

우리나라 전력시스템에 대한 태양광발전 확대의 영향과 대응방안 : 계통 및 수급안정성을 중심으로

김 완 수* · 조 하 현**

요약

전 세계적인 온실가스 감축목표를 달성하기 위하여 국가별로 다양한 친환경 정책을 수행하고 있다. 이러한 친환경정책 중 재생에너지 보급은 우리나라를 비롯한 많은 나라에서 가장 중요한 정책 중 하나이며, 국가별로 재생에너지 보급을 위하여 FIT와 RPS 등을 지원정책으로 수행하고 있다. 최근 우리나라는 2034년 총 발전설비 중 40%를 재생에너지로 계획되고 있으며, 다양한 지원정책으로 재생에너지 규모도 빠르게 증가하고 있다. 재생에너지 중 태양광발전은 일사에너지 변화에 따라 출력이 변동하여 낮시간대 duck curve 현상을 유발하고 있다. 이러한 태양광발전으로 인한 전력시스템의 수급불안정과 계통불안정에 대응하기 위하여 유연성자원의 확보 및 인공관성과 보조서비스 확보 등이 필요하며, 하루전-당일-실시간으로 이어지는 다중거래체제 도입과 속응성자원 유도를 위한 거래단위의 축소, 에너지시장과 예비력시장의 구분, 태양광의 자기책임의무 부여 등이 필요하다.

주제분류 : B030902, D090100

핵심 주제어 : 재생에너지, 태양광발전, 계통안정성, 유연성자원, 전력시장

I. 서 론

2015년 12월에 유엔기후변화회의(United Nations Climate Change Conference)에서 파리 협약(Paris Agreement)이 채택된 이후, 2016년

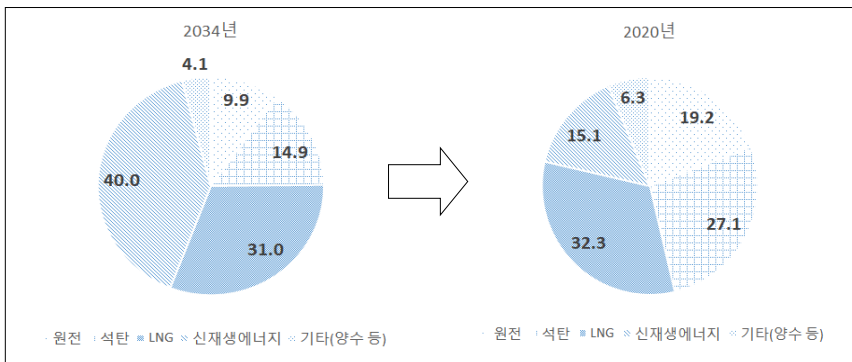
* 제1저자, 전력거래소 전력산업연구원 차장, e-mail: lazywolf@kpx.or.kr

** 교신저자, 연세대학교 경제학부 교수, e-mail: hahyunjo@hanmail.net

11월부터 현재까지 전 세계는 온실가스 감축을 위하여 여러 형태의 노력을 수행하고 있다. 이러한 노력은 사용하고 있는 에너지의 상당부분을 친환경 에너지로 전환하는 것에 집중되고 있다. 이러한 친환경에너지의 대부분은 재생에너지를 통한 전기의 형태로 나타나고 있으며, 이에 따라 전 세계적으로 전력부문에서의 재생에너지 확대가 이루어지고 있다. 특히 OECD 국가들의 경우는 2018년 기준으로 전년 대비 재생에너지로부터의 에너지 생산은 20Mtoe 이상 증가하였다(IEA, 2019c).

우리나라도 파리협약 감축목표 달성을 위하여 2016년 전체 발전량의 7.0%를 차지하고 있는 재생에너지 규모를 2030년 총 발전량의 20%를 차지할 수 있도록 신규설비의 95% 이상을 재생에너지로 계획하고 있다(산업통상자원부, 2017a). 이를 위하여 정부는 『제8차 전력수급기본계획』과 『2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안』을 통해 2030년 재생에너지 설비비중 33.7%, 설비용량 58.5GW를 목표로 제시하였다(산업통상자원부, 2017b; 환경부, 2018).

〈그림 1〉 전원별 설비비중 전망(Prediction of resource's capacity)



출처: 산업통상자원부(2020)를 기반으로 작성하였음.

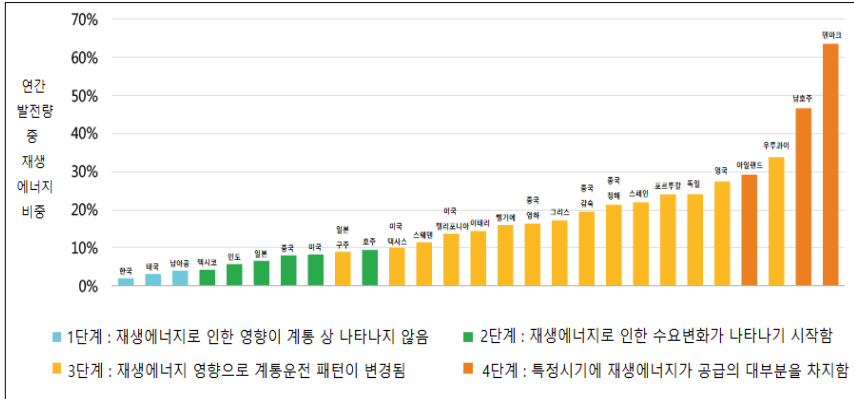
Source: Constructed from Ministry of Trade, Industry and Energy(2020).

이러한 공격적인 재생에너지 확대 정책은 불가피하게 전력시스템 전체에 새로운 영향을 미치게 되는데, 이를 위하여 IEA(2017)는 재생에너지 보급 단계를 6개 단계로 나누어 각각의 단계별로 발생하는 현상과 이에 대응하는데 필요한 작업을 지적하고 있다.¹⁾ 이러한 IEA의 보급단계에 따르면 『제3

1) IEA는 재생에너지 보급수준에 따른 전력시스템 영향을 다음의 6단계로 나누었다:

차 에너지기본계획』의 2040년 재생에너지 목표를 달성할 경우 대부분의 유럽선진국이 도달해있는 수준인 3단계 수준까지 달성하게 된다.

〈그림 2〉 국가별 재생에너지 발전비중에 따른 보급단계 비교 : 2018년 기준
(Comparison of the distribution stage according to the proportion of renewable energy generation by country: Year 2018).



출처: IEA et al.(2019).
Source: IEA et al.(2019).

다만 〈그림 2〉에서 알 수 있듯이 재생에너지 30~35% 비중은 우루과이를 제외한 아일랜드와 사우스오스트레일리아를 보면 알 수 있듯이 사실상 4단계 수준으로 보아야 한다. 특히 유럽의 다른 지역과의 연계선로 용량이 충분하지 않은 아일랜드의 경우 풍력발전이 이미 2015년 1월 순시 기준 계통출력의 66.2%까지 차지하여 연계선 한계로 인한 고립계통 문제가 발생하고 있으며, 이에 따른 계통안정도 확보를 위하여 2017년 풍력발전의 약 4%를 조정할 바 있다(IRENA, 2019a). 2017년 발전량의 53%를 풍력으로부터 공급받고 있는 덴마크는 바람이 없을 때 필요한 기저발전기 확보가

1단계는 재생에너지로 인한 영향이 계통전체 수준에서 나타나지 않는 상황이며, 2단계는 재생에너지로 인한 수요변화가 인지되는 상황을, 3단계는 수급불균형이 발생하기 시작하여 상당한 규모의 추가적인 유연성자원이 필요한 상황을 의미한다. 4단계는 특정시기에 재생에너지가 공급의 대부분을 차지하여 계통안정도에 문제가 발생할 수 있으므로 계통운영방법을 바꿔야하는 상황을 의미하며, 5단계는 재생에너지 공급이 수요를 넘어서는 경우가 주기적으로 발생하여 재생에너지 출력제한이나 새로운 수요를 만들어야 하는 상황을, 마지막 6단계는 재생에너지 출력이 낮을 경우에도 수급이 유지되어 전력을 장기저장 또는 수소와 같은 타 에너지로 전환해야하는 상황을 나타낸다.

중요한 문제가 되고 있으며, 풍력발전이 많을 경우는 오히려 발전을 지속하기 위하여 낮은 가격, 심지어는 마이너스 가격으로 발전을 판매하고 있다²⁾. 다만 덴마크의 경우는 아일랜드와 달리 노르딕국가와의 연계선로가 충분하여 풍력의 출력조정은 빈번하지 않은 상황이다(IEEFA, 2018).

본 연구에서는 현재 전 세계적으로 진행되고 있는 재생에너지 확대 현황에 대하여 간단하게 짚어보고, 이를 위하여 제시되고 있는 지원정책의 영향을 알아보고자 한다. 또한, 이러한 정부 정책에 따른 재생에너지 확대 시 우리나라 전력시스템이 받게 될 영향에 대하여 논의해보고, 우리나라 전력시스템이 미래 전력환경 변화에 대응하기 위한 발전 방향에 대하여 크게 정리하였다. 이러한 논의를 본 연구에서는 앞으로 재생에너지 확대에 인하여 발생 가능한 다양한 부작용에 대하여 어떠한 방향으로 대응할 것인지에 대한 정책적 시사점을 제시하고자 한다.

