

미국 전력시스템의 발전 방향¹⁾

김 현 제 에너지경제연구원 선임연구위원(hjkim@keei.re.kr)



1. 서론

파리협정 이후 세계 각국은 기후위기 대응을 위한 이산화탄소 감축 목표를 앞다퉈 발표하고 있다. 2050 탄소중립을 선언한 국가 대부분은 도전적인 감축 목표를 NDC(Nationally Determined Contribution)에 담아내고 있다. 우리나라도 일차적으로 발표한 NDC가 비난에 직면하자 NDC 상향안을 발표하면서 감축 의지를 새롭게 천명하였다. 이러한 한층 더 강화된 국가 감축 목표를 달성하기 위해서 국내 전환 부문의 탈탄소화가 중요한 당면 과제이다.

빌 게이츠(2021)에 따르면 지구의 연간탄소배출량은 510억톤이며, 이 가운데 27%가 발전부문에 배출되고 있다고 한다. 이는 제조공정에서 발생하는 배출량 31% 다음으로 큰 배출 부문이다. 2050년에 탄소중립을 달성하기 위해서 세계 각국은 전환부문의 탈탄소화를 가장 중요한 정책 목표로 내세우고 있다. 청정에너지를 기반으로 전기화를 통해 탄소중립을 실현하기 위해서는 발전 부문에서 혁신적인 변화가 이

1) 본고는 Committee on the Future of Electric Power in the U.S.(2021), The Future of Electric Power in the United States의 주요 내용을 바탕으로 작성한 것임.

루어져야 한다. 이러한 변화에는 기존 화석연료 위주의 전원을 친환경적인 전원으로 전환해야 한다. 재생 에너지의 이용 확대와 더불어 수소와 암모니아 등 무탄소 전원의 활용도 적극적으로 고려해야 한다. 그리고 아직도 상용화 단계의 기술은 아니지만, 이산화탄소 포집·저장·활용도 매우 중요한 기술임이 틀림없다.

한편 탄소중립 달성을 위해서는 전력 부문의 공급측 변화와 더불어 수요측 변화도 필요하다. 이제까지 우리나라는 전력수요의 증가에 대비해서 설비의 확장으로 공급 안정성 확보에만 주력해왔다. 이런 정책 기조는 안정적인 전력공급을 위해 2년마다 수립하는 전력수급기본계획이 전력정책의 최우선 과제가 되도록 만들었다. 반면 소비 절약이 중요한 정책 대안임에도 불구하고 소비자의 적극적인 수요 반응을 끌어내지 못하고 있다. 현행의 저렴한 요금 수준에서 소비자가 불편을 감수하면서 소비 절약을 실천할 유인이 없다고 보는 것이 맞다.

미국 전력산업의 미래에 대한 전망과 정책 권고를 담고 있는 보고서(The Future of Electric Power in the United States)의 핵심적인 내용을 살펴보고, 이를 통해 국내 전력산업에 대한 시사점을 짚어 보고자 한다. 본 고는 2. 미국 전력산업의 개관에서 미국 전력산업의 동향을 요약하고, 그리고 3. 미국 전력시스템의 변화 요인을 살펴본다. 이러한 환경 변화에 대응한 4. 미국 전력시스템의 발전 방향을 서술하고, 미국 전력업계의 대응책 마련을 통해 국내 전력부문에 시사하는 바를 5. 정책적 시사점에서 제시한다.

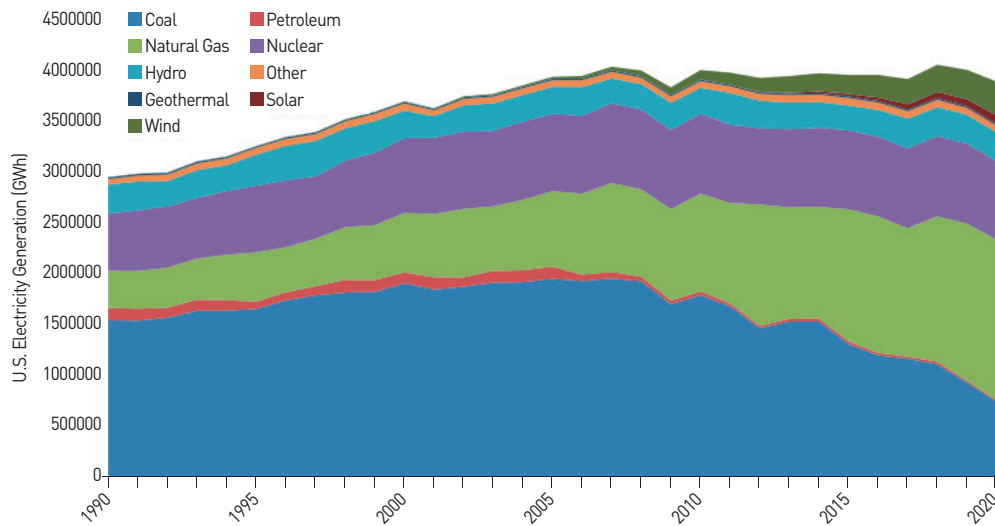
2. 미국 전력산업의 개관

가. 전원구성 변화 추이

2020년 기준 미국의 발전량은 4,286.6 TWh이며, 발전설비용량은 1,057 GW이다.²⁾ 이는 우리나라와 비교해서 약 10배 정도로 큰 규모에 해당한다. 지난 30년간 미국 전원구성의 변화를 요약하면 다른 국가와 유사하게 석탄의 발전비중이 감소하고 천연가스와 재생에너지 발전량이 큰 폭으로 증가하고 있다는 점이다. 총발전량 중 화석연료의 발전량은 2001년 72%에서 2019년 63%로 감소하였다. 총발전량은 2001년부터 2019년 사이 10% 증가했지만, 화석연료의 발전량은 2% 증가에 그쳤다. 미국의 전원구성은 셰일가스 혁명과 풍력, 태양광 등 재생에너지 발전설비의 도입 확대로 2000년대 중반 이후 큰 변화를 겪고 있다. 특히 기후변화 대응과 저탄소 발전원으로서의 전환을 위한 정책 변화로 인해 2019년에 천연가스(38%)가 석탄(23%)의 발전량을 초과하였다. 풍력발전과 태양광 발전은 2001년 대비 44배와 200배가량 대폭 성장하였다. 재생에너지 발전량은 풍력(7%), 태양광(3%), 수력(7%)의 비중으로 총발전량의 약 17%를 차지하고 있다. 한편 원자력은 총발전량의 20%를 차지하고 있는데, 2019년 98 GW에서 2050년 79 GW로 감소할 전망이다.

2) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), p.24.

