 나타난다. 둘째 항은 전력생산 시 배출되는 배기가스에 의한 환경 부담 비용, 즉 예를 들어 탄소배출 비용 등이 포함된다. 발전기 i 와 배출가스 j 에 대한 배출계수 EF_{ij} 와 전력생산량 P_i 의 곱으로 배출가스의 양이 표시되고, 이 배출가스가 환경에 미치는 영향을 비용으로 환산하는 계수 α_j 를 곱하여 환경적인 비용이 계산된다. 세 번째는 파워그리드로부터 전력을 구매할 때 드는 비용을 의미한다. p 는 파워그리드로부터 전력을 사올 경우 단위당 비용을 의미하여 구매된 전력량 P_{PG} 의 곱으로 구매된 총 비용을 계산한다. 위의 비용 모형에 대한 연구를 바탕으로 본 연구는 의사결정 모형을 제시한다. 먼저 환경 비용의 문제는 마이크로그리드와 파워그리드 간의 거래에 영향을 미치는 요인이 아니므로 문제를 간단히 하기 위해 고려에서 제외하기로 한다. 또한 생산비용에서 고정비에 대한 부분은 전력생산량의 영향을 받지 않는 부분이므로 본 연구의 모형에서 제거하여 생각하여도 무방하다. 즉 이 부분은 모형의 계산된 비용에 일정한 고정비를 더함으로써 총 비용을 계산할 수 있기 때문에 제외되더라도 의사결정에 영향을 끼치지 않는다. Mohamed and Koivo(2007)의 분석을 활용하여 본 연구에서는 전력 생산비용은 생산전력량과 선형적 관계를 지니는 것으로 가정할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 전력을 생산하고 남은 잉여분의 전력을 파는 마이크로그리드와 전력 잉여 시 잉여분을 구입하고 부족 시에는 필요한 양을 파는 파워그리드의 의사결정 모형을 선형 모형으로 아래와 같이 제시한다. 먼저 아래와 같이 모형에서 사용하는 기호들을 정의한다.

〈표 1〉 모형에서 사용되는 기호들

c	마이크로그리드의 자체 단위당 전력 생산비용
$\bar{D}$	수정요소에 의해 조정된 마이크로그리드 자체 전력 수요량
p_b	마이크로그리드에서 필요한 전력을 파워그리드에서 살 때의 전력 단위당 구매 가격 (파워그리드 의사결정 변수)
p_s	마이크로그리드에서 생산한 전력을 파워그리드에 팔 때의 전력 단위당 판매 가격 (파워그리드 의사결정 변수)
Q	마이크로그리드에서 생산할 전력량 (마이크로그리드 의사결정 변수)
$Q_{\min}$	마이크로그리드의 최소 전력 생산량
$Q_{\max}$	마이크로그리드에서 생산할 수 있는 최대 전력 생산량
$p_b^{\min}$	파워그리드에서 설정할 수 있는 최소 전력 구매 가격
$p_b^{\max}$	파워그리드에서 설정할 수 있는 최대 전력 구매 가격
$p_s^{\min}$	파워그리드에서 설정할 수 있는 최소 전력 판매 가격
$p_s^{\max}$	파워그리드에서 설정할 수 있는 최대 전력 판매 가격

모형에서 마이크로그리드가 담당하는 수요에 대해서는 수정요소를 감안하여 실제 수요가 아닌 조정된 수요 $\bar{D}$ 를 고려하였다. 이는 일반적으로 마이크로그리드의 특성상 풍력과 태양광 발전과 같이 초기 시설비의 투자 이후 고정적으로 전력이 공급되는 시설이 있고 이를 통해 전체 수요 중의 일부가 항상 충족될 수 있기 때문이다. 그리고 이런 시설들은 유지비 이외에는 추가적인 비용이 들어가지 않으며 바람의 양이라든지 햇빛의 강도 같은 환경적인 제약에 의해 발전량이 영향을 받지만 이는 기술적인 문제로 기술적으로 해결해야 할 부분이다. 이런 이유로 시장 메커니즘을 이슈로 하는 이 논문에서는 마이크로그리드로부터 일정한 전력이 항상 생산된다고 가정하고 또 전체 비용에 영향을 끼치지 않는 요소여서 마이크로그리드 모형의 전력량 결정에는 포함되지 않게 된다. 따라서 모형에서의 수요는 일정 생산 전력에 의해 충족되는 수요를 제외한 조정된 수요를 고려하게 된다. 그리고 앞으로 이를 총 수요와 구별하여 조정수요로 부르기로 한다. 또한 여기서 문제가 의미 있게 되

기 위해 모형에서의 변수들이 택하는 값에 대해 $Q_{\min} < Q_{\max}$, $p_b^{\min} < p_b^{\max}$, $p_s^{\min} < p_s^{\max}$ 를 가정한다. 위의 정의된 기호에 의해 다음과 같이 의사결정 모형을 설정할 수 있다.

마이크로그리드 모형

$$\min \quad cQ + p_b(\bar{D} - Q)^+ - p_s(\bar{D} - Q)^- \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \quad (2)$$

마이크로그리드는 생산량을 결정하는 모형이다. 제약식에 주어진 것과 같이 생산량은 주어진 최소 생산량 ($Q_{\min}$) 과 최대 생산 가능량 ($Q_{\max}$) 과의 사이에서 (2)에 의해 결정된다. 목적함수식 (1)은 비용을 최소화하는 것으로 첫째 항은 생산량에 대한 비용을 계산하고 있다. 둘째와 셋째 항은 생산량이 수정된 수요와 비교되었을 때 수정 수요와의 차이의 함수로 표현된다. 즉 둘째 항은 생산량이 수정 수요보다 작을 경우 수요를 충족시키기 위해 파워그리드에서 구입하는 비용이다. 수식에서 $(\bar{D} - Q)^+ = \max\{0, \bar{D} - Q\}$ 으로 나타내어진다. 셋째 항은 생산량이 수정 수요보다 클 경우 수요를 충족시키고 남게 되는 양이 $Q - \bar{D}$ 이고 이에 파워그리드에 판매하는 가격 p_s 를 곱하여 구한 수익을 표현하고 있다. 비용의 입장에서 수익은 음수의 비용이므로 앞에 -1의 계수를 갖게 되다. 여기서 $(\bar{D} - Q)^- = \max\{0, -(\bar{D} - Q)\}$ 이다. 부연하면 생산량과 수정 수요의 차이 $|\bar{D} - Q|$ 는 (1)에서 사용한 두 개의 양의 합 $(\bar{D} - Q)^+ + (\bar{D} - Q)^-$ 으로 표시된다. 이때 $Q > \bar{D}$ 인 경우 합의 식은 $0 + (Q - \bar{D}) = Q - \bar{D}$ 로 수요 충족 후 남은 양을 표시하고 $Q < \bar{D}$ 인 경우는 $(\bar{D} - Q) + 0 = \bar{D} - Q$ 으로 충족시키지 못한 필요량을 표시한다. 따라서 이 두 개의 양이 동시에 양의 값을 갖지 못하며 (1)의 식은 Q 의 값에 따라 구매 시 들어간 순 비용 혹은 전력 판매 시 들어간 순 비용을 계산하게 된다.