II. 재생에너지 확대 현황

Meadows et al.(1972)의 로마클럽 보고서에서 오늘날 전 지구적인 문제가 되고 있는 온난화 현상이 처음으로 제기되었으며, 전 세계가 풀어야 할 가장 큰 숙제가 되었다. 이러한 온난화 현상은 최근까지 지속하고 있으며, 최근 5년간은 전 세계적으로 가장 높은 기온을 기록하고 있다(WMO, 2019). 이러한 전 지구적인 온난화 현상에 대응하기 위해 국제사회는 2015년 12월에 기존 선진국 중심의 대응협정인 교토의정서를 대신할 협정으로 파리협정(the Paris agreement)을 맺고 국가별로 온실가스 감축 의무를 강화하고 있다.

2015년 파리협정은 모든 국가가 국가 온실가스 감축목표(INDC, Intended Nationally Determined Contribution)를 제시하도록 하고 있으며, 우리나라도 2030년 온실가스 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 37%를 감축목표로 제시하였다. 하지만 2016년 발표 당시

2) 가격입찰 기반 전력시장의 경우 낮은 수요로 인하여 자신의 발전설비가 정지되는 것을 방지하기 위하여, 발전기별로 필요할 경우 마이너스 가격을 입찰가격으로 제시할 수 있다.

2030년 감축목표 37%에는 국내 감축분은 25.7%만 차지하고 있어, 2009년 발표한 2020년 기준 30%보다 오히려 후퇴하였다는 지적을 받았으며, 국제 탄소 시장 메커니즘을 통해 달성 목표로 삼은 11.3%에 대하여도 명확한 계획이 없다는 점, 또한 제시된 목표와 국가 미래전략과의 연계 부재 등을 문제점으로 지적되었다(최현정, 2015). 반면 유항재(2016)는 2020년 감축목표 대비 후퇴, 해외감축분에 대한 구체적 정책수단의 결여, 산업 외 부문에 대한 부담 증가 등 일부 문제가 있기는 하나, 제시한 감축목표가 2030년 절대배출량 기준 G20국가 중 5위, 배출집약도 기준 3위로 높은 수준이며 온실가스 목표배출량 국제비교지수 상으로도 적극적인 수준인 것으로 평가하였다. 오진규(2018)는 감축 감축목표의 의욕성 산정에서 지표별로 우리나라의 감축목표에 대한 평가가 상이하며, 전 세계 총량에 대한 나라별 비중인 비중지표로 복합된 지표를 사용할 경우는 우리나라 감축목표가 매우 의욕적인 것으로, 전 세계 평균지표에 대한 상대값인 1인당 상대지표를 혼합하여 적용할 경우 매우 비의욕적인 것으로 나타난다고 주장하였다. 이만희·박선경(2017)은 분석결과 우리나라 온실가스 감축목표가 배출 절대량 기준으로 OECD 국가 중에서 높은 수준이나 인구당 배출량 기준으로는 낮은 수준이라고 주장하였다. 또한 에너지 집약산업 중심으로 발전해 온 우리나라의 산업부문 온실가스 감축노력과는 별도로 비 산업부문 배출량이 전체의 60%를 넘는 점을 지적하면서 시민 행동변화 유도가 목표 달성에 중요하다는 것을 강조하였다.

이러한 지적을 반영하여 우리나라 정부는 『2030년 온실가스 감축 로드맵』을 통해 2030년 온실가스 배출량 목표를 BAU 대비 37% 감축한 5억 3,600만 톤으로 정하고, 국내 감축분을 25.7%에서 30%로 확대시킨 2억 7,700만 톤으로 배정하였다. 국내 감축분 중 2,400만 톤은 발전부문의 미세먼지 저감과 친환경에너지 전환을 통하여, 3,400만 톤은 제3차 에너지 기본계획 및 에너지세제 개편, 환경급전 강화 등을 통하여 감축하는 것을 목표로 하고 있으며(환경부, 2018), 이러한 전력 부문에 할당된 배출량 감축목표는 전체 국내 감축목표 중 20.9%에 달하고 있어, 목표달성을 위해서는 재생에너지 확대 정책이 불가피한 상황이다. 따라서 우리나라 정부는 『재생에너지 3020 이행계획』에서 2030년까지의 재생에너지 발전량 비중 목표를 20%로 정하고 신규 설비용량의 95% 이상을 태양광 및 풍력으로

공급토록 하였으며, 『제3차 에너지기본계획』을 통해 2040년 재생에너지 발전비중을 최대 35%까지 확대하는 것을 계획하고 있다.

재생에너지 보급을 위한 전 세계적인 노력의 결과로 2018년 OECD 국가들의 전력생산량 중 풍력은 6.7%를, 태양광은 2.9%를 차지하였으며, 1980년대 후반부터 꾸준히 증가하던 천연가스 발전 비중(27.9%)도 2018년 처음으로 석탄발전 비중(25.6%)을 상회하였다(IEA, 2019a). 비 OECD 국가들의 경우는 석탄발전이 2013년 48.6%를 정점으로 소폭 하락하기 시작하였으며, 2017년에는 46.8%를 차지하였다. 풍력발전은 2013년 1.6%에서 2017년 2.9%로 점유율이 상승하였고, 태양광 역시 2013년 0.2%에서 2017년 1.2%까지 상승하였다.

특히 재생에너지의 비중이 높은 OECD 국가 중에서도 유럽지역 국가들의 전력 부문 재생에너지 비중은 다른 지역보다 높은 수준을 보인다. IEA(2019b)에 따르면 유럽지역의 2018년 총 전력발전 중 재생에너지 발전비중 추정치는 35.7%로, 미주 지역의 23.1%나 아시아·오세아니아의 14.6%보다 월등히 높은 수준을 기록하고 있다.

조하현·임형우(2017)는 재생에너지 보급으로 인한 긍정적인 경제성장 효과를 Annex 1과 Non-Annex 1 국가를 대상으로 한 비선형 동태 패널 분석을 통하여 지적한 바 있다. 이 연구에서 신재생 보급의 경제 영향은 보급 초반에는 악영향으로 시작되나, 이후 경제에 도움이 되는 U자 형태로 도출되었다. 이에 따라 과거 온실가스 배출량이 많았던 Annex 1 국가들은 초반에는 경제 타격을 크게 받으나, 오히려 전환점 이후 경제성장률에 긍정적 효과가 크게 나타났으며 그 변화폭도 Non-Annex 1 국가에 비해 크게 나타남을 보여주었다.

이러한 재생에너지 확대에 가장 중요한 필요한 잣대는 재생에너지가 경제성을 확보하는 grid parity의 달성 여부이다.³⁾ Grid parity의 달성 여부는 국가별, 발전원별로 상이하게 나타나는데, 신동현 외(2019)는 태양광발전의 경우 126개국 중 8개 국가만이 grid parity를 달성하였으며 특히 한

3) Grid parity는 전력시장(도매 또는 소매) 가격보다 균등화발전비용(LCOE, Levelized Cost of Electricity)이 작거나 같아지는 현상을 의미하며, 발전원 자체적으로 경제성을 확보하는 것을 의미한다. 또한 균등화발전비용은 발전기의 전체 수명기간 중 총생산전력량 대비 소요되는 비용, 즉 투자비와 운영·유지보수비, 연료비 및 기타 폐기비용·사회적 비용 등에 대한 비율을 의미한다.

국은 grid parity 달성을 위한 비용 격차가 \$0.125에 달한다고 주장하였다. 반면 Deutsche Bank(2014)는 세계적으로 최소 19개 시장에서 grid parity를 달성하였으며, 미국도 2014년 10개 이상 주에서 이미 grid parity를 달성한 상태이고 태양광 가격 하락에 따라 12개 주가 추가로 grid parity 달성이 가능하다고 주장하였다.

IRENA(2019d)도 전력회사 규모 태양광의 경우 세계 평균 LCOE가 2018년 US\$ 0.085/kWh까지 하락하여 2010년 대비 77%나 감소함에 따라 점차 grid parity 달성이 쉬워지고 있음을 지적하고 있다.

아직 grid parity를 달성하지 못한 우리나라의 경우는 재생에너지 보급을 위하여 2002년부터 재생에너지의 기준가격과 전력시장 가격 차이를 전력산업기반기금으로부터 지원하는 “대체에너지발전전력 차액지원” 제도를 도입하였다(산업통상자원부, 2002). 하지만 2002년 33억 원 수준이었던 FIT(Feed In Tariff) 지원금은 2011년 3,689억 원에 달하였으며, 막대한 재정투입에도 당초 목표를 달성하지 못함에 따라 2012년부터 기존의 FIT를 폐지하고 신재생에너지 공급의무화제도, RPS(Renewable Portfolio Standard)로 전환하였다(전기연구원, 2009).

FIT와 RPS는 각각의 장단점이 존재하므로 재생에너지 보급에 어느 쪽이 더 효과적인가에 대해서는 논란이 있다.⁴⁾ 신동현 외(2019)는 태양광발전의 grid parity 달성을 위한 결정요인으로 재생에너지 산업발전, 태양광 효율 개선, 전력가격 상승, 낮은 자본조달 비용, R&D 투자, 강도 높은 신재생 정책, 높은 소득수준과 에너지 소비 등을 제시하였으며, 특히 FIT보다는 RPS가 grid parity 달성에 유리하다고 주장하였다.

