

스마트그리드 통신과 게임이론의 응용

배성환, 김홍석
서강대학교

요약

본 고에서는 전력시스템의 효율화를 위한 스마트그리드(Smart-grid) 통신 기술을 소개하고, 스마트그리드 통신의 다양한 문제를 해결하는데 사용될 수 있는 게임이론(Game theory)의 응용에 대해서 살펴보고자 한다. 스마트그리드는 에너지 ICT융합기술로써 전력의 수요와 공급에 대한 정보가 실시간으로 양방향 통신이 가능하기에 기존의 단방향 전력 시스템과 비교해서 에너지 효율적이고 안정적이라는 장점이 있다. 전통적인 전력시스템과는 달리 스마트그리드 환경에서는 다수의 분산 전원 공급자가 존재할 수 있으며, 전력의 소비자 또한 전력시장에 영향력을 행사할 수 있는 메커니즘을 가지고 있다. 그에 따라 복수의 공급자와 소비자로 이루어진 합리적인 경제주체들이 어떤 의사결정을 하는가에 대하여 게임이론을 통해 분석하는 연구가 활발하다. 본 논문에서는 특별히 스마트그리드에서 중요한 역할을 담당할 것으로 예상되는 수요관리(DSM: Demand Side Management) 및 마이크로그리드(Micro-grid)를 소개하고 게임이론과 접목시킨 연구들을 살펴보기로 한다.

I. 서론

스마트그리드는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 ICT 기술과 에너지 기술이 융합된 형태로서 공급 및 수요가 단방향이었던 기존의 전력망과 달리, 전력망이 지능화되고 양방향으로 이루어짐으로써 보다 에너지 효율적이고 안정적인 첨단 전력망 시스템이다. 스마트그리드는 기후 변화에 적극적으로 대응하고자 하는 전 지구적 관심과 한정된 에너지 자원을 효율적으로 사용하고자 하는 목표, 그리고 스마트그리드 사업을 통해 신성장 동력을 창출하고자 하는 의지가 결합되어 그 필요성이 세계적으로 중요하게 여겨지고 있으며 관련 시장 규모 또한 급속도로 증가하는 추세이다. 전기에너지 공급 및 사용에 중점을 둔 에너지 효율화 및 신재생 에너지원과 연계를 위한 스마트그리드 시스

템이 전 세계적으로 추진되고 있으나, 산업의 특성에 따라 가스 및 열에너지가 차지하는 비중 또한 크므로 전력, 가스, 열 등 전반적인 에너지 공급망의 효율화가 시급한 상황이다. 전세계 부문별 에너지 사용량 중 주거용 및 상업용 건물 부문 36%, 산업용 29%로 두 부문의 합이 전체의 65%를 차지하며, 이 두 부문의 에너지 효율화에 전세계가 노력을 경주하고 있으며 산업적으로 치열한 경쟁이 불가피하다[1].

스마트그리드 관점에서 산업과 빌딩 에너지를 최적화하기 위해서는 산업시설물 및 건축물과 분산 에너지원, 에너지 공급망(전력, 가스, 열)에 대하여 각각의 최적화와 함께 각 분야간 상호 연계 융합이 필수적이며 향후 에너지와 IT기술이 융합된 다양한 에너지 시스템이 필요하다. 또한, 스마트그리드 통신에서는 분산 에너지원을 효율적으로 사용하면서 전력소비자들의 에너지 비용을 최소화 하기 위해 다양한 게임이론을 적용하고 있다[2][3]. 게임이론은 큰 틀에서 살펴보면 비협조적 게임이론(Non-cooperative game theory)과 협조적 게임이론(Cooperative game theory)로 나눌 수 있다[4]. 두 이론은 게임에 참여하는 경기자(Players)의 게임 상황을 분석하는 공통점을 가지고 있으나, 그 분석의 기본 전제가 다른 것이 큰 차이점이다. 스마트그리드에서는, 경기자는 에너지를 소비하는 가정, 산업, 전기차 충전소 등등의 사용자들로 다양하게 나눌 수 있다. 특히, 비협조적 게임에서는 모든 경기자가 각자 자신의 이익에 합당한 행동을 할 것이라고 가정한다. 구속력 있는 계약(Binding agreement)을 맺는 것이 불가능하다는 전제로 시작하며, 설사 어떤 계약을 맺었다 하더라도, 한 경기자가 그것을 위반할 경우 다른 경기자들이 그를 처벌할 수 있는 수단이 없다. 반면, 협조적 게임이론은 게임에 참여하는 경기자들 전체, 혹은 일부가 연합(Coalition)을 이루어 경기자 사이에 강제가 아닌 자발적으로 구속력 있는 계약을 맺을 수 있는 상황을 분석한다. 따라서, 구속력 있는 계약을 맺었기 때문에, 한 경기자가 그 계약을 위반할 경우, 다른 경기자들이 계약을 위반한 경기자를 처벌할 수 있다.