파워그리드 모형

$$\min \quad -p_b(\bar{D}-Q)^+ + p_s(\bar{D}-Q)^- \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad -p_b(\bar{D}-Q)^+ + p_s(\bar{D}-Q)^- \quad (4)$$

$$p_b^{\min} \leq p_b \leq p_b^{\max} \quad (5)$$

파워그리드 입장에서 비용을 최소화 하는 모형이 위에 제시되었다. 모형에서 파워그리드는 마이크로그리드의 전력을 잉여분을 구입하거나 부족분을 판매하는 역할을 하게 된다. 그리고 마이크로그리드와의 거래에서 파워그리드는 마이크로그리드의 전력 구매 가격 p_b 와 판매 가격 p_s 을 결정함으로써 비용을 최소화 할 수 있다. 두 가격은 (4)와 (5)에서 나타난 바와 같이 정책적으로 결정된 구매-판매 가격의 범위 안에서 움직일 수 있다. (3)에서 파워그리드의 비용은 마이크로그리드의 비용에서 자체 생산비용을 제외한 부분의 반대로 나타난다. 즉 마이크로그리드의 전력 구매 비용은 파워그리드의 전력 판매 수익이 되고 마이크로그리드의 전력 판매 수익은 파워그리드의 전력 구입 비용이 된다. 위의 모형에서 $p_b^{\max} < p_s^{\min}$ 을 가정한다. 일반적으로 정책적으로 마이크로그리드를 통한 전력 생산을 활성화하기를 원하기 때문에 이를 권장하기 위한 인센티브 제공으로 마이크로그리드에서 전력을 사올 경우 더 높은 가격을 책정하게 되기 때문이다. 따라서 문제에서 $p_b < p_s$ 임이 가정된다.

IV. 모형 분석 및 해의 도출

1. 보수적인 해

두 모형에서 먼저 마이크로그리드와 파워그리드가 취할 수 있는 보수적인 해를 구하고 이를 통해 마이크로그리드나 파워그리드가 취할 수 있는 최악

상황에서의 의사결정이 어떻게 되는지를 살펴본다. 마이크로그리드에서의 비용함수를 $f(Q, p_b, p_s)$ 라 하고 파워그리드의 비용함수를 $g(Q, p_b, p_s)$ 라고 하자.

$$\begin{aligned} f(Q, p_b, p_s) &= cQ + p_b(\bar{D} - Q)^+ - p_s(\bar{D} - Q)^- \\ g(Q, p_b, p_s) &= -p_b(\bar{D} - Q)^+ + p_s(\bar{D} - Q)^- \end{aligned}$$

마이크로그리드의 입장에서 보수적인 해의 의사결정은 파워그리드의 결정이 마이크로그리드의 입장에서 최악일 경우 마이크로그리드의 비용을 최소화하는 것이다. 즉 최악의 파워그리드 의사결정은 $\max_p f(Q, p_b, p_s)$ 이고 이는 (1)에서 p_b 와 p_s 의 각각의 값이 $p_b^{\max}$ 와 $p_s^{\min}$ 일 때이다. 이 상황에서 마이크로그리드의 비용을 최소화하도록 전력 생산량을 결정하는 문제는

$$\min_Q f(Q, p_b^{\max}, p_s^{\min}) = \min_Q [cQ + p_b^{\max}(\bar{D} - Q)^+ - p_s^{\min}(\bar{D} - Q)^-]$$

로 단위 생산 비용 $c > 0$ 이지만 이 값과 $p_b^{\max}, p_s^{\min}$ 의 값의 차이에 따라 최소의 비용함수 값이 달라진다. 먼저 비용 함수 f 는 구간 선형 함수이다. $c \leq p_b^{\max} < p_s^{\min}$ 인 경우 f 는 단조감소 함수이고 이때 $Q = Q_{\max}$ 에서 비용이 최소화가 된다. $p_b^{\max} < p_s^{\min} \leq c$ 인 경우는 f 가 단조증가 함수이므로 $Q = Q_{\min}$ 에서 최소가 된다. $p_b^{\max} < c < p_s^{\min}$ 경우는 f 가 Q 의 값이 증가할 때 역시 같이 증가하다가 Q 가 $\bar{D}$ 일 때 최대가 되었다가 이 값을 지나면 감소하는 구간 선형 함수이다. 따라서 최소값은 Q 가 한계값을 가질 때의 값을 비교함으로써 얻어진다. 즉 $f(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 과 $f(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 중에 최소값이 비용함수의 최소값이 된다.

파워그리드의 보수적인 해는 $g(Q, p_b, p_s)$ 를 최대로 만드는 마이크로그리

드의 의사결정이 주어졌을 때 비용을 최소화하는 파워그리드의 의사결정을 구하면 된다. 비용함수 (3)는 두 개의 부분으로 나누어진다. 마이크로그리드에 전력을 판매할 때 나오는 수익(음으로 규정된 부분)과 전력을 구매할 때 드는 구매 비용(양으로 규정된 부분)으로 주어진 가정에 따라 $p_b < p_s$ 이고 이 함수는 $\bar{D}$ 에서 미분가능하지 않는 구간 선형이면서 단조 증가인 함수이다. 따라서 비용을 최적으로 하는 마이크로그리드의 생산량 결정은 $Q = Q_{\max}$ 에서 결정되면 파워그리드의 의사결정 문제는 다음과 같다.

$$\min_{(p_b, p_s)} g(Q_{\max}, p_b, p_s) = \min_{(p_b, p_s)} [-p_b(\bar{D} - Q_{\max})^+ + p_s(\bar{D} - Q_{\max})^-]$$

이 때 $Q_{\max}$ 값과 $\bar{D}$ 값에 따라 다음이 유도된다. $Q_{\max} < \bar{D}$ 일때 위 식의 첫째 항만 존재하게 되므로 $p_b = p_b^{\max}$ 가 $Q_{\max} > \bar{D}$ 일 때는 $p_s = p_s^{\min}$ 이 최소의 비용을 만든다. 따라서 파워그리드는 $(p_b, p_s) = (p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 를 보수적인 해로 갖고 $g(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 이 최소의 비용이 된다. 지금까지의 설명을 요약하면 다음과 같다.

정리 1: 마이크로그리드의 보수적인 의사결정은 $c \leq p_b^{\max} < p_s^{\min}$ 인 경우 $Q = Q_{\max}$ 이고 비용은 $f(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 에서 최소가 되고 $p_b^{\max} < p_s^{\min} \leq c$ 인 경우 $Q = Q_{\min}$ 으로 비용 $f(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 에서 최소가 되며 $p_b^{\max} < c < p_s^{\min}$ 인 경우

$$\min \{f(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min}), f(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})\}$$

으로 두 값 중 최소가 될 때의 Q 값이 보수적인 해가 된다. 파워그리드의 보수적인 해는 $(p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 으로 $g(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 을 보수적인 최소의 비용으로 갖게 된다.

Aubin (1982)에 따르면 보수적인 해는 게임에서 일종의 위협의 역할을 한다. 마이크로그리드 입장에서 보수적인 해가 갖는 비용 이상의 비용을 제시하는 어떤 해도 거절하게 되고 파워그리드의 입장에서도 마찬가지로 행동하기 때문이다. 왜냐하면 상대방이 어떤 전략을 선택한다 하더라도 게임을 수행하는 입장에서 비용을 줄이기 위해서는 일방적으로 거절하는 것이 옳기 때문이다. 따라서 여기 제시되는 보수적인 해들은 문제의 해를 고려할 시에 고려될 영역의 한계 역할을 한다. 보수적인 해가 제시하는 비용보다 큰 비용을 갖는 해는 고려 대상에서 제외되고 작은 비용을 갖는 해만이 고려 대상이 되는 것이다.