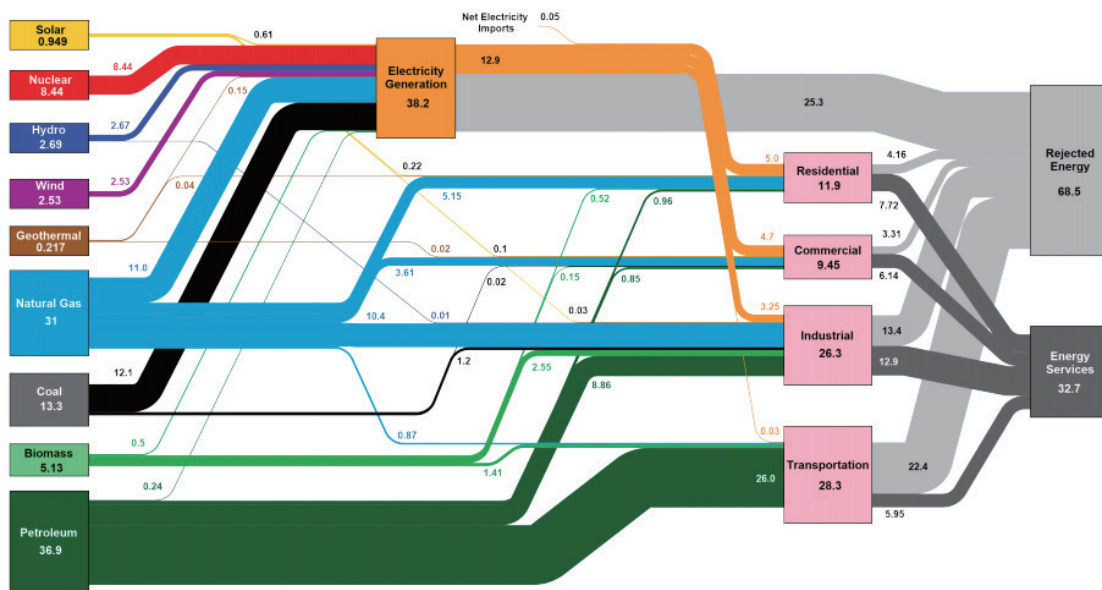
그림 1 미국의 발전량 변화 추이(1990년~2020년)



자료: The Future of Electric Power in the United States(2021), p.24.

2019년을 기준으로 미국 에너지소비의 흐름을 살펴보면 [그림 2]와 같다. 미국의 수송부문에서 전기가 차지하는 비중은 0.1% 미만이며, 석유가 91%를 차지하고 있다. 이는 미국 수송부문의 에너지전환이 얼마나 어려운 도전 과제인지를 짐작하게 하는 수치이다. 그리고 상업부문에서 에너지소비 중 전기가 차지하는 비중은 49%이며, 주거부문은 41%를 차지하고 있다. 이에 비해 산업부문의 전기 소비 비중은 12%로 전기 화가 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다.

그림 2 미국의 에너지소비의 흐름(2019년)



자료: The Future of Electric Power in the United States(2021), p.37.

나. 전력산업의 주요 참여자

미국 전력산업의 주요 이해당사자를 살펴보면 투자자 소유의 유틸리티(Investor-owned utility, IOU), 공공 소유의 유틸리티(State-owned utility), 독립적 시스템 운영자(Independent system operator, ISO) 및 지역송전기구(Regional transmission organization, RTO), 그리고 전력 중개업체, 소매 전기공급업체, 장비 제조 및 판매업체 등으로 구성된다. IOU는 2018년 기준으로 200개 미만인데, 전체 소매전력의 3/4을 이들 유틸리티의 지역 배전시스템을 거쳐 공급하고 있다. 공공 소유의 유틸리티는 협동조합 형태의 유틸리티(Cooperative utility)와 특수 목적의 행정구역을 포함한 지방 정부 및 기타 공공기관 소유의 유틸리티(약 2,000개)가 있다. 834개의 배전 협동조합과 63개의 발전/송전 협동조합으로 약 900개의 협동조합 형태의 유틸리티가 존재한다. 결국 공공 소유의 유틸리티는 모두 2,900개에 달한다.

독립적 시스템 운영자는 특정 지역 내의 송전시스템을 운영하고 도매시장의 기능을 관리하는 연방 규제 비영리 단체이다. 전기 소비자 2/3에게 전기를 공급하는 총 7개 기관으로 텍사스 주를 담당하는 ERCOT을 제외한 전체는 연방규제위원회(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)가 규제한다.³⁾ 한편 전력산업 및 전력시장에 대한 규제는 연방규제위원회와 주규제위원회(Public Utilities Commission, PUC)가 규제관할권을 구분하여 전력산업을 포함한 에너지산업 전체에 대해서 수행하고 있다. 기본적으로 원자력 발전소를 제외한 발전소 부지 선정, 소매전기 서비스 요금, 저소득층 유틸리티 프로그램 운영 등 주 내부의 에너지 사업에 대한 규제는 주규제위원회가 담당하고 주 간 거래, 전력 도매가격, 원자력 발전소의 건설/운영 인허가(수력발전 포함), 송전서비스에 대한 접근, 도매시장 운영 등의 업무는 연방 규제위원회가 담당한다.

다. 소매경쟁의 동향

1990년대 선진국의 전력부문에서 가장 뜨거운 주제는 구조개편과 규제완화였다고 해도 과언이 아닐 것이다. 이제까지 자연독점적인 성격을 지닌 사업이라고 생각해오던 전력산업에 경쟁을 도입하여 효율성을 제고하고, 소비자에게는 양질의 서비스와 합리적인 가격이라는 혜택을 제공한다는 것이다. 전력산업 구조개편은 도매경쟁에서 시작해서 소매경쟁의 도입으로 마무리 지어졌다. 대표적인 사례로 영국, 호주, 이태리, 스페인 등을 들 수 있다.

미국도 전술한 대로 도매시장을 구축하여 발전부문의 경쟁을 유인하고 소비자에게 공급자 선택권을 부여하는 소매경쟁을 도입하였다. 하지만 거의 30년이 지난 2017년 기준으로 미국의 소매경쟁 동향을 살펴보면 완전한 소매경쟁을 시행하는 주는 텍사스, 일리노이, 오하이오, 펜실베이니아, 뉴욕, 메인, 로드아일랜드, 코네티컷, 뉴햄프셔, 뉴저지, 매사추세츠, 델라웨어, 메릴랜드, 워싱턴 DC 등 14개 주이다. 부분적으로

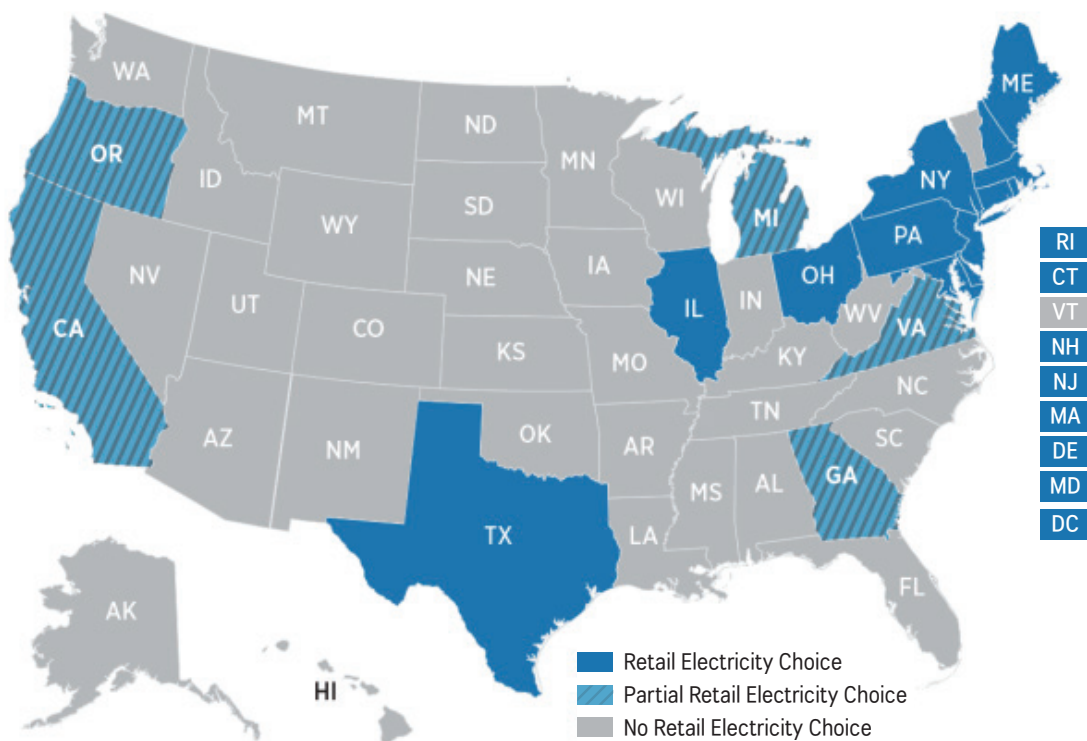
3) 7개의 지역송전기구는 미국 전역에 걸쳐 있는데, California ISO, Southwest Power Pool, Electric Reliability Council of Texas, Midcontinent Independent System Operator, PJM Interconnection, New York ISO, ISO New England임.

