



스마트 에너지 도시 조성을 위한 분산형 전력시장의 활성화 방안

Empowering Smart Energy Cities through Decentralized Electricity Market Revitalization

이용재* · 김욱정** · 한종범***

Lee, Yong Jae · Kim, Uk Jeong · Han, Jong Beom

Abstract

Energy is essential for economic and social development. The demand for energy continues to rise every year, driven by diverse economic activities. Simultaneously, escalating energy costs and the need to curb greenhouse gas emissions underscore the urgency of transitioning to renewable energy sources. This study aims to address the challenges in the electricity market stemming from the growth of renewable energy supply in urban areas. It examines the causes of uncertainty and instability in the electricity system resulting from the integration of various renewable sources and explores potential solutions. The focus is on enhancing grid stability by effectively securing flexible resources through the local electricity market and introducing the concept of a "smart energy city", a development model applicable to similar scenarios in the future.

주제어 분산에너지, 스마트 에너지 도시, 분산형 에너지 시스템, 지역 전력시장

Keywords Distributed Energy Resource(s), Smart Energy City, Decentralized Energy System, Local Electricity Market

1. 서론

에너지는 경제 발전과 사회 성장을 위한 중요한 원동력이다. 다양한 경제 활동으로 에너지 수요는 매년 증가하고 있다. 설상 가상으로 매년 증가하는 에너지 비용과 온실가스 배출을 감축해야 하는 필요성은 재생에너지 자원을 효과적으로 활용해야 하는 주된 원인이 된다.

본 연구에서는 도시지역에서 재생에너지 보급확대로 예상되는 전력시장의 변화와 도전과제에 대한 솔루션을 다룬다. 향후 유사한 문제로 반복적으로 경험하게 될 도시 개발에서 효과적으로 활용될 수 있는 개발 모형인 "스마트 에너지 도시"의 소개를 비롯하여 수많은 재생에너지원의 급격한 전력망 접속으로 야기되는 전

력계통의 불확실성과 변동성의 문제에 대한 원인 분석과 함께 해결 방안을 강구한다. 특히, 지역 전력시장의 활성화를 통한 수요 관리, 보조 서비스 등 유연성 자원의 확보로 전력계통의 안정성을 강화하는 방안에 집중한다.

사실 도시는 에너지 안보와 기후 완화 조치를 시행하기 위한 중요한 출발점이다. 세계 인구의 55% 이상이 거주하고 있으며, 세계 에너지의 75%를 소비하고 세계 탄소 배출량의 70%가 도시에서 발생하고 있다. 이러한 도시문제를 완화하기 위한 다양한 개발 모형이 제안되고 있으며, 특히 "스마트 도시" 개발 모형은 도시환경과 교통과 같은 부문에서 넷제로(탄소중립) 목표를 효과적으로 달성하는 데 주목받고 있다. "스마트 도시"는 도시 운영의 관련 데이터를 수집하고 도시민의 삶의 질, 지속 가능성 및 효율

* Professor Emeritus, Urban Design and Studies, Chung-Ang University (Corresponding Author : yjlee@cau.ac.kr)

** Vice President, JPM Inc. (rladnrwd11@naver.com)

*** Policy Research Commissioner, Environment & Urban Affairs Committee of Jeju Special Self-Governing Provincial Council (bbarni926@korea.kr)

성 등을 향상시키는 기술을 활용하여 도시 개발을 유도한다. 특히, 스마트 도시의 영역 중 에너지 관리 부문은 도시 에너지 시스템의 복잡성과 중요성 때문에 다루기가 매우 까다롭다.

도시지역에서 재생에너지 기반의 분산 전원 증가와 분산형 에너지 시스템의 보급확대로 발생하는 전력계통의 변동성(전력생산 간헐성과 품질 신뢰성 등)과 이와 관련된 주요한 도전과제의 솔루션 탐색을 유럽 선진국에서 이미 검증한 “스마트 에너지 도시”라는 개념의 이론적 틀 내에서 실행함으로써 보다 안정적이고 효과적인 해결 방안의 접근이 기대된다.

연구의 내용은 연구의 이론적 틀을 구성하기 위하여 먼저 스마트 에너지 도시의 개념과 도시 개발의 프레임워크를 검토한다. 제안된 프레임워크에 따라 도시 에너지 시스템과 에너지 서비스의 도전과제를 기술적, 경제적, 사회적 차원에서 다룬다. 국내 최초로 전력시장 제도개선을 위한 시범사업이 추진되고 있는 최근 제주도의 사례를 중심으로 국내 전력시장의 현주소와 스마트 에너지 도시의 프레임워크의 적용 가능성을 타진한다. 마지막으로 새로운 에너지 전력시장에 대한 건의사항 등 전반적인 의견을 종합한다.

II. “스마트 에너지 도시” 개발의 프레임워크

“스마트 에너지 도시(smart energy city)”는 도시의 에너지 시스템을 최적화하고 도시민의 삶의 질을 향상시키는 것을 목표로 하는 도시 개발 모형이다.

학술 문헌에서는 “스마트 에너지 도시” 개념에 대해서 크게 세 가지 형태가 나타난다. 첫 번째는 도시 에너지 시스템에 영향을 미치는 특정 문제에 대한 기술적 솔루션을 통해 이를 실현하려고 한다. 이러한 문헌의 특징은 스마트 에너지 도시 개념에 대한 기존의 해석을 재정의하려는 시도는 거의 하지 않는다. 두 번째 형태는 “스마트 도시”의 개념을 통하여 도시의 다양한 구성요소, 목표 및 특성을 고려하여 스마트 에너지 도시(네트워크)를 정의하고 분석하려고 시도한다. 마지막 형태는 포괄적인 에너지 도시의 정의로 접근한다. 예를 들면, Nielsen et al.(2013) 같은 학자는 “스마트 에너지 도시는 에너지와 자원 효율성이 뛰어나며 점점 더 재생에너지원을 활용하고 있다. 이는 통합되고 탄력적인 자원 시스템뿐만 아니라 전략적 계획에 대한 통찰력 중심의 혁신적인 접근 방식에 의존한다. 정보통신기술의 응용은 일반적으로 이러한 목표를 달성하기 위한 수단이다. 스마트 에너지 도시는 사용자의 요구와 관심을 지원하고 지속 가능한 경제를 기반으로 하는 살기 좋고 저렴하며 기후 친화적이고 매력적인 환경을 사용자에게 제공한다.”고 주장한다.

반면, 국내의 연구활동에서는 “스마트 도시”에 관한 많은 연구에 비교하여 “스마트 에너지 도시”라는 별개의 용어를 사용하는 연구는 거의 발견되지 않는다. 그러나, “스마트 에너지 도시” 용

어를 대신하여 예로 들면, 김민경 외(2010)에서는 “제로 에너지타운”에 대한 기초조사 연구를 수행하고 있으며, “스마트 도시” 연구에서 에너지(환경) 부문으로 포괄적으로 취급하고 있다. 이재용 외(2016)에서는 스마트 도시의 개념을 재정립하고 에너지환경지표를 포함한 전반적인 관련지표의 검토를 통해 한국형 성숙도 및 잠재력에 대한 진단모형을 개발한 사업이 있으며, 이재용 외(2018)에서는 2003년부터 시작된 국내 스마트시티 관련 정책흐름 검토에서 스마트시티의 구성 요소로서 “스마트 에너지환경”이 연구되었다. 또한, 왕광익·노경식(2014)는 국내의 사례 검토 및 법제도적 문제점을 분석하여 향후 “친환경 에너지타운”의 효과적 추진을 위한 정책과제 수행하였으며, 이어 왕광익(2016)에서는 “제로 에너지 스마트 도시” 조성방안 연구를 세종시 지역을 대상으로 한 연구가 발견된다. 제주도에서는 CFI(carbon free island) 2030 계획의 일환으로 2009년에서 2013년까지 수행된 “스마트 그리드” 및 신재생에너지 실증사업이 주목받고 있다.

본 연구에서는 학술 문헌검토의 마지막 형태인 포괄적 도시 정의에 의한 “스마트 에너지 도시”의 개발 모형을 채택하여 솔루션을 탐색한다. “스마트 에너지 도시” 개발도 “스마트 도시”의 일반 원칙을 따르는 동시에 에너지와 관련된 특정원칙을 준수한다. “스마트 에너지 도시”는 “스마트 도시”의 전반적인 목표에 기여하는 동시에 보다 구체적으로 에너지 관련 목표를 지향한다. 에너지 부문은 “스마트 도시”의 핵심 영역 중 하나이며, 거버넌스, 모빌리티, 경제, 커뮤니티 등 다른 영역과 보완적 솔루션 및 지식 교환과 공유 형태로 상호작용한다.

스마트 에너지 도시 개발의 프레임워크는 개발을 위한 도시목표, 도메인(영역), 이해관계자, 시간적 및 공간적 차원 등의 다섯 가지 차원과 에너지 기본원칙 차원의 총 6가지 차원을 통합한다. 이는 스마트 도시 개발과 같이 영역의 통합을 통하여 여러 이해관계자의 협력을 강화하는 동시에 솔루션의 지속가능성을 보장하는 정보통신기술과 일반 기술이 결합된다. 다음은 각 차원의 내용을 간단히 정리한다.