반면 임형우·조하현(2017)은 자신들의 연구를 통해 RPS보다는 FIT가 전반적으로 재생에너지 보급에 효과적이라는 주장을 하였다. 104개국 패널 자료를 이용한 확률효과 토빗 모형으로 FIT와 RPS의 정책효과를 비교한 이 연구에서 발전원별로 태양광은 FIT 정책이, 풍력은 RPS와 FIT 정책혼용이 효과를 나타내는 것으로 분석하였다. 또한, OECD 국가는 FIT가, 비 OECD 국가는 FIT, RPS 모두 효과가 있다는 것을 연구 결과로 제시하였

4) FIT(Feed in Tariff)는 재생에너지에 대하여 정해진 기간 동안 고정된 가격으로 생산된 전력을 구매하여 경제성을 확보해주는 제도이며, RPS(Renewable Portfolio Standards)는 전력사업자가 공급하는 전력의 일정 비중을 재생에너지로부터 생산된 전력으로 공급하도록 의무 할당하는 제도이다.

다.

이수일 외(2015)는 우리나라 RPS제도의 경우 재생에너지 보급 측면에서 FIT 대비 효과를 거두기는 하였으나 여전히 목표 달성에는 미흡하였고, RPS 공급의무자를 판매사업자가 아닌 발전사업자로 지정하여 유인 왜곡이 발생하고 있다고 주장하였다. 또한, 재생에너지 보급목표 달성과 유인 왜곡 현상 해결을 위해 사업자 불확실성 완화 및 소규모 재생에너지에 대한 FIT 제도입, RPS 의무자의 재검토 등이 필요함을 지적하였다.

우리나라도 FIT 제도의 추가적인 장점을 활용하기 위해 2018년 7월부터 소규모 태양광 발전사업자를 위한 한국형 발전차액지원제도를 5년 한시로 도입하고 있다(산업통상자원부, 2018a). 이 제도는 30kW 미만의 설비와 농·축산·어민, 협동조합 소유의 100kW 미만의 설비를 대상으로 2018년 매입가격인 189,175원/MWh로 20년간 구매물량을 지원하고 있다.

임형우·조하현(2017)이 주장했던 FIT 제도의 태양광발전설비 보급에 대한 효과성은 EU에서도 나타나고 있으며, 이미 2011년부터 독일, 영국, 프랑스 등에서는 태양광설비에 대한 지원금을 삭감할 정도로 태양광설비가 과도하게 공급되고 있다(에너지경제연구원, 2011). 이에 대한 해결방안으로 EU는 태양광발전 지원정책을 기존의 FIT에서, 시장에서의 전력 판매와 프리미엄 지급으로 나누어 지원하는 FIP(Feed in Premium)로 개편하는 방향으로 전환하고 있다(윤지영·최광환, 2017).

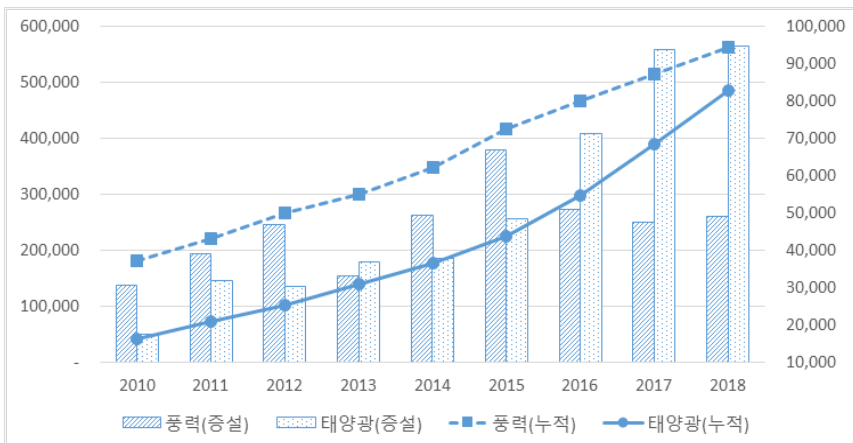
미국이나 유럽과 같은 연계계통이 아닌 우리나라와 같은 독립계통에서의 재생에너지에 대한 FIT 제도 도입의 사례로는 일본을 들 수 있다. 일본은 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 신재생에너지 확대를 위하여 2003년부터 시행하였던 RPS 제도를 2012년부터 FIT로 전환하였다. FIT 도입 이후 일본에서는 상대적으로 매입가격이 높고 설치부터 가동까지 기간이 짧은 태양광발전이 급격히 증가하여, 전기소비자의 부담이 증가하였다. 또한, 태양광발전설비가 일조량이 많은 규슈지역에 집중되면서 구주전력은 2018년부터 태양광발전 출력억제 제도를 운용하게 되었다(에너지경제연구원, 2019a). 일본 전력당국도 이러한 부작용을 인식하고 2019년 11월 FIT 제도 매입기간이 만료됨에 따라 10kW 이상의 태양광발전설비에 대하여는 FIP로 이행토록 논의를 진행 중이며, 500kW 이상 설비에 대해서는 입찰

제도에 참여토록 정책을 수정하였다(에너지경제연구원, 2019b).

Ⅲ. 태양광발전 확대에 따른 전력시스템 영향

재생에너지 중 전 세계적으로 가장 주목받는 에너지원으로는 풍력과 태양광을 들 수 있다. 전력거래소(2018)에 따르면 2017년 국내 평균 이용률은 풍력 22.10%, 태양광 15.57%로 나타났으며, 이용률 기준 발전 원가도 풍력 116.26원/kWh, 태양광 131.85원/kWh로 나타나 풍력의 경제성이 태양광보다 우수한 것으로 나타났다. 하지만 이러한 경제성과는 별개로 신규 설비의 경우 태양광이 풍력을 앞지르고 있는데, IRENA(2019c)에 따르면 2018년 한 해 동안 추가로 설치된 전 세계 신규 태양광 설비규모는 94,763MW로 동기간 중 추가로 증설된 신규 풍력 설비규모 49,104MW를 훌쩍 뛰어넘고 있다.

〈그림 3〉 전 세계 풍력 및 태양광 누적·신규설비 규모추이 : 2010~2018년(Trend of cumulative and new facility scale of wind and solar power worldwide : From year 2010 to year 2018)

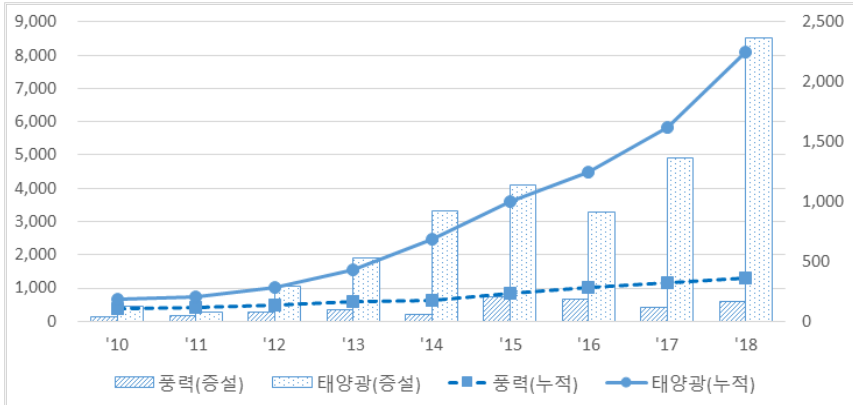


출처: IRENA(2019c)를 기반으로 작성하였음.
Source: Constructed from IRENA(2019c).

이러한 현상은 우리나라도 유사하게 나타나고 있다. 2018년 태양광 신규 설비 규모는 2,367MW인 반면 풍력 신규설비 규모는 161MW에 그쳤으

며, 2018년 태양광 총 설비 규모 역시 8,099MW로 풍력 총 설비 규모 1,303MW를 이미 역전한 상황이다(한국에너지공단, 2019a).

〈그림 4〉 우리나라 풍력 및 태양광 누적·신규설비 규모추이 : 2010~2018년(Trend of cumulative and new facility scale of wind and solar power in Korea : From year 2010 to year 2018)



출처: 한국에너지공단(2019a)을 기반으로 작성하였음.
Source: Constructed from Korea Energy Agency(2019c).

『제8차 전력수급기본계획』에서도 2030년 기준 풍력발전 설비는 재생에너지 설비규모 총합인 58.5GW의 30.3%를 차지하는 17.7GW로 전망되었으며, 상업용 태양광발전은 총합의 57.3%인 33.5GW로 전망되고 있다(산업통상자원부, 2017b). 이러한 태양광 설비계획량은 2030년 전체 발전 설비 규모인 173.7GW의 19.3%에 달하는 규모이다. 이와 같이 앞으로도 태양광발전은 가장 중요한 재생에너지가 될 것으로 예상되며, 태양광발전 증가로 인한 전력시스템 영향도 검토가 필요하다. 앞으로 태양광발전 비중이 증가함에 따라 예상되는 전력시스템 영향은 크게 수급안정성 차원의 문제와 계통안정성 차원의 문제로 나누어 볼 수 있다.