소매경쟁을 시행하고 있는 주는 캘리포니아, 오레곤, 미시건, 버지니아, 조지아이며, 나머지 주는 소매경쟁을 전혀 시행하지 않고 있다.

소매경쟁으로 경쟁적 전력시장을 마련하는 전력산업의 구조개편은 일부 주를 제외하고는 별로 성과를 내지 못하고 있다. [그림 3]에서 볼 수 있듯이 미국의 소매경쟁은 과반이 되지 않는 주에서 시행하고 있음을 알 수 있다.

경쟁적 전력시장을 구축한다는 관점에서는 소매경쟁의 도입이 중요한 선결과제이지만 에너지전환을 위해서 소매경쟁이 반드시 필요한 것은 아니다. Sioshansi 외(2018)는 미국의 주별 소매경쟁 도입 실태를 통해 소매경쟁이 청정에너지 미래로의 유망한 경로라고 단정할 수 없다는 주장을 펼치고 있다. 즉 모든 주의 규제당국은 전력공급 신뢰도를 확보하고 청정에너지를 확대하기 위해 전력시장에 직접 개입하고 있으며, 에너지 절약, 혁신적인 요금제 도입은 시장이 아니라 규제적 결정에서 시작되었다는 것이다.⁴⁾ 어쨌든 판매부분의 경쟁으로 소비자의 선택권을 확대하는 소매경쟁이 반드시 시행되어야 한다거나 혹은 시행될 필요가 없다고 단정하기 곤란하다. 따라서 전력산업의 미래 청사진에 부합하는 국내 전력산업 구조를 모색하는 후속 연구가 필요하다.

그림 3 미국의 주별 소매경쟁의 추진 동향(2017년 기준)



자료: The Future of Electric Power in the United States(2021), p.101.

4) Sioshansi 외(2018), p. 263.

3. 미국 전력시스템의 변화 요인

가. 전력수요의 변화

미국의 미래 전력수요에 영향을 미치게 될 주요 변수들은 다음과 같다. 우선 수송부문의 전기화를 선도하고 있는 전기자동차의 확산이다. 미국은 온실가스 감축을 목표로 전기자동차 가운데 경차에 대한 지원을 확대하고 있다. 캘리포니아주는 2035년까지 주 내에서 판매되는 모든 신규 차량을 무배출 차량으로 한다는 정책 목표를 설정하였다. 또한 향후 중대형 차량의 전기화 노력이 지속되면 충전용 전력수요가 많이 증가할 수 있다. 더욱이 디지털 경제의 성장으로 데이터 센터의 전력수요도 증가하고 있다. 디지털 기술의 사용이 증가하면서 컴퓨팅 및 데이터 센터의 전력수요가 증가하고 있으며, 블록체인 기술도 전력수요의 증가를 견인하고 있다. 한편 미국 최종에너지 소비량의 28%를 차지하는 건물부문의 기기, 조명, 냉난방 설비의 효율성 개선으로 이 부문의 전력수요 증가에 대응할 필요가 있다. 미국의 26개 주에서는 에너지효율화 향상사무화제도(Energy Efficiency Resource Standards, EERS)를 도입하여, 유틸리티가 장기 에너지 절감 목표를 수립하고 이를 에너지 효율 개선을 통해 달성하도록 유도하고 있다.

한편 장기적으로 전력수요를 증가시키는 기타 요인으로 수소경제의 확대, 대기중 온실가스 직접 포집, 실내 농업 활동 증가 등이 있다. 수전해(water electrolysis)를 통해 그린수소를 생산하기 위해서는 상당한 양의 전기가 필요하다. 그리고 이산화탄소 포집을 위해 주목받고 있는 이산화탄소 포집·이용·저장(Carbon Capture, Utilization, Storage, CCUS) 기술도 전력수요를 증가시키는 요인이다. 또한 미국은 국내와 달리 합법적인 대마초 재배를 허용하고 있는데 이러한 실내 농업 활동 또한 전력수요를 증가시키는 요인으로 작용한다. 미래 전력수요는 잠재적인 전력 집약적인 기술이나 수요조절 기술 등이 다양하게 보급되는 것에 따라 좌우될 것이다. 하지만 이러한 기술의 보급 범위와 시기는 불확실하며, 따라서 미래 전력수요의 변화 방향을 단정적으로 말하기는 곤란하다.

나. 강력한 온실가스 감축 정책 시행

2018년 기준으로 미국의 이산화탄소 배출량은 66억 7천7백만톤이다.⁵⁾ 이를 부문별로 나눠보면 수송 부문 28%, 발전부문 27%, 산업부문 22%, 상업 및 가정부문 12%, 그리고 농업부문 10%를 각각 차지한다. 미국의 이산화탄소 배출 감축을 위해서는 수송부문의 탈탄소화가 가장 중요하며, 다음으로 발전부문과 산업부문에 대한 탈탄소화가 요구된다. 온실가스 배출을 완전하게 제거하려는 심층 탈탄소화(deep decarbonization)에는 두 가지 전환이 필요하다. 우선 기존 화석연료 기술을 통한 발전방식을 무탄소 혹은 저탄소 발전방식으로 전환해야 한다. 그리고 건물, 운송 및 산업부문에서 사용하는 기존의 화석연료 기술을 무배출 전력 또는 순배출이 0인 연료로 대체하는 것이다.

미국은 석탄의 천연가스 대체를 통해 발전부문에서 탈탄소화를 상당 부분 이루었다. 2005년 기준으로

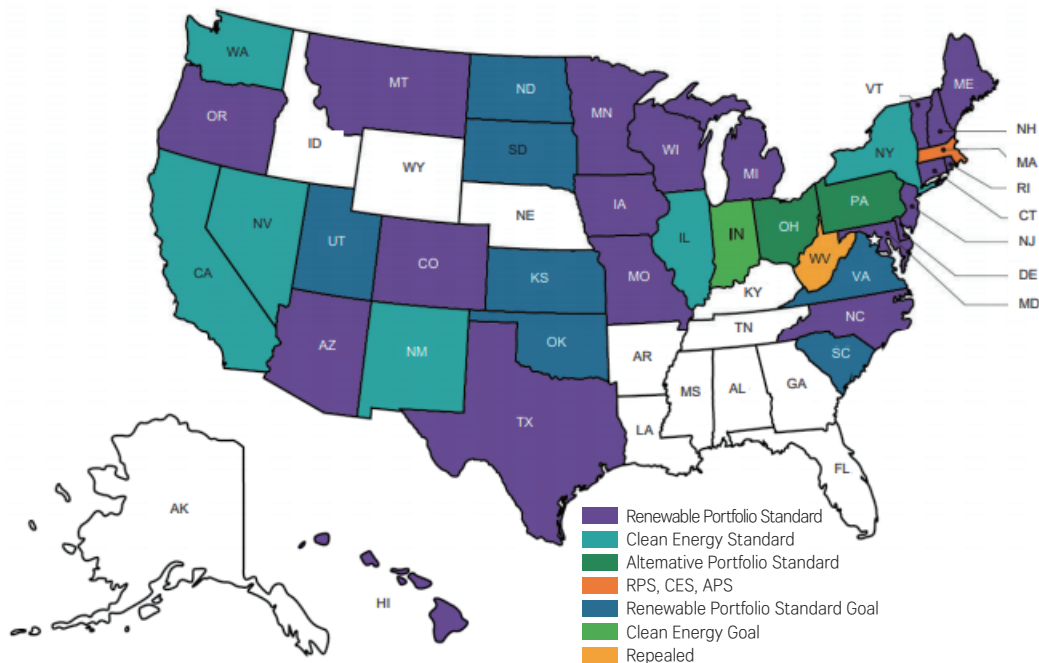
5) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), p.43.