1. 도시의 목표

스마트 에너지 도시로의 전환 자체가 도시의 목표가 되며, 이 목표를 달성하기 위하여 “에너지 서비스”와 “에너지 시스템”이라는 두 가지 형태의 목표가 제시된다.

“에너지 서비스(energy services)”는 ‘최종에너지 사용 장치에서 전기, 열 혹은 냉난방 에너지로 변환하여 최종소비자에게 제공되는 기능’이다. 따라서 스마트 에너지 도시로의 전환을 계획하는 기초는 적절한 수단을 통해 “에너지 서비스”에 대한 수요문제를 해결하고, 도시민을 위한 물리적 혜택, 유용성 또는 상품을 보장한다는 최종 목표를 충족하는 것이어야 한다.

또한 “에너지 시스템(energy systems)”은 전통적으로 발전소

에서 최종 사용자에게 이르는 다양한 물리적 인프라의 구성 요소와 관련이 있다. 이를 통합적으로 고려하는 것이 스마트 에너지 도시 목표 달성의 출발점이다. “스마트 에너지 시스템”은 재생에너지원의 분산형 발전과 함께 높은 에너지 효율 요구 사항에 따라 작동되어야 한다. 시스템 아키텍처를 재구성하고 새로운 기술을 통합하려면 상당한 변화가 필요하지만, 기후 위기 또는 기타 대정전과 같은 공급 중단사태에 대한 시스템의 복원력을 향상시킬 수 있는 전력시장 활성화의 중요한 기회도 제공되어야 한다.

2. 개입 영역

개입 영역은 스마트 에너지 도시 개발 활동, 투자 및 이해관계자의 관심을 위한 주요 대상 분야이다. 스마트 에너지 도시의 개입 영역은 교통 인프라, 에너지 유통 네트워크, 자연 자원 등과 같은 유형 자산(“하드(hard)” 영역)과 인적, 지적, 조직 자본 및 소프트웨어 등의 무형 자산(“소프트(soft)” 영역)으로 구분된다. 스마트 에너지 도시 활동은 이 두 가지 유형의 영역 내에서 새로운 요소나 기존 요소와 관련될 수 있다.

“하드” 영역과 “소프트” 영역은 서로 교차 관계를 갖을 수 있다. 실제로 행동 변화, 더 나은 데이터 관리 또는 협업 도구는 모든 “하드” 영역 내에서도 구현될 수 있다. 예를 들어, 건물, 모빌리티, ICT 또는 에너지 인프라에서 도시민의 행동 변화가 발생할 수 있다.

3. 이해관계자

이해관계자는 프로젝트(이니셔티브) 목표 달성에 영향을 미치거나 영향을 받는 모든 집단 또는 개인을 말한다. 스마트 에너지 도시의 주요 이해관계자는 의사결정자, 서비스 제공자, 대상 집단, 주변의 관련 이해관계자 등 4가지 광범위한 범주로 분류된다.

4. 시간적 차원과 공간적 차원

스마트 에너지 도시와 관련된 “시간적” 문제는 크게 세 가지 범위로 정의되며 전력시장에서는 확실하게 구분된다. 첫째, 전기 에너지의 속성상 에너지 수요와 에너지 공급의 지속적인 변동을 실시간 최적화한다. 둘째, 보다 장기적 관점에서 생산과 수요의 균형(밸런싱)을 맞추기 위해 일일, 월간, 연간 에너지 변동을 최적화한다. 마지막으로, 기존 도시에서 다양한 에너지 시스템의 구조를 수정하고 에너지 정책을 구현하기 위하여 도시의 장기적 에너지 전환을 유도한다.

스마트 에너지 도시로의 전환은 공간마다 특징이 다르게 나타난다. 각 도시는 현장의 경제적, 사회적, 환경적, 제도적 조건의 독특한 조합으로 인해 스마트 에너지 도시 개발에 대한 다양한 요

구, 우선순위 및 역량이 발생한다. 기술 수준이 열악한 저렴한 주거지인 경우에는 스마트 에너지 도시 개발이 우선순위가 아닐 수 있다. 또한, 스마트 에너지 도시 개발 잠재력은 새로운 기술을 선호하는 최신 규정, 수용적이고 유연한 사회, 에너지 프로젝트 운영 및 관리에서 훈련되고 경험이 풍부한 전문가가 있는 도시에서 실현될 가능성이 더 높다. 또한 공간 규모는 스마트 에너지 도시 개발에서 중요한 역할을 한다. 단일 건물 규모의 에너지 채택은 지구, 도시 전체 또는 지역과는 완전히 다른 사항을 추구한다. 어떤 규모이든 스마트 에너지 도시 개발은 지역적 특성을 기반으로 하며 동시에 풍부한 도시 경험과 국제적인 경험을 활용한다.

5. 기본원칙

기본원칙은 스마트 에너지 도시 개발이 어떻게 통합되고 작동하는지를 설명하는 규칙이자 철학이다. 여기에는 일반원칙과(에너지) 특정원칙이 있다. 일반원칙은 모든 “스마트 도시” 구성 요소에 적용되는 반면, 특정원칙은 에너지 영역에 대해서 보다 구체적으로 적용된다. 일반원칙과 특정원칙 모두 목표를 효과적으로 달성하기 위해 도시 개발을 수행하는 방법을 나타낸다.

신기술, 특히 ICT의 혁신적이고 합리적이며 통합적인 일반원칙의 적용은 스마트 에너지 도시 개발의 핵심이다. 다양한 도시 영역에 적용되는 ICT 기반의 네트워크, 도구, 장치, 방법은 참여자에게 새로운 권한을 부여하고 도시 기능을 향상시키는 원동력 역할을 한다. 혁신적이고 통합적인 방식으로 기술을 적용하고 빅데이터 수집 및 분석 처리를 결합하면 사람들의 행동과 습관에 대한 더 나은 이해력, 의사 결정, 에너지 구성 요소 간의 상호운용성 향상이 가능해진다. 그러나 기술 솔루션의 위험을 줄이기 위해서는 기술의 합리적인 적용이 중요하다.

주요 이해관계자 간의 협력은 스마트 에너지 도시의 가장 중요한 일반원칙 중의 하나이다. 고급 소통 인프라와 협업 도구를 통해 더 나은 협업 관계가 가능해진다. 이러한 관계는 이해관계자 간의 이해와 합의 구축을 촉진하고, 대상집단 사이에서 수용 가능하고 효과적으로 실행하는 에너지 커뮤니티(공동체) 결성을 유도한다. 특히 스마트 에너지 도시는 에너지 문제에 대한 해결책을 창출하기 위해 핵심인 상호식 협력과 사회적 통합을 가능하게 한다. 스마트 에너지 도시는 도시 거버넌스 설정 규칙의 공간적, 부문적 구분을 연결하는 것을 목표로 하며, 특히 공동 투자와 신규 비즈니스 모델 개발에 초점을 맞추는 도시 거버넌스의 공공 부문과 민간 부문 간의 협력을 중시한다.

“스마트 에너지 도시”가 “지속 가능한 도시”의 일부가 되며 지속가능성의 프레임에 적합하기 위하여 에너지에 관한 특정원칙을 에너지 보전, 에너지 효율, 그리고 재생에너지 확대라는 세 가지 부문에 국한한다.

“에너지 보전”이란 유용한 에너지 서비스를 동일한 수준으로

유지하고 기타 불필요한 에너지 서비스를 제거하거나 회피하는 동시에 에너지 소비를 줄이는 것을 의미한다. “에너지 효율”의 향상은 동일한 수준의 서비스에 대해 에너지 소비가 적어지거나 더 높은 수준의 서비스를 유지하면서 동일한 에너지 소비를 의미한다. “재생에너지 확대”는 지역 내 재생에너지원의 비중을 높이는 것을 말한다. 이는 화석 연료 대신 지역의 자연 현상에서 생성되는 에너지 생산과 소비를 우선한다는 의미이다. 재생에너지원 개발은 기술 변화를 포함하여 에너지 전환으로 발생하는 에너지 공급 변화와 관련이 있다.

결과적으로 에너지별 특정원칙은 “에너지 시스템”과 “에너지 서비스”의 혁신적 변화를 통해 스마트 에너지 도시 목표를 효과적으로 달성하는데 기여한다. 이 연구에서는 스마트 에너지 도시의 특정원칙인 도시의 재생에너지 확대와 관련된 도시문제에 집중하고, 지역 전력시장의 활성화를 통하여 에너지 서비스와 에너지 시스템 개선방안을 제시하므로 재생에너지 100%의 스마트 에너지 도시의 목표 달성을 앞당긴다.

(Figure 1)은 위에서 설명한 6가지 차원을 통합하여 스마트 에너지 도시 개발의 프레임워크를 이해하기 쉽게 시각화한다.

III. 재생에너지 확대와 도전과제

재생에너지는 체계적으로 예측할 수 없는 우발적 현상 때문에 전력망 운영에 다양한 도전과제를 제시한다. 특히, 재생에너지원의 소규모 분산 전원으로 통합되어 규모와 복잡성은 물론 해결책 마련에 어려움을 가중시킨다. 따라서, 관련된 도전과제들은 중앙 집중형 또는 분산형 제어 솔루션 간의 선택문제를 수반한다.

