

# 제주도의 재생에너지 확대와 전력계통의 안정적 운영 방향

이태의 에너지경제연구원 연구위원(lte@keei.re.kr)

이유수 에너지경제연구원 선임연구위원(yslee@keei.re.kr)



## 1. 서론

에너지전환 정책을 추진하고있는 현 정부는 최근 그린뉴딜 정책을 발표하여 재생에너지 발전과 에너지 효율 분야의 투자확대를 통해 녹색산업의 활성화에 주력함으로써 온실가스 감축이행과 일자리 창출에 박차를 가하고 있다. 이는 기후변화대응의 이행과정에서 코로나19에 따른 경제침체 위기극복도 동시에 추진하고자 하는 의지가 반영된 것으로 그린뉴딜에서 탈출구를 찾기 위한 것이다. 정부는 기후변화 대응에 따른 온실가스 감축의 가장 핵심적인 수단인 태양광 및 풍력 등 변동성 재생에너지의 확대를 경제성장과 연계하여 성장 동력으로서의 활용가치를 극대화하는 방향으로 투자확대 계획을 주도하고 있다.

현재에도 태양광 및 풍력의 발전단가는 하락하고 있으며, 향후에도 지속적인 하락으로 인해 전력시장에서 경쟁우위를 달성할 것으로 기대되고 있으므로 그린뉴딜을 통한 재생에너지의 발전설비 확대는 더욱 활성화될 것으로 전망되고 있다. 그런데, 전력계통 측면에서는 변동성 재생에너지가 자연조건에 의존하여 발전하는 경직성 전원으로 출력조정이 어렵고, 주파수 및 전압을 일정 범위 내에서 안정적으로 유지하는 데에도 애로가 있다. 따라서 변동성 재생에너지를 확대하기 위해서는 빠른 시간 내 운전 중인 발전기의 출력증

감발이나 대체자원의 확보가 가능하도록 전력계통의 유연성을 확보하는 것이 가장 중요한 사안일 것이다. 그렇지 않으면, 태양광 및 풍력 발전의 설비가 확대될수록 출력변동성이 높아져 전력공급 대응력 부족 또는 전력공급 과잉으로 인한 수급불균형이 발생하고 주파수 및 전압의 변동성이 확대되어 전력계통의 불안한 상황과 정전이 발생할 수 있기 때문이다.

우리나라 제주도 지역에서는 태양광 및 풍력 발전설비의 증가로 인해 이미 전력수요에 비해 공급이 많아지는 사례가 자주 발생하고 있으며, 이에 따라 풍력발전의 출력제한 횟수가 증가하고 있는 상황이다. 전력계통이 유연하다면, 변동성 재생에너지 발전설비가 증가하더라도 이에 비례하여 출력제한이 증가하지는 않을 것이다. 기존 발전설비의 출력감발을 통한 최소출력 유지와 대체자원의 확보, 그리고 잉여전력 활용을 위한 수요이전 또는 신규 수요개발, 전력저장장치의 확대 등 다양한 방안을 마련하여 계통의 안정성을 확보하는 것이 향후 태양광 및 풍력 발전설비의 확대에 기여할 것으로 보인다.

제주도의 경우 우리나라 육지계통과 다르게 고압직류송전선(HVDC)을 통해 육지계통으로부터 부족한 전력을 공급받고 있기 때문에 고립계통을 유지하고 있는 육지계통과는 근본적으로 차이가 있다. 그리고 육지에 비해서 전원구성이 다양하지 않으며, 변동성 재생에너지의 발전비중이 약 14%로 이미 전력계통에 영향을 미칠 수 있는 수준이다. 제주도의 전력계통은 HVDC와 변동성 재생에너지의 영향력이 크기 때문에 재생에너지의 확대가 풍력발전의 출력제한 횟수 증가로 이어지고 있다. 또한, 자연재해에 따른 송배전선로 고장 및 변동성 재생에너지 발전설비의 탈락 등으로 인한 주파수 및 전압의 변동성 문제를 어떻게 해결할 것인가 초미의 관심사가 되고 있다. 결국 제주도 전력계통의 안정적 운영 방향은 향후 태양광 및 풍력 발전설비의 확대에 의한 육지계통의 운영에도 긍정적으로 작용할 수 있는 시사점을 제공할 수 있을 것으로 보인다. 따라서 본고에서는 변동성 재생에너지가 증가하고 있는 제주도를 중심으로 전력수급 현황을 살펴보고, 전력계통의 특징과 재생에너지의 영향을 검토하는 한편, 전력도매시장의 운영과 제주도 CFI(Carbon Free Island) 2030 계획을 분석함으로써 제주도에 전력계통의 안정적 운영방향에 대한 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

## 2. 제주도의 전력수급 현황

### 가. 발전설비와 발전량

제주도는 육지에 비해 매우 작은 발전 규모를 갖고 있지만, 전력계통에서 필요한 기본요소인 발전, 송·배전, 판매 등을 모두 갖추고 있어 완전한 하나의 전력계통의 모습을 하고 있다. 2010년 700MW을 조금 넘었던 제주도의 전력설비는 2020년 8월까지 2배 이상 증가하여 1.46GW<sup>1)</sup>의 전력시장 참여 설비용량을 보유하고 있다.<sup>2)</sup> 제주도 경제는 관광산업을 중심으로 성장하면서 높은 GDP성장률<sup>3)</sup>을 보이는 도시로 전력소비의

1) 이는 육지와와의 연계선을 제외한 전력시장 참여 설비용량 기준이며, PPA등 전력거래소와 거래하지 않은 발전설비의 규모는 포함되어 있지 않아 실제 발전설비 규모는 이보다 다소 높다.

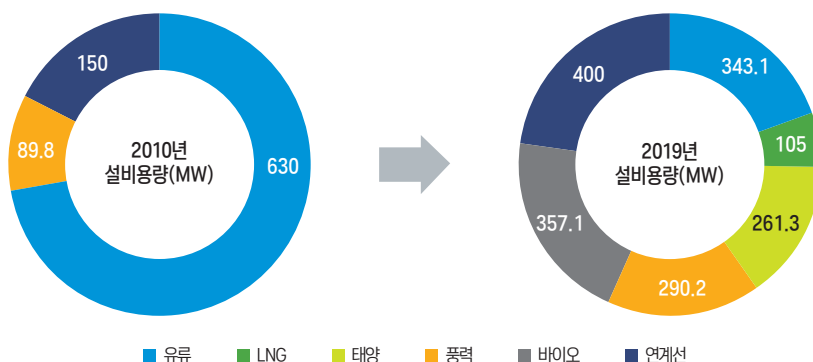
2) 제주도의 전력설비는 우리나라 전체 발전설비 규모인 122.7GW의 약 1.2%를 차지한다.

3) 2011년 이후 매년 전국 3위 이내의 높은 성장률을 보였으나, 2017년의 사드 여파 이후 중국의 관광수요 감소로 상대적으로 낮은 성장률을 보이고 있다.