수평 시추 및 파쇄를 이용한 셰일 유정의 가스 생산량이 미국 가스 생산의 1%에 불과했지만, 현재 이 방식을 통해서 천연가스 생산이 급격하게 증가하였다. 이를 셰일혁명(Shale Revolution)이라고 할 정도로 미국은 물론 세계 에너지 지평에 큰 변화를 가져왔다. 셰일가스의 공급으로 인해 가스 가격이 하락하면서 천연가스가 미국의 많은 지역에서 석탄보다 더 경쟁력이 있는 발전원이 되었다. 그리고 일부 원자력 발전소조차 전력시장 내에서 경쟁 열위의 상태에 처하게 되어 무탄소 전력의 공급이 오히려 축소되는 현상이 나타나고 있다.

2020년 기준 미국의 22개 주와 워싱턴 DC에서 구체적인 온실가스 배출량 감축 목표를 수립하고 시행하는 중이다.⁶⁾ 또한 발전부문에 대한 청정에너지 혹은 재생에너지 목표도 설정하고 있다. 29개 주와 워싱턴 DC는 의무기준을 적용하고 있으며, 다른 8개 주는 자발적인 전력부문의 기준을 가지고 있다. 이러한 강력한 온실가스 감축 정책에 따라 유틸리티도 적극적으로 대응하고 있다. 온실가스 감축 정책과 더불어 재생에너지의 비용 하락으로 투자 확대, 재생에너지 및 기타 무탄소 발전원에 대한 소비자 선호, 온실가스 감축 필요성에 대한 합의 등에 대응하여 유틸리티도 2050 넷제로를 선언하고 있다. 총 57개 유틸리티가 탄소 배출량 절감을 공약하였으며, 30개의 유틸리티가 2050년까지 넷제로 목표를 설정하였다.⁷⁾

아래 [그림 4]에서 2019년 기준으로 미국의 발전부문에 재생에너지 지원 정책이나 온실가스 감축 정책을 시행하는 주의 동향을 파악할 수 있다.

그림 4 미국의 주별 발전부문의 재생에너지 및 온실가스 감축 정책 시행(2019년)



자료: The Future of Electric Power in the United States(2021), p.105.

6) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), p.103.

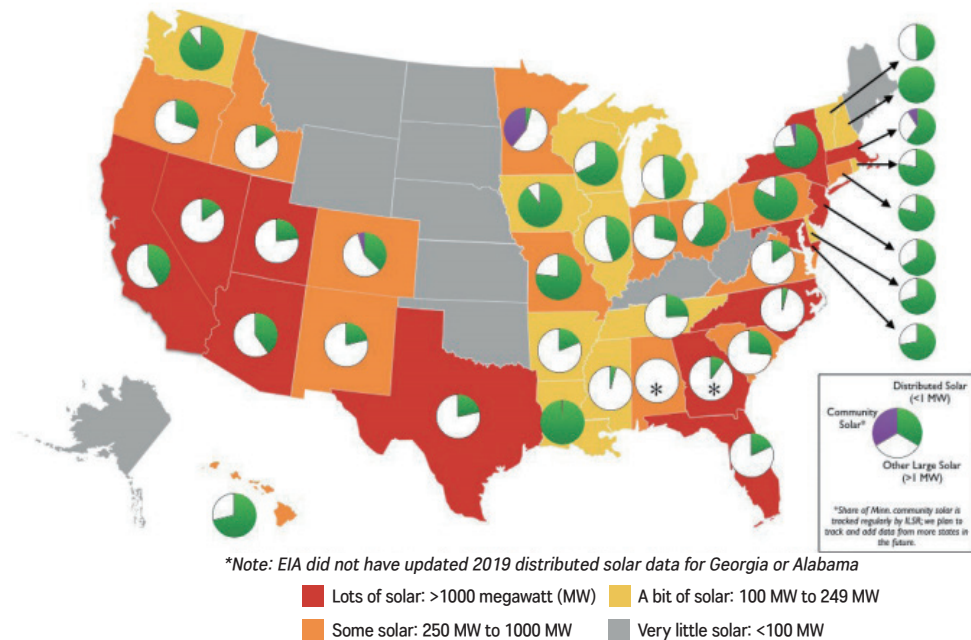
7) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), p.104.

이러한 탈탄소화의 확대에 이어질 수 있는 새로운 유형의 전기수요(전기자동차 충전, 난방 및 온수 등 건물에너지 서비스의 전기화 등)는 탈 중앙식 에너지 저장, 수급 유연성, 전기 생산 시점의 에너지소비로부터 분리 등의 기회를 제공하기도 한다. 특히 이런 최종에너지 사용기술은 재생에너지가 풍부한 특정시간(일조량이 가장 높은 시간대)에 수요를 창출하도록 유도할 수 있으며, 이는 가격 신호에 따라 더욱 강화될 수 있다. 즉 소비자의 부하 이전을 유도할 수 있는 가격제를 유틸리티가 제시하도록 만들 수 있다.

다. 분산 에너지자원의 확산

분산 에너지자원(Distributed Energy Resource, DER)은 수요지 인근의 소규모 친환경적인 자원을 의미하는데, 대표적으로 옥상형 태양광 등 재생에너지, 수요반응자원(Demand Response, DR), 에너지저장장치(ESS)를 들 수 있다. 소비자의 계량기 이후(Behind-the Meter, BTM)에 설치하는 소규모 설비이거나 지역사회(Community Solar) 혹은 유틸리티 차원의 태양광 프로젝트 등을 포함하는 DER은 주로 배전시스템에 연결하여 이용하게 된다. 미국에서 DER은 소비자의 자립도 향상, 소비자 비용 절감, 탈탄소화 목표 달성을 위한 수단으로 주목받고 있다. 특히 대용량 전력시스템에서 단절되는 위기 상황에는 DER을 비상 발전용으로도 이용한다.

그림 5 미국의 주별 태양광 발전의 분포



자료: The Future of Electric Power in the United States(2021), p.50.

[그림 5]에서 미국의 대표적인 DER인 태양광 발전의 이용 정도를 파악할 수 있다. 미국의 서부지역, 그리고 남부와 동부지역을 중심으로 태양광 발전이 활발하게 보급되고 있다. 1,000MW 이상의 보급 실적을 보유한 캘리포니아, 텍사스, 아리조나, 네바다, 유타, 조지아, 플로리다주 등은 태양광 이용이 활발한 지

역으로 주로 유틸리티 차원의 대규모 태양광 프로젝트를 기반으로 보급이 확대되고 있다. 반면에 동부지역은 유틸리티 차원의 대규모 태양광 프로젝트보다는 1MW 미만의 소규모 태양광을 중심으로 분산에너지원으로 이용하고 있다. 한편 미네소타주의 경우 지역사회 기반의 태양광 프로젝트인 community solar의 보급이 가장 활발하다는 특징을 보인다.

이러한 DER의 확산으로 유틸리티는 수요측에서 생산되는 전기를 시각화, 추적, 관리해야 하는 부담을 떠안게 되었다. 수백만의 DER의 조정작업을 원활하게 하려고 유틸리티는 분산형 에너지자원관리시스템(DER Management System, DERMS)을 도입하여 전력계통의 안정성을 추구하고 있다.