재생에너지원에 의해 생산된 전력의 충분한 제어 부족은 심각한 문제이며, 이는 추가적인 보조 서비스 등 전력의 유연성 자원

의 동원이 필요한 전력수급 불균형 문제가 된다. 또한 분산형 에너지 시스템의 도입과 관련하여 주파수와 전압의 안정성에 대한 우려도 있다. 도시민이 선호하는 태양 및 풍력 에너지 기술의 관성 지원 부족은 위기상황에서 계통 복원력에 기여하지 못하므로 통합 가능성을 크게 저해한다. 재생에너지원의 운영 확대는 특히 주택 및 도시 전력망에서 전압 안정성 문제를 야기할 수 있는 최대 전력수요(부하) 예측에 심각한 공포감을 유발한다.

에너지 시장의 관점에서 재생에너지 보급 확대와 관련된 주요한 도전과제는 다음과 같이 요약된다.

1. 기술적 복잡성

기술적 복잡성은 분산 발전 운영의 지역적 특성과 물리적 인프라의 조합에 따라 발생한다. 특히 분산형 에너지 시스템은 지역 환경에 매우 의존적이며 불확실하다. 이러한 불확실성은 재생에너지원의 에너지 시장으로의 통합에 어려운 과제를 던지며, 시스템의 유연성과 적절한 안정성을 요구한다.

송배전 계통에서 분산에너지 시스템을 상호 연결하고, 전력망에 연결된 분산 전원에 대한 무효전력(reactive power) - 교류회로의 전류에는 전력의 송전에 기여하는 유효성분과 기여하지 않는 무효성분이 있는데, 이 중 무효성분의 크기와 전압의 크기와 곱에 비례하는 전력량 -을 보상하기 위한 적절한 기술규정이 필요하다. 이러한 규정의 도입은 분산 전원 운영의 신뢰성, 보안성, 유연성, 안정성을 높일 수 있고, 시장운영에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

분산 전원 배치 및 유형도 전력시장의 계획 및 실행에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 과제는 특히 다수의 상호 연결된 스마트 그리드를 갖는 대규모 배전 시스템에서 두드러진다.

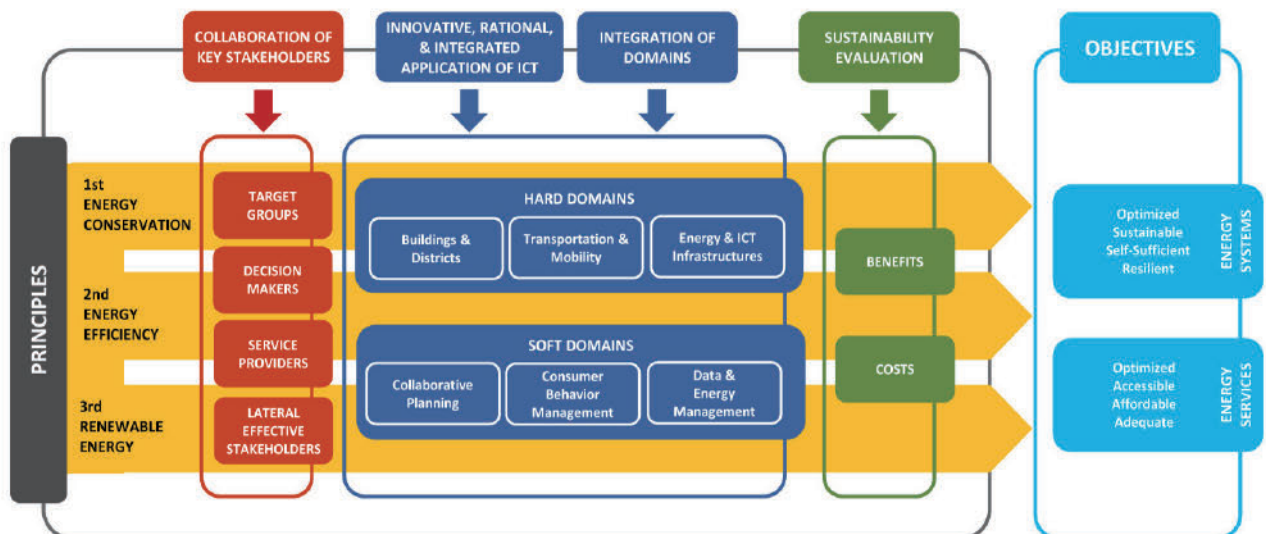


Figure 1. Framework for smart energy city development (Mosannenzadeh et al., 2017)

또한, 대기업 전략적 행태와 소규모 발전자 및 에너지 저장 시설 특성 또한 큰 차별성을 나타내고 시장 운영을 어렵게 한다.

2. 규제 프레임워크

적절한 기준, 규칙, 조건, 관리 원칙 등 분산 전원의 기능과 에너지 시장 참여를 유도하기 위해서는 적절한 규제가 필요하다. 특히, 전력시장 안정을 위한 발전연료 할당 메커니즘에서 공공 부문의 선호와 장기 계약 방식을 활용하여 용량과 시장 역동성의 균형을 맞출 필요가 있다. 규제의 독립성은 유지하면서 독립 규제기관의 책임성을 확보하는 것도 중요하다. 또한, 시장 설계에서 경제적 효율성과 함께 환경보호, 공급의 안정성, 사회적 목표 등도 함께 고려될 필요가 있다.

3. 시장 메커니즘

분산 전원 통합과 더불어 스마트 배전 시스템의 급속한 성장과 부하(수요)의 변화는 시장 메커니즘을 복잡하게 만든다. 많은 국가와 기업들이 전력 수요의 급속한 성장을 위해 공급을 늘리는 노력을 하고 있으며, 이는 에너지 발전 부문에서 더 낮은 에너지 가격을 제공해야 한다는 기본개념에 영향을 미칠 수 있다.

서비스 제공자의 신뢰성과 성과의 일관성을 높이기 위해서는 미래 가능성을 고려한 전략적 관리와 정책이 필요하며, 복잡한 에너지 시장 시나리오에 대응하기 위한 상호 공동 투자, 시장 주체들의 보다 투명한 협력, 새로운 지역 시장 개척, 전략적 파트너십 등이 필요하다.

또한, 소비자에게 선택의 유연성을 제공할 필요가 있으며, 발전, 송전과 발전, 최종 사용자 수급의 분리가 균형을 이루어야 한다. 이러한 이유로 전력시장과 전력계통의 연결 고리는 에너지 시장에서 건전한 거래를 통해 필요한 자원과 지원을 효과적으로 획득하는 것이 중요한 과제가 된다. 전력시장에서 전력 시나리오를 구현하기 위해서는 송배전 부문 개발 특히, 판매 부문에서의 전력시스템 운영 원칙과 기준이 필수적이다.

IV. 지역 전력시장의 활성화

전력시장의 소매시장은 소규모 소비자에게 초점이 맞춰져 있다. 우리나라의 경우, 전력판매는 한국전력공사 단일체제로 제한되어 있어 대부분의 소비자는 법적으로 선택권을 가질 수 없으나 서구의 주요 선진국에서는 소매시장에서 소비자는 각자의 지역 내에서 활동하는 소매업체를 대상으로 자유롭게 선택할 수 있어 소매업체 간의 시장 경쟁이 촉진된다.

주민들이 지역 전력시장에 관심을 갖는 현상은 재생에너지원의 확산에 따른 전력시스템의 탈탄소화(탄소중립)에 대한 주민들의

지속적인 지지(支持)의 결과라고 생각된다. 저탄소 사회를 지향하는 주민들이 기후 행동을 스스로 표현하는 것은 물론 마을 단위의 에너지 협동조합은 최종 사용자가 필요로 하는 유형의 서비스를 제공하고 에너지 부문의 기존 독점체제를 완화하는 데에도 기여할 수 있다. 미래의 전력시스템은 수백만 명의 프로슈머, 전기차 동차와 분산에너지 저장 시스템(ESS)이 포함될 것으로 예상된다. 또한 지역 전력시장의 활성화는 소규모 에너지 협동조합이 당면하는 경제성 및 효율성 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있다.

지역을 중심으로 한 전력시스템의 가장 중요한 변화는 전력시장 모델에서 능동적이고 필수적인 역할을 하는 최종 사용자에 대한 인식의 변화이다. 에너지 부문 혁신의 핵심은 소비자 중심의 비즈니스 모델을 개발하고 수요 측면 관리 프로그램을 신중하게 정의하는 것이다.

1. 지역 전력시장의 유형과 역할

지역 전력시장은 수직통합형 전력시스템의 중간 및 하위 단계에서 효과적으로 시장 규칙을 실현할 수 있다. 스마트 그리드는 이러한 유형의 프로슈머와 소비자뿐만 아니라 지역 구성원이 소유한 에너지 저장 시설과 함께 에너지 공동체(자립마을)의 형태를 취할 수 있다. 지역 전력시장은 다양한 비즈니스 활동에 공동체 관심을 공유하는 사람들을 참여시켜 더 낮고 지속 가능한 에너지 환경을 만드는 데 도움을 준다. 일부 연구에서는 시장 참여자(소비자, 생산자, 프로슈머 포함)가 경쟁 체제에서 자신의 에너지를 공유할 수 있는 환경을 “마이크로” 시장이라는 용어를 사용하여 설명한다.