2. KKT 조건과 내쉬 해

이 절에서는 좀 더 의미있는 균형점을 찾기 위해 각 모형에 대한 분석을 진행한다. 먼저 상대방의 전략 선택이 주어졌다고 가정할 때 최적 전략의 선택 양상을 보기위해 최적해에 대한 조건을 도출해 보기로 한다. 이를 위해 마이크로그리드 모형의 라그랑지 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$L_M(Q, \lambda_{M1}, \lambda_{M2}) = cQ + p_b(\bar{D} - Q)^+ - p_s(\bar{D} - Q)^- - \lambda_{M1}(Q_{\max} - Q) - \lambda_{M2}(Q - Q_{\min})$$

라그랑지 함수를 이용해 KKT 조건을 구하면 다음과 같다. $Q = \bar{D}$ 인 경우는 문제를 풀 필요가 없으므로 경우에서 제외되었다.

$$c - p_b + \lambda_{M,1} - \lambda_{M,2} = 0 \quad \text{if } Q < \bar{D} \quad (6)$$

$$c - p_s + \lambda_{M,1} - \lambda_{M,2} = 0 \quad \text{if } Q > \bar{D}$$

$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \quad (7)$$

$$\lambda_{M,1}(Q_{\max} - Q) = 0 \quad (8)$$

$$\lambda_{M,2}(Q - Q_{\min}) = 0 \quad (9)$$

$$\lambda_{M,1}, \lambda_{M,2} \geq 0 \quad (10)$$

위의 KKT 조건을 가지고 다음과 같은 임계점들을 구해본다면, 먼저 식 (6)을 다음과 같이 쓴다.

$$\lambda_{M,1} - \lambda_{M,2} = p_b - c \quad \text{if } Q < \bar{D} \quad (6-1)$$

$$\lambda_{M,1} - \lambda_{M,2} = p_s - c \quad \text{if } Q > \bar{D} \quad (6-2)$$

$Q < \bar{D}$ 일 때 (6-1) 에서 전력 구매 가격 p_b 와 자체 단위생산비 c 의 값에 따라 다음의 세 가지 경우가 발생된다. 즉 $c > p_b$ 이면 (10)과 함께 $0 \leq \lambda_{M,1} < \lambda_{M,2}$ 의 관계가 된다. (8)과 (9)에서 $\lambda_{M,1}$ 과 $\lambda_{M,2}$ 는 동시에 양수가 될 수 없다. 왜냐하면 Q 가 $Q_{\min}$ 과 $Q_{\max}$ 동시에 될 수 없기 때문이다. 따라서 $\lambda_{M,1}^* = 0$ 이어야 하고 $\lambda_{M,2}^* = c - p_b > 0$ 이므로 (9)에서 $Q^* = Q_{\min}$ 이다. 만약 $c < p_b$ 라면 $0 \leq \lambda_{M,2} < \lambda_{M,1}$ 이고 앞의 이유와 마찬가지로 $\lambda_{M,2}^* = 0$ 이 되고 $\lambda_{M,1}^* = p_b - c > 0$ 이므로 (8)에서 $Q^* = Q_{\max}$ 이다. $c = p_b$ 인 경우는 $\lambda_{M,1} = \lambda_{M,2}$ 이고 (8)과 (9)에서 Q 가 동시에 $Q_{\min}$ 과 $Q_{\max}$ 가 될 수 없으므로 $\lambda_{M,1}^* = \lambda_{M,2}^* = 0$ 이 되어 Q^* 는 $Q_{\min}$ 과 $Q_{\max}$ 의 어느 값이든 될 수 있다. $Q > \bar{D}$ 일 때는 (6-2)를 사용한다. 이때 $c > p_s$ 이면 위와 마찬가지로 $\lambda_{M,1}^* = 0$ 이고 $\lambda_{M,2}^* = c - p_s > 0$ 이며 $Q^* = Q_{\min}$ 가 된다. 그리고 $c < p_s$ 이면 마찬가지로 $\lambda_{M,2}^* = 0$, $\lambda_{M,1}^* = p_s - c > 0$ 그리고 $Q^* = Q_{\max}$ 이다. $c = p_s$ 인 경우 마찬가지로 $\lambda_{M,1}^* = \lambda_{M,2}^* = 0$ 이고 Q^* 은 $Q_{\min}$ 과 $Q_{\max}$ 사이의 어떤 값에서도 최적이다. 이를 정리하면 다음과 같은 임계점 정보를 얻게 된다.

보조정리 2: 위의 KKT 조건으로부터 임계점은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{array}{llll} Q < \bar{D} & c > p_b & \lambda_{M1}^* = 0 & \lambda_{M2}^* = c - p_b \quad Q^* = Q_{\min} \\ \text{경우} & & & \end{array}$$

$$\begin{array}{llll}
c < p_b & \lambda_{M1}^* = p_b - c & \lambda_{M2}^* = 0 & Q^* = Q_{\max} \\
c = p_b & \lambda_{M1}^* = 0 & \lambda_{M2}^* = 0 & Q_{\min} \leq Q^* \leq Q_{\max} \\
Q > \bar{D} & c > p_s & \lambda_{M1}^* = 0 & \lambda_{M2}^* = c - p_s \quad Q^* = Q_{\min} \\
\text{경우} & & & \\
c < p_s & \lambda_{M1}^* = p_s - c & \lambda_{M2}^* = 0 & Q^* = Q_{\max} \\
c = p_s & \lambda_{M1}^* = 0 & \lambda_{M2}^* = 0 & Q_{\min} \leq Q^* \leq Q_{\max}
\end{array}$$

위의 임계점의 정보를 이용하여 다음으로 파워그리드의 전략 선택이 주어졌을 때 마이크로그리드의 최적 생산량을 결정할 수 있다. 최적 생산량의 결정에 대한 수식적인 증명은 부록으로 돌린다.

정리 3: 마이크로그리드의 의사결정 모형의 최적 생산량 결정은 다음의 세 가지 경우로 나누어진다.

$$\bar{D} > Q_{\max}$$

조정수요가 최대 생산 가능량 보다 크면 마이크로그리드의 의사결정은 전력그리드로부터의 전력구입을 고려하고 전력구입 가격 p_b 와 자체 생산단가 c 의 비교로 결정된다. 즉 $p_b < c$ 이면 최적 생산량은 $Q_{\min}$ 이 되고 $p_b > c$ 이면 $Q_{\max}$ 이며 만약 $p_b = c$ 이면 $Q_{\min}$ 와 $Q_{\max}$ 사이의 어떤 값에서도 최적이 된다.

$$\bar{D} < Q_{\min}$$

조정수요가 최소 생산 가능량보다 작으면 마이크로그리드의 생산량은 수요를 충족시키고 남는 양이 발생한다. 따라서 의사결정은 전력의 판매를 고려하고 전력판매 가격 p_s 와 자체 생산단가 c 의 비교로 결정된다. 즉 $p_s < c$ 이면 최적 생산량은 $Q_{\min}$ 에서 결정되고 $p_s > c$ 이면 $Q_{\max}$ 에서 결정되며 $p_s = c$ 일 경우 $Q_{\min}$ 와 $Q_{\max}$ 사이의 어떤 값에서도 최적이 된다.