1. 수급안정성 저하

(1) 태양광출력변동에 따른 duck curve 현상

자연에너지를 사용하는 발전설비들은 자연 상태변화에 따라 출력이 변동되는데, 태양광의 경우는 출력 수준이 일사량, 구름두께와 움직임과 같은

제어가 불가능한 기상요소에 따라 결정된다. 또한, 발전출력 대부분이 해가 떠 있는 낮 시간대에 일어나므로, 기존 중앙급전발전기의 운전출력 기준이 되는 순부하, 즉 net load를 감축시키게 된다. 이러한 태양광의 부하감축 효과는 태양광발전설비 규모가 일정 이상이 되면 아침이나 저녁 시간대보다 오히려 낮 시간대 부하가 하락하는 duck curve 현상을 일으키게 된다⁵⁾. 이러한 duck curve 현상은 기존 전력시스템에게 최저부하의 하락과 함께, 태양광 출력변화에 따른 급격한 증발과 감발자원의 확보를 요구한다.

이러한 태양광출력변화에 따른 증감발 소요량에 대하여 김창수·정다연(2018)은 2031년 기준 신재생설비가 51GW 수준까지 증가한다는 가정하에 최대 시간당 13GW, 5시간 내 35GW까지 순부하 변동이 발생하는 것으로 분석하였으며, 고권우·전영환(2018)은 2029년 기준 신재생 출력 변동성을 시간당 최대 6GW로 전망하고 이를 해결하기 위한 방안으로 양수발전설비 확충이 필요하다고 주장하였다.

해외의 경우는 Solomon et al.(2010)이 이스라엘 네게브 사막 내 8개 지역의 2006년 자료를 이용한 시뮬레이션을 통하여, 중앙제어설비를 갖춘 태양광발전설비를 지역별로 계통이 허용하는 한도까지 효과적으로 배치할 경우 이스라엘 계통부하 변동의 약 98%에 대응하기 위한 증감발 용량은 약 2.0GW 정도가 필요할 것임을 보여주었으며, Huber et al.(2014)은 2001년부터 2011년까지의 유럽 내 27개국의 육지풍력과 태양광발전 실적을 이용하여 유럽의 1퍼센타일 평균 순부하 변동량이 1시간 기준 최대전력의 10~26%, 6시간 기준 34~104% 정도임을 지적하였다. 또한 Shaker et al.(2016)은 캘리포니아 지역의 대규모 풍력 및 태양광 보급으로 2023년 기준 시간별 순부하가 8,000MW/h까지 변동할 것으로 예상되며, 1,500MW 이상 규모의 시간별 증발 및 감발 시간대는 각각 16~17시와 22~23시경에 가장 빈번하게 발생할 것이라고 주장하였고, Andrychowicz et al.(2017)은 2030 글로벌 재생에너지 로드맵(REmap, 2030)을 반영할 경우 폴란드 신재생발전원의 2025년 연중 최대 감발규모와 증발규모는 각각 수요의 25%와 14% 수준이 될 것으로 추정하였다.

5) Duck curve 현상은 재생에너지 증가(주로 태양광)로 인하여 낮 시간대 전력수요가 급감하는 현상을 의미하며 낮 시간대 수요형태가 오리의 배와 같다고 하여 붙여진 이름이다.

우리나라의 설비계획은 냉방 및 난방부하로 인하여 수요가 급등하는 여름철과 겨울철을 기준으로 수립되고 있다. 또한, 재생에너지 확대정책과 맞물려서, 태양광설비와 같은 재생에너지를 우선적으로 발전계획에 반영하는 형태로 이루어지고 있다. 이러한 설비계획에 반영되는 재생에너지 설비계획량은 여름철 및 겨울철 피크기여도 기준으로 일괄 반영되고 있어, 재생에너지로 인하여 발생하는 수요패턴의 변화현상, 즉 duck curve 현상은 설비계획에 아직 크게 고려하지 못하는 것으로 추정된다(산업통상자원부, 2015).

하지만 앞으로 재생에너지가 증가함에 따라 오히려 수요수준이 감소하는 봄철과 가을철이 수급이 취약한 기간이 될 것이다. 더욱이 이 기간에는 맑은 날씨와 함께, 상대적으로 낮은 기온으로 인하여 발전효율이 높게 유지되므로 태양광발전의 영향이 더욱더 강하게 나타난다. 따라서 앞으로 수급확보 중점 기간은 기존의 여름과 겨울이 아닌 봄과 가을이 되어야 하며, 특히 전체 전력소비량의 약 55.7%를 차지하는 산업용 수요가 감소하는 특수일이 가장 수급에 취약한 기간이 될 가능성이 크다(한국전력공사, 2019). 특히 기존의 설비계획은 봄과 가을 같은 저수요 구간에서 발전자원의 기동·정지계획을 크게 고려하지 않을 위험성을 내포하고 있으며, 수요급등 및 급감에 따른 유연성자원 확보에 한계를 지니게 될 가능성도 가지고 있다.

전영환 외(2019)는 태양광 및 풍력으로 인한 부하 차감효과로 2030년 봄철 주말의 경우 최저부하가 12시부터 1시까지 21,900MW까지 하락할 수 있음을 지적하였으며, 이에 따라 원자력 발전의 2.8GW 수준까지의 감축 없이는 예비력 확보가 쉽지 않음을 주장하였다. 『제8차 전력수급기본계획』상의 2030년 정격용량 기준 석탄과 원자력 설비규모는 약 60.3GW로, 문제 발생 지점으로 지적하고 있는 봄철 최저부하 21.9GW를 상회하는 수준으로 기저발전기의 출력 감축은 피하기 어렵다.

정영범 외(2011)는 <표 1>과 같이 2009년 발전원별 최소출력 수준을 원자력은 설비용량의 90%, 석탄은 50%, LNG는 30% 수준임을 보여주었으며, 발전설비별 최소정지시간은 hot mode에서 원자력은 8~12시간, 석탄은 12시간, LNG는 복합의 경우 3시간이 걸리는 것으로 정리하였다. 또한, 증감발률은 각각 석탄은 10MW/분, LNG는 22MW/분으로 조사하였다. 또한 전영환 외(2013)는 발전기 기동소요시간에 대하여 원자력은 수십시간, 석탄은 최대 10시간, 복합은 최대 2시간 소요된다고 주장하였다.

이와 같은 발전원별 운전특성을 고려할 때 2030년 기준 비유연성자원, 즉 원자력과 석탄설비의 최소출력 수준은 약 38.3GW로 계산된다. 따라서 기저발전기의 출력을 최소로 낮춘다 하더라도 봄철 최저부하 21.9GW를 상회하므로 일부 발전기는 출력정지까지 필요하다. 문제는 이렇게 최소출력 수준까지 발전출력을 하락시킬 경우 수요변화나 재생에너지 출력변화에 따라 대응이 가능한 자원이 부족할 가능성이 크다는 것이다.

〈표 1〉 발전원별 운전특성(Characteristics by resources)

발전원		원자력	석탄	LNG	
				GT	CC
최소출력수준		90[%]	50[%]	30[%]	
증감발율(MW/분)		-	10	22	
GFRQ(MW)		-	16	14	
최소 (hot mode)	운전시간	8~22h	6~10h	1h	4h
	정지시간	8~12h	12h	1h	3h
기동소요시간		수십h	6~10h	1~2h	
정지소요시간		수십h	3~6h	0.25~1h	

출처: 정영범 외(2011), 전영환 외(2013)을 재구성하였음.
 Source: Constructed from Young-Beom Jung et al.(2011) and Yeong-Han Chun et al.(2013).

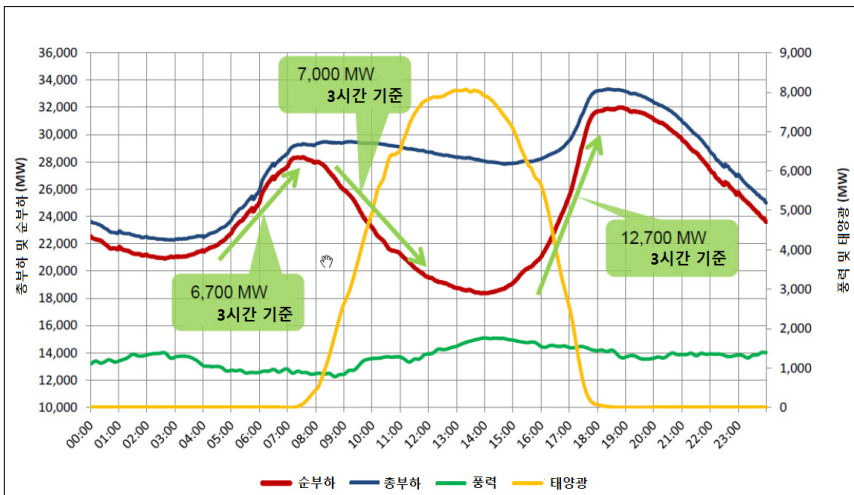
전우영 외(2019)도 이러한 봄철과 가을철의 duck curve로 인한 기저발전기의 비효율적 운전과 이에 따른 발전비용 상승, 유연성자원 필요성을 지적하면서, 수요자원과 ESS 등을 이용하여 duck curve를 완화해야 한다고 주장하였다.⁶⁾ IRENA 외(2018)는 재생에너지가 늘어남에 따라 순부하수준이 매우 낮은 수준까지 떨어져서 기존의 출력제어가 가능한 발전기의 최소출력 수준까지 지속적으로 하락할 수 있으며, 반대로 수요가 높은 수준에서 재생에너지 출력이 탈락함에 따라 기존 발전기들의 갑작스러운 출력증가 현상이 발생할 수 있음을 지적하고 있다. 이미 미국 캘리포니아의 경우는 소규모 태양광으로 인한 아침과 저녁 시간대의 급격한 증발 및 감발이 문제

6) 수요자원은 계통운영상의 필요성이나 경제적 필요성에 따라 수요가 급등하는 시간대에 수요감축을 하고 이에 따른 대가를 지급받는 자원을 의미하며, ESS는 Energy Storage System의 약자로 에너지저장장치를 의미한다. 우리나라의 경우는 배터리 충·방전을 통하여 전기를 저장하는 BESS(Battery ESS)와 동일한 의미로 사용된다.