지역 전력시장 구조는 크게 P2P(peer-to-peer) 시장(이웃 전력시장), 커뮤니티 기반 시장 (마을 전력시장), 집단 커뮤니티 기반 시장(구역 전력시장)으로 나누어 볼 수 있다. 양자 간 협상 거래의 중심에 있는 P2P 메커니즘에만 국한된 것이 아니라 넓은 의미에서 인센티브를 제공하고 참여자 간의 권리공유에 대한 보상 여부에 따른 구분도 필요한 것으로 판단된다.

〈Figure 2〉에서 보여주는 (이웃)전력시장의 P2P(peer-to-peer) 개념은 분산형 전력시스템의 모든 참여자(지점)가 동등한 책임을 갖고 전력 생산과 소비에 적극적인 역할을 하는 시나리오를 의미한다. 이 구조는 전력망의 모든 소비자가 생산된 에너지를 거래에 사용할 수 있는 프로슈머가 될 수 있다는 가능성에 기반을 두고 있다. 따라서 소비자는 전력시스템에 적극적으로 참여한다. P2P 시장에서는 탈중앙화가 가장 큰 특색이며, 이를 통해 시장이 보다 독립적이고 유연해질 수 있다. 이러한 유형의 아키텍처는 다수의 사업자와 계약 관계를 가진 상향식(bottom-up) 접근 방식을 따른다. 관련된 모든 장단점을 통합하는 Airbnb 혹은 Uber와 같은 공유경제 모델을 기반으로 P2P 시장의 실현을 수행할 수 있다. 따라서 이러한 P2P 시장 구조에서 P2P 플랫폼은

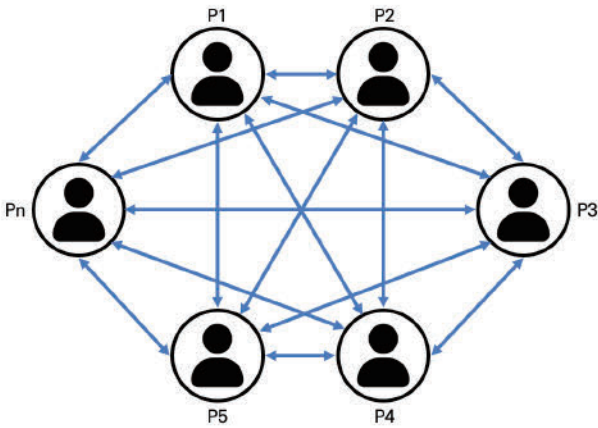


Figure 2. P2P market structure (Faia et al., 2024)

생산자와 소비자가 직접 에너지와 에너지 관련 서비스를 판매하고 구매할 수 있도록 해준다.

〈Figure 3〉은 지역 전력시장 운영자(local market operator, LMO)가 시장 정산을 통제하는 커뮤니티 기반 시장(마을 전력시장) 구조를 보여준다. 지역 전력시장 운영자(중개인)는 에너지 거래에 참여하고 배전망 사용자에게 서비스도 제공한다. 이 운영자(중개인)는 수요반응(demand response, DR)을 관리하고, 통합 기능을 통해 중앙 전력망 또는 다른 지역 전력망과 연계하여 현지에서 생산된 에너지를 최적화하고 전달하는 역할을 담당한다. 도매시장의 시장 운영자와 유사한 마이크로 시장 운영자로서 정산 알고리즘을 실행하고 시장 운영을 감독하는 역할을 한다.

커뮤니티 기반 시장의 경우 전력시스템은 중앙 전력망의 연결 여부에 따라 사용자에게 상이한 인센티브가 주어진다. 지역 시스템이 중앙 전력망에 연결되면 발전량 초과분을 중앙 전력망에 판매할 수 있기 때문에 사용자가 가능한 한 많은 전력을 생산할 이윤을 제공한다. 따라서 지역 전력시장 운영자는 시장이 있는 지역사회의 이익을 극대화하려는 목표를 가지고 있으며, 배전계통 운영자는 지역시장 운영자가 책임지고 제공하는 유연성 자원을

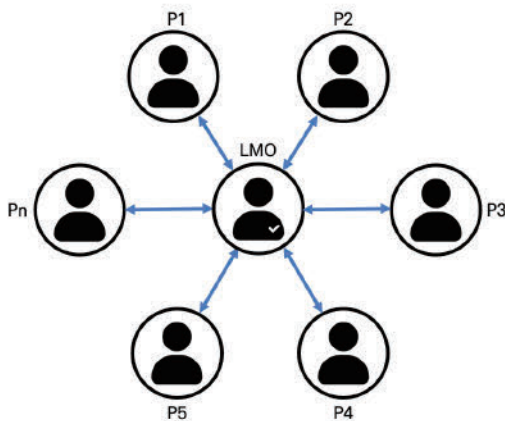


Figure 3. Community-based market structure (Faia et al., 2024)

통해 능동적인 시스템 관리자가 되고자 한다.

〈Figure 4〉의 집단 커뮤니티 기반 시장 구조는 구조와 규모 측면에서 P2P 시장 구조와 커뮤니티 기반 시장 구조 모델의 확장형이다. 이는 각 지역시장 운영자가 지역을 대표하고 다른 지역 커뮤니티와 협상할 수 있는 개념을 기반으로 한다. 이러한 유형의 모델은 일반적으로 스마트 그리드 환경(마이크로그리드 포함)에서 제시되며 지역 조직, 지역사회를 위하여 지역(균형) 자원을 사용하여 에너지 수요를 효율적이고 역동적으로 관리할 수 있다. P2P 플랫폼 접근 방식을 사용하면 P2P 시장과 비교하여 유연성 협상을 위한 더 나은 이점을 제시할 수 있다. 특히 표준화된 유연성 서비스는 수급균형 책임 당사자, 배전계통 운영자(DSO) 또는 송전계통 운영자(TSO)와 같은 상위 단계의 주체들에 의해 요구된다.

집단 커뮤니티 기반 시장 구조에서는 P2P 시장의 프로슈머가 갖는 협상력 부족을 보완할 수 있다. 시장 참여를 위한 최소 에너지 양에 대한 요구 사항 때문에 각 프로슈머의 생산 잠재력은 도매시장의 P2P 거래에서 장애가 될 수 있다. 최종 사용자가 프로슈머가 될 수 있도록 유도하는 정책이 실제로 지역사회 기반 이니셔티브를 촉진할 수 있다. 최종 사용자가 에너지를 생산할 기회를 갖게 되면 자신의 잉여 에너지를 지역사회에 판매함으로써 이러한 이니셔티브에 적극적으로 참여할 수 있다. 지역사회 기반 이니셔티브는 프로슈머의 참여를 촉진하고 에너지 시스템 내에서 자신의 가치를 강화하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 지역사회와 지역 당국은 지역의 자원을 활용하여 자체적으로 수익을 창출할 수 있다. 전통적인 기업과 유사하게 새로운 기업은 지역 수준에서 중개 기능을 수행하거나 유통 및 에너지 서비스를 제공하는 방식으로 운영될 수 있다.

특히, 중개사업자(중개인)은 의사 결정자이자 중앙 감독자로서

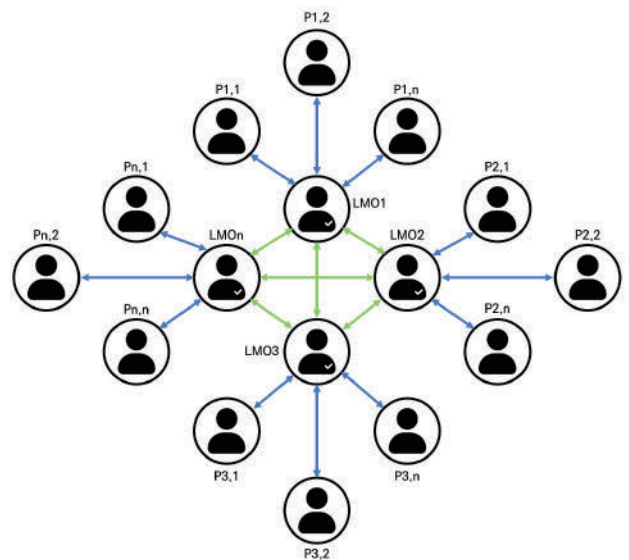


Figure 4. Group of communities-based market structures (Faia et al., 2024)

중요한 역할을 한다. 중개사업자는 시장 상황에 대한 전체적인 안목을 갖고 각 참여자를 개별적으로 고려하는 대신 지역 에너지 공동체 전체의 이익을 위한 입장에서 다양한 결정을 내릴 수 있다. 지역 전력시장에서 중개사업자의 역할은 소규모 소비자와 프로슈머의 시장 참여를 촉진하는 데 매우 중요하다. 중개사업자의 주요 책임에는 시장 참여 촉진, 유연성 서비스 협상, 시장 접근 및 수익 창출 기회 확보, 중개 참여자에 대한 거래 단순화가 포함된다.

또한 중개사업자는 분산에너지 자원과 전력망 지원 가용성을 효과적으로 관리하여 전력망에 유연성 서비스를 제공한다. 여기에는 전력망 안정성과 균형을 보장하기 위한 주파수 조절, 전압 제어, 피크 감소와 같은 보조 서비스가 포함된다. 그러나 전력망에 유연성 서비스를 제공할 때 중개사업자의 역할을 신중하게 관리하는 것 또한 중요하다. 열(난방) 자원의 유연성을 갖춘 특정 프로슈머에 대한 중개사업자에 의한 유연성의 빈번한 활성화는 최종 사용자의 불편함과 수용 감소로 이어질 수 있다. 따라서 지역 전력시장을 성공적으로 실현하려면 전력망 성능 최적화와 최종 사용자 편의성 유지 간의 균형점을 찾는 것이 중요하다. 이러한 상황을 극복하기 위해서는 프로슈머에게 더 높은 보상금을 지급하여 지역 전력시장 참여를 독려하고 일상 환경의 불편함에 대해서는 적극적으로 보상해야 한다.