이러한 비협조적 게임이론과 협조적 게임이론이 스마트그리드에 적용된 응용분야는 수요관리(DSM: Demand Side

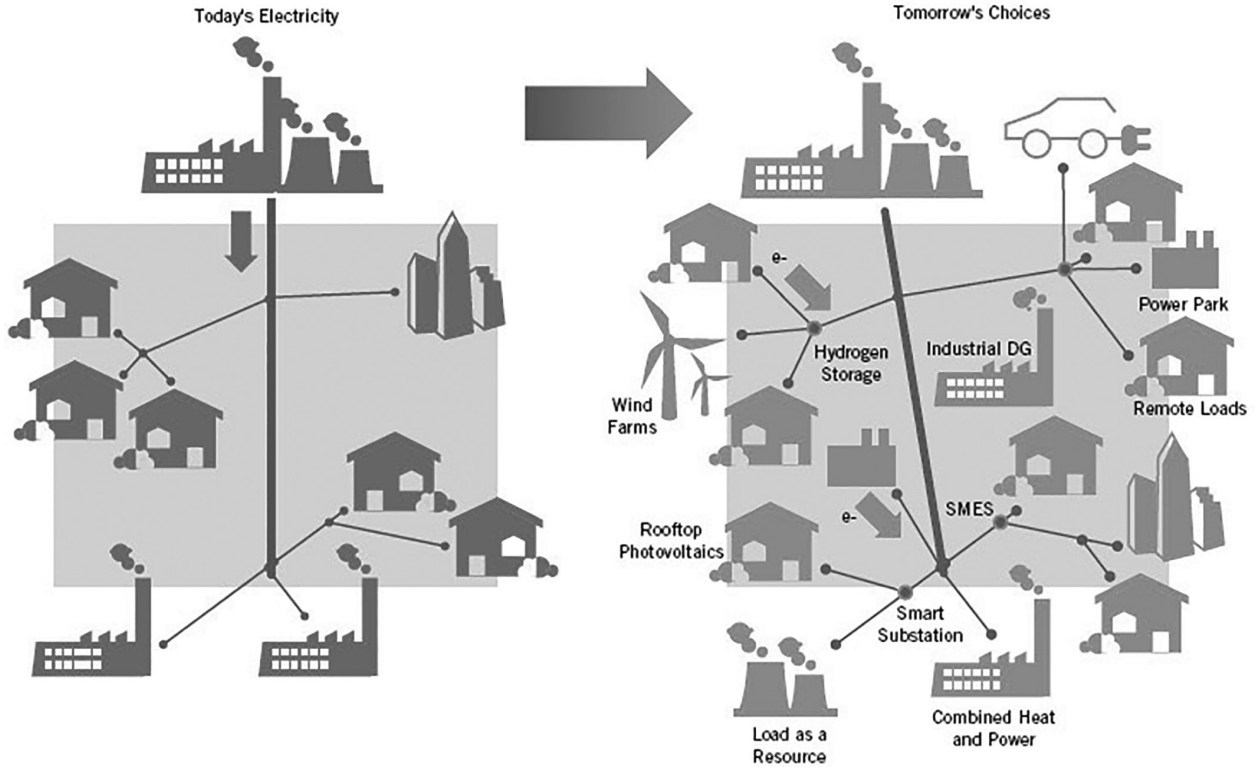


그림 1. 스마트그리드를 이용한 미래의 양방향 전력망.

Management)와 마이크로그리드(Micro-grid) 시스템이 대표적이다. 본 고에서는 상기한 두 가지 게임이론의 응용분야를 살펴보고, 스마트그리드의 효율성을 검토하도록 한다.

II. 수요관리: 비협조적 게임 모형의 적용

수요관리는 미래 스마트그리드의 핵심기능으로 자리잡고 있다. 수요관리는 전력회사가 에너지를 소모하는 사용자들의 입장을 충분히 고려하여, 좀 더 효율적인 에너지 소비형태를 유도하는 모든 제반 활동을 지칭한다. 예를 들어, 사용자들이 소비하는 전력량을 실시간으로 제공함으로써 사용전력의 수위를 조절할 수 있도록 도움을 주는 것이다. 또한, 전력회사는 전력소모량이 많은 시간대에 전력공급에 대한 부담을 줄이기 위해서 사용자들에게 인센티브를 부여하여 사용자들의 전력소비 패턴을 조절할 수 있다. 수요관리는 주로 전력회사와 사용자들 사이의 수요와 공급에 대한 모델을 제시할 수 있으며, 여기서 사용자들은 일반가정, 상업빌딩, 사업시설 등을 포함한다. 곧 상용화 될 것으로 전망되는 전기자동차 및 전기자동차 충전소들 또한 중요한 역할을 하는 사용자들이다. 전력소비량과 전력부담에 대한 우려가 커지는 가운데 수요관리의 역할은 더욱더 중요