증가와 함께 전력설비가 확충되어 왔다.

제주도는 전통적으로 유류를 주된 발전원료로 사용해 왔다. 그동안 제주도 온실가스 배출량의 대부분은 유류발전이 차지한다고 해도 무방하다. 제주도는 섬 지역의 한계로 인해 높은 의존도를 보이던 유류발전에서 벗어나 재생에너지의 보급을 통해 온실가스가 없는 섬의 모습을 추구하고 있다. 재생에너지 설비 중 가장 먼저 도입이 활성화 된 것은 풍력이었다. 1997년 제주행원풍력발전단지가 처음 만들어진 이후부터 재생에너지 설비는 지속적으로 증가해왔다. [그림 1]에서 볼 수 있듯이, 2019년 재생에너지 발전설비의 비중은 2010년 대비 약 3배 증가(10.4% → 31.4%)하였다. 동일한 기간 동안 제주지역의 전체 발전설비 규모도 2배 이상 증가하였기 때문에 재생에너지 발전설비는 2010년 대비 6.2배 증가(89.8MW → 552.5MW)한 것이 된다.

그림 1 제주도 전력설비용량 변화



자료 : EPSIS 전력통계정보시스템, 시장참여설비용량 기준, 저자 재구성

재생에너지의 비중과 설비용량의 규모는 매우 높지만, 재생에너지는 그 이용률이 전통적인 발전기에 비해 높지 않기 때문에 설비용량에 비해서 실제 발전량의 비중은 다소 낮게 나타난다. [그림 2]에서 볼 수 있듯이, 2010년 대비 2019년 재생에너지 발전량은 4.7배 증가(176GWh → 822GWh)하였으며, 전체발전량 기준 대비 발전비중으로 살펴보면 재생에너지의 비중은 4.5%에서 14.4%로 증가하였다.

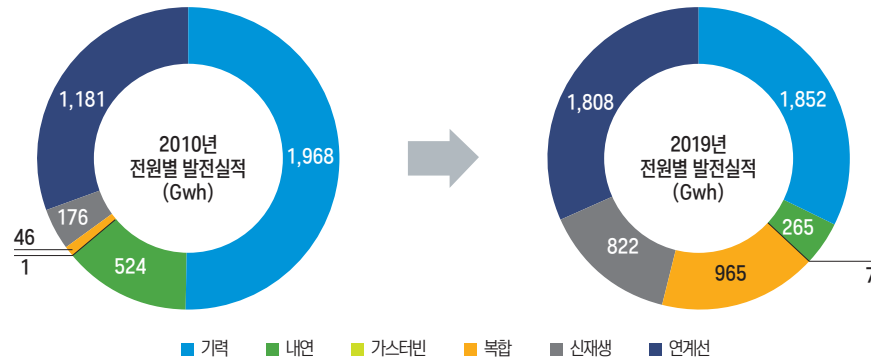
표 1 제주도의 태양광 및 풍력 발전설비 용량과 발전량

년도/구분	발전설비 용량(kW)		발전량(MWh)	
	태양광	풍력	태양광	풍력
2015	86,040	221,260	72,802	344,678
2016	102,525	271,510	89,466	463,613
2017	120,578	273,510	141,150	535,384
2018	168,329	267,060	170,671	533,618
2019	261,300	290,190	268,483	546,846

자료 : EPSIS 전력통계정보시스템, 연료원별 발전설비 및 전력거래량, 저자 재구성



그림 2 제주도 전원별 발전실적 변화



자료 : 김세호, 재생에너지 증가에 따른 전력안보 확보 방향 세미나(2020) 발표자료

제주도의 재생에너지 비율은 매우 높은 수준으로 IEA에서 제시하는 재생에너지보급 6단계 중 제 3단계에 해당한다. IEA는 재생에너지 비율에 따라 단계를 구분하여 국가별 대응수단에 대한 제안을 하고 있는데, 우리나라는 IEA에서 분류하는 재생에너지보급단계에서 1단계 수준이지만, 제주도는 3단계<sup>4)</sup>(2019년 약 14%)에 해당한다. 2019년 우리나라 전체의 발전량은 552,8TWh를 기록하였다. 제주도는 전체 발전량의 약 1% 수준인 5.7TWh의 발전량을 보였는데, 국내 전체 태양광·풍력 발전량의 약 12.5%<sup>5)</sup>를 제주도에에서 생산하고 있다.

#### 나. 전력수요와 산업분류

제주도의 전력소비 규모가 육지의 1% 수준이라고는 하지만 제주지역의 전력 수요는 육지와는 매우 다른 소비 구조를 갖고 있기 때문에, 이를 우리나라 전체의 전력수요를 1/100로 축소하여 설명할 수는 없다. 우리나라는 전체 전력소비의 55% 이상을 산업용이 차지하고 있지만, 제주도는 육지와 달리 제조업의 비중이 크지 않음을 [그림 3]의 왼쪽 그림을 통해서 확인할 수 있다. 제주도의 산업용 전력사용량은 11% 수준이고, 일반용과 주택용이 절반 이상의 전력사용량을 차지하여 가장 높은 비중을 보였다.<sup>6)</sup> [그림 3]의 오른쪽 그림은 주택용을 제외한 산업분류별 전력소비 분포를 보인다.

육지의 경우 산업분류별 전력소비에서 제조업의 비중이 60%가량을 차지하지만 제주도에서는 6% 수준에 그친다. 제주도에서 가장 큰 전력수요를 보이는 산업은 농림 수산업으로 제주도의 산업 및 일반용 전력소비<sup>7)</sup>의 약 34%를 차지한다. 또한 제주도의 주요 산업 중 하나로 볼 수 있는 관광산업을 기반으로 하는 숙박, 음식, 임대업은 전체의 28.5%를 차지한다.

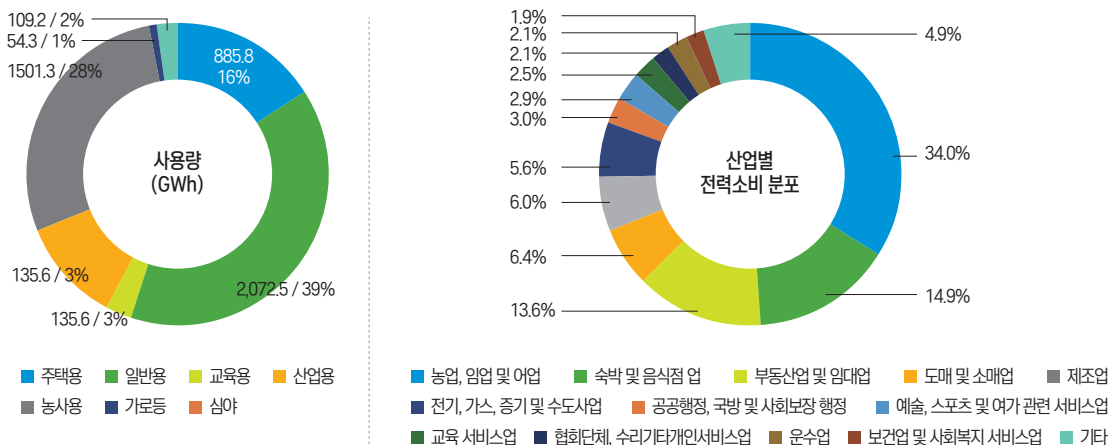
4) 이탈리아, 스페인과 일본 규수 지역 등이 3단계에 도달해 있다.