$Q < \bar{D}$ 경우	$c > p_b$	$\lambda_{M1}^* = 0$	$\lambda_{M2}^* = c - p_b$	$Q^* = Q_{\min}$
	$c < p_b$	$\lambda_{M1}^* = p_b - c$	$\lambda_{M2}^* = 0$	$Q^* = Q_{\max}$
	$c = p_b$	$\lambda_{M1}^* = 0$	$\lambda_{M2}^* = 0$	$Q_{\min} \leq Q^* \leq Q_{\max}$
$Q > \bar{D}$ 경우	$c > p_s$	$\lambda_{M1}^* = 0$	$\lambda_{M2}^* = c - p_s$	$Q^* = Q_{\min}$
	$c < p_s$	$\lambda_{M1}^* = p_s - c$	$\lambda_{M2}^* = 0$	$Q^* = Q_{\max}$
	$c = p_s$	$\lambda_{M1}^* = 0$	$\lambda_{M2}^* = 0$	$Q_{\min} \leq Q^* \leq Q_{\max}$

$$Q_{\min} < \bar{D} < Q_{\max}$$

조정수요가 최소 생산 가능량과 최대 생산 가능량 사이의 값이 되면 전력구입 가격 p_b , 판매 가격 p_s , 그리고 자체 생산단가 c 의 비교로 결정된다. 일반적으로 환경 친화적인 전력 공급의 인센티브로 시장에서 구입 가격을 판매 가격보다 낮게 책정한다고 보았을 때 ($p_b < p_s$), 자체 생산단가가 판매 가격보다 낮게 되면 ($c \leq p_b$) 최적 전력 생산량은 $Q_{\max}$ 이고 생산단가가 구입 가격보다 높게 되면 ($c \geq p_s$) 최적 전력 생산량은 $Q_{\min}$ 에서 결정된다. 마지막으로 생산단가가 구입 가격과 판매 가격의 사이에 있다면 ($p_b < c < p_s$) 다음의 두가지 측정치 $(c - p_b)(\bar{D} - Q_{\min})$ 와 $(p_s - c)(Q_{\max} - \bar{D})$ 가 비교되어 전자가 클 경우 최적 전력 생산량은 $Q_{\max}$ 에서 후자가 클 경우는 $Q_{\min}$ 에서 결정된다.

위의 마이크로그리드의 최적생산량의 결정과 비슷한 방식으로 KKT 조건을 이용하여 마이크로그리드의 전략 선택이 주어졌을 때 파워그리드의 최적 전략 역시 결정이 가능하다. 파워그리드 모형에서의 최적해의 조건에 대해 알아보기 위해 파워그리드 모형의 라그랑지 함수 L_P 를 다음과 같이 구한다.

$$L_P(p_b, p_s, \lambda_{P1}, \lambda_{P2}, \lambda_{P3}, \lambda_{P4}) = -p_b(\bar{D} - Q)^+ + p_s(\bar{D} - Q)^- - \lambda_{P1}(p_b - p_b^{\min}) \\ - \lambda_{P2}(p_b^{\max} - p_b) - \lambda_{P3}(p_s - p_s^{\min}) - \lambda_{P4}(p_s^{\max} - p_s)$$

그리고 정의된 라그랑지 함수를 이용한 KKT 조건을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{cases} Q - \bar{D} - \lambda_{P,1} + \lambda_{P,2} = 0 & \text{if } Q < \bar{D} \\ -\lambda_{P,1} + \lambda_{P,2} = 0 & \text{if } Q \geq \bar{D} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} -\lambda_{P,3} + \lambda_{P,4} = 0 & \text{if } Q \leq \bar{D} \\ Q - \bar{D} - \lambda_{P,3} + \lambda_{P,4} = 0 & \text{if } Q > \bar{D} \end{cases} \quad (12)$$

$$p_b^{\min} \leq p_b \leq p_b^{\max} \quad (13)$$

$$p_s^{\min} \leq p_s \leq p_s^{\max} \quad (14)$$

$$\lambda_{P,1}(p_b - p_b^{\min}) = 0 \quad (15)$$

$$\lambda_{P,2}(p_b^{\max} - p_b) = 0 \quad (16)$$

$$\lambda_{P,3}(p_s - p_s^{\min}) = 0 \quad (17)$$

$$\lambda_{P,4}(p_s^{\max} - p_s) = 0 \quad (18)$$

$$\lambda_{P,1}, \lambda_{P,2}, \lambda_{P,3}, \lambda_{P,4} \geq 0 \quad (19)$$

이제 마이크로그리드의 경우와 마찬가지로 구해진 KKT 조건에서 임계점에 대한 정보를 구하고 이를 이용하여 파워그리드의 최적의 전략을 결정한다. 즉 $Q < \bar{D}$ 인 경우 KKT 조건 (11)에서 $\lambda_{P,2} = \lambda_{P,1} + \bar{D} - Q$ 와 (19)에 의해 $\lambda_{P,2} > \lambda_{P,1} \geq 0$ 이 된다. 이는 $\lambda_{P,2}^*$ 가 양임을 의미하므로 (16)에서 $p_b^* = p_b^{\max}$ 가 성립된다. 이는 (15)에서 $\lambda_{P,1}^* = 0$ 을 의미한다. 또 (12)에서 $\lambda_{P,3} = \lambda_{P,4}$ 이므로 (17)과 (18)을 동시에 만족하기 위해서는 $\lambda_{P,3}^* = \lambda_{P,4}^* = 0$ 이어야 하고 이는 p_s^* 가 $p_s^{\min}$ 과 $p_s^{\max}$ 사이의 어느 값을 가져도 (17)과 (18)을 만족한다. 둘째로 $Q > \bar{D}$ 인 경우는 (12)에서 $Q - \bar{D} + \lambda_{P,4} = \lambda_{P,3}$ 를 얻고 $\lambda_{P,3}^* > 0$ 이 된다. (17)에서 $p_s^* = p_s^{\min}$ 이 되고 이는 (18)에서 $p_s \neq p_s^{\max}$ 이므로 $\lambda_{P,4}^* = 0$ 이 된다. 마찬가지로 (11)과 (15)(16)에서 $\lambda_{P,1}^* = \lambda_{P,2}^* = 0$ 이 되고 p_b^* 는 $p_b^{\min}$ 과 $p_b^{\max}$ 사이에서 어느 값이든 결정될 수 있다. 마지막으로 $Q = \bar{D}$ 로 결정된다면 (11)과 (12)에서 $\lambda_{P,1} = \lambda_{P,2}$ 와 $\lambda_{P,3} = \lambda_{P,4}$ 이므로 (15)-(18)에서 p_b, p_s 는 $p_b^{\min}, p_b^{\max}$ 와 $p_s^{\min}, p_s^{\max}$ 값으로 결정될 수 없고 $\lambda_{P,1}^* = \lambda_{P,2}^* = \lambda_{P,3}^* = \lambda_{P,4}^* = 0$ 이 된다. 따라서 $p_b^{\min} \leq p_b^* \leq p_b^{\max}$ 와

$p_s^{\min} \leq p_s^* \leq p_s^{\max}$ 로 결정된다. 이상의 도출된 결과에 따라 파워그리드의 최적 전략을 정리하면 다음과 같다.

정리 4: 파워그리드의 최적 의사결정은 다음의 세 가지 경우로 나뉜다.

$$Q < \bar{D}$$

마이크로그리드의 전력생산량이 조정수요보다 작을 경우 마이크로그리드는 부족한 전력량을 구매하게 되고 파워그리드는 구매 가격 p_b 를 최대 구매가격 $p_b^{\max}$ 로 결정한다.

$$Q > \bar{D}$$

전력 생산량이 조정수요보다 클 경우 마이크로그리드는 남은 전력량을 파워그리드에 판매하게 되고 파워그리드는 판매 가격 p_s 를 최소 판매 가격 $p_s^{\min}$ 에서 결정한다.

$$Q = \bar{D}$$

이 경우는 판매 가격과 구매 가격을 주어진 범위 내의 어느 가격으로 결정하여도 최적이 된다.