할 수 있다. 수요관리는 사용자들이 효율적인 에너지 소비를 할 수 있도록 장기적인 관점에서 도움을 줄 수 있는 역할을 하며, 단기적인 관점에서는 수요반응(DR: Demand Response)이 쓰이고 있다. 수요반응에 대한 연구는 스마트그리드 연구분야 중에서 매우 활발하며, 국내에서도 공동주택용 수요반응, 상업시설을 대상으로 하는 수요반응, 더 나아가서 일반가정집까지 포함하는 국민발전소 형태의 수요반응에 대한 연구가 활발하다. 전력의 공급이 부족하여 위기 상황에서 수요반응을 통해 원활한 전력 수급을 달성하기 위해서는, 고속성, 확장성, 보안성 등이 중요하며, 이러한 문제를 대규모 사용자들을 대상으로 해결하기 위해 클라우드 기반의 고속 수요반응 시스템 또한 활발히 연구되고 있다[5][6]. 또한, [7]에서는 대단히 많은 수의 PHEV와 같은 분산전원 또는 수요자원이 존재하는 경우, 수많은 분산전원이 매크로그리드와 직접 전력거래를 하는 것은 불가능하기 때문에 매크로그리드와 분산전원 사이에 애그리게이터(aggregator)가 존재하는 경우, 시장을 매크로그리드와 애그리게이터, 그리고 애그리게이터와 분산전원의 2단계 시장으로 모델화 한 후, 2단계 Stackelberg 게임모형을 적용하여 분산전원의 가격대비 공급유연성에 기초하여 시장을 분석하였다.

스마트그리드에서는 일반적으로 수요관리가 수요반응을 포함하며, 이번 장에서는 수요관리에 중점을 두고 그 연구동향에 대

해 알아보기로 한다.

스마트그리드에 게임이론을 적용한 [8]에서는 비협조적 게임이론을 적용하여, 사용자들 사이에 통신환경을 바탕으로 서로의 에너지 사용패턴을 공유하는 모델(A two-way digital communication infrastructure)을 제시했다. 기존 스마트그리드 연구에서는 다수의 사용자들은 서로 연결되지 않은 상황에서 각 사용자가 유일하게 전력회사와 연결고리를 가지고 있었다. 즉, 전력회사와 각 사용자의 상호관계를 연구하는 모델이었다. 하지만 이제는 사용자들도 서로의 정보를 일정범위 안에서 공유함으로써 전체 전력소비의 패턴을 에너지 효율적인 방향으로 이끌어 나갈 수 있으며, 이와 동시에 전체 소비 전력 가격을 낮출 수 있음을 시사하고 있다. <그림 2-3>에서는 기존의 시스템과 [8]에서 제안하는 통신환경을 바탕으로 수요관리의 모습을 보여주고 있다. <그림 2>는 기존의 수요관리에서 전력회사와 각 전력사용자의 대응 관계를 보여주고 있다. 반면, <그림 3>에서는 전력사용자들이 서로의 정보를 공유하는 통신 모델을 바탕으로 분산시스템의 형태를 보여주고 있다. 여기서, 에너지 사용자는 각 가정에 부착된 ECS(Energy consumption scheduler)의 도움을 받는다.

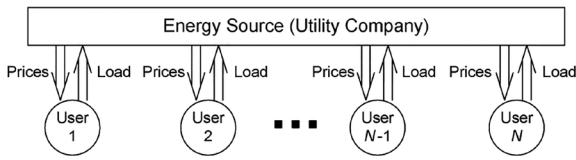


그림 2. 전력회사와 사용자의 개별 관계 [8]

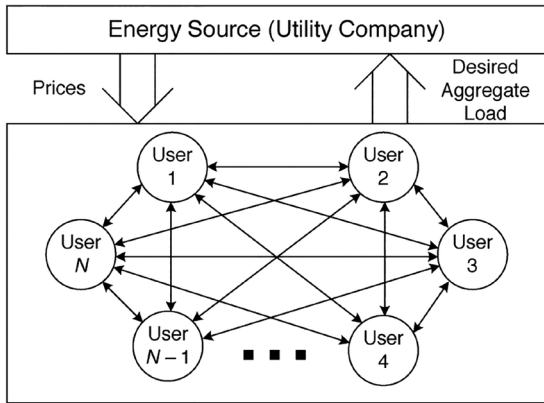


그림 3. 전력회사와 사용자들의 상호 관계 [8]

위에서 언급한 상호 관계에서 N 명의 사용자가 단 한 개의 전력회사와 연결된 상황을 고려했을 경우, 특정 h 시간에 대한 모든 사용자의 전체 전력소비량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_h \triangleq \sum_{n \in \mathcal{N}} l_n^h.$$

여기서, l_n^h 은 정해진 h 시간에 사용자 n 이 소비한 에너지를 나타낸다. 스마트그리드에서는 전체 전력 소비량뿐만 아니라, PAR(Peak-to-Average Ratio)도 전력시스템의 안전성을 평가하기 위해서 필요하다. PAR은 주어진 h 시간대비 전체 전력 소비량을 전체 시간으로 나누어준 값으로 표현할 수 있다.