가 되고 있으며, 아일랜드는 연계선 문제로 2017년부터 이미 전체 풍력발전의 4% 정도를 감축하고 있다(IRENA, 2019a). 우리나라도 이미 제주 계통의 경우 과도한 재생에너지 비중과 연계선 문제 등으로 풍력발전기의 출력제어 현상이 매년 증가하고 있다(명호산 외, 2018).

또한 duck curve 현상으로 인한 급격한 증감발 필요성과 순부하수준 하락에 따른 과잉공급 가능성 문제는 현재와는 다른 새로운 형태의 계통운동을 필요로 한다. 미국 캘리포니아 ISO에서는 급격한 수요패턴 변화로 인하여 하루 중 3시간 동안 약 13GW까지 발생할 것으로 예상되는 증감발 소요량을 해결하기 위해, 주요 증감발 시간대의 3시간 동안에 대하여 증감발 소요량과 상정고장 등을 고려한 유연성 자원 확보를 요구하고 있다(CAISO, 2016; NERC, 2014). 또한 과잉공급 가능성 문제해결 방안으로 가격신호를 활용한 수요자원의 시장참여 확대 및 소매요금 연동, 에너지저장장치와 유연성자원의 유인 등을 제시하였다.

〈그림 5〉 캘리포니아 ISO의 2020년 1월 순수요 시나리오(Net load scenario of California ISO on January 2020)



출처: NERC(2014).
Source: NERC(2014).

Milligan and Kirby(2010b)는 재생에너지로 인하여 발생하는 증감발 소요량이 기존의 상정고장 대응으로 해결할 수 있다고 주장하며, 대응방안으로 계통운영자의 감축지시가 가능한 수요반응자원을 활용할 것을 제안하

였다. 또한, 저수요로 인한 과잉공급 문제 역시 실시간 가격반응을 통한 수요반응으로 해결 가능하며, 이러한 자원으로 양수, 열저장, 전기분해, 전기차 충전, 세일가스추출 등을 꼽았다.

IEA(2017)는 재생에너지 확대에 따른 준비사항으로 재생에너지 운전정보의 투명성 및 계통안정성 책임부여 등을 위한 송배전접속 규칙의 정비, 접속 기술요건의 표준화, 재생에너지 예측강화, 운영예비력의 재검토, 시장제도 개편 등을 단계별로 제시하였다.

(2) 태양광출력예측 불확실성

도매전력시장과 전력시스템을 운영하고 있는 전력거래소에서는 다음날의 시간대별 태양광발전출력 예측을 위하여 최근 7일간 동 시간대의 발전량 또는 거래량의 평균값을 육지와 제주로 구분하여 발전계획에 반영하는 형태로 처리하고 있다(전력거래소, 2020). 김완수·조하현(2019)이 현행 전력시장에서의 태양광예측 방식과 유사한 방식으로 지적인 persistence model의 정확도를 평가하면 태양광발전 설비가 가장 많은 전남 기준으로 nRMSE (Normalized Root Mean Square Error) 14.5%에 달하는 것으로 나타났다.⁷⁾ 일반적으로 태양광발전 최대출력이 설비용량의 약 80% 정도인 것을 고려할 때 설비용량 기준 예측오차율, nMAE(Normalized Mean Absolute Error)는 약 11.6% 정도로 계산되며, 이를 제8차 전력수급기본계획에 계획된 2030년 기준 상업용 태양광설비용량에 반영하면 예측오차 규모는 약 3.9GW에 달한다.

태양광예측 방법론은 예측기법에 따라 persistence method, physical approach, statistical approaches, machine learning approaches, hybrid technologies 등으로 나뉜다(Raza et al., 2016; Das et al., 2018). 예측방법론에 따라 예측정확도가 상이하기는 하지만 persistence method의 경우는 nRMSE 기준으로 12.6~21.2% 수준을(Fernandez-Jimenez et al., 2012; Monteiro et al., 2013; Zhang et al., 2015; 김완수·조하현, 2019), physical approach의 경우는 RMSE/A 기준

7) persistence model은 예측치를 전일 동시간의 실적으로 갈음하는 방법을 의미하며,

여기서의 nRMSE는 $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} / \max(y_t)$ 로, nMAE는 $\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t| / Capacity$ 로 각각 정의된다.

7.6~13.2%(Graditi et al., 2016), NMAE 기준 8.6~9.1%(Ogliari et al., 2017), nRMSE 기준 5.6~16.0%(김완수·조하현, 2019)가 이야기되고 있다. 최근 주목받고 있는 머신러닝의 경우는 MAPE 기준 2.4~45.9% 등이 예측정확도로 언급되고 있다(이강혁·김우재, 2016; Zhang et al., 2018).

이와 같은 태양광예측의 불확실성으로 인한 발전계획량과 실제 발전량 간 차이에 대응하기 위해서는 유연성자원에 대한 중요성은 더욱 커질 것으로 보인다. 유연성자원은 계통운영 시 급작스러운 수요변동에 대응하기 위해 필요한 양수나 LNG와 같은 발전설비를 의미하며, 중장기 설비계획 수립 시 현재의 경제성 중심의 전원믹스로부터 변동성과 불확실성을 고려한 새로운 형태의 포트폴리오로 중심을 이동시킬 필요가 있다는 것을 의미한다. 김두천 외(2019)는 태양광 및 풍력발전기의 갑작스러운 출력변동에 대응하기 위한 LNG와 같은 추가적인 백업설비 확보비용으로 2030년 기준 7.6조원이 필요할 것으로 주장하였다.

또한 재생에너지 예측에 대한 불확실성은 추가적인 예비력을 필요로 하는데, 김완수 외(2020)는 수요와 재생에너지 예측오차로 인하여 추가적으로 필요한 예비력 규모가 2030년 기준 2.9GW에 달할 것이라고 주장하였다. 이러한 예측오차는 과다 또는 과소형태로 나타나므로, 기존의 발전기 고장에 따른 발전력의 감소 및 수요증가에 대응하기 위해 확보해왔던 증발자원의 예비력만이 아닌 예측대비 과다출력으로 인한 수요감축에 대응하기 위한 감발자원의 예비력 확보도 함께 고려해야 한다.

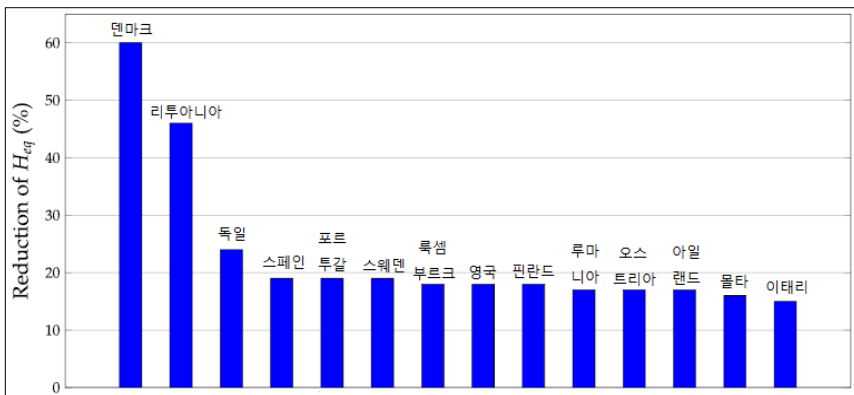
2. 계통안정성 저하

전력은 일반적인 재화와 달리 수요와 공급의 수급균형이 빛의 속도로 이루어지는 특성이 있다. 또한, 현재까지도 계통안정성 및 경제성을 확보한 전력저장 수단이 마땅치 않아 실시간 수요변동을 공급으로 맞추어가는 특성이 있다. 이러한 실시간 수급균형에 대한 감시지표 중 하나로 사용하는 것이 주파수이다. 우리나라의 전력계통 주파수는 60Hz로 계통안정성 확보를 위하여 정부 고시를 통하여 정상시에는 $\pm 0.2\text{Hz}$ 범위를 유지하도록 전력거래소에 대하여 역무를 부여하고 있다(산업통상자원부, 2019).