5) 2019년 전력시장거래량 기준 태양광·풍력거래량(PPA 제외): 전국 6.5TWh, 제주 0.8TWh

6) 2019년 기준

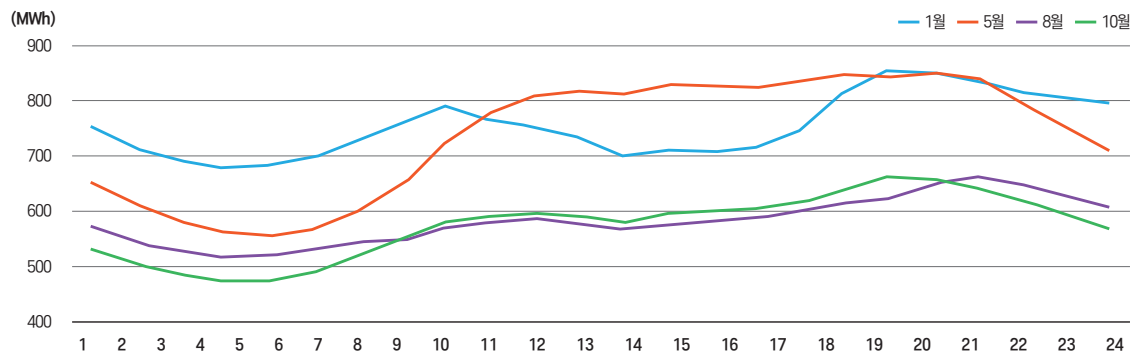
7) 전체 전력소비에서 주택용을 제외한 소비량 기준

그림 3 제주도 용도별 전력사용(좌) 및 산업분류별 전력사용 분포(우)



자료 : 전력데이터 개발 포털시스템, 2019년 전력사용 기준, 저자 재구성

그림 4 2019년 제주도 월별 평균 전력수요 패턴



자료 : 전력거래소 제공 자료, 저자 재구성

제주지역의 수요패턴은 여름철에는 냉방부하 등으로 인해 높은 전력수요가 14~21시까지 지속되며 낮은 저녁에 피크가 발생하고, 겨울철에는 난방, 전등 부하 등으로 인해 19~21시에 피크가 나타난다. 높은 태양광 비중으로 낮 시간에 발전량이 증가하는 반면에 낮 시간의 전력수요는 평균보다 낮거나(겨울철) 크게 증가하지 않는 모습을 보여 전력의 공급에서 큰 비중을 차지하는 재생에너지의 발전과 수요의 패턴이 일치하지 않는 특성을 보인다. 2019년을 기준으로 보면 겨울철에만 덤커브<sup>8)</sup> 현상이 발생하는 것으로 나타나지만, 이러한 덤커브 현상은 봄, 가을로 확대되는 추이다.

8) “태양광 발전량이 증가하면서 낮 시간의 전력수요가 낮아지고, 해가 지는 시간부터 전력수요가 급증하는 수요패턴이 나타나는데, 이러한 수요패턴의 모양이 오리나 비슷하여 하여 붙여진 이름이다.” 이태의(2019). p.2

### 3. 제주도 전력계통의 특성과 재생에너지 영향

#### 가. 전력계통의 특성

전국계통과 분리 운영되는 소규모 독립계통인 제주도를 육지와 연계하기 위해 제주-육지 간 고압직류송전 선로(HVDC)가 설치<sup>9)</sup>되어 있다. 2019년 우리나라의 계통 평균전력은 63.1GW, 피크전력은 90.3GW인데 비해, 제주도는 2019년 기준 평균전력 0.65GW, 피크전력 0.96GW로 운영되는 소규모 계통이다. 제주도는 계통에서 필요한 전력의 상당부분을 육지를 통해 공급받고 있는데, 현재 2개 HVDC 라인 400MW규모로 운영되고 있다. 2019년 기준으로 #1 HVDC 150MW, #2 HVDC 250MW로 운영되어 제주지역 전체 사용량의 약 30% 이상을 담당하고 있다. 이 두 라인의 해저송전선은 제주도 전력사용량의 약 40%를 담당하고 있는 제주화력발전소(482MW) 다음으로 큰 용량을 가진 설비이다. HVDC는 제주도 전체 발전량의 큰 비중을 차지하면서 육지의 SMP를 적용받기 때문에 경제성을 지녔다. 또한, 수급조절이 용이하여 제주지역 간헐성 백업에 활용성이 높은 수단이다. 단, 현재 설치된 #1, #2 연계선은 역송이 가능하기는 하지만 상업용으로 운영하기에는 제약이 있는 전류형 HVDC기술<sup>10)</sup>이 적용되어 있다. 정부는 제 7차 전력수급기본계획에서 전력 수급 변동성을 보완하겠다는 계획을 갖고 양방향 송수전이 가능한 #3 HVDC<sup>11)</sup>를 제주와 전남 완도 사이에 도입하여 2020년 6월까지 준공하려 하였으나 완도군 주민의 반발에 부딪혀 난항을 겪어왔다. 2020년 6월 28일이 되어서야 변전소 유치에 대한 주민동의를 얻어 입찰을 진행하고 있다.

제주도 전력계통의 또 다른 특징은 계통의 규모 대비 발전설비 단위용량이 크기 때문에 사고에 취약하다는 것이다. 발전설비의 단위용량이 크더라도 일정 부분의 출력조정이 가능하기 때문에 다수의 발전설비가 존재하면 수요에 대해서 연속적인 선형으로 공급이 가능하다. 그러나 큰 단위용량에 비해 설비의 수가 적다면 계통에서 계단형으로 공급이 가능하게 된다. 따라서 HVDC 혹은 발전기에 고장이 발생할 경우, 정전의 가능성이 높다. 특히 용통전력양이 많거나, 수요변화가 급한 상황에서 HVDC의 고장이 발생할 경우 수급조절 능력은 현저하게 떨어진다.