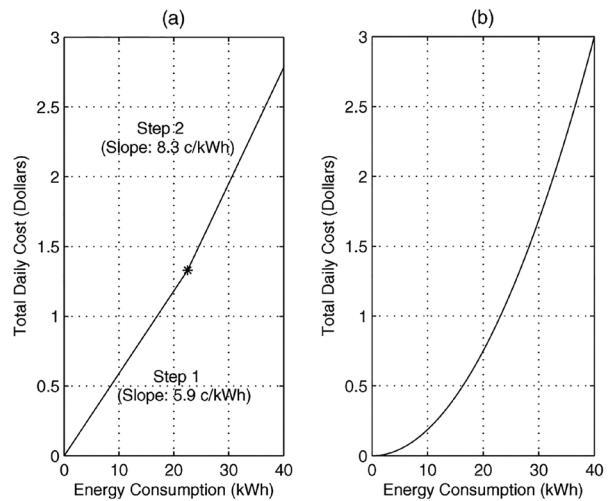
$$PAR = \frac{L_{\text{peak}}}{L_{\text{avg}}} = \frac{H \max_{h \in \mathcal{H}} L_h}{\sum_{h \in \mathcal{H}} L_h}.$$

또한, 전력 소비량에 대한 비용을 나타내기 위해서 [8]에서는 비용함수가 strictly convex를 따르며, 증가함수로 가정하였다. 일반적으로, 가장 간단한 비용함수를 다음과 같이 2차 함수로 표현 할 수 있다.

$$C_h(L_h) = a_h L_h^2 + b_h L_h + c_h$$

전력의 사용패턴 및 전력회사가 사용자들에게 부가하는 비용의 방식에 따라 a, b, c 의 상수 값을 설정할 수 있다.

<그림 4>에서는 실제로 전력회사가 사용자가 소비한 전력에 대한 비용을 계산하는 함수를 그래프로 표현하였다. <그림 4>의 (a)에서는 캐나다의 British Columbia Hydro의 모델을 나타내고 있으며, <그림 4. (b)>에서는 [8]에서 수학적 모델링을 위해 설정한 2차함수 형태의 비용모델을 나타내고 있다.

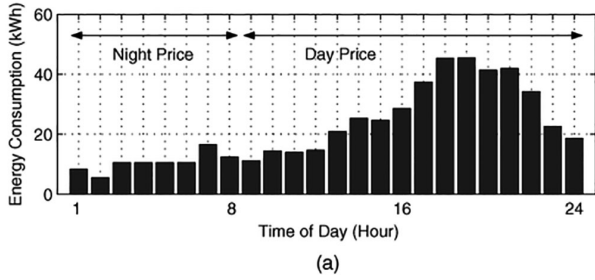


(a) BC Hydro의 two-step conservation rate 모델[9]

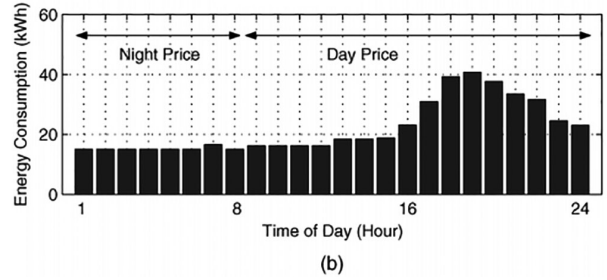
(b) 2차함수형태의 모델[8]

그림 4. 일반적인 두 비용함수의 증가 및 convexity

현실적인 전력소비량을 나타내기 위해 가정에서 흔히 사용하는 임의의 제품들에 따라 에너지 소비를 벡터로 표현할 수 있다.



(a) ECS(Energy consumption scheduler)가 없는 일반적인 전력소비 패턴



(b) 제안한 게임에서 ECS를 사용하여 스케줄링 한 경우의 전력소비패턴 [8]

그림 5. 시간에 따른 에너지 소비

$$\mathbf{x}_{n,a} \triangleq [x_{n,a}^1, \dots, x_{n,a}^H]$$

여기서 $x_{n,a}^h$ 는 각 시간 h 에 대해 사용자 n 의 특정 가전제품 a 가 소비하는 전력량으로 정의한다. 또한, 시간의 기본단위는 한 시간으로 설정한다[8].