일반적으로 모든 발전기는 이러한 60Hz에 맞추어 동기화하여 회전한다. 따라서 주파수가 하락할 경우 1차적으로 발전기 내부에 축적되어있는 운동 에너지를 활용하여 계통에 관성을 제공한다. 하지만 회전관성이 존재하지 않는 인버터 기반의 재생에너지 확대는 발전기 탈락 또는 수요 및 발전출력 급변 시 이를 순간적으로 받쳐줄 관성이 존재하지 않아 점차 계통전체의 강건성이 하락하는 현상으로 이어진다. 이러한 전력계통의 강건성 하락은 대용량 발전기 고장 시 과도한 주파수 하락 현상과 관성부족으로 인한 주파수 유지가 불가능해지는 현상을 일으키며, 이에 따라 순차적으로 발전기가 탈락하는 cascading 현상으로 전체 계통이 무너지는 black-out 현상이 발생할 수 있다.

재생에너지 확대에 따른 계통의 약화 현상은 유럽에서도 두드러지게 나타나고 있는데, 1996년부터 2016년까지 20년 동안 재생에너지 확대에 인하여 평균적으로 약 20% 수준의 계통관성 하락현상이 나타나고 있으며 이에 대응하기 위한 가상관성의 확보가 시급한 상황이다(Fernández-Guillamón et al., 2019). <그림 6>은 2016년 기준 EU 28개국 중 20년 간 계통관성 하락률이 15% 이상 하락한 국가를 나타내고 있다. 이 가운데 덴마크의 경우는 재생에너지 비중이 전체 발전량의 60% 이상을 차지함에 따라 EU국가 중 가장 크게 계통관성이 하락하여, 1996년 대비 2016년 약 60%의 하락률을 보였다.

<그림 6> 2016년 EU 내 국가별 계통관성 하락율 : 1996년 대비(Decreased system inertia by country in the EU in 2016: compared to 1996)



출처: Fernández-Guillamón et al.(2019).
Source: Fernández-Guillamón et al.(2019).

또한 점차 재생에너지가 증가함에 따라 함께 늘어나고 있는 계통운영에 대한 불확실성 대응이 중요한 이슈가 될 전망이다. 기상변화에 따라 출력수준이 좌우되는 재생에너지의 특성으로 점차 태양광설비가 증가함에 따라 기상변화에 따른 불확실성을 계통운영에 그대로 안고 가는 문제가 발생한다. 또한, 전력망이 좁은 한반도에 국한된 고립계통을 가진 우리나라에는 현재 운영방식으로는 앞으로 태양광이 확대될 경우 계통안정성 확보에 한계가 발생할 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 연계계통을 운영하는 유럽의 경우는 보다 계통망을 확대하여 재생에너지 영향을 분산시키기 위한 “송전망 개발 10개년 계획”을 유럽계통운영자인 ENTSO-E가 수립하고 있으며, 이를 통하여 유럽 전체 전력망 연결을 통한 발전비용 절약 및 계통안정도 향상을 확보할 것으로 기대하고 있다(에너지경제연구원, 2012).

IV. 태양광발전 전력시스템 영향에 대한 대응방안

1. 수급안정을 위한 유연성 자원 확보

IEA et al.(2019)은 2018년 현재 우리나라를 재생에너지로 인한 영향이 시스템에 나타나지 않는 1단계 국가로 분류하고 있으나, 실제로는 2017년부터 낮 시간대 태양광발전출력 증가로 인한 수요감축 효과로 여름철 최대전력이 하루 중 가장 더운 14시에서 15시 사이가 아닌 16시에서 17시로 이동하는 수요패턴 변화가 발생하고 있어 이미 2단계 수준에 진입한 상황이다. 특히 코로나19로 인한 사회적 격리로 산업용부하가 급감한 2020년 봄철에는 주말마다 발전기 최저출력 수준까지 떨어지는 duck curve 현상이 심화되고 있어, 유연성 자원에 대한 필요성은 점차 증가하고 있다. 더욱이 『제3차 에너지기본계획』의 목표인 2040년 최대 35%까지 재생에너지의 발전비중을 높이면 사실상 IEA가 분류하고 있는 4단계 수준에 진입하게 되어 계통유연성 확보가 수급관련 요소 중 가장 중요한 이슈가 될 것으로 판단된다. 이러한 측면에서 『제8차 전력수급기본계획』의 2030년 LNG의 발전량 비중인 18.8%는 2018년 OECD의 천연가스 발전량 비중인 27.9%에 비하면 그 비중이 낮은 편이다. 더욱이 상대적으로 유연성이 떨

어지는 자원인 석탄 36.1%까지 함께 고려한다면, 우리나라의 2030년 발전량 비중 전원별 포트폴리오는 오히려 재생에너지 출력비중이 높지 않았던 2000년의 OECD와 유사한 점이 있다.

현재 우리나라는 온실가스 절감 차원에서의 재생에너지 확대정책으로 RPS와 FIT 등을 혼합하여 적극적으로 추진하고 있는 반면, 제어가 불가능하고 출력변동성이 높은 재생에너지 확대에 따른 계통유연성에 대해서는 중장기 설비계획 차원이나 시장 투자신호 제공 차원에서 아직 고려가 미흡한 상황이다. 특히 재생에너지 확대에 대한 투자신호가 상대적으로 보다 경직적인 자원인 소규모 태양광에 유리한 형태로 되어있어, 2019년 7월말 기준 태양광발전 사업허가의 75.9%가 100kW 미만 소규모 설비에 집중되는 등 전력시스템의 강건성은 지속적으로 훼손되고 있는 상황이다.⁸⁾

〈표 2〉 태양광에너지 REC 가중치 적용: 일반부지 설치경우 (Applying solar energy REC weights: In case of general site installation)

	설치용량		
	100kW미만	100kW부터	3,000kW초과부터
REC 가중치	1.2	1.0	0.7

출처: 한국에너지공단(2019b)을 재구성하였음.

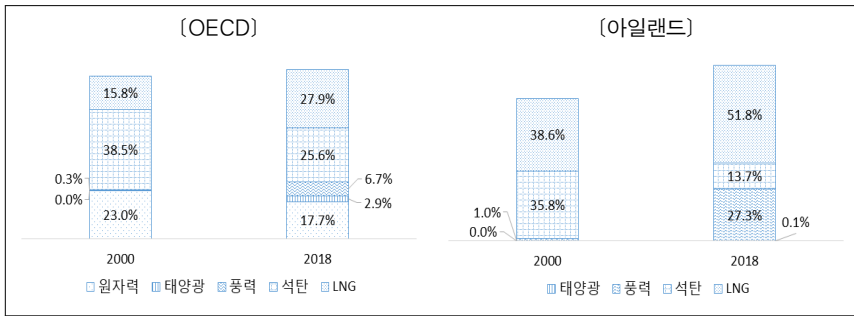
Source: Constructed from Korea Energy Agency(2019b).

안재균(2017)은 선진국의 전력계통 유연성강화 방법으로 전력시장제도 개선과 계통운영·예측의 고도화, 유연성 자원 확보 메커니즘 등을 지적하였다. 전력시장제도 개선은 주로 정산주기 단축을 통하여 응동성능이 우수한 자원으로의 인센티브 제공이 주요 목적이며, 전력계통 운영 및 예측 고도화는 재생에너지 변동제어를 최소화하는 것이 목적이다. 또한, 유연성자원 확보 메커니즘은 수요자원과 ESS 같은 비발전자원 활용과 증감발전원 확보, ESS 사용 의무화 등을 통하여 충분한 유연성 자원확보를 목적으로 한다. 이러한 선진국의 계통 유연성 강화노력의 증거는 IEA 자료를 통해서 알 수 있는데, OECD 국가들의 연간 발전량 중 발전원별 점유율을 비교해보면, 2000년 0.3%였던 태양광과 풍력발전의 점유율이 2018년에 9.6%로 증가함에 따라 전통적인 비유연성 자원인 원자력은 점유율이 23.0%에

8) 지방행정 인허가 데이터개방, <http://localdata.go.kr>, 행정안전부.

서 17.7%로 하락하고 유연성자원인 천연가스의 점유율이 15.8%에서 27.9%로 상승하였다. 특히 높은 재생에너지 점유율과 제한적인 연계계통을 가진 아일랜드의 경우는 풍력발전비중이 2000년 1.0%에서 2018년 27.3%로 증가함에 따라 천연가스 발전비중이 38.6%에서 51.8%까지 증가하여 유연성자원에 대한 중요성이 두드러지고 있다(IEA, 2019a).

〈그림 7〉 OECD 주요 발전원별 발전비중 비교 : 2000년, 2018년(Comparison of the share of power generation by major OECD power generation sources between 2000 and 2018)



출처 : IEA(2019a)를 기반으로 작성하였음.
Source : Constructed from IEA(2019a).

이러한 유연성 자원을 확보하는 방안으로 Milligan et al.(2015)는 인근 전력시장과의 연계, 에너지시장 거래단위 단축, 시장설계 개선, 수요반응, 전략적 재생에너지 출력제한, 새로운 보조서비스 개설, 기존 발전기 중 유연성 전원 활용, 전력저장장치 등을 제시하였다. 특히 여기서 주목해야 할 부분은 시장거래 단위에 대한 중요성이다.