제주도의 발전설비는 높은 비용의 바이오 중유와 유류를 주 연료로 사용하고 있다. 제주도 전력의 대부분을 공급하는 것은 3개의 발전소로 제주시 삼양동에 위치한 제주화력발전소(513.6MW)와 서귀포시 안덕면에 위치한 남제주화력발전소(200MW), 제주시 한림읍에 위치한 한림복합화력발전소(105MW)이다. 현재 유류발전으로 등록이 되어 있는 설비들은 제주화력이 보유하고 있는 80MW의 내연<sup>12)</sup> 2기를 제외하면 바이오중유를 활용한 350MW규모의 기력발전<sup>13)</sup> 형태로 운영하고 있다. 그동안 LNG공급 지장으로 경유를 사용하던 LNG복합발전의 경우 2019년 말LNG공급을 시작으로 2020년부터는 LNG로 전환되었다. 2019

9) 1998년도 제주-해남 사이 101km구간 연결된 HVDC 연계설비는 150MW 2개 회선을 통해 300MW급 정격(150MW 수전)으로, 2013년 운전을 시작한 제주-진도 간 HVDC는 200MW급 2회선을 113km 구간에 설치하여 400MW 정격(250MW 수전, 200MW 역송)으로 ALSTOM에서 시공하였다. 현재는 ALSTOM사를 인수한 GE와 한전이 공동으로 설립한 KAPES사가 사업 수행을 담당하고 있다.

10) 2019년 노후화 된 #1 HVDC를 최신설비로 개선하여 현재 두 연계선 모두 역송으로 전환하는 것이 기술적으로는 가능하지만, 전환시간 및 최소 정지시간이 길어 활용에는 제약이 있다.

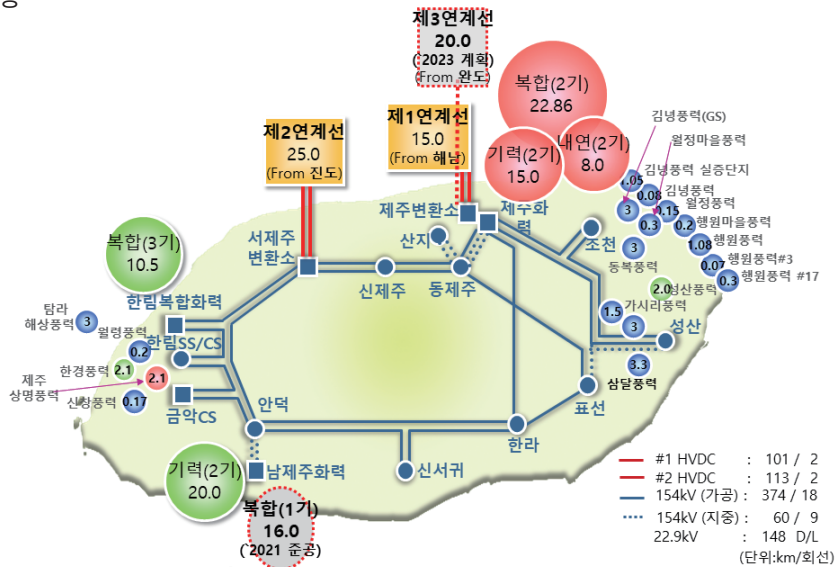
11) 제주#1, 제주#2가 전류형 HVDC이며, 제주#3은 육지-제주 간 양방향 송수전이 가능한 전압형 HVDC다.

12) 자동차의 엔진과 같이 연소되는 힘으로 직접 피스톤을 움직여 동력을 발생시키는 기관

13) 연료를 연소시켜 보일러의 물을 끓여 발생하는 증기의 힘으로 터빈을 돌리는 발전기

년 12월 한림복합화력의 LNG 복합 3기 105MW가 LNG를 발전연료로 시장에 참여한 이후 2020년부터는 제주화력의 LNG복합이 LNG로 전환하여 현재 333.6MW규모의 LNG 복합으로 운영 중이다. 이외에도 남부발전에서 남제주복합화력 발전소 160MW규모는 2019년 1월에 착공하여 2020년 12월까지 시공을 완료하는 것을 목표로 하고 있어, 2021년부터는 제주도의 연료에 따른 발전설비 규모에서 가장 큰 부분을 차지하는 것은 LNG가 될 전망이다.

그림 5 제주도 전력계통



단위: 만kW

자료 : 전력거래소, 발전설비 용량변경; 김세호, 재생에너지 증가에 따른 전력안보 확보 방향 세미나(2020) 발표자료, 활용 저자 재구성

## 나. 재생에너지의 영향

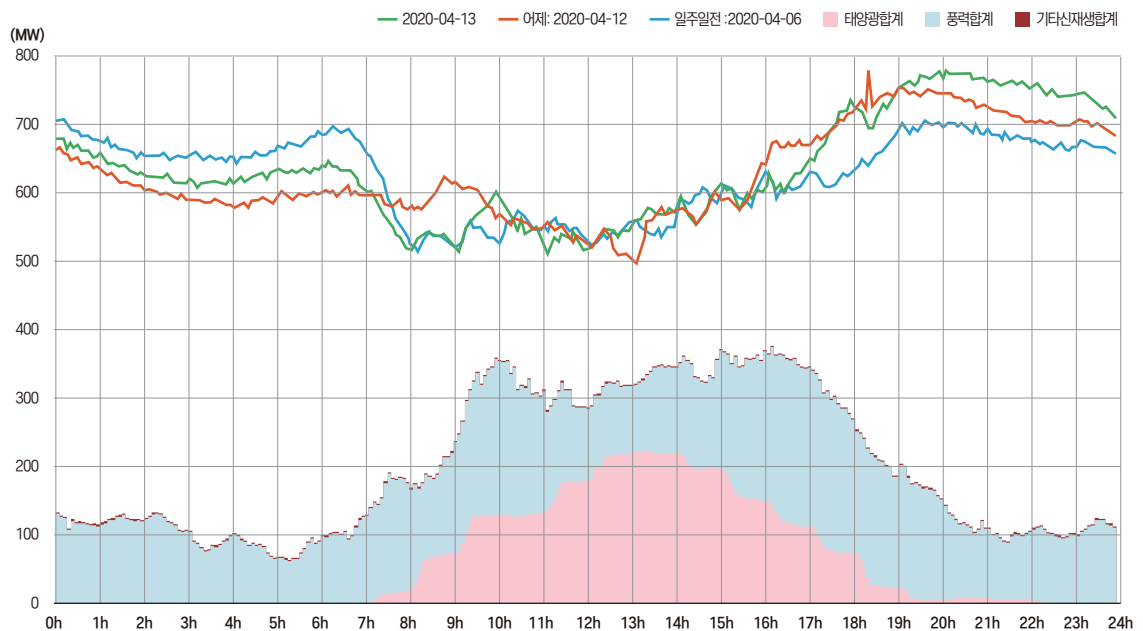
제주도는 신재생 전력계통 연계비중이 육지에 비해 상대적으로 높은 상황이지만, 앞으로 지속 확산될 예정이다. 현재 풍력 29만kW, 태양광 26만kW의 재생에너지 설비가 보급된 제주도는 신재생 보급정책을 더욱 적극적으로 추진(제주CFI 2030)하며 2030년까지 탄소배출이 없는 청정제주 구현을 목표로 하고 있다. 이러한 정책의 일환으로 앞으로 태양광을 1GW이상 추가로 설치할 계획임으로 계통에서 급전불가능 발전기와 변동성도 크게 증가할 것으로 예상된다. 이렇듯 재생에너지의 발전량은 지속적으로 증가하고 있지만, 향후 계통부하에 나타나는 변화는 크지 않을 것으로 보인다. 큰 변화가 없을 것으로 예상된다. 제주도 계통운전을 위한 HVDC수전량과 필수발전기 최소 발전량인 211MW<sup>14)</sup>를 고려할 때, 제주도는 재생에너지의 발전량이 수요에 일정 수준까지 가까워지면 출력제한이 발생할 수밖에 없다.