수요관리의 목적은 전력회사가 모든 사용자들이 최소의 비용으로 전력을 사용할 수 있도록 도움을 주는 모든 제반 활동이며, 비용최소화의 문제를 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\underset{\mathbf{x}_n \in \mathcal{X}_n, \forall n \in \mathcal{N}}{\text{minimize}} \sum_{h=1}^H C_h \left(\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^h \right).$$

마지막으로 비용최소화를 위해 [8]에서는 비협조적 게임을 제안했으며, 한 가지 예로, 비협조적 게임에 참여한 임의의 사용자들은 전력회사에 지불하는 비용을 최소화 하기 위해서 비용이 저렴한 시간대에 전력을 사용할 수 있다. 제안한 비협조적 게임의 해결방법으로 내쉬 균형(Nash equilibrium)이 존재하며, 그 내쉬 균형이 유일한 해결방법이라는 것을 증명했다 [8]. 즉, 에너지를 소비하는 방식에서 있어서 이 비협조적 게임의 내쉬 균형은 다음과 같다.

$$P_n(\mathbf{x}_n^*; \mathbf{x}_{-n}^*) \geq P_n(\mathbf{x}_n; \mathbf{x}_{-n}^*), \quad \forall n \in \mathcal{N}, \mathbf{x}_n \geq 0.$$

여기서, $P_n(\mathbf{x}_n; \mathbf{x}_{-n})$ 은 사용자 n 에 대한 보수(payload)이다. 즉, 전력비용의 반대개념으로 볼 수 있다. 사용자 n 을 제외한 다른 사용자들의 전력소비량은 다음과 같이 표현할 수 있다 [8].

$$\mathbf{x}_{-n} \triangleq [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{x}_{n+1}, \dots, \mathbf{x}_N]$$

[8]에서 제안한 알고리즘에서는 사용자 n 을 제외한 모든 사용자들의 전력소비정보를 바탕으로, 사용자 n 이 선택한 x^* 가 전체 보수를 증가시킬 수 있는 지 확인할 수 있다. 이 과정을 반복하면서 사용자 n 이외에도 모든 사용자들에게 똑같이 적용되어

균형점에 도달할 경우, 비협조적 게임의 내쉬 균형을 이룰 수 있다. 수요관리에서 에너지 소비를 하는 게임이 유일한 내쉬 균형을 가지고 있다면, 어떠한 사용자들이라도 현재 선택한 전략 외에 다른 전략들을 선택할 유인이 없는 것을 말한다[4].

<그림 5>에서는 수요관리에서 게임모델을 적용 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 에너지 소비의 패턴이 어떻게 변할 수 있는지 간략하게 보여주고 있다. 또한, 앞서 설명한 PAR에 대한 값은 게임방법을 적용하지 않을 경우 2.1이며, 게임을 적용 후, 내쉬 균형을 이루었을 때는 17%가 줄어든 1.8의 값을 얻을 수 있다[8].

<그림 6>에서는 비협조적 게임방법을 적용 후, 어느 정도의 반복수행을 통해 최소의 에너지 비용을 달성할 수 있다는 사실을 실험을 통해서 증명했다[8]. 이처럼, 스마트그리드의 수요관리에서는 비협조적 게임방법을 이용하여 게임에 참여한 사용자들에게 전력의 최소 비용을 보장해 줄 수 있다는 사실을 인식시켜 줄 수 있다. 따라서, 게임에 참여한 사용자들은 전력비용 절감을 위해서 기꺼이 소비패턴을 변경할 수 있으며, 최종적으로

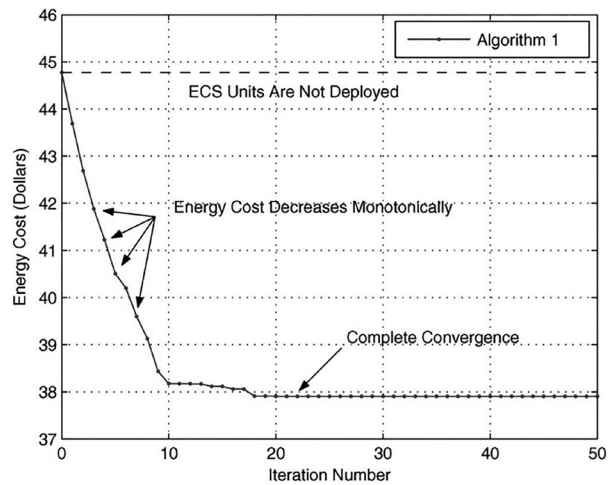


그림 6. 제안한 게임방법 및 알고리즘의 반복수행에 따른 에너지 비용 그래프 [8]

전체 소비전력비용을 절감할 수 있는 긍정적인 효과를 누릴 수 있다.

Ⅲ. 마이크로그리드: 협조적 게임 모형의 적용

마이크로그리드(Micro-grid distribution network)는 태양 전지, 풍력발전기, 신재생 에너지자원들과 같은 다양한 종류의 에너지원들이 서로 흩어진 상태에서 연결된 분산 네트워크 형태의 전력시스템이다. 마이크로그리드는 전력 소비자들에게 연결된 기존의 매크로그리드(Macro-grid)와 함께 전력을 공급할 수 있으며, 때로는 매크로그리드에 의존하지 않고 자체적으로 전력공급이 가능하다.