2. 에너지 상품과 서비스 확보방안

지역 전력시장에서는 에너지(전기, 열(난방), 가스 등) 용량은 물론 보조 서비스 및 이와 결합된 에너지 상품의 거래를 제공한다. 지역 전력시장은 유연성 서비스, 중개 지원, 에너지 효율 조치, 저장, 자금 조달, 발전 효율 지원, 설치 서비스와 유지 관리 프로그램을 지원할 수 있다. 그러나 지역 전력시장은 해당 서비스에만 국한되지 않으며 특정 고객에게 특정 서비스를 지원할 수

있다. 이러한 서비스를 제공하고 필요에 따라 네트워크 안정성 제한 위반이나 에너지 안정성 문제를 해결하는 방안으로 분산에너지 자원을 활용할 수 있다. 이러한 조정은 적절한 가격 신호를 통하여 달성될 수 있다. 지역 내에서 소비 및 생산 활동을 지원함으로써 최종 사용자의 에너지 가격을 낮추고 송배전 손실도 줄일 수 있다.

배전계통 운영자(DSO)는 지역 전력시장에서 유연성 서비스를 계약할 수 있다. 이러한 방식으로 입찰과 거래를 허용하면 지역 전력시장은 유연성을 위한 새로운 하위 시장으로 탄생한다. 지역 유연성 시장은 유연성 서비스를 사고팔 수 있는 전력거래 시장으로 일반적으로 공간적으로 제한된 지역에서 형성된다. 참여자의 유연성 협상을 지원하는 플랫폼을 갖춘 외국 현지 유연성 시장도 이미 개설되어 운영되고 있다. 플랫폼은 정보 전달 및 작업 예약에도 유용하다. 에너지 서비스 공급자는 해당 플랫폼을 관리하고 중개 기능을 수행한다. 이러한 방식으로 최종 사용자는 자신의 유연성 가치를 플랫폼에 제출하고 서비스 제공업체는 도매시장에서 이러한 제안에 입찰한다.

1) 보조 서비스 시장

“보조 서비스”는 ‘전력시스템 안보 즉, 신뢰할 수 있고 안전한 전력시스템 운영을 보장하기 위해 송전계통 운영자(TSO)에게 필요한 기능 또는 서비스’라고 정의된다. 이러한 서비스는 전력 품질 표준을 충족하면서 발전 장치에서 부하 장소까지 전력 전송을 수행하기 위해 송전계통 운영자에게 제공되거나 다른 이해관계자로부터 조달된다. <Figure 5>의 보조 서비스는 다음의 기능을 제공하는 데 사용되며 보다 자세한 설명은 Kaushal and Van Hertem(2019)를 참조 바란다.

- 손실보상(loss compensation): 송전 중에 발생하는 전력 손실을 보상하기 위한 솔루션의 제공

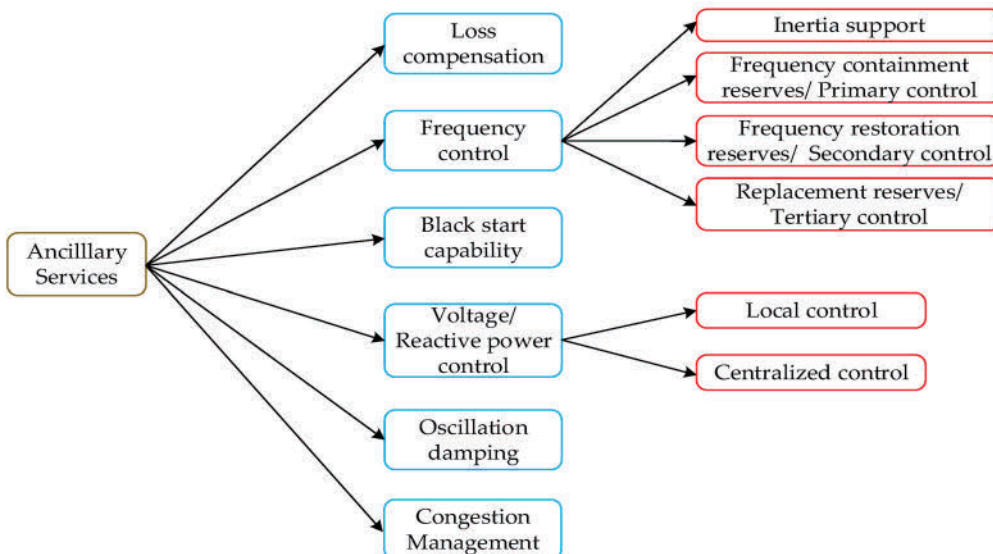


Figure 5. Classification of ancillary services (Kaushal and Van Hertem, 2019)

- 주파수 제어(frequency control): 시스템 주파수를 공통 값으로 유지하기 위한 일련의 제어
- 블랙 스타트 기능(black start capability): 전력계통의 부분 또는 완전 정지(停止)로부터 다시 동작모드로 재가동시키는 능력
- 전압 또는 무효전력 제어(voltage/reactive power control): 시스템의 각 노드에서 일정한 전압 수준 또는 무효전력 값을 유지하도록 의도된 일련의 조치 또는 제어
- 진동 감쇠(oscillation damping): 내부 교란 또는 외부 교란에 의한 주파 진동 발생을 주파수 및 전압의 안정적인 운전 범위내에 있도록 제어
- 혼잡 관리(congestion control): 전력계통의 물리적, 운영상의 한계로 인해 송전계통이 원하는 모든 거래를 이행할 수 없는 상황을 제어

전력시장 자유화는 보조 서비스 시장을 통한 발전 및 송배전 인프라의 최적 사용에 큰 관심을 갖게 만든다. 전력 송전시스템이 임계 용량 한계에 가깝게 운영되고 있는 시장 시나리오에서 보조 서비스(ancillary services, AS)는 전력시스템이 안정되고 비용 효율적인 운영을 보장하는 데 중요한 역할을 한다.

수직통합형 전력계통 관리자는 발전사업자, 송전계통 운영자(TSO), 배전계통 운영자(DSO)로 분리 구성되며 이들 계통 운영자의 주요 책임과 의무는 전력시스템을 안정적이고 안전한 방식으로 운영하는 것이다. 전력시장은 투명하고 비용 효율적인 에너지 거래를 위해 조성된다. 그러나 에너지 거래의 경우 “보조 서비스”라고 하는 또다른 상품이 다른 시장 참여자 간에 교환된다.

보조 서비스는 송전계통 운영자(TSO)에게 필요한 자원이다. 주파수, 전압, 부하 및 시스템 재가동 프로세스와 같은 중요한 전력시스템 특성은 이러한 보조 서비스에 의해 유지된다. 보조 서비스의 명칭은 나라마다 조금씩 다르다. 예를 들어, 미국의 PJM 운영자 영역의 경우, 주파수 제어를 위한 보조 서비스는 운영, 기본, 동기화 및 빠른 시작 예비력으로 알려져 있으며 CAISO(캘리포니아 독립 시스템 운영자) 영역의 경우, 보조 서비스는 규제 상향, 규제 하향, 급전가능 예비력 및 비급전가능 예비력으로 불린다. 주파수 제어를 위한 보조 서비스는 호주 에너지 시장 운영자에 의해 규제 및 비상 상황으로 분류되지만, 유럽에서는 전기 균형에 대한 지침에 따라 주파수 제어 서비스가 주파수 제어 예비력, 주파수 복원 예비력 및 교체 예비력으로 알려져 있다.

실시간 전력시스템 운영에서도 안전한 전력시스템 운영을 위해 보조 서비스 시장의 기능은 매우 중요하다. 보조 서비스는 시장 기반이거나 비시장 기반일 수 있다. 시장 기반 보조 서비스는 전력시장의 다양한 이해관계자로부터 송전계통 운영자에게 조달된다. 일부 제어 영역에서는 전력회사가 지불 유무에 관계없이 보조 서비스를 의무적으로 제공해야 하며, 이러한 보조 서비스를 비시장 기반 보조 서비스라고 한다. 보조 서비스는 상호 연결된

전력시스템에 대해 정의되지만 이러한 서비스의 구현, 조달 방법 및 활성화는 국가마다 다르다.

2) 수요관리 시장

전력시스템에서 통합(가상)발전소(virtual power plant, VPP), 수요관리(demand-side management, DSM), 전기자동차(electric vehicles, EV) 및 재생에너지원 통합을 통해 구현된 전략이 스마트 그리드 시나리오에서 “스마트 에너지 도시”에 제공하는 이점은 다음과 같이 요약된다.