일반적으로 하루 전의 전력거래 및 정산의 단위는 1시간으로 이루어진다. 이러한 형태의 1시간 단위의 거래 단위는 많은 해외전력시장에서 운영하는 실시간 시장의 거래 단위인 15분 또는 5분과 비교를 할 때 유연성자원과 기저자원 간의 수익 배분에서 보다 기저자원에게 유리한 형태로 이루어지게 된다. 이러한 문제점은 조강욱(2018)도 양수발전과 원자력 만이 참여하는 간단한 예를 통하여 지적한 바 있다. 정승민(2019) 역시 앞으로 4.5GW 규모의 태양광 출력변화가 30분 이내에서 빈번히 발생할 것으로 예상되므로, 전력 거래단위의 축소가 불가피하다고 주장하였다.

Ela et al.(2016)도 전통적인 전력시장 요소 중 유연성자원 확보에 유

리한 제도 중 하나로서 5분 단위 급전 및 5분 단위 정산 제도를 꼽고 있다. 다만 Milligan & Kirby(2010a)에서 지적한 바와 같이 비록 실시간 시장 제도 하에서 증감발 속도가 늦은 기저발전기 대신 응동속도가 빠른 침두발전기가 해당 시간대의 가격을 결정하더라도, 해당 시간대의 가격 상승이 오히려 시장가격결정 발전기인 침두발전기보다 비유연성 자원인 기저발전기의 이익 증가에 유리하게 작용할 수 있다는 점에서 더 많은 검토가 필요한 부분이다.

2. 계통안정성 확보를 위한 인공관성 및 계통확대

회전관성이 존재하지 않는 인버터 기반의 재생에너지 확대에 의한 전력계통의 강건성 하락 현상을 방지하기 위하여 최근 다양한 형태의 인공관성에 대한 연구가 진행되고 있다. Dreidy et al.(2017)과 Fernández-Guillamón et al.(2019)은 재생에너지를 위한 인공관성 및 주파수제어 기술을 태양광발전기와 풍력발전기 기준으로 에너지저장장치의 부착유무에 따라 8가지로 구분하여 제시하였다. 이러한 기술들을 크게 분류해보면 에너지저장장치를 이용한 관성 제공 및 주파수제어 참여 기술들이 한축을 이루고 있으며, 다른 한축으로는 에너지저장장치 없이 계통운영에 참여하는 기술들로 나뉘인다. 태양광의 경우는 인버터를 이용한 출력조정 기술을, 풍력의 경우는 회전체에 저장된 관성을 이용하거나, 블레이드 조정 등을 이용하여 출력을 감소시키는 다양한 부분에서 연구가 진행되고 있다.

최우영 외(2017)는 BESS(Battery Energy Storage System)를 이용하여 화력발전기 수준의 관성응답을 제공하는 연구를 수행하였으며, Gonzalez-Longatt(2016)와 김현태·장성수(2018)는 재생에너지 중 회전관성을 가진 풍력발전기의 출력제어를 통한 계통관성 제공가능성에 대하여 각각 연구하였다.

진행되고 있는 다양한 인공관성 관련 연구 중 풍력발전기의 출력제어를 통한 계통안정성 유지 방안은 손쉽게 적용할 수 있는 기술 중 하나로 보인다. 풍력발전기의 인공관성 제공을 유인하기 위해서는 경제적 인센티브를 제공하기 위한 거래 메커니즘이 필요하다. 하지만, 현재 에너지단독 시장인 우리나라 전력시장에서는 관성제공에 대한 별도의 인센티브가 존재하지 않

아, 대부분의 풍력발전기가 최대출력을 기준으로 운전을 수행하고 있는 형편이다. 다만 태양광과 풍력발전이 전체 설비의 26.9%를 차지하고 있는 제주도의 경우는 2015년부터 2018년까지 총 49회에 걸쳐 3GW 정도의 풍력발전 출력제한을 이미 진행하고 있으며, 그 횟수와 출력제한규모가 매년 증가하고 있는 추세이다(이창우 외, 2019).

현재 제주에서 시행하고 있는 풍력발전 출력제한은 별도의 인센티브 없이 수행하는 강제조치이며, 태양광발전과의 차별에 따른 사업자의 불만이 점차 증가하고 있다. 따라서 앞으로 제한적이거나 중앙급전이 가능한 예비력 자원으로서의 풍력발전 이용을 위해서는 에너지 외의 보조서비스 제공에 대한 충분한 가치평가·대가제공이 필요하며, 이를 위해서는 현재의 에너지시장 외의 별도 보조서비스 시장도입이 필요하다. 재생에너지 계통운영 활용을 위한 방법으로는 앞서서도 기술한 유연성자원에 대한 별도 시장을 운영하는 것도 하나의 방법이 될 수 있으며, 현재 기존 시장참여 발전기들이 당연하게 제공하고 있는 것으로 간주되고 있는 계통관성이나 주파수조정에 대한 서비스에 대하여 충분한 대가를 지불할 수 있는 시장메커니즘 확보가 필요하다.

Zaman(2018)는 17명의 전문가와의 인터뷰와 문헌조사 등을 통하여 재생에너지 확대에 인하여 발생하게 될 계통주파수안정도, 전압안정도, 미소 신호안정도, 증감발용량 등 문제에 대한 해결방안을 기술발전 측면과 계통운영 차원으로 각각 나누어 제시하였다. 기술발전 측면의 해결방안으로 예측정확도 향상과 인버터 기능개선, 스마트그리드 개발, 전력저장장치 기술 개발 등을 꼽았으며, 계통운영 차원에서의 해결책으로는 운영계통망의 확대와 급전시간대의 축소를 제시하였다.

Milligan et al.(2015)과 Zaman(2018)이 제시한 해결방법 중 하나인 계통망 확대에 대해서는 우리나라에서도 여러 연구자가 의견을 제시하고 있다.

조상민 외(2018) 역시 재생에너지 변동 대응을 위한 방법으로 재생에너지 제어 향상과 슈퍼그리드와 같은 전력망의 연계를 제시하고 있으며, 전력망 연계의 선결요건으로 장길수 외(2020)는 한국과 중국, 일본의 계통 연계를 기준으로 국가 간 접속점 인근 설비보강과 연계선 탈락에 따른 추가적인 대비책을 지적하였다. 특히 연계선 탈락에 따른 추가적인 대비책은 현재

제주연계선 탈락을 고려하여 제주지역 내의 발전설비를 상시 운영하는 것과 일맥상통하는 부분이 있다. 제주의 경우도 연계선 문제로 2006년 4월 블랙아웃을 경험하였으며, 2018년 6월에도 진도변환소 문제로 3만여 가구의 동시정전이 발생하기도 하였다. 다만 시뮬레이션 결과 연계전력을 1kWh 증가시킬 때마다 발전비용이 평균 75.76원/kWh 감소하는 장점이 있는 것으로 연구결과 나타났다.

하지만 동북아 슈퍼그리드와 같은 국가 간 전력망 연계는 단순히 기술적 문제만이 아닌 국가차원에서의 정치·경제문제와 연결이 되기 때문에 조심해서 검토할 필요가 있다. 유럽에 대하여 러시아가 가스공급망을 정치적으로 이용한 사례나, 한국전쟁 직전에 북한의 단전사태에서도 볼 수 있듯이 국가 간 전력거래의 정치적 이용가능성이 상존하므로, 이에 대응하기 위한 에너지자립 문제도 고민이 필요한 선결문제이다.

V. 전력계통 및 수급안정성을 위한 정책 제언

현재 우리나라의 전력시장은 소비자가 직접 참여하는 소매전력시장이 아닌 발전회사와 판매회사가 거래에 참여하는 도매전력시장이며, 다수의 발전회사가 존재하는 공급 측과는 달리 수요측은 한국전력공사가 단일 구매자로 존재하는 구매독점형태로 이루어져있다. 또한 우리나라 전력시장은 의무적 시장으로 용량이 20MW을 초과하는 모든 상업용 발전기는 전력시장을 통해서만 거래가 가능하며, 독점구매자인 한전의 시장지배력 행사를 차단하기 위하여 한전의 구매입찰을 금지시키고 있다. 대신 전력수급 책임기관인 전력거래소의 예측치를 수요입찰량으로 간주하고, 발전기별로 회계적 방법으로 추산된 발전비용과 공급가능곡선을 입찰하는 형태로 에너지를 거래하고 있다. 뿐만 아니라 앞에서 설명한 발전비용기반의 에너지시장과 설비투자비용 회수를 위한 용량시장으로 이원화된 시장으로 운영되고 있다(남일충, 2012).

우리나라 전력시장은 전력시장가격이 실제 계통환경 하에서의 발전기운전과 동떨어진 이상적인 환경 하에서의 발전계획 기준으로 정해진다. 따라서 계통운영자는 이러한 전력시장에서 작성된 발전계획 대신 실제 계통환경

을 반영한 계통운영발전계획을 별도로 수립하고 이에 따라 발전기의 기동 및 정지, 출력 증감발을 지시하고 있다.

〈표 3〉 가격결정발전계획과 운영발전계획의 비교(Comparison between pricing generation schedule and operational unit commitment schedule)

구분	용도	제약조건	계획기간
가격발전계획	익일 시장가격결정	발전기특성(증감발출, 최소운전수준, 최소정지시간, 최소운전시간 등)	32시간 (전일 19시~)
운영발전계획	익일 기동정지계획	발전기특성 및 계통제약, 자기계약(열공급, 연료계약 등)	24시간 (당일 0시~)

〈표 3〉에서 나타나있는 계통제약과 자기제약을 반영하지 않은 가격결정 발전계획을 통하여 정해진 시장가격은 계통운전과 괴리되어 있어, 계통의 효율적으로 운영을 위한 시장신호 제공을 위하여 존재하는 전력시장의 존재 가치를 크게 훼손시키고 있다.