일반적으로 매크로그리드는 파워플랜트에서 생산되는 전기에너지를 고압선을 이용해서 하위단계의 매크로스테이션(macro-station, 또는 변전소, substation이라함)으로 전송한다. 따라서, 매크로스테이션에서는 상대적으로 낮은 전압으로 여러 지역에 전기를 분배한다. 기존의 이러한 전력시스템 상황에

서는 하나의 매크로스테이션이 널리 퍼져있는 많은 지역을 감당하기에는 부담이 컸다. 실제로 멀리 떨어져 있는 지역들에 전기를 공급하는 과정에서 많은 에너지가 소실된다. 전송단계에서 낭비하는 에너지를 최대한 줄이기 위해서는 다양한 지역에 분산된 가까운 에너지원들이 즉각 에너지가 필요한 곳에 공급을 해야 한다. 이러한 기능을 가진 마이크로그리드는 차세대 전력 시스템에서 중요한 역할을 할 수 있다. 마이크로그리드는 상대적으로 매크로스테이션에서 멀리 떨어진 지역에서도 태양발전, 풍력발전, 그리고 기타 다양한 신재생 에너지들을 이용하여 전력공급이 가능하다. 따라서, 마이크로그리드를 이용하며 전력손실을 최소화할 수 있으며, 전체 스마트그리드에서 소비하는 에너지의 비용을 절감할 수 있다. 이 장에서는 마이크로그리드 환경에서 연합을 하여 협조적 게임을 제시한 모형을 살펴보고자 한다.

〈그림 7〉은 앞서 설명한 일반적인 마이크로그리드를 보여준다[10]. 이 그림에서 에너지를 소비하는 주체는 생략됐지만, 마이크로그리드에서 사용하는 에너지원은 풍력, 태양열 등으로 표현하고 있다. 주목해야 할 점은 근접한 마이크로그리드들은 서로 연합을 이루고 있다는 것이다. 연합의 첫 번째 형태

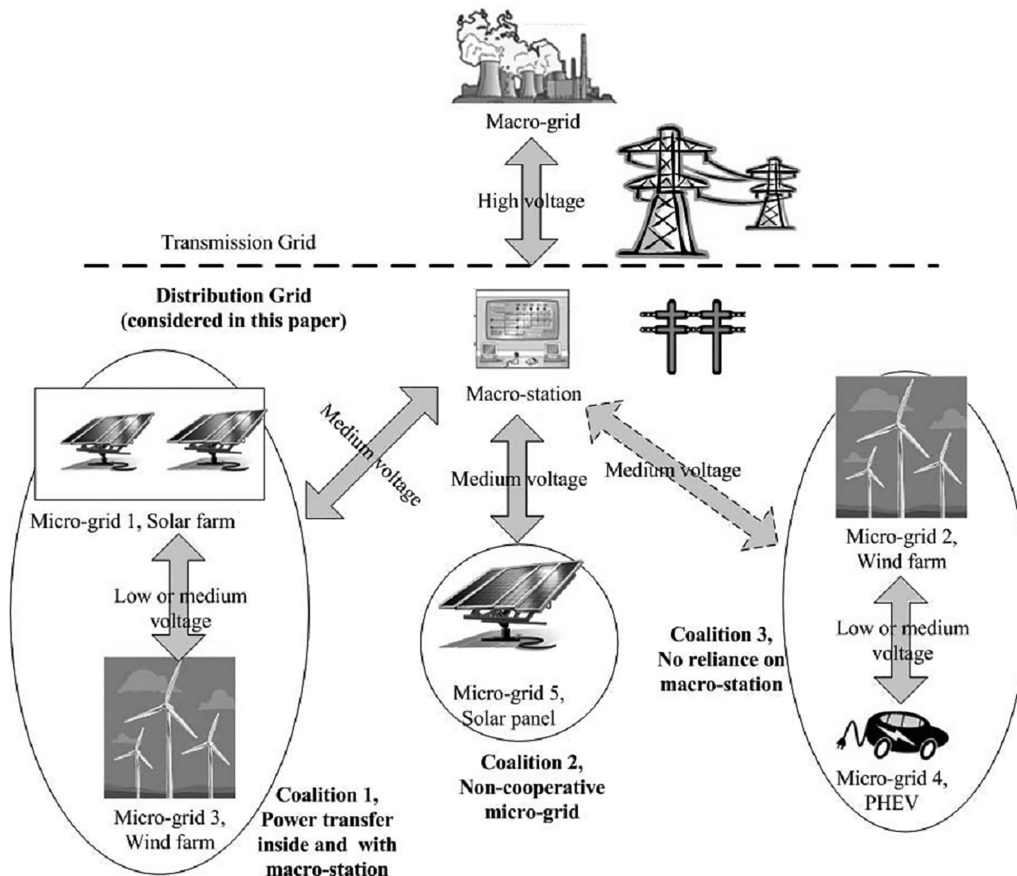


그림 7. 마이크로그리드의 협조적 시스템 모델 [10]

(Coalition 1)는 풍력과 태양열로 이루어져 있으며, 경우에 따라서 매크로스테이션과 연결하여 에너지를 공급한다. 두 번째 연합(Coalition 2)은 주변에 마이크로그리드가 없는 단 하나의 태양열 에너지자원만 존재한다. 마지막으로 세 번째 연합(Coalition 3)은 매크로스테이션의 도움 없이 자체적으로 에너지를 공급할 수 있음을 보여준다.