14) 제주연구원(2018), p.170



[그림 6]은 2020년 4월 13일 제주도의 전력수급 현황을 보여주는데, 시간대에 따라서는 이미 신재생출력 비중이 전체 수요의 60%를 초과하는 경우가 발생하여 수요와 재생에너지의 차이가 210MW대로 낮아지기도 했다. 이처럼 계통부하와 재생에너지 발전량의 차이가 좁아지고 있어 불가피하게 재생에너지에 대한 출력제한 등의 조치가 빈번하게 나타날 것으로 전망된다.

**그림 6** 제주도 전력수급 및 재생에너지 발전 현황(2020.4.13)



자료 : 그리드위즈 웹사이트, 실시간 전력시장 현황, 2020.4.13.일자

그렇다고 지금까지 출력제한이 발생하지 않았던 것은 아니다. 제주도에서는 이미 2015년부터 출력제한이 발생하고 있다. 풍력발전이 운전한계량을 초과하는 사례는 지속적으로 증가하고 있으며, 봄, 가을의 경부하 기간을 중심으로 계통운영의 어려움이 가중되고 있다. 제주도의 풍력발전 출력제어 횟수는 2019년에 46회를 기록하였다. 2017년에 연간 1TWh 이상 출력을 제한하였는데, 2020년에는 전반기에 이미 10TWh 이상의 출력제한이 발생하였고, 8월 기준으로는 13TWh를 넘어섰다. 물론 코로나19로 인해 제주도의 수요가 감소한 것이 큰 원인이지는 않지만, 재생에너지의 공급이 증가하고 있는 이상, 향후 출력제한이 감소할 여지가 보이지는 않는다.

또한 제주도의 기상은 지역적인 특성으로 인해 잦은 태풍 및 돌풍 등 극한의 기상현상이 나타날 확률이 높다. 따라서 기상에 의존하는 신재생 발전에 급격한 출력 변동 가능성과 사고발생의 위험성이 상존한다. 따라서 이에 대한 영향을 충분히 고려하기 위해 제주도에 특화된 정교한 신재생발전 예측시스템의 개발이 필요하다.



표 2 연도별 제주 풍력발전 출력제어 발생 추이

구분	2015	2016	2017	2018	2019	2020.8
출력제어 횟수(회)	3	6	14	15	46	45
제어량(MWh)	152	252	1,300	1,366	9,223	13,166
풍력 전체 발전량(MWh)	352,183	470,576	542,525	540,073	556,999	391,309
출력제어 비중(%)	0.04	0.05	0.24	0.25	1.66	3.36

주: 2020년은 1월~8월의 수치임.

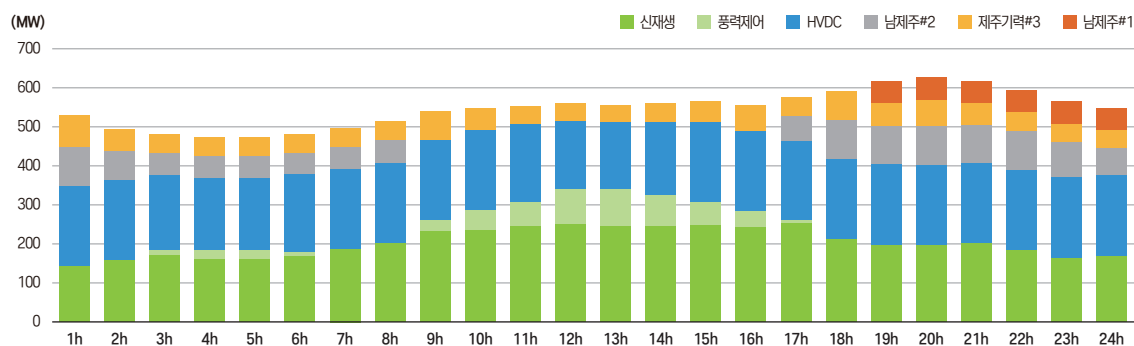
자료: 일렉트릭파워, 2020.10.15일자, 김성한 의원실 자료 재인용

## 4. 제주도의 도매시장 운영과 CFI 2030 계획

### 가. 제주도의 SMP 및 발전비용

제주도 도매전력시장에서 결정되는 계통한계가격(SMP)은 연료비를 기반으로 변동비가 없는 신재생에너지 설비가 우선적으로 발전하고, 다음으로 HVDC가 공급을 담당하는 한편, 중유 활용의 기력발전과 LNG 복합발전이 부족한 공급을 담당하는 방식으로 결정된다. 도매전력시장의 가격결정 운영방식에서는 연료비가 낮은 발전원부터 우선 발전하고 단계적으로 연료비가 높은 발전원을 활용하여 하루 전에 예측된 수요를 충족하도록 하고 있기 때문에 계통운동을 위한 제약사항이 반영되지 않는다. 그러나 실제 운영발전 계획에서는 송전제약, 열제약 등의 제약사항이 반영되기 때문에 발전설비 가동의 우선순위가 달라진다. 제주도 전력계통의 안정적인 전력공급을 위해서는 HVDC를 기본적으로 공급하고, 다음으로 급전 발전기의 정지시간과 가동시간을 고려하여 일부 기력 발전기를 필수가동(Must-Run) 발전기로 운전함으로써<sup>15)</sup> 가격결정 방식과의 발전설비 가동순서에 차이를 보이고 있다.