라. 풍력과 태양광의 증가

미국 전력시스템의 변화 요인으로 풍력과 태양광의 급증을 들 수 있다. 전술한 대로 대표적인 재생에너지원인 미국의 풍력 발전과 태양광 발전은 2019년에 2001년에 비해 각각 44배와 약 200배 성장하였다.⁸⁾ 2019년에는 풍력이 7%를 차지하였고, 유틸리티 규모 및 옥상형 태양광은 전체 전력 공급의 3%를 담당했다. 전체 발전에서 차지하는 비중은 10% 정도로 다른 발전원에 비해서 낮은 편이다.

하지만 비급전 발전원인 풍력과 태양광은 공급 과잉의 경우 출력제한이 필요하며, 공급이 부족한 경우 정전을 막기 위해 다른 에너지원으로 부하 추종을 해야 한다. 캘리포니아 전력시장에서 낮 시간대에 태양광의 가동으로 순수요금이 거의 0인 상태에서 태양광이 가동을 멈추는 일몰시간에 부하가 급증하는 덕커브(duck curve) 현상이 자주 발생하고 있다. 이를 해결하기 위해 부하추종이 용이한 백업 전원이 필요하게 되는 것이다. 풍력의 경우에도 바람의 영향으로 비급전 전원으로 분류된다. 결국 풍력과 태양광의 간헐성으로 인해 전력시스템의 운영이 점차 복잡해지며, 급전가능한 무배출 발전, 단기 및 장기 저장, 전기차 충전, 수요반응 기술 및 기타 유연한 하이브리드 자원의 통합 등 추가적인 해법이 필요하게 되는 것이다.

마. 사회적 불평등 완화에 대한 요구

사회적 불평등 완화에 대한 요구가 미국 전력시스템의 미래 모습을 변화게 하는 요인 가운데 하나이다. 빈곤 및 소득의 격차는 미국 사회의 전반적인 문제이며, 전력부문에서도 저소득층 소비자가 다양한 문제에 직면하고 있다. 예를 들면 전기요금 체납으로 서비스 중단, 보다 효율적인 가전제품에 투자할 능력의 부족, 요금 및 규제 변화로 인한 부담 가중 등 저소득층이 겪게 되는 문제가 많다. 미국 연방정부 차원에서 에너지 빈곤 문제에 대응하기 위해 저소득 가정 에너지 보조프로그램(Low Income Home Energy Assistance Program, LIHEAP)과 주택 단열 지원 프로그램(Weatherization Assistance Program, WAP)을 통해 저소득층 소비자의 에너지 요금 부담을 낮추려는 노력을 기울이고 있다.

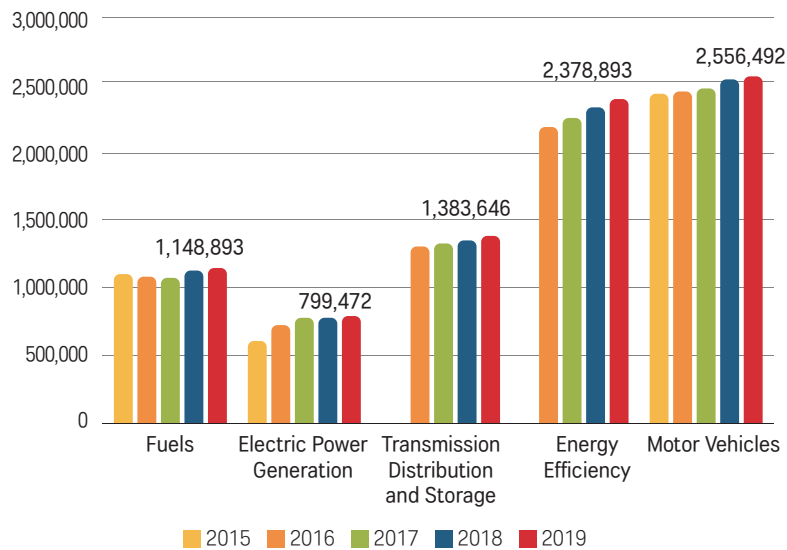
연방정부 차원의 지원사업과 함께 주정부 차원에서도 저소득층에 대한 지원사업을 펼치고 있다. 대표적으로 로스앤젤레스의 수도전력국은 주택 에너지 효율개선 프로그램을 통해 주로 내륙의 지역사회를 대상

8) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), p.24.

으로 저소득층 소비자 및 임차인에게 주택의 효율성을 개선함으로써 에너지 및 수도 요금 부담을 낮춰주려고 한다. 하지만 친환경에너지 보급 확대 정책에는 무시할 수 없는 불평등 요소가 포함되어 있다. 즉 에너지 효율적인 건물, 옥상 태양광 발전, 전기자동차 보급을 촉진하는 정책은 빈곤층 고객을 희생시키면서 부유층 고객을 지원한다는 비판에 직면하고 있는 것도 사실이다.

한편 일자리 문제도 사회적 불평등 완화 차원에서 중요한 이슈이다. 전력부문에서 탈탄소화가 진행됨에 따라 고용에 대한 우려가 점점 커지고 있다. 석탄발전소의 폐지로 발전소 종사자의 고용이 불안해진다는 것이다. 그러나 주요 기술 그룹별 지난 5개년(2015년~2019년)의 고용 증가율은 12.4%인데, 이는 일반적인 고용 증가율의 두 배에 달하는 수준이다.⁹⁾ [그림 6]에서 미국 전력부문의 주요 기술별 고용 증가율을 살펴보면 다음과 같은 특징을 발견할 수 있다. 전력시스템이 발전함에 따라 발전 및 송배전/저장의 기존 일자리는 유지될 것으로 전망되며, 재생에너지와 효율화, 센서 성능의 향상, 보안 강화 등과 관련된 새로운 기회는 고용에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 보인다. 특히 향후 전기자동차와 관련한 고용 증가가 두드러질 전망이다. 하지만 최소 중산층 정도의 생활이 가능한 “좋은 일자리”의 창출이 중요하다고 말할 수 있다.

그림 6 미국의 주요 기술별 고용 변화 추이(2015년~2019년)



자료: The Future of Electric Power in the United States(2021), p.58.

4. 미국 전력시스템의 발전 방향

가. 미래 도매시장의 설계

9) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), p.58.

전술한 미국 전력부문의 변화 요인에 대응하기 위해서 미국의 전력시스템은 전력도매시장부터 새롭게 만드는 작업을 추진하고 있다. 미국의 미래 도매시장을 설계할 때에 염두에 두어야 할 과제를 열거하면 다음과 같다. 우선 저비용 혹은 무비용의 발전자원이 확대되는 미래의 전력망에서 효율적이며 안정적인 전기 공급이 유지되도록 시장을 설계해야 한다. 유연성 자원을 확보하기 위해 발전 및 부하 측에서 다양한 수단을 강구해야 하며, 유연성 자원 메커니즘을 도매시장과 적절하게 연계해야 한다. 또한 지역 전력망에 연결되는 분산형 자원에 대한 의존도가 높아질 것에도 대비해야 한다. 그리고 탄소가격 결정 메커니즘을 도입하여 적절한 수준의 탄소가격 하에서 자원이 더 효율적으로 시장에 진입하거나 퇴장할 수 있도록 해야 한다. 아울러 시장참여자들의 다양한 이해와 우선순위를 수용해야 하며, 도매시장 발전방향에 대한 논의를 통해 규제 및 제도적인 제약을 조정해야 할 것이다. 한편 다른 국가들이 경험한 성공과 실패 사례를 통해 정책적 시사점을 얻고 이를 활용하는 것도 중요하다.