따라서 위의 결과에 따라 파워그리드는 구매 가격과 판매 가격을 $p_b^* = p_b^{\max}$, $p_s^* = p_s^{\min}$ 로 결정하면 마이크로그리드의 생산량과 상관없이 항상 최적의 상태에 있게 된다.

지금까지의 정리에서 각 의사결정자마다 상대방의 선택 전략이 주어졌다고 가정할 때의 최적 전략이 어떻게 결정 되는지를 보았다. 이 정보를 이용하여 게임에서 비협조적 균형점인 내쉬균형점을 구할 수 있다. 먼저 마이크로그리드의 입장에서 보자. 주어진 파워그리드의 최적 값 $(p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 에 대해 정리에서 말하는 각 경우당 Q 값은 앞의 KKT 조건에서 유도된 마이크로그리드의 최적 전략 선택에 대한 정리에 의해 다른 전략 선택보다 최소의 비용을 야기하는 전략이다. 즉 마이크로그리드의 입장에서 최선인 것이다. 마찬가지로

로 주어진 마이크로그리드의 최적 값 Q^* 에 대해서도 KKT 조건에서 유도된 파워그리드의 최적값 정리에 의하면 선택된 값 $(p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 이 최적의 전략 즉 최소의 비용을 야기하는 전략이 된다. 따라서 정리에서 주어진 값들을 내쉬균형점이 된다.

정리 5: 마이크로그리드와 파워그리드의 의사결정 모형은 다음과 같은 내쉬균형점을 갖는다. 먼저 $\bar{D} > Q_{\max}$ 일 때 $c \leq p_b^{\max}$ 이면 균형점은 $(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 이고 $c > p_b^{\max}$ 이면 $(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 이다. $\bar{D} < Q_{\min}$ 일 때 $c \leq p_s^{\min}$ 이면 균형점은 $(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 이고 $c > p_s^{\min}$ 이면 $(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 이다. $Q_{\min} < \bar{D} < Q_{\max}$ 일 때 $c \leq p_b^{\max} < p_s^{\min}$ 이면 $(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 이 $p_b^{\max} < p_s^{\min} \leq c$ 이면 $(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 이 균형점이 되고 $p_b^{\max} < c < p_s^{\min}$ 인 경우 $(c - p_b^{\max})(\bar{D} - Q_{\min})$ 과 $(p_s^{\min} - c)(Q_{\max} - \bar{D})$ 를 비교하여 전자가 크면 $(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 후자가 크면 $(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min})$ 가 균형점이다.

구해진 내쉬균형점을 앞의 보수적인 해와 비교를 해 볼 수 있다. $p_b^{\max} < c < p_s^{\min}$ 의 경우에 $\min\{f(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min}), f(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min})\}$ 는 f 의 정의에 의해서

$$\begin{aligned} f(Q_{\min}, p_b^{\max}, p_s^{\min}) &= c\bar{D} + (p_b^{\max} - c)(\bar{D} - Q_{\min}) \\ f(Q_{\max}, p_b^{\max}, p_s^{\min}) &= c\bar{D} + (c - p_s^{\min})(Q_{\max} - \bar{D}) \end{aligned}$$

이므로 각각 두 번째 항의 값의 비교에 따라 전자와 후자의 값이 최적 값으로 결정되면 이는 위의 내쉬균형점의 경우와 일치한다. 따라서 내쉬균형점은 보수적인 해임을 알 수 있다.

2. KKT 조건과 내쉬 해

1) 해의 해설

이 절에서는 내쉬균형점에 의한 전략의 선택에 대해 좀 더 정책적인 논의를 한다. 먼저 파워그리드의 전략 균형점은 항상 $p_b^{\max}$ 와 $p_s^{\min}$ 에서 결정된다. 이 연구에서 항상 $p_b^{\max} < p_s^{\min}$ 을 전제하고 있으므로 파워그리드의 전략 선택은 항상 $p_b < p_s$ 인 선택이 될 수밖에 없다. 그 얘기는 파워그리드의 입장에서 마이크로그리드로부터의 전력 구매에 대해서는 전력 판매보다 높은 가격에 제공되기 때문에 비용 절감의 입장에서는 항상 파워그리드의 전력 구입 가격인 p_s 를 되도록 낮은 단가를 유지할 필요가 있다. 즉 최선의 선택은 $p_s^{\min}$ 에서 결정된다. 마이크로그리드로의 전력 공급에서는 판매 가격이 전력 구매 가격과는 독립적으로 결정되지만 정부의 정책상 구매 가격보다는 낮은 가격으로 설정되었다. 따라서 비용절감의 측면에서 판매 가격을 최고 $p_b^{\max}$ 로 유지하는 것이 파워그리드의 입장에서 최선의 선택이 된다 할 수 있다.

마이크로그리드의 입장에서는 앞 절에서 보는 바와 같이 세 가지 경우로 정리되었다. 첫째로 자체 조정수요가 마이크로그리드가 생산할 수 있는 최대 생산 가능량을 초과할 경우($\bar{D} > Q_{\max}$), 마이크로그리드는 생산된 모든 전력을 자체 수요를 충당하는데 사용해야 한다. 따라서 전력 판매 가격은 큰 의미를 갖지 못하고 생산된 전력량이 수요를 충족하는데 부족할 경우 부족분을 파워그리드에서 구입하여야 하므로 전력 구입비용이 더 의미가 있게 된다. 따라서 이 경우 수요의 얼마만큼을 마이크로그리드 전력 생산량으로 감당할지는 마이크로그리드에서의 전력 생산단가와 파워그리드에서의 전력 구입 단가와 비교에 의해 결정이 된다. 즉 전력 생산 단가가 전력 구입 단가보다 작으면($c \leq p_b^{\max}$) 내쉬균형점에 의해 최적의 전력 생산량은 최대 생산 가능량 $Q_{\max}$ 에서 결정된다. 다른 말로 생산단가가 낮기 때문에 가능한 많은 수요분

을 전력 생산을 통해서 조달하는 것이 유리하다. 반대로 전력 생산 단가가 전력 구입 단가보다 크면 ($c > p_b^{max}$) 최적 생산량은 최소 생산 요구량 Q_{min} 에서 결정된다. 이는 생산 단가가 구입 단가보다 높으므로 굳이 전력을 생산을 하는 것보다 파워그리드에서 구입하는 것이 비용 상 유리하다는 것을 의미한다.

둘째로 자체 조정수요가 마이크로그리드에 요구되는 최소 전력 요구 생산량보다 작은 경우이다. ($\bar{D} < Q_{min}$) 이때는 항상 마이크로그리드에서 생산되는 전력 생산량이 수요를 초과하게 되고 수요를 충족시키고 남은 잉여분이 생기게 된다. 따라서 전력 구매 가격은 의미 없게 되고 전력 판매 가격 p_s^{min} 이 의미를 갖는다. 최적 전력 생산량은 전력 생산 단가와 전력 판매 단가의 비교로 결정된다. 전력 생산 단가가 전력 판매 단가보다 낮은 경우 ($c \leq p_s^{min}$), 마이크로그리드의 입장에서는 ($p_s^{min} - c$)가 단위당 양의 이익이 되므로 가능한 많은 양을 생산하여 파워그리드에 판매하는 것이 낫다. 따라서 최적의 생산량은 최대 생산 가능량 Q_{max} 에서 결정된다. 만약 생산 단가가 판매 단가보다 크면 ($c > p_s^{min}$), ($p_s^{min} - c$)의 값은 음이 되어 파워그리드에 대한 전력의 판매는 이익 대신 손실을 유발한다. 따라서 마이크로그리드의 입장에서는 당연히 전력의 판매량을 줄여야 하고 이를 위해 전력 생산량을 줄일 것 이다. 따라서 최적의 생산량의 최소 생산 요구량 Q_{min} 에서 결정된다.