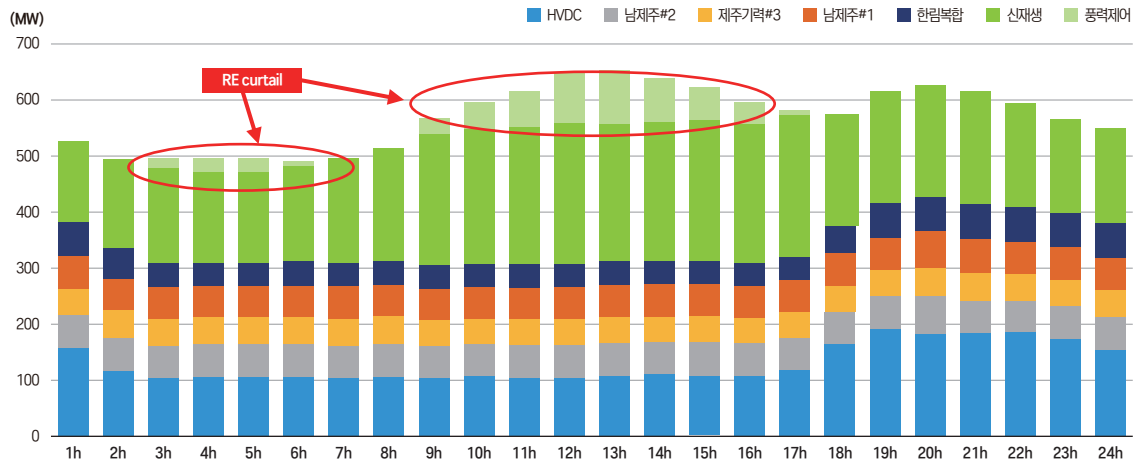
그림 7 제주도 SMP 결정 구조(비제약 시장낙찰)



자료: 옥기열, '1단계 국내 전력시장 개편 방향', 제16회 서울국제전력시장 컨퍼런스 발표, p. 4.

15) 이러한 화력발전기의 필수가동으로 인해 전력계통에서 재생에너지의 수용성이 감소하기 때문에 재생에너지의 출력제한이 발생하고 있는데, 특히 전력수요가 낮은 경우에는 빈번하게 출력제한이 이루어지고 있다.

그림 8 제주도 실계통 운영계획



자료 : 옥기열, '1단계 국내 전력시장 개편 방향', 제16회 서울국제전력시장 컨퍼런스 발표, p. 4.

재생에너지의 출력제한이 발생하는 시간대에는 초과 전력공급으로 인해 계통한계가격이 0 또는 마이너스 (-) 가격이 될 수 있지만 현재 하루 전 시장만을 운영하고 있는 전력 도매시장구조 하에서는 실시간으로 제약 상황이 고려된 계통한계가격이 제공되지 않고 있다. 따라서 재생에너지의 출력제한으로 발생하는 사업자의 손실에 대해서는 일종의 기회비용에 대한 보상이 이루어질 필요가 있다. 계통망의 제약으로 인해 발생하는 강제적인 출력제한의 경우에는 보상이 필요할 수 있지만, 공급과잉으로 인한 출력제한의 경우는 시장의 실시간 가격시스템이 작동한다면, 시장가격에 따라 사업자 스스로 전력생산을 중단하는 선택을 할 수 있어야 하기 때문에 출력제한에 대한 보상이 공존할 수 없다. 아직 우리나라 전력계통 운영에서는 실시간 전력수급을 가격에 반영할 수 있는 시스템이 갖추어져 있지 않다. 신재생에너지의 발전량에 대해서는 전력 도매가격인 SMP에 추가적으로 REC가격을 고려하여 구입하고 있다. 따라서 초과공급으로 인한 사업자의 비자발적인 풍력발전의 출력제한에 대해서는 보상이 필요한 상황이다. 제주도의 계통한계가격을 살펴보면, 신재생에너지 설비를 제외하고, HVDC와 연료비가 높은 유류 중심의 기력발전과 LNG 복합발전으로 설비가 구성되어 있기 때문에 제주도의 평균 계통한계가격(SMP)은 대체로 육지보다 높게 형성되어 있다.

표 3 육지와 제주도의 연간 SMP 비교

(단위: 원/kWh)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
통합 SMP	152.10	142.26	101.76	77.06	81.77	95.16	90.74
육지 SMP	151.56	141.78	101.54	76.91	81.39	94.64	90.09
제주 SMP	213.86	195.87	125.83	91.77	119.72	146.69	152.78

자료: 전력거래소, 2019년도 전력시장 통계, 2020.5.

표 4 제주도 발전원별 전력거래금액과 정산단가(2019)

(단위: 백만 원)

	2016	2017	2018	2019	2019년 정산단가(원/kWh)
유류	332,632	394,994	517,680	426,516	250.1 (231.2)
LNG	-	-	-	8,150	233.0 (118.7)
태양광	8,017	16,504	24,556	38,766	144.4 (93.8)
풍력	43,073	63,535	77,554	82,014	150.0 (103.5)
수력	150	254	278	388	151.9 (103.9)
해양	-	-	-	0.04	154.5 (88.7)
바이오	2,346	3,392	3,033	232,580	199.4 (119.8)
폐기물	0.22	2.09	2.22	2.02	146.6 (94.6)
합계	386,218	478,681	623,750	789,493	211.7 (89.4)

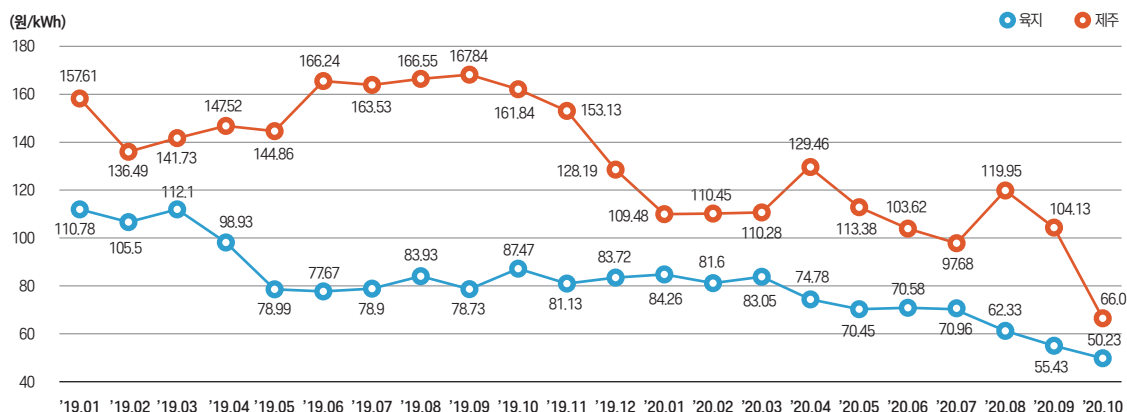
주: 1) 전력거래금액은 전력거래소를 통한 금액으로 한전 PPA, BTM 자원은 포함되지 않음.

2) 2019년 정산단가에서 ( )안의 수치는 전국의 전력정산단가임.