- 에너지 소비 비용 절감
- 에너지 공급원으로서 재생에너지원의 활용 극대화
- 전력시장 참여를 통해 고객에게 최적의 솔루션의 혜택 강화

수요관리는 ‘스마트 그리드 환경에서 배전계통 하위 활동의 계획, 실행 및 모니터링’으로 정의된다. 전력 사업자들은 최종 사용자 측면에서 첨단 계량 인프라를 활용하여 에너지 소비를 줄이기 위한 다양한 수요관리 프로그램 개발에 관심을 갖는다. 스마트 그리드 시나리오에서 수요관리를 구현하는 것은 시장 기반 프로그램의 수요자와 공급자 모두에게 이익이 된다. 에너지 시장에 기반한 수요관리가 제공하는 주요한 이점으로는 낮은 도매 전기 가격, 시장 성과 및 효율성 향상, 안정적인고 유연한 시장 메커니즘의 제공, 가격변동성과 시장지배력 완화는 물론 수요-공급 균형과 경제 주체의 다양화와 수출 수익성 향상 등으로 정리된다.

이러한 목적을 달성하기 위해 현물 전력시장에서의 가격 변동성 관리와 피크 수요 감소 전략을 다루는 두 가지 주요 기법이 동원된다. 스마트 그리드 환경에서도 수요관리는 매우 중요한 역할을 하며 필수 구성 요소이다. 최적화 활동에 필요한 센서 기반 제어 장치, 통신 시스템, 자동 계량 장치 및 처리 하드웨어는 수요관리 아키텍처 통합의 주요 요소이다.

최첨단 정보통신기술(ICT) 장치를 구현하여 전력망 운영 효율성을 향상시킨다. 반복적인 요금구조 변경 사항의 전달을 가능하게 하여 수요관리 프로그램의 운영에 상당한 혜택을 줄 수 있다. 모든 실시간 가격제, 특히 분산전원에 기반한 재생에너지 생산 가격 메커니즘과 동적 가격 결정을 통합할 수 있다. 이는 운영에서 에너지 공급과 수요 간의 실시간 균형을 가져오는 결과로 이어진다. 그 외에도 수요관리 아키텍처에서 스마트 미터기와 ICT 장치를 통합 및 운영하는 것은 현장에서의 효율성을 크게 향상시킨다.

수요관리는 주로 수요(부하) 변동 형태에서 원하는 변화를 사용자에게 촉진하고 영향을 주도록 설계된다. 수요관리의 목표를 달성하는 데 ① 에너지 효율(EE), ② 사용 시간(ToU), ③ 예비전력 및 ④ 수요 반응(demand response; DR)의 네 가지 주요 전략이 있다. 또한, 수요관리 접근 방식은 인센티브 기반 프로그램과 가격 기반 프로그램으로 구분할 수 있다. 일반적으로 가격 기반 수요반응의 특징은 소비자가 전기 요금 신호에 빠르게 반응한다는 이점이 있다. 반면 인센티브 기반 프로그램에서는 소비자가

전기 요금과는 독립적으로 전적으로 인센티브(보상)를 받는다. <Figure 6>에서는 최근 수요관리 운영에서 적용된 여러 수요반응(DR) 프로그램의 유형을 보여준다.

수요관리 시장의 입찰 및 가격 규제 운영에서 소비자는 다양한 분산 발전 및 가용 부하만 아니라 시장 활동에 적극적으로 참여함으로써 전통적인 에너지 시장 시나리오에서 게임체인저 역할을 할 수 있다. 수요관리는 최종 사용자를 중심으로 전력시장의 각 단계에서 제공되는 편익을 극대화하고 경제성 및 운영성 관점에서 실현될 수 있다.

3) 에너지 저장 시장

에너지 저장 시스템의 개념은 단순히 에너지 생산과 소비 사이의 저장 매체 역할을 하는 에너지 완충지대를 설정하는 것이다. 에너지 저장 시스템의 목적은 주파수 안정성, 전압 안정성, peak shaving, 시장 규제, 예측 오류로부터의 독립성과 예비 전력량 제공 등이지만 이에 국한되지만 않는다.

에너지 저장 시스템의 높은 경제적 비용부담은 통합적 효율성을 제한하는 주요 요인 중 하나이다. 따라서, 많은 연구가 배치 및 크기에 관련된 최적화 프레임워크에 집중되어 있다. 에너지 저장 시스템의 최적 크기 및 위치를 공식화하기 위해 에너지 저장 효율성, 수명 주기, 신뢰성 지수, 네트워크 역학과 같은 파라미터를 고려한다. 최적화 솔루션이 저장 비용 절감 및 때로는 전력 품질 향상을 위한 최첨단 프레임워크를 제공하지만, 완전한 기술적 특성은 여전히 고려되지 못한다. 예를 들어, 높은 효율성 및 에너지 밀도를 고려할 때, 배터리 에너지 저장 시스템은 재생에너지 기반 분산형 에너지 시스템의 영향을 줄이는 데 매우 유리하다. 배터리는 전력시스템 운영의 장기 계획과 관련된 과제에서 높은 선호의 솔루션을 제공한다. 그러나 낮은 전력 밀도로 인해 배터리는 갑작스러운 부하 또는 수요 급증과 1차 주파수 제어 지원과 같은 단기적 전력망 불일치를 유발하고 수명 주기의 축소, 조기 교체 및 높은 전류 스트레스를 초래하여 기술적으로 실행이 쉽지 않다.

대안적으로, 수소 및 수소 화합물(예: 메탄올, 암모니아, 다른 e-연료 등)은 재생에너지의 운송 및 저장을 가능하게 하여, 탄소 배출 감소가 어려운 부문(중공업, 화학 물질 및 재료, 중대형 교통

수단 등)을 탈탄소화하고 탄력적인 미래 에너지 시스템을 만드는 데 도움을 준다. 수소 에너지 저장이 주목을 받는 이유는 ① 정부는 깨끗한 에너지원으로의 에너지 전환을 장려하고 있으며, ② 수소의 제로 배출 에너지 저장 및 운송 가능성으로 인해 매력적인 옵션이며, ③ 수소 에너지 저장과 풍력 및 태양광과 같은 재생에너지원의 통합은 에너지 간헐성 문제를 근본적으로 해결하기 때문이다.

풍력과 태양에너지 발전은 변동성이 많기 때문에, 효과적인 에너지 저장이 지속적인 확장의 열쇠가 된다. 전기 에너지 저장을 위해 매우 다양한 기술 옵션을 사용할 수 있다. 그중 하나는 수전해에 의해 전기를 (그린)수소로 변환, 저장하여 나중에 연료 전지에 제공하여 전력을 재생산하는 재생 수소 연료전지(regenerative hydrogen fuel cell, RHFC) 시스템은 이미 세계 여러 곳에서 운영되고 있다. 동일한 양의 제조 에너지 투입에 대해 수소 저장이 일반적인 리튬 이온 배터리 저장 보다 더 많은 에너지를 방출한다. 반면에, 수소에서의 에너지 저장은 배터리보다 훨씬 낮은 왕복 효율을 가지므로 운영 중에 상당한 에너지 손실을 초래한다. 그러나 현재의 왕복 효율인 약 30% 상태에서도 재생에너지원의 잉여(과다) 에너지를 저장할 때는 배터리와 동일한 에너지 이점을 제공할 수 있다.

상이한 유형의 에너지 저장 방식의 실현 또는 에너지 저장 시스템의 혼합은 이러한 불일치를 추가로 제거할 수 있을 뿐만 아니라, 전체 에너지 저장 규모를 감소시켜 저장 비용을 획기적으로 감소시키는 효과가 있다.

V. 제주도 사례 연구

향후 건설될 “스마트 에너지 도시”의 전력시스템은 수백만 명의 프로슈머, 수많은 전기자동차와 분산에너지 저장 시스템(ESS)으로 구성될 것으로 예상된다. 이러한 변화와 도전과제를 수용하기 위해서는 유연하고 튼튼한 분산형 전력계통의 구축과 지역 전력시장의 활성화를 통한 유연성 자원의 확보가 필수적이다.

제주특별자치도는 2012년부터 CFI2030 계획을 꾸준히 추진하고 있으며, 2021년 기준 재생에너지 발전비중이 18.3%로, 우리나라에서 재생에너지 설비용량 증가율과 발전량이 가장 많은 지자체로 주목된다. “탄소 없는 섬 제주 2030(CFI2030)” 계획은 2030년까지 도내 전력사용량 100%를 신재생에너지로 활용한다는 계획으로 비록 대한민국의 탄소중립을 선도하는 위상은 갖추었으나, 부문별로 목표대비 실적이 부족하고, 수소경제에 대한 부분을 포함하지 않는 등 한계점이 있었다.

이에 따라 민선 8기 새 정부에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 새로운 도정과제로 “그린수소 글로벌 허브 아일랜드” 계획을 수립하고, 제주지역의 전력 에너지를 청정 재생에너지 중심으로 재편, 생활과 산업 등에 확대 적용하는 “제주 에너지 대전환

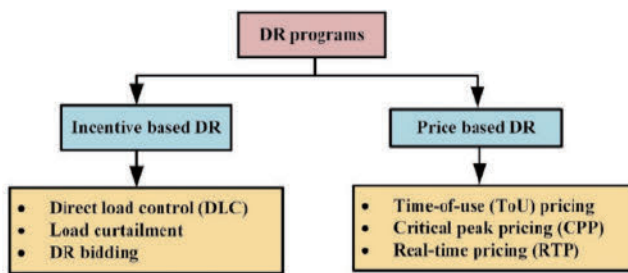


Figure 6. DR programs in demand-side management (Panda, et al., 2022)

로드맵(2023.01.13.)”을 발표했다.