마지막으로 자체 조정수요가 최소 전력 요구 생산량과 최대 생산 가능량의 사이에서 발생할 경우를 보겠다. 먼저 생산 단가가 전력 판매 가격과 전력 구매 가격보다 작을 때 ($c \leq p_b^{max} < p_s^{min}$), 전력을 조정수요보다 적게 생산하면 부족분을 파워그리드에게서 구매해야하고 구매 가격과 생산 단가의 차 ($p_b^{max} - c$)는 양의 비용이 된다. 따라서 비용을 줄이기 위해 마이크로그리드는 생산량을 늘릴 것이다. 생산이 조정수요보다 많으면 판매가격이 생산 단가보다 크므로 그 차 ($p_s^{min} - c$)는 마이크로그리드에게 수익으로 오게 되어 비

용을 줄이는 효과가 있다. 따라서 마이크로그리드는 생산량을 더 늘려 최대로 생산하는 것이 유리하다. 따라서 최적의 생산은 최대 생산 가능량 $Q_{\max}$ 에서 결정된다. 만약 생산 단가가 전력 구매 가격과 전력 판매 가격보다 큰 경우 ($p_b^{\max} < p_s^{\min} \leq c$), 잉여 전력의 판매에서 얻는 단위당 수익 ($p_s^{\min} - c$)은 음이 되어 비용을 증대시키고 부족 전력의 구매는 단위당 비용($p_b^{\max} - c$)이 음이 되어 비용을 감소시키는 역할을 한다. 따라서 마이크로그리드는 최대한 생산량을 줄이려 할 것이고 최적의 생산량은 최소 생산 요구량 $Q_{\min}$ 에서 결정된다. 생산 단가가 전력 구매 가격과 전력 판매 가격 사이에 있다면 ($p_b^{\max} < c < p_s^{\min}$), 전력을 구매할 때의 비용과 전력을 판매할 때의 이익을 비교하게 된다. 즉 생산 단가가 전력 구매 가격보다 크므로 마이크로그리드는 전력을 생산하는 대신 전력을 구매함으로 단위당 $c - p_b^{\max}$ 만큼의 이익을 올릴 수 있다. 전력 구매로 최대 얻을 수 있는 전체 이익은 단위당 이익과 최대 전력 부족분 ($\bar{D} - Q_{\min}$)의 곱이다. 한편 전력 판매로도 단위당 $p_s^{\min} - c$ 만큼의 이익을 얻을 수 있다. 그리고 이 경우 전력 판매를 통해서 얻을 수 있는 최대 총 이익은 단위당 이익과 최대 전력 잉여분 ($Q_{\max} - \bar{D}$)의 곱이다. 전력의 부족과 잉여는 배타적인 관계에 있으므로 마이크로그리드는 이 둘 중 하나의 선택만 가능하다. 즉 전력 생산에 부족분을 만드느냐 아니면 잉여분을 만드느냐. 이는 두 경우의 최대 총 가능 이익을 비교하여 더 많은 이익이 나는 쪽으로 선택할 것이고 따라서 전력 구매의 이익이 크면 최적 생산량을 최소 생산 요구량 $Q_{\min}$ 으로 결정할 것이고 전력 판매의 이익이 크면 최대 생산 가능량 $Q_{\max}$ 으로 결정할 것이다.

이와 같은 마이크로그리드-파워그리드의 경제적인 동인에 대한 반응을 살펴볼 때 전력의 분산 생산을 통해 한 국가의 전력 공급의 효율성을 개선하기 위한 장치로 그리드 시스템을 도입하려는 정책 입안자의 입장에서 어떤 방식으로 시스템이 운용되어야 하는지에 대한 아이디어가 제시된다고 할 수 있다.

즉 안정적으로 시스템이 구축되기까지는 마이크로그리드의 전력 생산 시스템이 장려되어야 하고 그것이 전력 그리드 시스템의 초기 성패의 중요한 요인 중 하나이므로 정책 입안자의 입장에서 마이크로그리드 시스템을 통한 전력 생산이 가능한 많이 이루어지도록 하여야 하고 또한 마이크로그리드 시스템에 대한 투자에 있어서도 경제적인 동인을 제공하여야 한다.

2) 정책적 함의

위의 최적해 분석과 논의를 통해 볼 때 이는 마이크로그리드로 하여금 최대 생산 가능량에서 최적 생산량이 결정되도록 할 필요가 있다. 따라서 이를 위하여 다음과 같은 정책적인 제안이 마련될 수 있다.

정책 1. 마이크로그리드의 자체 조정수요가 최대 생산 가능량보다 클 때 마이크로그리드의 전력 구매 가격을 생산 단가보다 높게 유지한다.

정책 2. 마이크로그리드의 자체 조정수요가 최소 생산 요구량보다 작을 때, 마이크로그리드의 전력 판매 가격을 생산 단가보다 높게 유지한다.

정책 3. 마이크로그리드의 자체 조정수요가 최소 생산 요구량과 최대 생산 가능량 사이에 있을 때, 전력 구매 가격과 전력 판매 가격을 생산 단가보다 높게 유지하거나 전력 구매 가격을 생산 단가보다 낮게 할 때는 적어도 전력 판매 가격을 생산 단가보다 높게 유지해야 하고 전력 판매로부터 오는 최대 총 가능이익이 전력 구매로부터 오는 최대 총 가능 이익보다 크도록 판매 가격을 설정해야 한다.

V. 결론 및 토의

본 연구는 마이크로그리드에서 생산되는 전력의 부족과 잉여를 파워그리드와 쌍무적으로 거래할 때 거래 가격과 마이크로그리드의 전력 생산량과의 관계를 게임이론에 근거한 모형을 근거로 살펴보고 정부의 마이크로그리드 활성화 정책 하에서 거래 가격 결정의 정책적 의미를 살펴보았다. 자세히 살펴보면, 마이크로그리드와 파워그리드의 거래에 따른 비용을 최소화하는 문제를 설정하고 비협조적 게임의 이론에 따라 내쉬 균형점을 도출하였고 모형의 보수적인 해와의 관계를 살펴보았다. 해석적으로 해결된 내쉬해를 이용해 정책적인 의미를 끌어내고 마이크로그리드 활성화를 위한 정책적인 가격결정의 방향성을 도출할 수 있었다는 데에 이 연구의 공헌이 있다고 할 수 있다.

비록 제기된 게임의 모형이 해석적인 해의 도출을 위해 상대적으로 단순하게 보일 우려는 있지만, 게임 이론을 사용한 연구의 틀과 모형을 통한 분석이 의미 있는 결과를 얻어낼 수 있다는 사실을 보임으로써, 모형에 대한 좀 더 자세하고 세밀한 조건과 보다 현실적인 가정으로의 확장에 의해 문제 해결의 폭을 더 넓히고 이를 통해 증거에 기반을 둔(evidence-based) 공공정책에 일조할 수 있다고 판단된다.