여기서, N 을 전체 마이크로그리드의 수라고 한다면, 임의의 i 번째 마이크로그리드가 생성할 수 있는 전력의 총량을 G_i 라고 하자. 또한, i 의 마이크로그리드가 공급해야 할 소비자들의 총 전력요구량을 D_i 로 표현하면, $Q_i = G_i - D_i$ 로써 Q_i 는 전력의 초과, 혹은 부족한 양을 나타낸다 [10].

만약 i 마이크로그리드의 $Q_i < 0$ 인 경우, 마이크로그리드끼리 연합이 없다면, i 마이크로그리드는 매크로스테이션으로부터 전력을 공급받아야 하며, [10]에서는 전력공급 중 발생하는 손실을 P_{i0}^{loss} 로 표현했다. 전력손실은 마이크로그리드에서 부담하는 비용이며, 단위 전력손실당 가격을 w_i 로 두면, 전력손실에 해당하는 비용(혹은 보수함수)를 다음과 같이 표현할 수 있다[10].

$$u(\{i\}) = -w_i P_{i0}^{loss}$$

하지만, 연합을 하게 될 경우, 마이크로그리드 사이에서 에너지를 서로 주고 받을 수 있기 때문에, 매크로스테이션으로부터 공급받는 전력을 줄일 수 있으며, 따라서 전력공급 중에 발생하는 손실도 줄일 수 있다.

이 경우, 그 비용에 대한 함수를 다음과 같이 표현할 수 있으며, 마이크로그리드를 연합한 경우는 전력손실을 최소화할 수 있다 [10].

$$u(S, \Pi) = - \left(\sum_{i \in S_a, j \in S_b} P_{ij}^{loss} + \sum_{i \in S_a} P_{i0}^{loss} + \sum_{j \in S_b} P_{j0}^{loss} \right)$$

실제로, <그림 8>에서는 마이크로그리드를 랜덤하게 분포시키고 그 연합을 이용해서 서로 필요한 전력과 초과 생산한 전력을 분배하는 모습을 보여주고 있다 [10]. 가로 및 세로를 각각 10km의 지형으로 가정하고, 중앙에 마이크로스테이션을 배치했다. 예를 들어, 연합으로 묶인 3번의 경우는 마이크로스테이션 4번에서 134.3MW의 초과 생산이 있었으며, 마이크로스테이션의 5번과 7번에 각각 35.4MW, 33.2MW를 공급해 주고, 남은 전력을 다시 매크로스테이션에 판매하고 있다.

마지막으로 <그림 9>에서는 연합을 하지 않은 경우와 연합을 한 경우, 마이크로그리드의 수에 따른 평균 보수(전력손실)를 보여주고 있다[10]. 연합을 할 경우 마이크로그리드의 숫자가 증가할수록 전력의 전송에 따른 손실이 점점 줄어들고 있음

을 확인할 수 있다. 또한, $N=30$ 일때, 연합을 할 경우 31%로 전력손실을 줄일 수 있다.

이처럼 마이크로그리드는 스마트그리드에서 지형적으로 전력공급이 불리한 곳에 전력공급을 효율적으로 수행할 수 있으며, 협조적 게임을 통해서 평균 전력손실을 줄일 수 있다.

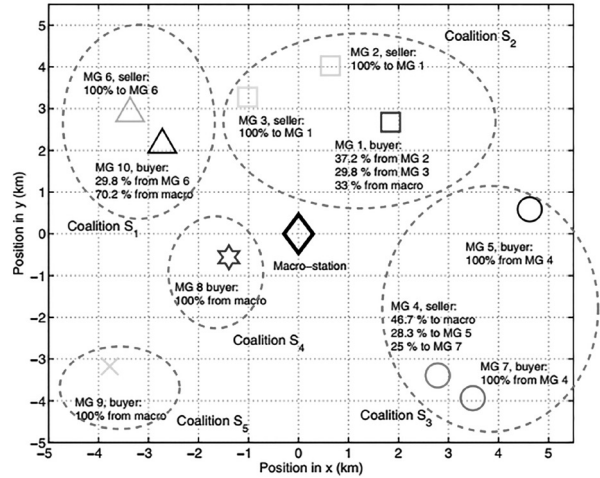


그림 8. 10개의 마이크로그리드와 하나의 매크로스테이션 분포 [10]