현재의 도매시장 설계에서 가장 두드러진 한 가지 제약사항은 시장 수요측의 가격반응이 부족하다는 점이다. <표 1>에서 미국의 전력도매시장에서 수요반응 자원의 역할을 살펴볼 수 있다. 최대부하에서 차지하는 수요반응 자원의 비율이 2017년 5.6%, 2018년 6.0%에 그친다. MISO가 2018년 10.6%로 겨우 두 자릿수를 나타내는 정도로 최대부하에 대한 역할이 낮은 실정이다. 캘리포니아주의 전력도매시장인 CAISO가 전년 대비 85.6%의 증가세를 보인 점이 특징적이다. 미래의 시장 설계와 관련 정책이 소비자에게 미치는 영향을 파악하고 수요측 반응을 높이기 위해서 앞으로 더 많은 경제 및 기타 사회과학 연구가 필요하다. 예를 들면 행동경제학적 접근을 통한 소비자의 소비패턴 연구를 들 수 있다.

표 1 RTO/ISO의 최대부하에 대한 수요반응 자원의 기여

RTO/ISO	2017년		2018년		전년대비 변화율	
	수요반응 자원 (MW)	최대부하의 비율	수요반응 자원 (MW)	최대부하의 비율	MW	%
CAISO	1,293	2.6%	2,400	5.2%	1,107	85.6%
ERCOT	3,009	4.3%	3,262	4.4%	253	8.4%
ISO-NE	684	2.9%	356	1.4%	-328	-48.0%
MISO	11,682	9.7%	12,931	10.6%	1,249	10.7%
NYISO	1,353	4.6%	1,431	4.5%	78	5.8%
PJM	9,520	6.7%	9,294	6.3%	-226	-2.4%
SPP	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
합계	27,541	5.6%	29,674	6.0%	2,133	7.7%

자료 : World Bank, Where Sun Meets Water, 2019., p.17.

나. 혁신적 기술의 도입과 배전시스템의 변화

배전시스템의 잠재적 변화를 가져오는 요인들 가운데 핵심적인 것은 지역 전력망과 상호 연결된 옥상 태양광, 마이크로 그리드, 소규모 저장 시스템, 전기자동차 등의 관련 기술 보급 확대에 따른 전력수요의 증가를 들 수 있다. 이와 더불어 에너지 생산과 소비를 자체적으로 통제하기 위해서 더 많은 옵션을 요구하는 소비자의 등장이다. 또한 대규모 정전 사태에 따라 전력망 복원력의 강화에 대한 필요성이 늘어나고 있

다. 그리고 환경적 영향을 고려하면서 동시에 경제성장을 달성하려는 정책입안자들의 목표도 중요한 요인이라고 할 수 있다. 요컨대 지역 단위 전력서비스를 위한 정책 목표는 저렴한 가격과 공정성의 보장, 신뢰성과 복원력 확보, 지속가능성과 청정에너지 발전의 확대 등이라고 할 수 있다.

미국의 배전부문에서 혁신적 기술 도입의 사례를 살펴보자. 일리노이주의 유틸리티인 ComEd(Commonwealth Edison)는 브론즈빌 지역 공동체에 마이크로 그리드와 분산형 에너지 복합시스템을 적용하는 시범사업을 진행하고 있다. 뉴욕주의 유틸리티인 ConEd(Consolidated Edison)는 브루클린/퀸즈 지역에서 제삼자의 분산에너지 자원 포트폴리오(수요 반응, 에너지 효율화, 지역 저장장치, 옥상 태양광)를 활용하여 지역 배전시스템 기능을 제공하는 사업을 펼치고 있다. 이러한 사업을 통해 기존 유틸리티의 투자를 지연시켜서 비용 절감을 도모한다. 캘리포니아주의 유틸리티인 PG&E(Pacific Gas & Electric)는 산불 위험에 대비하여 유틸리티 서비스의 복원력을 높이기 위한 마이크로 그리드 보급사업을 추진하고 있다. 미네소타주의 태양광 발전 가치 전력 요금제, 뉴욕주의 DER 혜택/비용 방법론, 매사추세츠주의 청정에너지 최대부하 기준 등 DER 공급업체 및 저장장치에 대한 보상 제공 기준을 설정하거나 첨단 계량기의 도입과 사이버 보안의 개선을 도모하는 등 새로운 기술을 배전시스템에 도입하여 변화에 대응하고 있다.

다. 마이크로 그리드의 보급

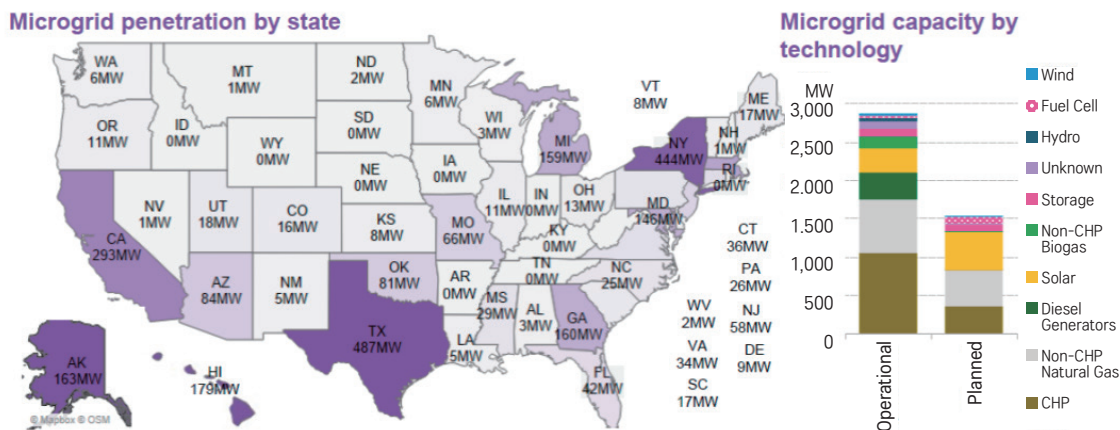
미국에서는 현재 2.7GW 규모의 마이크로 그리드가 운영 중이며 추가로 1.4GW 규모의 설비가 계획 단계에 있다.¹⁰⁾ 아래 [그림 7]에서 미국의 마이크로 그리드 보급 동향을 살펴보면, 텍사스, 뉴욕, 매사추세츠, 캘리포니아, 메릴랜드주가 마이크로 그리드 보급에 적극적임을 알 수 있다. 이들 주는 전력시장이 자유화되어 있으며, 소비자가 제삼자로부터 전력을 구매하는 것이 허용되어 있다. 2019년 기준으로 운영 중인 242개 마이크로 그리드 중 1/3은 군사시설이나 상업용 건물에 설치되어 있다. 도시와 지자체가 29개의 마이크로 그리드 설비를 운영하고 있는데, 이들이 계획하고 있는 마이크로 그리드 프로젝트의 규모가 비교적 큰 편이다. 하지만 마이크로 그리드 보급이 기대보다 빠르게 진행되지 않고 있는데, 이는 혁신에 대한 규제 장벽의 극복이 생각보다 쉽지 않다는 방증이라고 할 수 있다.

미국 전력시스템의 발전 및 송전 부문에서 이루어진 대대적인 변화와 구조개편과 달리 배전 부문은 비교적 큰 변화가 없는 것이 사실이다. 배전 부문은 주정부 차원에서 규제하고 있으며 주정부 또한 권한 유지를 위해 노력하기 때문에 혁신의 정도는 상대적으로 미약하다. 배전사업자에게 독점사업권을 허용하게 되면 새로운 서비스를 통해 혁신을 이루려는 제삼자의 능력이 배제될 수 있으나 이를 용인하고 있다.¹¹⁾ 제삼자의 전기차 충전소 설립과 운영을 금지하는 배경에는 이 같은 사업이 전기 소매업과 다름이 없고 이는 배전사업자의 배타적 사업영역에 속하기 때문이다. 이러한 연유로 인해 배전 부문에서의 혁신이 비교적 더디게 나타나고 있음을 알 수 있다.

10) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), p.124.

11) 배전사업자에게 지역 독점권을 보장해 주는 배경은 배전사업자가 특정 지역 내의 모든 소비자에게 비차별적으로 서비스를 제공하고 전력 요금이 공정하고 합리적으로 유지될 수 있도록 한다는 전제하에 해당 지역 내에는 단 하나의 배전사업자만 존재하는 규제계약을 인정하는 것임. 이 같은 독점 구조로 규제를 받는 사업자는 에너지 인프라를 위한 투자에 필요한 자본을 조달할 수 있으며, 투자비를 요금으로 회수할 수 있도록 허용됨.

그림 7 미국의 주별 마이크로 그리드 보급 동향



자료: The Future of Electric Power in the United States(2021), p.127.

라. 소매부문의 변화

분산 에너지자원(DER)의 보급이 확대됨에 따라 DER 기반의 서비스를 제공하기 위한 시장의 변화가 필요하게 되었다. 우선 배전시스템 운영자(Distribution System Operator, DSO)의 역할이 확대되고 있다. 중앙집중화된 도매시장과 함께 DSO는 효율적이고 신뢰할 수 있는 분산자원 시장을 구축하고 지원하기 위한 계획 및 운영 역할과 책임을 담당해야 한다. 또한 첨단 계량 및 실시간 요금제를 도입하여 고객이 자신의 전기 사용량을 관리하고, 유틸리티 사업자와 기타 서비스 제공자들이 중앙집중 및 분산형의 유연한 자원을 활용하여 시스템 부하의 균형을 유지하고 최대한 효율적으로 전력을 공급하도록 한다. 고객이 선택하는 요금제에 따라 고객의 기기를 자동으로 제어할 수 있는데, 예를 들면 온수기와 에어컨이 고객의 선호도와 허용 수준에 따라 전력시스템의 유연한 자원이자 저장장치로 활용될 수 있다. 마지막으로 소매 전력가격은 자본집약적이고 변동비가 적은 자원에 대한 의존도가 점점 커지고 있는 전력망의 비용 구조의 변화를 반영해야 한다. 이러한 자원으로 송배전 자원, 저장, 분산 및 중앙 집중형 자원을 들 수 있다. 이 경우 사용량 기반의 요금에 크게 의존하던 방식에서 벗어나 소비자에게 더 많은 옵션을 제공하고 서비스 제공자가 투자비를 회수할 수 있는 요금제를 설계하도록 한다.

결국 DER의 대대적인 도입과 지역 전력망에서의 전력 흐름의 변화와 더불어 소매시장 설계와 관련된 더 많은 혁신이 필요하다. 즉 새로운 소매시장으로의 개편이 필요하며, 가격신호는 동적이면서 시간에 따라 지역별로 다르게 나타나는 것이 중요하다.

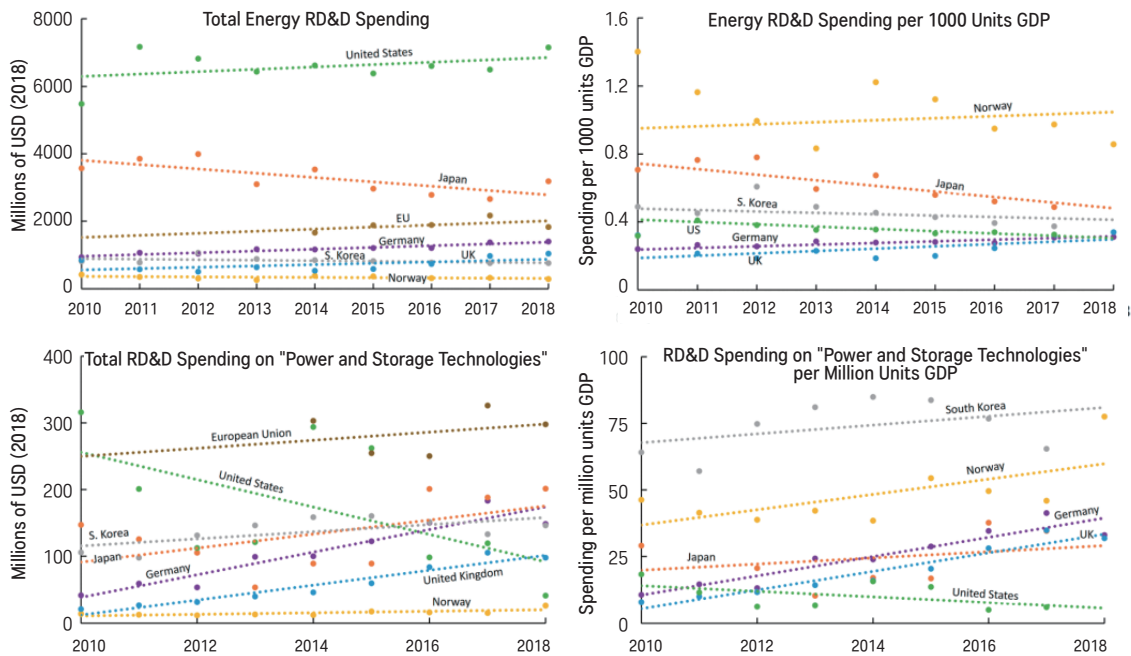
마. 미래 전력시스템 구축을 위한 연구개발

2019년 기준 미국의 에너지 관련 연구개발 및 실증사업(RD&D)을 위한 에너지부(Department of Energy, DOE)의 지출 총액은 64.6억 불이었다.¹²⁾ DOE 에너지 혁신 예산의 1/3은 기초 연구(핵융합 및

12) The future of electric power in the United States(2021), p.147

핵분열 연구), 2/3는 응용 연구에 투입되고 있다. 미국의 미래 전력시스템 구축을 위한 연구개발 동향을 살펴보면, 전력시스템에 영향을 주는 혁신에 대한 공공 및 민간 부문 투자의 기대효과가 큰 편이다. DOE의 지원을 받은 에너지 효율 및 오염 통제 관련 연구의 경우 초기 연구비의 3배에 해당하는 편익을 발생시켰다. 이와 같은 점에 고무되어 미국 정책당국은 방위고등연구계획국(DARPA)을 모방한 에너지 고등연구원(ARPA-E)을 2008년에 출범시켰다.

그림 8 주요국의 에너지 및 전력 부문 연구개발 지출 추이



자료: The Future of Electric Power in the United States(2021), pp.143-144.

미국의 지난 10년간 에너지 분야 연구개발비 지출 규모는 다른 나라에 비해 압도적으로 많은 편이다. 그리고 지속적으로 규모가 증가하고 있다는 점도 하락세를 보이는 일본과는 대조적이다. GDP 규모 대비 에너지 연구개발비 지출규모는 노르웨이가 선두를 달리고 있으며, 미국은 일본과 한국보다 뒤처지는 수준을 보인다. 한편 전력과 저장기술에 대한 연구개발비 지출 총액은 지난 10년간 지속적으로 하락세를 나타내고 있다. 유럽연합이 투자를 지속적으로 증가시켜온 것과는 많은 차이를 보인다. 우리나라의 관련 분야 연구개발이 일본과 유사한 수준인 점은 인상적이다. 이 부문에 대한 연구개발 규모를 GDP와 대비해서 살펴보면 우리나라가 단연 앞서고 있으며 노르웨이, 독일 다음으로 미국임을 [그림 8]에서 알 수 있다.

미국의 전력부문은 심층 탈탄소화와 가변적이고 간헐적인 재생에너지원의 대규모 통합, 전력망 운영자가 파악하지 못하는 소비자단(BTM) 자원의 모니터링 및 통합에 있어서 중요한 운영상의 도전 과제에 직면하고 있다. 전력망 현대화 및 심층 탈탄소화에 필요한 기술개발을 위한 전력분야 연구개발이 지속되어야 할 것이다. 정책당국은 전력수요의 시간적 유연성을 증대하고 가격 책정 및 기타 메커니즘을 통해 전력망 신뢰도 유지에 필수적인 서비스를 향상하기 위한 연구에 대해 지원하는 것이 필요하다.