본 연구를 바탕으로 다음 주제들을 추후 연구과제로 설정할 수 있다. 먼저 본 연구에서는 비용이 거래량에 선형으로 결정되는 것을 가정하고 있지만 정책적으로 다른 형태의 비용함수들로 확장할 수도 있다. 특히 비용에서 누진적인 가격체계를 통해서 이것이 마이크로그리드의 전력 생산에 어떤 인센티브를 주는지를 파악하고, 또 선형적인 가격체계와 비교를 통해 마이크로그리드의 활성화에 필요한 가격체계에 대한 심층적인 연구가 필요하다.

둘째, 현재의 연구는 쌍무적인 거래 하에서의 연구였지만 미래의 전력 거래 시장 생성을 고려할 때 거래시장에서의 가격 결정 모형과 전체 스마트그리드의 각 부분별로 주어지는 인센티브에 미치는 영향 등을 연구할 필요가 있다.

접수일(2014년 3월 14일), 수정일(2014년 7월 8일), 게재확정일(2015년 2월 17일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 조창현. 2002. 「경쟁적 전력시장에서의 전력거래제도와 전력거래방식 선택에 관한 소고: 거래비용, 경매이론 및 가격경쟁이론을 활용한 전력거래의 경제분석」. 규제연구. Vol.11, No.2, pp87-128.
- 지식경제부. 2010. 「스마트그리드 국가로드맵」.
- Aubin, J. P. 1982. *Mathematical Methods of Game and Economic Theory*. North-Holland.
- Dugas, C. 2005. "Configuring and Managing a Large-Scale Monitoring Network: Solving Real World Challenges for Ultra-Low Powered and Long-Range Wireless Mesh Networks." *International Journal of Network Management* 56(3): pp269-282.
- _____, 2013. "Innovation Pessimism: Has the Ideas Machine Broken Down?" *The Economist*, January 12th-18th, pp21-24.
- Ferreira, H. C., Lampe, L., Newbury, J., and Swart, T. G. 2010. *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*. Hoboken, NJ, Wiley.
- Friedman, D., Friedman, D. P., and Rust, J. 1993. *The Double Auction Market: Institutions, Theories, and Evidence*. Boulder, CO, Westview.
- Gamma, Paulo H. R. P., Gouvea, Marcos R., and Torres, Germano L. 2007. "Cost Allocation by Cooperation among Distributed Generators Inside a Micro Grid, Using the Cooperative Game Theory." 19th International Conference on Electricity Distribution(CIRED'07), Vienna.
- Kasbekar, Gaurav S., and Sarkar, Saswati. 2012. "Pricing Games among Interconnected Microgrids." Power and Energy Society General Meeting, IEEE.
- Lampe, L., Schober, R., and Yiu, S. 2005. "Multihop Transmission in Power Line Communication Networks: Analysis and Distributed Space-Time Coding." Proceedings in IEEE Workshop on Signal Processing Advance in Wireless Communications

- (SPAWC), New York, NY: 1006-1002.
- Mohamed, Faisal A., and Koivo, Heikki N. 2007. "System Modelling and Online Optimal Management of Microgrid with Battery Storage." 6th international conference on renewable energies and power quality (ICREPQ'07), Sevilla, Spain: 26-28.
- Mohsenian-Rad, H., Wong, V. W. S., Jatskevich, J., Schober, R., and Leon-Garcia, A. 2010. "Autonomous Demand Side Management on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 1(3): pp320-331.
- Niyato, D., Xiao, L., and Wang, P. 2011. "Machine-to-Machine Communications for Home Energy Management Systems in Smart Grid." *IEEE Communications on Management* 49(4): pp53-59.
- Park, S., Kim, H., Moon, H., Heo, J., and Yoon, S. 2010. "Concurrent Simulation Platform for Energy-Aware Smart Metering Systems." *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 56(3): pp1918-1926.
- Pavlidou, N., Vinck, A. J. H., Yazdani, J., and Honary, B. 2011. "Smart Meters for Power Grid: Challenges, Issues, Advantages and Status." *Renewable Sustainable Energy Review* 15(6): pp2736-2742.
- Rusitschka, S., Gerdes, C., and Eger, J. 2009. "A Low-Cost Alternative to Smart Metering Infrastructure Based on Peer-to-Peer Technologies." Proceedings of the 6th International Conference on European Energy Market, Leuven, Belgium.
- Saad, W., Han, Z., Poor, H. V., and Başar, T. 2012. "Game-theoretic methods for the smart grid: an overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications." *Signal Processing Magazine* 29(5): pp86-105.
- Saad, W., Han, Z., and Poor, H. V. 2012. "A Game Theoretic Approach for Multi-hop Power Line Communications." *Game Theory for Networks*: pp546-561.
- Saad, W., Han, Z., and Poor, H. V. 2011. "Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks." In Communications Workshops (ICC), IEEE International Conference.

- Vytlingum, P., Voice, T.D., Ramchurn, S. D. Rofers, A., and Gennings, N. R. 2010. "Agent-Based Microstorage Management for the Smart Grid." In Proceedings of International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), Toronto, Canada. In Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 1: 39-46.
- Weaver, W. W., and Krein, D. P. 2009. "Game-theoretic Control of Small-Scale Power Systems." *IEEE Transactions on Power Delivery* 24(3): pp1560-1567.
- Zhang, Y., Sun, W., Wang, L., Wang, H., Green, R. C., and Alam, M. 2011. "A Multi-Level Communication Architecture of Smart Grid Based on Congestion Aware Wireless Mesh Network." Proceedings of North American Power Symposium, Boston, MA.
- Zhu, Q., Wei, D., and Başar, T. 2011. "Secure Routing in Smart Grids." Proceedings of Workshop on Foundations on Dependable and Secure Cyber-Physical Systems (FDSCPS-11), Chicago, IL.

부 록

정리 3: 마이크로그리드의 의사결정 모형의 최적 생산량 결정은 다음의 세 가지 경우로 나누어진다.

$$\overline{D} > Q_{\max}$$

조정수요가 최대 생산가능량 보다 크면 마이크로그리드의 의사결정은 전력그리드로부터의 전력구입을 고려하고 전력구입 가격 p_b 와 자체 생산단가 c 의 비교로 결정된다. 즉 $p_b < c$ 이면 최적 생산량은 $Q_{\min}$ 이 되고 $p_b > c$ 이면 $Q_{\max}$ 이며 만약 $p_b = c$ 이면 $Q_{\min}$ 와 $Q_{\max}$ 사이의 어떤 값에서도 최적이 된다.

$$\overline{D} < Q_{\min}$$

조정수요가 최소 생산가능량 보다 작으면 마이크로그리드의 생산량은 수요를 충족시키고 남는 양이 발생한다. 따라서 의사결정은 전력의 판매를 고려하고 전력판매 가격 p_s 와 자체 생산단가 c 의 비교로 결정된다. 즉 $p_s < c$ 이면 최적 생산량은 $Q_{\min}$ 에서 결정되고 $p_s > c$ 이면 $Q_{\max}$ 에서 결정되며 $p_s = c$ 일 경우 $Q_{\min}$ 와 $Q_{\max}$ 사이의 어떤 값에서도 최적이 된다.

$$Q_{\min} < \overline{D} < Q_{\max}$$

조정수요가 최소 생산가능량과 최대 생산가능량 사이의 값이 되면 전력구입 가격 p_b , 판매 가격 p_s , 그리고 자체 생산단가 c 의 비교로 결정된다. 일반적으로 환경 친화적인 전력 공급의 인센티브로 시장에서 구입 가격을 판매 가

격보다 낮게 책정한다고 보았을 때 ($p_b < p_s$), 자체 생산단가가 판매 가격보다 낮게 되면 ($c \leq p_b$) 최적 전력 생산량은 $Q_{\max}$ 이고 생산단가가 구입 가격보다 높게 되면 ($c \geq p_s$) 최적 전력 생산량은 $Q_{\min}$ 에서 결정된다. 마지막으로 생산단가가 구입 가격과 판매 가격의 사이에 있다면 ($p_b < c < p_s$) 다음의 두 가지 측정치 $(c - p_b)(\bar{D} - Q_{\min})$ 와 $(p_s - c)(Q_{\max} - \bar{D})$ 가 비교되어 전자가 클 경우 최적 전력 생산량은 $Q_{\max}$ 에서 후자가 클 경우는 $Q_{\min}$ 에서 결정된다.