자료: EPSIS 전력통계정보시스템, 전력시장 정산단가-연료원별

2019년 전력거래소가 제주도의 발전원으로부터 구매한 전력구입단가를 살펴보면, 211.7원/kWh로 전국의 전력정산단가인 89.4원/kWh에 비해서 2배 이상으로 높게 나타나고 있다. 이와 같이 제주도의 평균 정산단가가 높은 이유는 연료비 단가의 차이에 기인하고 있다. 육지의 경우 LNG 발전의 연료비가 높아서 SMP를 구성하는 발전연료 중 상위단계에 위치하고 있으며, SMP를 결정하는 횟수가 많다. 제주도에서는 육지보다 연료비가 비싼 유류 발전이 SMP를 결정하는 경우가 많으며, 정산단가도 높게 나타나고 있다. 그러나 제주도는 2019년 12월부터 육지에 비해서 공급가격이 높지만 유류에 비해서는 낮은 가격으로 LNG가 공급되어 이전에 비해서는 SMP가 낮아지고 있다.

그림 9 육지와 제주도의 월별 평균 SMP 비교(2019.1~2020.10)



자료 : EPSIS 전력통계정보시스템, 전력시장 계통한계가격

금년에는 코로나19로 인해 전력수요가 낮아지는 상황에서 육지와 제주도의 SMP 격차가 줄어드는 현상이 나타나고 있다. 제주도에서는 낮아진 전력수요에도 불구하고 재생에너지 발전량이 증가하여 HVDC를 기준으로 SMP가 형성되기 때문에 kWh당 50원대로 나타나는 경우도 발생하는 데에 기인하고 있다. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 하루 전일 SMP를 결정하는 가격결정 발전계획과 계통의 운영 발전계획에 차이가 있으므로 저렴한 HVDC에 의해 SMP가 결정되었음에도 불구하고, 실제 제약사항을 반영한 운영발전 계획으로 인해 기력발전기도 여전히 가동하며, 정산을 받고 있는 실정이다.

#### 나. 제주도 CFI 2030 계획

제주도의 CFI(Carbon Free Island) 2030 계획은 2030년까지 전력수요의 100%를 신재생에너지 설비로 공급하는 것을 목표로 하고 있으며, 태양광 1.4GW, 풍력 2.3GW 등 신재생에너지 설비용량 4.1GW를 보급할 계획이다. 이 과정에서 재생에너지 확대에 따른 전력계통의 불안정 문제를 인식하고, 2030년까지 HVDC 등의 전력계통의 유연성 제고수단을 활용하여 신재생에너지의 수용능력을 증대시키는 CFI의 목표를 추진하고 있다. 그리고 장기적으로 HVDC의 의존도를 낮추는 한편, 대규모 저장장치를 활용하여 수용능력과 유연성을 확보하면서 태양광, 풍력, 수소, 연료전지의 비중을 높여나가는 목표를 세우고 있다.

**표 5** 제주도 CFI 2030 신재생에너지 설비도입 목표

신재생에너지/년도	2017	2020	2022	2025	2030
설비용량(MW)	605	1,137	1,821	2,490	4,058
발전량(GWh)	1,488	2,522	3,720	5,055	9,268
전력수요 대비 발전비중(%)	30	44	59	67	106

자료: 제주특별자치도, CFI 2030계획 수정 보완 용역(요약본), p. 17.

제주도 CFI 2030 계획에서 제시한 수정안은 기존안보다 HVDC의 의존도를 낮추어야 한다는 인식 하에서 2030년을 에너지자립의 과도기적 단계로 설정하고 있다. 그러나 제주도에서 2030년까지 전력수요의 100%를 신재생에너지 설비로 공급하는 목표는 전력계통의 불안정 문제를 해결하는 관점에서는 달성 가능할지 의문이다. 특히, 현재 제주도 전력계통의 문제는 전력수요가 낮은 상태에서 재생에너지 발전설비의 확대에 의한 과잉공급을 어떻게 해소할 것인가에 더 집중되어 있다. 전력공급의 부족보다는 풍력발전의 출력제한 횟수 증가에서 보듯이 과잉공급 물량의 처리방식이 문제해결의 중심과제로 부상하고 있는 것이다. 기존 발전설비의 최소출력과 HVDC의 공급량을 최소화하더라도 전력수요를 초과하는 태양광 및 풍력 발전량을 처리할 방안이 없으면 계통의 안정화를 위해서는 이들 발전설비의 출력을 제한하는 조치를 이행할 수밖에 없을 것이다.



표 6 제주도 CFI 2030 신재생에너지 보급 신규 목표

구분(MW)	CFI 기존안(2012)	CFI 수정안(2019)	비고
태양광	1,411	1,411	참여형/수익형 사업 확대 합리적 인허가 기준 정립
육상풍력	450	450	자립형 보급사업 추진 경관 보전, 갈등 관리 강화
해상풍력	1,900	1,895 (고정식) 1,195 (부유식) 700	터빈 대형화, 고정식 해상풍력 잠재량 적극 활용 '25년 이후 부유식 해상풍력 상용화
연료전지	520	104	부하 대응 및 P2G 기술 상용화 고려
지열	10	-	안전성 및 수용성 문제로 도입 보류
해양에너지	10	10	기존 계획 유지
바이오에너지 /폐기물에너지	10	40	도내 바이오/폐기물 자원 최대 활용
바이오중유	-	175	기존 중앙 발전기 연료 교체
합계	4,311	4,085	

자료: 제주특별자치도, CFI 2030계획 수정 보완 용역(요약본), p. 30.

한 가지 방법으로 제주도의 전력공급 잉여량을 섬 밖으로 보내는 것을 추진하고 있으나, 이러한 상황을 모두 해결할 수 있을 것으로 보이지는 않는다. 현재 한전이 2022년 말까지 제주와 완도를 잇는 #3 HVDC 건설을 추진하고 있어서 향후 제주도의 과잉공급량을 육지로 역송할 수 있더라도 전라남도 지역의 전력수급 상황을 고려해야 할 것이다. 이 지역에도 전력수요가 낮은 경우 태양광 발전설비의 급격한 증가로 인해 과전압 문제가 나타난 바 있으며, 전력수요의 증가요인이 없는 한 전력계통의 불안정 상황이 발생할 가능성은 여전히 남아 있다. 또한 현재 태양광 발전설비의 배전계통 대기접속 물량이 있기 때문에 향후에도 태양광 발전설비가 확대될 수 있다. 따라서 제주도의 전력 과잉공급량을 이 지역으로 보내는 것도 여의치 않을 것으로 판단되며, 역송이 가능하더라도 상황에 따라서 제한적으로 이루어질 것으로 보인다. 결국, 제주도 내에서 대부분의 전력 과잉공급 물량을 해소하는 방향으로 대책을 마련해야 할 것으로 보인다.