그렇다면 미국의 적정 연구개발 지출 규모는 과연 얼마일까? 본 보고서는 앞으로 10년간 에너지 혁신에 대한 연구개발 지출의 규모를 세 배가량 확대할 것을 촉구하고 있다.¹³⁾ 전력과 관련이 있는 기초과학에 대한 지원이 두 배로 그리고 응용 개발 및 실증사업에 대한 지원은 세 배로 확대해야 한다는 것이다. 특히 심층 탈탄소화 및 자연재해, 인재, 사이버 위협에 대한 복원력 확보와 같은 새로운 도전과제에 직면한 전력시스템의 계획, 설계, 운영 및 통제를 지원하기 위한 연구가 앞으로 더욱 강화되어야 한다.

5. 정책적 시사점

기후변화 대응을 위해 탈탄소화와 전기화가 진행되면서 전력부문의 역할이 더욱 확대되고 있으며 이런 변화를 수용하는데 적합한 정책, 제도, 사업구조, 인프라 등을 갖춘 새로운 전력시스템이 요구되고 있다. 혁신적인 기술개발과 전력부문의 환경 변화를 고려하면서 본 보고서를 작성한 위원회는 미래 전력시스템으로 전환하는데 중요한 5대 과제를 제시하고 있다.¹⁴⁾

첫째, 미국의 전력시스템의 발전 방향에 대한 이해를 증진하는 것이 필요하다. 기술발전, 전력 소비패턴의 변화, 전력에 대한 사회적 기대 등으로 미래 예측이 점점 어려워지고 있다. 전력의 미래를 예측하는 도구는 다양한 환경의 변화를 반영할 수 있어야 하는데, 특히 전력공급의 탈탄소화와 온실가스 배출량 감축이 중요하게 다루어져야 한다. 둘째, 깨끗하고 지속가능하며, 신뢰성과 복원력을 갖춘 전력서비스의 지속적인 제공이 요구된다. 재생에너지의 보급 확대에 따라 송전네트워크의 확충이 필요하다. 그리고 전력시스템에 대한 자연재해, 사이버 공격의 대응 방안도 마련되어야 할 것이다. 셋째, 중대한 기술변화의 국면에서 소비자의 전력소비 패턴에 대한 이해를 높이고 공정한 전기 서비스 제공을 위한 사회계약을 유지하는 것도 중요하다. 기존의 중앙집중식 전기 공급시스템에 의존하지 않는 소비자의 등장으로 이에 대한 적절한 대응도 필요하다. 프로슈머(prosumer)의 등장, 마이크로 그리드의 운영 등으로 분산형 전력시스템이 점차 확대되고 있는데 이에 대한 기존 전력계통의 통합 및 관리 방안이 마련되어야 할 것이다. 아울러 취약계층 및 저소득층에 대한 유틸리티의 전기 공급의 의무를 지속할 수 있도록 대책을 마련해야 한다. 넷째, 전력계통과 관련된 기술, 정책, 비즈니스 모델의 혁신을 촉진해야 한다. 청정 발전, 광역 전력화, 에너지 저장, 전기전자 장치, 감독 및 통제를 위한 시스템 등과 같은 다양한 신기술의 등장으로 전력부문의 혁신이 계속 이어질 것이다. 이러한 혁신적인 기술의 변화를 수용할 수 있는 정책, 제도, 그리고 비즈니스 모델을 갖춰야 한다. 다섯째, 글로벌 공급망의 변화와 혁신적 기술의 도입에 부응하는 기술혁신을 촉진해야 한다. 미래 전력시스템의 성능 향상에 필요한 혁신을 위한 투자 확대와 민간의 적극적인 참여가 필요하다.

이제까지 서술한 미국 전력시스템의 변화에 대응하는 방안 마련과 이행을 통해 국내 전력부문이 얻게 되는 시사점은 다음과 같다.

첫째, 경쟁 촉진을 위한 전력도매시장의 개편이 필요하다. 이미 이 방향으로 정책당국과 관련 업무를 담

13) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), p.160.

14) Committee on The Future of Electric Power in the U.S.(2021), pp.269-270.

당하고 있는 전력거래소를 중심으로 작업이 진행 중이다. 특히 2025년 실시간 시장 도입을 위한 준비 단계로 실계통기반 하루전시장을 2022년 9월1일부터 개설하여 운영 중이다. 2001년 전력산업 구조개편이 시작된 이래로 획기적인 시장 개편의 첫걸음을 시작하였으므로 예정된 로드맵에 따라 실시간 시장 도입까지 차질없이 진행되기를 기대한다.

둘째, 전력 부문의 규제 완화로 전력산업에 민간의 참여를 확대하는 것이 중요하다. 에너지산업의 확산을 위해 진입규제를 완화하여 민간의 시장 참여를 적극적으로 유인하는 것이 중요하다. 발전 부문과 판매 부문의 겸업은 경쟁을 크게 제한하지 않는 범위에서 허용하는 것이 필요하다. 연료비 연동제를 비롯한 원가주의의 집행 강화와 부문별 회계분리 및 정보 공개 등 요금 규제의 합리화가 뒤따라야 한다. 국내 전력 부문에서는 요금 규제에 대한 개편이 가장 미진한 점이라고 할 수 있다. 그리고 전력시스템의 분산화 및 디지털화에 대응하기 위해 스마트 전력량계 보급 확대 및 주택용 요금제 개편도 요구된다.

셋째, 전력산업을 규제하는 소관 규제기관의 전문성 및 독립성 확보이다. 전기위원회가 전력부문 규제기관으로서 제구실을 할 수 있도록 전문성과 독립성을 갖추도록 해야 한다. 요금을 규제하는 기획재정부, 사업자의 진입을 규제하는 산업통상자원부의 규제기능 조정 및 정책부서와의 역할 정립이 시급하다.

넷째, 미래 전력시스템의 안전과 사이버 안보에 대한 대응책 마련이 필요하다. 자연재해 및 외부 불순세력의 침입 등에 대해 전력시스템의 물리적 안정성 보장과 사이버 테러에 대한 대응책 마련이 요구된다. 기후변화로 인한 자연재해의 크기가 점점 커지고 있음은 주지의 사실이며, 이러한 재해를 극복하기 위해서 전력시스템의 복원력을 증대시켜야 할 것이다.

마지막으로 전력 관련 연구개발의 지속적인 확대가 필요하다. 우리나라가 해당 연구개발의 총지출 규모를 미국과 대등하게 유지하기는 힘들다. 따라서 선택과 집중 전략으로 미래 전력시스템에서 꼭 필요한 기술을 개발하고 상용화하기 위한 연구개발을 확대하는 것이 요구된다. 이제까지 배터리 부문에 대한 투자를 집중적으로 시행하여 세계적인 수준의 성과와 사업실적을 거둔 사례와 같이 이를 위한 공공 주도의 전략적인 접근이 필요하다.

참고문헌

국내 문헌

- 빌 게이츠, 「빌 게이츠, 기후재앙을 피하는 법」, 김영사, 2021
- 정태용 외, 「기후위기 시대, 12가지 쟁점」, 박영스토리, 2021
- Fereidoon Sioshansi 외, 에너지전환 전력산업의 미래, 이모션미디어, 2018

외국 문헌

- Committee on The Future of Electric Power in the U.S., "The Future of Electric Power in the United States," A Consensus Study Report of The National Academies of SCIENCES-ENGINEERING-MEDICINE, The National Academies Press, Washington, DC, 2021