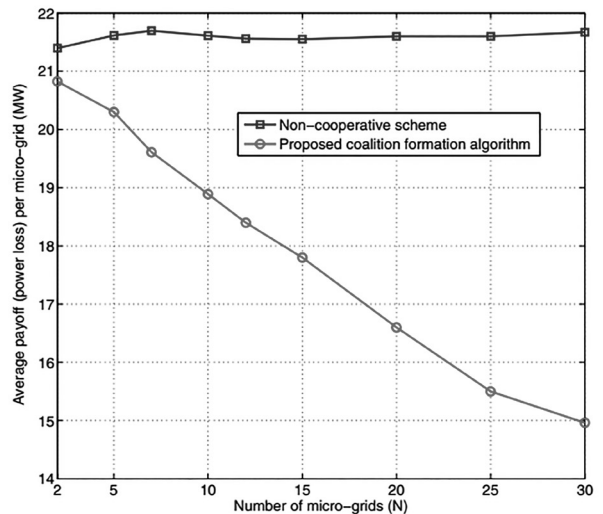


그림 9. 마이크로그리드의 협조적 게임을 통한 평균 전력 손실 그래프 [10]

IV. 결론

우리는 본 고에서 게임이론이 적용된 스마트그리드의 기술들을 살펴보고, 기존 시스템에 비해서 전력을 효율적으로 사용할 수 있음을 확인했다. 특히, 수요관리에서는 비협조적 게임이 적용된 사례를 통해서 내쉬 균형을 이루는 전력가격을 살펴보았다. 반면, 협조적 게임을 적용한 마이크로그리드에서는 연합을

통해서 서로의 전력을 교환함으로써 매크로스테이션에 부담을 최소화 할 수 있었으며, 동시에 마이크로스테이션이 30개로 증가할 경우 전력손실을 기존보다 31% 낮출 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 확인했다. 본 고에서 살펴본 게임이론의 모형은 스마트 그리드 통신에서 적용 가능한 일부 예에 지나지 않으며 게임이론은 분산형 시스템을 갖춘 통신 및 스마트그리드에서 중요한 역할을 차지할 것이므로 앞으로도 많은 연구가 필요할 것으로 예상된다.

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT/SW 창의연구과정의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-H0502-13-1060)

참고 문헌

- [1] 박세홍, 최요환, 김홍석, "시장원리에 기반한 고속 수요 반응 기술", OSIA Standards & Technology Review Journal, vol. 52, no. 4, pp. 30-45, Sep. 2013.
- [2] Zhu Han, Dusit Niyato, Walid Saad, "Game Theory in Wireless and Communication Networks", Cambridge University Press, 2012.
- [3] S. Kim "Biform game based cognitive radio scheme for smart grid communications," J. Commun. Netw., vol.14, no.6, pp.614-618, Dec. 2012.
- [4] 왕규호, 조인구, "게임이론", 박영사, 2012.
- [5] H. Kim, Y. Kim, K. Yang, and M. Thottan, "Cloud-based demand response for smart grid: Architecture and distributed algorithm," in Second IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2011.
- [6] Y.-J. Kim, J. Lee, G. Atkinson, H. Kim, and M. Thottan, "SeDAX: A Scalable, Resilient, and Secure Platform for Smart Grid Communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., no. 30(6), pp. 1119 - 1136, Aug. 2012.
- [7] H. Kim and M. Thottan, "A two-stage market model for microgrid power transactions via aggregators," Bell Labs Technical Journal, vol. 16, no. 3, pp. 101-107, 2011.
- [8] H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. LeonGarcia, "Autonomous demand side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 320-331, Dec. 2010.
- [9] British Columbia Hydro Conservation Electricity Rates [Online]. Available: https://www.bchydro.com/youraccount/content/residential_inclining_block.jsp 2009
- [10] W. Saad, Z. Han, and H. V. Poor, "Coalitional game theory for cooperative microgrid distribution networks," in Proc. IEEE Int. Conf. Communications, Workshop on Smart Grid Communications, Kyoto, Japan, May 2011, pp. 1-5.

약 력



배 성 환

2012년 서강대학교 공학사
 2012년~현재 서강대학교 공학석사과정
 관심분야: Cognitive Radio, LTE, and Game Theory in Wireless Communications



김 홍 석

1998년 서울대학교 전기전자공학과 학사
 2000년 서울대학교 전기전자공학과 석사
 2009년 The University of Texas at Austin, Electrical Computer Eng. 박사
 2010년~2011년 프린스턴 대학교 박사후연구원
 2000년~2005년 KT 선임연구원
 2010년~2011년 Bell Laboratories, Alcatel-Lucent
 2011년~현재 서강대학교 전자공학과 조교수
 관심분야: 무선통신망 자원관리, HetNET, Green Wireless, 5G, 스마트그리드 통신, 에너지 ICT 및 최적화, 수요반응