“제주 에너지 대전환 로드맵”은 새 정부 에너지정책 방향(2022.11.09.)의 청정수소 수소생태계 조성 방안에 부응하고, 제주의 그린수소 글로벌 허브 구축(2022.09.29.)을 포함하여 제주 지역 전체의 에너지 전환 이행과정을 제시하기 위해 수립되었다. 즉, CF2030 계획을 확대하여, 재생에너지의 공공성을 확보하고 산업과 생활의 전(全) 분야에 걸쳐 그린수소 기반의 청정에너지 가치사슬을 확립, 제주지역의 에너지 전환과 자립을 달성하고자 하였다. “그린수소 글로벌 허브 아일랜드 제주”를 비전으로, ‘에너지 전환과 에너지 자립, 산업과 생활의 재편·고도화, 대한민국 탄소중립 2050 실천, 선도적 전환모델 제시’의 세부목표를 설정했다. 추진전략으로 ‘재생에너지 확대, 그린수소 발전 전환’, ‘산업·생활 영역의 그린수소, 전전(全電)화’, ‘일자리창출·기업육성 및 사양화·취약계층 보호’, ‘법·제도 개선 및 관련 인프라 확충, 대내외 동력확보’의 4대 전략을 제시하였다.

2023년 5월 26일 국회를 통과한 “분산에너지 활성화 특별법”은 제주지역의 분산에너지 특구 지정 추진과 함께 제주지역 전력시장 제도개선에 획기적인 전환점을 제공하고 있다. 이 특별법은 <Figure 7>에서 보여주듯 대규모 전력수요를 사용하는 전력 소비자에게 지역의 분산에너지 사용 유도를 위한 분산에너지 설치의무 부과, 전력계통영향평가 실시, 분산에너지 특화지역 지정 등의 내용을 담고 있다. 이는 “스마트 에너지 도시”의 기본원칙인 지속 가능한 에너지 시스템의 실천, 즉, 기존 중앙집중형 전력체계를 지역으로 분산하는 분산형 전력체계로 전환되는 것을 법적으로 허용하고 있다.

지역의 분산형 시스템은 한국전력공사가 독점하던 중앙집중형 전력시스템과는 달리 소비자 주변에서 전기를 생산하고 저장하면서 초과 발전한 전력을 판매할 수 있는 소규모 전력시스템이다. 제주도가 분산에너지 특화지역으로 지정되면 전력거래 특례가 적용돼 발전사업과 판매사업 겸업이 허용(즉, “프로슈머”의 탄생)되고, 전력생산자와 소비자 간 전력거래가 자유로워진다. 이 법률에 근거하여 최근 전력시장 개선 시범사업이 제주도에서 본격적으로 시작되고 있다. 제주에너지공사에서 제공하는 제주도 분산에너지 사업 개략도가 <Figure 8>에 소개되어 있다.

이 시범사업은 국내 최초로 실시간 시장, 보조 서비스 시장, 재생에너지 입찰제도의 세 가지 전력시장 개선방안을 담고 있다. 새로운 전력시장의 구조 및 가격기능 고도화를 전국적으로 시행하기에 앞서 제주에서 선행하여 전력시장의 안정적 개선을 도모하려는 거시적 목표를 가지고 있다. 실시간 가격과 거래량을 결정하는 실시간 시장과 예비력에 대해서도 시장가격으로 보상하는 보조 서비스 시장을 개설한다. 현행 하루 전 시장 - 거래일 하루 전 전력시장의 낙찰과 가격결정이 완료되는 시장으로서, 실시간 여건 변동으로 낙찰량과 다르게 운전한 경우 시장가격 외적으로 개별 정산함 -은 화력발전기의 기동과 정지에 중점을 두고 설계되어 예측불확실성 및 간헐성이 큰 재생에너지 수용에는 한계가 있었다. 또한 재생에너지 입찰 제도를 통해 재생에너지를 시장 및 계통운영에 능동적으로 참여할 수 있게 함으로써 과잉 공급 상황에 대해서도 유연하게 대처할 수 있는 소비자 중심의 제도적 기반을 마련하고 있다.

그동안 전력시장의 하루전시장 단일 체제로 인한 실시간 가격

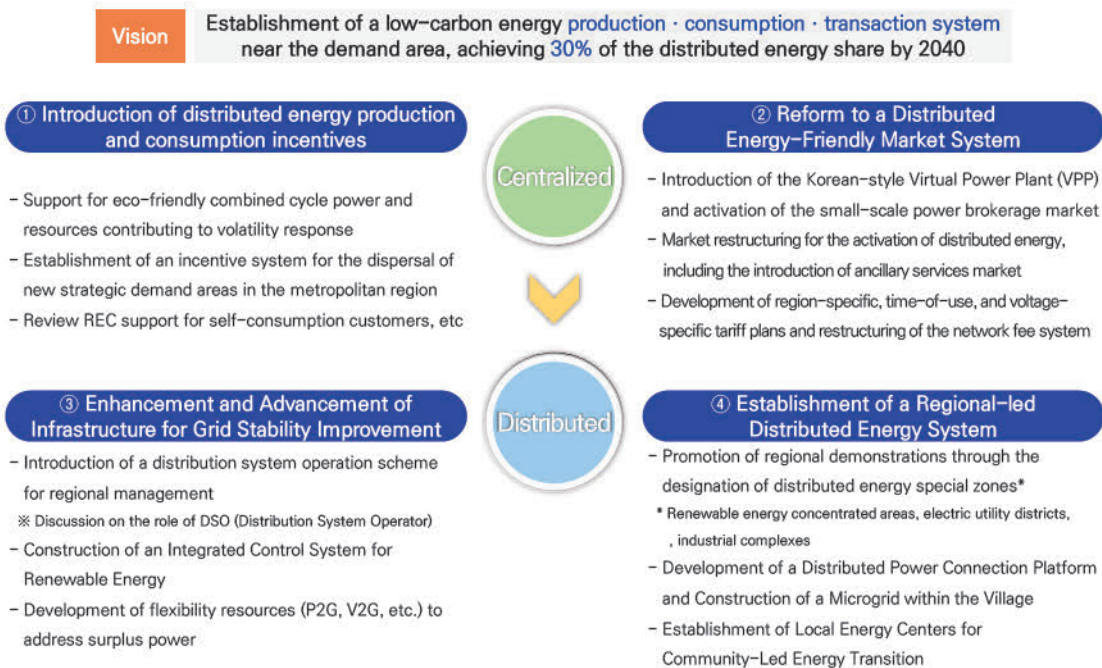


Figure 7. Contents of the dispersed energy promotion special act

Source: Ministry of Trade, Industry and Energy, 2021.

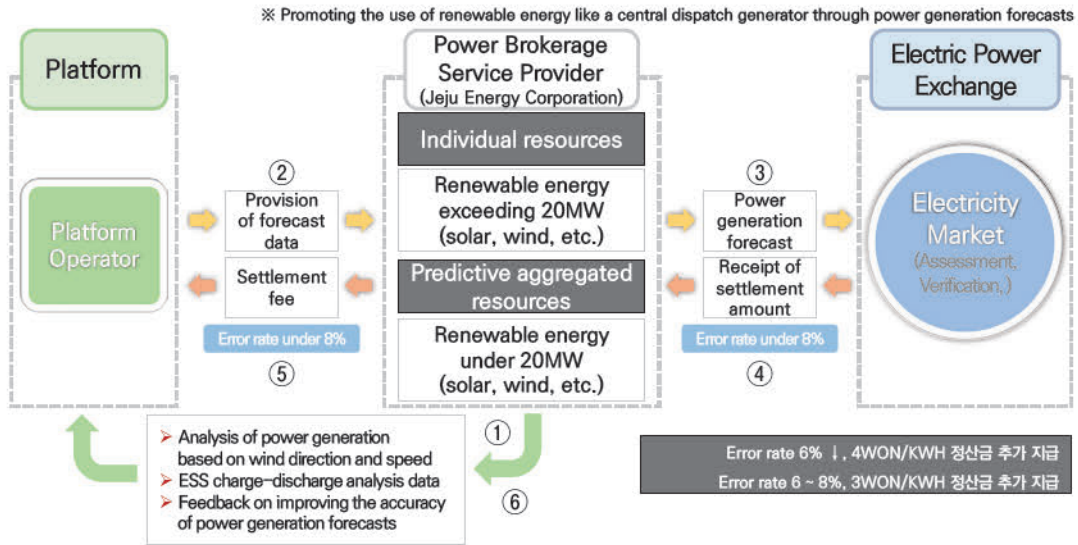


Figure 8. Scheme of the distributed energy project on Jeju Island

Source: Jeju Energy Corporation's internal data

기능이 작동되지 않아 실시간 시장의 수급균형 확보에 어려움이 있었다. 하루전 예측한 상황과 실시간 수급여건 간의 편차가 발생하는 경우, 하루전 예측을 기반으로 정해진 거래량과 거래가격의 정확성이 떨어지게 되어 시장 비효율을 유발되는 우려도 있었다. 이를 기존 화력 발전기를 대체하여 불확실성이 큰 재생에너지의 확대에 시장 외적인 방법으로 실시간 수급여건에 대응해 왔다. 시범사업에서는 하루전시장에 더하여 실시간 수급여건을 반영한 낙찰 및 시장가격을 결정하는 실시간 시장을 추가로 신설한다.