## 5. 정책적 시사점

지금까지 검토해 본 바와 같이 제주도에서 태양광 및 풍력 발전설비의 증가는 전력계통 운영측면에서 전력수급 불균형에 따른 주파수 및 전압의 변동성을 심화시키고 있다. 제주도에서 태양광 및 풍력발전량은

이미 전력계통에 상당한 영향을 미치는 수준에 이르고 있다. 전력수요에 대한 공급력이 부족할 때에는 HVDC에 대한 의존도가 크고, 전력수요에 대한 공급력이 과잉일 때에는 풍력발전의 출력제한으로 대응하고 있다. 특히, 최근에는 전력수요가 낮아 HVDC를 포함한 유류 및 가스복합의 전통적 발전설비의 최소출력에도 불구하고 태양광 및 풍력 발전의 과잉공급량으로 인해 전력계통의 안정성에 문제가 발생하고 있다. 재생에너지 발전설비의 공급 과잉량을 제어하지 않으면 수급불균형으로 인한 주파수 및 전압의 변동성이 심화되어 결국 부하차단으로 이어지는 상황이 발생할 수도 있기 때문에 전력계통 안정성 차원에서 조속히 해결방안을 찾아야 한다.

이 문제를 해결하기 위해서는 재생에너지 발전설비에 따른 과잉 전력공급량을 어떻게 비용효과적으로 처리할 것인가가 관건일 것이다. 제주도에서 과잉 전력공급량을 육지로 역송하는 방안은, 이를 수전하는 지역에서도 태양광 발전량이 많아서 제한적일 것이다. 또 한편으로 농림수산업 및 관광산업의 비중이 높은 전력수요를 단기간에 증가시켜 과잉 공급량을 해소하기에도 용이하지 않다. 특히, 금년에 코로나19로 인한 전력수요 하락으로 풍력발전의 출력제한 횟수가 급격히 증가한 상황을 보면 더욱 그러하다. 결국 제주도 내에서 잉여전력량을 처리하는 방향으로 해결책을 마련하는 것이 실질적인 대안이 될 것으로 보인다. 제주도의 전력수요가 낮고, 재생에너지 발전량이 증가할 때를 대비하여 재생에너지 발전의 출력예측에 대한 정확도 개선을 바탕으로 계통운영과 관련된 기술적 개선방안과 시장제도를 통한 제도개선 방안을 동시에 마련해야 할 필요가 있다.





먼저 기술적 측면에서 살펴보면, 우선 변동성 재생에너지의 제어 및 관리를 중심으로 시스템을 보다 효율적으로 운영할 수 있는 체계를 갖추는 것이 중요하다. 그리고 제주도 계통의 규모대비 발전설비 단위용량이 큰 중앙급전 발전기의 최소출력을 더 낮출 수 있도록 조정하면 계통운영의 안정성을 높이고 태양광 및 풍력 발전의 출력제한의 완화에도 기여할 수 있다. 또한 잉여전력을 흡수하여 전력의 공급과잉을 해소할 수 있는 기술적 장치의 도입을 추진할 수 있다. 전력을 직접 저장하고 방출하는 에너지저장장치(ESS)로서 배터리, 전력을 가스·열 등의 타 에너지원으로 전환하는 P2G(Power to Gas), P2H(Power to Heat) 등이 대표적인 예이다. 이러한 기술적 수단의 운영을 위해서는 시장제도 측면의 개선이 병행되어야 한다. 태양광 및 풍력 발전의 잉여전력이 발생하는 시간대를 고려하여 수요 개발 및 타 시간으로부터의 부하 이전을 고려해 볼 수 있다. 정해진 시간대에 수요를 낮추는 수요반응(DR)과 반대되는 개념으로 태양광 및 풍력 발전의 잉여전력이 발생하는 시간에 전력을 추가로 사용하는 소비자에게 인센티브를 제공하는 방식(Reverse DR)<sup>16)</sup>으로 잉여전력의 소비를 유도할 수 있다. 또한 잉여전력이 발생하는 시간대에 직접 소비하는 대신 태양광 및 풍력 발전설비와 연계하여 설치된 ESS를 활용하여 공급전력을 조정하도록 유인하는 제도를 설계할 수 있을 것이다. 도매시장의 가격메커니즘이 전력수급 상황을 반영하여 전력의 초과공급 시에는 0 또는 마이너스(-) 가격을 형성할 수 있도록 개선된다면 차익거래의 개념으로 ESS의 운영이 가능해진다. 결국 전력수급에 따른 가격신호라는 제도적 장치는 발전사업자가 출력제한 혹은 ESS의 운영을 통해 발전량을

16) 우리나라에서는 플러스DR이라는 이름으로 제도를 추진 중이다.



스스로 제어하도록 유도할 수 있다.

재생에너지의 보급 속도가 육지보다 높은 제주도의 특성을 고려하여, 육지보다 먼저 도매시장의 운영체계에 실시간 시장의 제약을 반영한 운영발전 계획을 통합하여 그 경험을 축적할 필요가 있다. 향후 재생에너지 발전설비의 확대에 육지에서 발생될 수 있는 전력계통의 불안 문제를 사전에 대비하는 데에 좋은 경험이 될 수 있다는 점에서 의미가 있을 것이다.

이와 같이 제주도에 중장기적으로 탄소배출이 없는 섬을 조성하기 위해서는 계통운영의 유연성을 갖추기 위한 기술 및 시장제도적 개선을 기반으로 향후 계획된 태양광 및 풍력 발전설비를 확충하는 것이 출력제한을 완화할 수 있는 방향이 될 것으로 보인다. 현재와 같은 상황에서 재생에너지가 확충될 경우 재생에너지의 출력제한은 더욱 늘어날 가능성이 커져 설비운영의 비효율성이 증대될 것이다. 그리고 자연재해로 인한 대형 발전소 및 송전선로의 사고에 따른 재생에너지 발전설비의 추가 탈락으로 급격한 주파수의 하락과 이에 대한 대응력도 약화될 수 있으므로 조속히 설비관련 기술 및 시장제도의 개선을 추진할 필요가 있을 것이다.

## 참고문헌

### 국내 문헌

- 김세호, 재생에너지 증가와 제주계통 운영 이슈, 재생에너지 증가에 따른 전력안보 확보방향 세미나, 2020.9.
- 옥기열, '1단계 국내 전력시장 개편방향', 제16회 서울국제전력시장 컨퍼런스, 2020.
- 이태의, '태양광 발전의 보급 확산에 따른 상계제도 개선방향 연구', 에너지경제연구원 2019.
- 전력거래소, '발전설비 용량변경', 각 호.
- 전력거래소, 2019년도 전력시장 통계, 2020. 5.
- 제주연구원, '제2차 풍력발전 종합관리계획 수립', 2018.
- 제주특별자치도, CFI 2030계획 수정 보완 용역(요약본), 2019. 8.

### 웹사이트

- 국가통계포털, <https://kosis.kr/>
- 전력데이터 개방 포털시스템, <https://bigdata.kepco.co.kr/>
- 전력통계정보시스템, <http://epsis.kpx.or.kr/>
- 전력거래소 홈페이지, <http://kpx.or.kr/>
- 일렉트릭파워, 2020.10.15일자, '올해 제주서 버려진 풍력발전량 1만3,166MWh달해' <http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=26046>, 접속일자 2020.11.05.