증명) $\bar{D} > Q_{\max}$ 인 경우는 보조정리 2의 $Q \leq \bar{D}$ 에 해당하므로 항상 (6-1)을 사용하여 보조정리에 나타난 임계점에 따라 최적의 생산량이 달성된다. $\bar{D} < Q_{\min}$ 인 경우는 항상 (6-2) 식에 의해 보조정리 2의 $Q \geq \bar{D}$ 에 해당하여 보조정리 2의 임계점에서 역시 최적이 달성된다. $Q_{\min} < \bar{D} < Q_{\max}$ 인 경우는 (6-1)과 (6-2)가 동시에 고려되므로 Q 의 영역을 두 개로 나누어 고려한다. 즉 $D(Q) \equiv [Q_{\min}, \bar{D}] \cup [\bar{D}, Q_{\max}]$ 로 나누어 계산한다. 이 때 앞에서 $p_b < p_s$ 를 전제로 함으로 다음의 다섯 경우를 고려할 수 있다.

$$c < p_b < p_s$$

만약 $Q \leq \bar{D}$ 일 때 보조정리 2에 따라 $Q^* = Q_{\max}$ 이지만 이는 주어진 구간 밖에 있으므로 달성되지 않는다. 따라서 구간 안에서는 임계점이 존재하지 않고 비용함수가 선형 단조감소이므로 $Q^* = \bar{D}$ 에서 최적이 달성된다. 이 때 비용은 $c\bar{D}$ 이다. 만약 $Q \geq \bar{D}$ 라면 보조정리 2에 따라 $Q^* = Q_{\max}$ 가 되고 이 때의 비용 $c\bar{D} - (p_s - c)(Q_{\max} - \bar{D})$ 는 다른 구간 한계 $\bar{D}$ 의 비용 $c\bar{D}$ 보다 작으므로 이 값은 최적이 된다. 따라서 전체 영역 $D(Q)$ 에서의 최적은 $Q^* = Q_{\max}$ 이고 비용은 $c\bar{D} - (p_s - c)(Q_{\max} - \bar{D})$ 이다.

$$c = p_b < p_s$$

$Q \leq \bar{D}$ 이면 보조정리 2에서 $\lambda_{M,1}^* = 0$ 와 $\lambda_{M,2}^* = 0$ 로 $Q_{\min} \leq Q^* \leq \bar{D}$ 이고 비용은 $p_b \bar{D}$ 가 된다. $Q \geq \bar{D}$ 이면 임계치 $Q^* = Q_{\max}$ 와 한계 $\bar{D}$ 의 비용 $c\bar{D}$ 를 비교할 때 임계치에서 비용 $c\bar{D} - (p_s - c)(Q_{\max} - \bar{D})$ 이 작으므로 이 값이 최적이 된다. 따라서 전체 $D(Q)$ 에서 최적 생산량은 $Q^* = Q_{\max}$ 이고 비용은 $c\bar{D} - (p_s - c)(Q_{\max} - \bar{D})$ 이다.

$$p_b < c < p_s$$

$Q \leq \bar{D}$ 이면 보조정리 2에 의해 $Q^* = Q_{\min}$ 에서 비용은

$$cQ_{\min} + p_b(\bar{D} - Q_{\min}) = c\bar{D} - (c - p_b)(\bar{D} - Q_{\min})$$

으로 한계 $\bar{D}$ 의 비용 $c\bar{D}$ 보다 작으므로 최적이 달성된다. $Q \geq \bar{D}$ 인 경우 보조정리 2에서 $Q^* = Q_{\max}$ 의 임계치를 갖고 비용은

$$cQ_{\max} - p_s(Q_{\max} - \bar{D}) = c\bar{D} - (p_s - c)(Q_{\max} - \bar{D})$$

으로 한계 $\bar{D}$ 의 비용 $c\bar{D}$ 보다 작아 최적이 된다. 전체 영역 $D(Q)$ 에서의 최적점은 이 두 개의 임계치의 비용을 비교하여 결정된다. 즉

$$(c - p_b)(\bar{D} - Q_{\min}) < (p_s - c)(Q_{\max} - \bar{D})$$

이면 $Q^* = Q_{\max}$ 이 최적이 되고 반대의 경우 $Q^* = Q_{\min}$ 가 최적이 된다. 위 식이 등식이 되면 같은 비용의 두 개의 최적점이 생기므로 어느 하나를 선택하면 된다.

$$p_b < c = p_s$$

$Q \leq \bar{D}$ 이면 보조정리 2로 $Q^* = Q_{\min}$ 은 비용 $c\bar{D} - (c - p_b)(\bar{D} - Q_{\min})$ 으
로 최적이고 $Q \geq \bar{D}$ 이면 보조정리 2에서 $\bar{D} \leq Q^* \leq Q_{\max}$ 으로 비용이 $c\bar{D}$
이어서 전체 $D(Q)$ 에서 $Q^* = Q_{\min}$ 이 최적이 된다.

$$p_b < p_s < c$$

$Q \leq \bar{D}$ 에서 비용 $c\bar{D} - (c - p_b)(\bar{D} - Q_{\min})$ 로 $Q^* = Q_{\min}$ 이 최적이 된다.
 $Q \geq \bar{D}$ 에서는 보조정리 2에 $Q^* = Q_{\min}$ 를 임계치로 갖지만 이는 범위의
바깥에 있고 비용함수 $c\bar{D} + (c - p_s)(Q - \bar{D})$ 가 선형 단조증가이므로 $Q^* = \bar{D}$
에서 최저가 된다. 따라서 전체 $D(Q)$ 에서는 $Q^* = Q_{\min}$ 가 최적이고 비용
은 $c\bar{D} - (c - p_b)(\bar{D} - Q_{\min})$ 이다.

ABSTRACT

A Game Theoretic Decision Making on the Prices
for Surplus and Deficiency of Power Generation
in the Microgrids

Hak-Jin Kim · Sam Youl Lee

The success of the smart grid, a new power networking technology to enhance the efficiency in electric power generation, distribution and consumption as a modern industry infrastructure, depends upon the intelligent interaction among its constituents. The microgrid, one of the constituents, plays a critical role in its flexible networking and efficient power generation. This paper studies the decision-making and conditions on purchase and sales of power on the mutual contract with a power generator or a distributor in the upper layer of the network in order to deal with the power deficiency and surplus in a microgrid. From the cost functions of the two parties, their decision-making models are proposed, and Nash equilibrium is reduced as a non-cooperative game model. The solution shows the relationship between the price involved in power transaction and the power generation in a microgrid, which can be used for policies in promoting the microgrid.

Key Words : microgrid, smart grid, game theory, pricing