지난 시장제도 개선(2022.9)을 통해 예비력에 대한 보조 서비스 요금제를 도입하였으나 동분기 예비력 실적을 기반으로 단가를 책정하고 있어 시간대별 정확한 가치를 보상하지 못하고 있는 실정이었다. 또한, 재생에너지 증가에 따라 실시간 계통 운영 시 예비력 과부족 현상이 빈번하게 발생하고, 예비력 요금과 실시간 예비력 가치 간의 차이는 예비력을 제공하고자 하는 유인력을 약화시키는 결과로 작용했다. 이에 대해 실효적인 예비력 시장을 개설하여 예비력의 가치를 실시간 예비력 가격으로 인정함으로써 예비력 제공 및 관련 설비투자 유인을 강화한다.

제주도는 재생에너지가 급증하고 상대적으로 화력 발전기의 의존은 감소하고 있어 계통 전반적으로 유연성 자원이 부족해지고 있는 상황이다. 재생에너지의 비중이 크게 증가하였음에도 불구하고 비중양자원으로서 시장가격 정산만 받을 뿐 시장과 계통에서의 실질적인 역할은 없었다. 이러한 문제에 대해서 재생에너지 입찰을 통해 전력시장에 참여할 수 있도록 허용하고, 제어가 가능 자원으로 전환시켜 시장과 계통에서의 역할을 확대하는 실시간 변동성 문제의 해결 방안을 제시하고 있다.

“CFI2030 계획”과 “그린수소 글로벌 허브 아일랜드” 계획, 그리고 최근 진행되고 있는 제주 전력시장 제도개선의 시범사업의

시행은 국가가 지향하는 전력시장 자유화의 목표와 국내 전력시장의 판도에 큰 변화를 가져올 것으로 예상되며 “스마트 에너지 도시” 개발의 목표에 한 걸음 더 다가가는 좋은 선례가 될 것으로 전망된다.

VI. 결론 및 건의사항

글로벌 에너지 전환의 목표는 기후 변화, 에너지 안보, 그리고 지속 가능하고, 신뢰할 수 있는 저탄소 에너지 시스템을 만드는 것에 집중되어 있다. 이를 요약하면 에너지 전환 시스템을 떠받치고 있는 “4D” 즉, 탈탄소화(Decarbonization), 탈중앙화(Decentralization), 디지털화(Digitalization), 민주화(Democratization)로 표현된다.

재생에너지 100%를 지향하는 “스마트 에너지 도시” 건설의 가장 중요한 주제는 에너지 전환의 탈중앙화(Decentralization) 즉, 분산형 에너지 시스템이다. 일반적으로 분산형 에너지 시스템은 에너지 품질과 안정성의 불리함에도 불구하고 중앙집중형 에너지 시스템과 비교하여 더 나은 효율성, 유연성과 경제성을 제공하며 지속 가능한 에너지 미래를 제시한다. 이러한 이점을 감안할 때, 분산형 에너지 시스템의 도입은 21세기 에너지 전환의 핵심 내용이 된다.

도시지역에서 재생에너지원의 보급 증가와 분산 전원 자원의 통합으로 전력계통의 변동성과 불확실성이 증가하는 상황에 대비하여 “스마트 에너지 도시”의 “에너지 서비스”는 전력상품의 품질을 개선하기 위한 다양한 유연성 자원의 확보 방안을 필요로 한다. 다음은 본 연구의 결과를 통하여 확인된 주요 건의사항이다.

- 계통 부문 간 정보 공유와 운영 투명성 및 효율성을 촉진하는 전력시장 프레임워크를 구현한다.

- 재생에너지 통합 기술로 전력계통의 변동성을 최소화하여 대 정전 등 우발성을 최소화한다.
- 간헐적 재생에너지원의 더 나은 제어 및 수용을 위해 스마트 그리드 도입을 촉진한다.
- 전력망의 안정성을 위한 수요관리 프로그램을 장려한다.
- 분산 전원 자원을 보다 쉽게 통합할 수 있도록 통일된 규정과 제도를 마련한다.
- 원활한 에너지 전환을 위해 유연성 자원 개발 및 에너지 저장 장치에 대한 자본 투자를 강화한다.

본 연구에서는 특히 “스마트 에너지 도시”의 개념 프레임워크를 활용하여 향후 도시의 재생에너지와 관련된 유사한 사례연구에서 활용 가능한 보다 체계적이고 효과적인 도시 개발 모델을 제공하고 있다. 향후 에너지 시장에서는 분산형 에너지 시스템의 채택과 보급 확대는 물론 지역 전력시장의 활성화를 통한 보조 서비스, 수요관리에 의한 유연성 서비스 등의 시장 진입에 대한 보다 세심한 관심이 필요하다. 이러한 개선방안은 미래 전력시장 전략과 시장 운영 과정을 설계할 때 반드시 고려해야 할 핵심 영역이 된다.

제주지역의 전력시장 제도개선 시범사업에서는 국내 최초로 실시간 시장 개장과 예비력을 위한 보조 서비스 시장 개설, 재생에너지의 입찰제도에 대한 기초적인 개선 방안이 논의되고 있다. 향후 국내 전력시장의 선진화를 위해 에너지 저장 장치 통합, 스마트 그리드의 구현, 부하 변동성 및 불확실성 해결을 위한 보조 서비스 활성화 방안 등 다양한 전략에 대한 보다 구체적인 논의가 필요하다. 기후 변화, 전력 가격 결정, 거래 전략, 가상 발전소, 에너지 저장, 전기자동차, 분산 발전 등 전력시장 운영에 영향을 미치는 다른 요인에 대해서도 깊은 관심이 필요하다. 지역 전력시장의 활성화에 필수적인 수요관리와 시장 설계와의 관계를 살펴보고 고객 참여, 기술 통합, 시장 프레임워크 변경 등을 고려한 수요관리 전략이 전력시장의 유연성과 효율적 운영에 어떻게 기여하는지에 대한 구체적인 연구도 추가적으로 요구된다.

인용문헌
References

- 김민경·임희지·김민영·이민희, 2010, 「세계 주요도시의 제로에너지타운 정책비교 연구」, 서울: 서울시정개발 연구원.
Kim, M.G., Lim H.J., Kim, M.Y., and Lee, M.H., 2010. *A Comparative Study of Zero Energy Town Policies of Contemporary Cities*, Seoul: Seoul Development Institute.
- 산업통상자원부, 2021.5.25. “분산에너지 활성화 특별법”, 세종 Ministry of Trade, Industry and Energy, 2021.5.25. “The Special Act on Promotion of Distributed Energy”, Sejong.
- 왕광익·노경식, 2014, 「친환경 에너지타운 사업 추진을 위한 도시계획적 대응방안 연구」, 세종: 국토연구원
Wang, K.I. and Noh, K.S., 2014. *A Study on the Best Practices and Policy Agenda for Environment-Friendly Energy Towns*, Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
- 왕광익, 2016, 「제로 에너지 스마트 도시 조성방안 연구」, 세종: 국토연구원
Wang, K.I., 2016. *A Study on Basic Planning of Zero Energy Smart City*, Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
- 이재용·김성수·김은란·박종순·이미영·이성원, 2016, 「스마트 도시 성숙도 및 잠재력 진단모형 개발과 적용방안 연구」, 세종: 국토연구원.
Lee, J.Y., Kim, S.S., Kim E.R., Park J.S., Lee, M.Y., and Lee, S.W., 2016. *A Study on Construction and Application Approaches of Smart City Maturity and Potential Diagnostic Models*, Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
- 이재용·이미영·이정찬·김희희·이성원·계갈영, 2018, 「스마트 시티 유형에 따른 전략적 대응방안 연구」, 세종: 국토연구원.
Lee, J.Y., Lee, M.Y., Lee, J.C., Kim, I.H., Lee, S.W., and Jegal, Y., 2018. *A Study on Strategic Response to Smart City Types*, Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
- Kaushal, A. and Van Hertem, D., 2019. “An Overview of Ancillary Services and HVDC Systems in European Context”, *Energies*, 12(18): 1-20.
- Mosannenzadeh, F., Bisello, A., Vaccaro, A., D’Alonzo, V., Hunter, G., and Vettorato, D., 2017. “Smart Energy City Development: A Story Told by Urban Planners”, *Cities*, 64: 54-65.
- Nielsen P.S., Ben Amer, S., and Halsnæs K, 2013. *Definition of Smart Energy City and State of the Art of 6 Transform Cities Using Key Performance Indicators: Deliverable 1.2*, DTU.
- Panda, S., Mohanty, S., Rout, P.K., Sahu, B.K., Parida, S.M., Kotb, H., Flah, A., Tostado-Véliz, M., Samad, B.A., and Shouran, M., 2022. “An Insight into the Integration of Distributed Energy Resources and Energy Storage Systems with Smart Distribution Networks Using Demand-side Management”, *Applied Sciences*, 12(17): 8914.
- Faia, R., Lezama, F., Soares, J., Pinto, T., and Vale, Z., 2024. “Local Electricity Markets: A Review on Benefits, Barriers, Current Trends and Future Perspectives”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 190, Part A.

Date Received 2024-01-28
Reviewed(1st) 2024-03-20
Date Revised 2024-04-30
Reviewed(2nd) 2024-05-04
Date Accepted 2024-05-04
Final Received 2024-06-18