예비력의 경우는 정부의 신뢰도 고시에 따라 평상시 계통주파수 유지를 위하여 사용되는 주파수제어예비력과 고장발생시 계통주파수 회복을 위하여 사용되는 주파수회복예비력을 계통운영 시 확보하고 있으며, 이를 위하여 발전설비의 출력을 일정규모 감소시켜 운전하고 있다. 이러한 발전기 출력 감소에 따른 기회비용은 제약비발전정산금 형태로 에너지시장을 통하여 회수하며, 이때 회수되는 기회비용은 일반적으로 LNG 발전기 등의 침두발전기 발전비용 기준으로 결정된 시장가격과 자신의 발전비용 간의 차이로 나타나므로 상대적으로 연료비가 낮은 석탄발전기가 유리한 상황이 발생한다. 따라서 비용기반 에너지시장을 통해 예비력가치를 보상할 경우 Godoy-Gonzalez et al.(2020)이 지적한바와 같이 예비력공급에 따른 보상이 침두발전기보다 기저발전기에게 유리하게 주어진다.

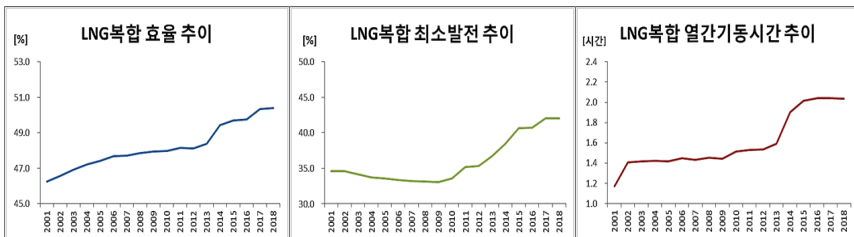
이러한 비용기반 에너지시장의 시장신호는 모든 발전기의 제1목표가 자신의 비용을 최대한 절감하여 발전순위, 즉 merit-order를 낮추는 것이 되며, 이러한 에너지비용 절감에 대한 시장신호는 공급로케도 값비싼 유연성 자원보다는 값싼 경직성자원에 대한 선호로 나타나 점차 유연성자원의 퇴출로 연결이 된다.⁹⁾ 이러한 경직성자원에 대한 전력시장에서의 선호현상은

9) 유연성자원은 계통상황 변화에 따라 기동·정지와 출력변동이 빠르게 일어나는 발전기 자원들로 양수나 가스터빈, 수요반응자원 등을 의미하며, 일반적으로 경직성자원인

우리나라에서도 이미 가시화되고 있다. 기존 발전설비 중 대표적인 유연성 자원인 가스터빈 발전기가 점차 사라지고 복합화력 발전기만 남는 현상이 그것이다.

본래 복합화력 발전기는 1개 또는 다수의 가스터빈 발전기와 스팀터빈 발전기가 결합된 형태로 구성되며, 운전방식에 따라 가스터빈 단독모드 운전과 가스터빈-스팀터빈 복합모드 운전이 모두 가능한 발전기이다. 그러나 우리나라의 경우 전력시장이 도입된 이후 대부분의 복합화력 발전기들이 발전효율증대를 위하여 가스터빈 단독모드 운전이 불가능하도록 설비를 개조하였다. 이에 따라 복합화력 발전기들의 발전효율은 점차 상승한 반면 예비력 대응자원으로서의 중요한 요소인 최소발전 수준 역시 전반적으로 상승하여, 예비력 확보를 위하여 보다 많은 규모의 발전기를 기동해야하는 상황이다. 또한 복합화력 발전기의 기동시간도 효율개선에 따라 증가하고 있어, 조속기동 예비력으로서의 자원가치도 점차 상실하고 있다.

〈그림 8〉 LNG 복합발전기의 효율 대비 출력유연성 추이(Trend of output flexibility compared to efficiency of LNG combined cycle generator)



출처 : 전력거래소 내부자료를 이용하여 구성하였음.

Source : KPX internal data.

앞으로 우리나라 전력산업에서의 유연성 자원을 유인하기 위해서는 충분한 시장신호가 뒷받침되어야 한다. 현재의 하루 전 1시간 단위의 이상적인 계통상황을 가정한 비용기반 비계약 에너지시장은 값싼 경직성자원에 대한 선호도를 높이는 방향으로 신호를 주고 있어, 유연성자원에 대한 올바른 시장신호를 제공하지 못하는 것은 〈그림 8〉과 같이 이미 증명된 상황이다. 또한 재생에너지 확대에 따른 계통안정도 확보방안으로 인공관성과 함께 제시되고 있는 동북아 슈퍼그리드와 같은 국가 계통망의 연계문제도 북한문제

석탄이나 원자력 보다 발전비용이 높은 경향성을 가진다.

및 국제정세와 얽혀있어 단순하게 해결될 문제도 아니다. 따라서 현재의 전력시스템을 기준으로 제시된 문제해결을 위하여 다음과 같은 몇 가지 제언을 하고자 한다.

첫 번째로 전력시장에서의 유연성자원에 대한 시장신호 제공을 위하여 현재 비계약기반 하루 전 1시간 단위의 에너지시장을 제약을 반영한 시장으로 개편하고, 하루 전 시장 외에 거래일 당일시장과 실시간 시장 등을 포함하는 다단계 거래시스템 도입이 필요하다. 현재의 비계약기반 하루 전 전력시장은 전력을 수송하기 위한 도로의 역할을 하는 계통망의 혼잡문제를 가격발전계획에 반영하고 있지 않아 하루 전에 이미 혼잡으로 발전을 할 수 없는 것이 충분히 인지된 발전기들도 발전계획에 반영되며, 정산과정에서는 혼잡에 따른 기회비용을 보장해주는 등 계통상황과 상관없이 발전비용이 낮은 기저발전기에게 유리한 거래제도이다. 따라서 효율적인 계통운영의 수단으로서의 거래제도 운영을 위해서는 실제 계통상황을 하루 전부터 당일, 실시간까지 연속적으로 발전계획에 반영할 필요가 있다. 이를 통하여 전력시장 참여기관들은 거래시점에 대한 수급불확실성을 시간흐름에 따라 순차적 거래를 통하여 해소하게 되며, 계통운영자 역시 미래 불확실성에 대한 대응 자원규모를 발생확률을 고려하여 점차 현실화시키는 방법으로 계통위험에 대한 회피를 제도적으로 확보할 수 있다. 김완수 외(2020)도 이러한 발생확률을 고려할 때 하루전 발전계획 단계에서 현행 예비력수준보다 많은 규모의 예비력이 필요하며, 이를 순차적 거래를 통하여 현실화시키는 것이 보다 효과적일 것이라고 주장하였다.

두 번째로 현재 하루 전 전력시장 및 발전기 기동정지계획 수립에 적용되고 있는 1시간의 거래단위를 당일시장이나 실시간시장을 통하여 15분 또는 5분 단위로 축소시킬 필요가 있다. 현재의 전력시장가격은 MIP(Mixed Interger Programming) 기반의 e-terracommit을 우리나라 전력시장에 맞도록 조정한 발전계획프로그램을 통하여 1시간 단위로 결정되고 있다(Hur and Jeong, 2009). 이렇게 1시간 단위로 결정되는 발전계획에서는 1시간 동안의 평균적인 수요변화에 대응하기 위한 발전기의 증발 및 감발능력 만이 반영되므로, 1시간 내에 급격히 발생하는 수요변화에는 대응가능여부가 불투명하다. 이러한 1시간 단위의 발전계획의 한계는 시간대별 양수발전 실적을 보면 알 수 있는데, 양수발전 실적이 수요가 가장 높은 시간대

가 아닌 수요패턴이 급변하는 아침시간대와 오후시간대에 집중되고 있어 에너지가 아닌 주파수제어 용도로 주로 사용되고 있음을 알 수 있다. 따라서 앞으로 재생에너지가 확대됨에 따라 발생하는 변동성과 불확실성 대응을 위해서는 1시간 내의 변동을 발전계획에 포함시킬 필요가 있다(조주현 외, 2017). 또한 거래단위의 축소는 기저발전원에 비하여 발전비용이 높은 속응성 자원에 대한 전력시장 유인과 역할 강화에 도움이 될 것으로 판단된다. 이러한 유연성자원 확보를 위한 거래단위 축소의 필요성은 이미 여러 전문가들도 지적하고 있는 사항이다(정승민, 2019; 조강욱, 2018; Ela et al., 2016; Milligan et al., 2015).

세 번째로 기존의 에너지시장 외에 예비력에 대한 기회비용의 거래가 이루어지는 예비력시장 개설이 필요하다. 조상민 외(2018)도 재생에너지 보급에 따른 수급안정을 위하여, 예비력 요구량 확대, 유연성 자원확보의 의무화 및 시장참여 유도를 위한 제도개선, 보조서비스 시장개설, 당일 발전 계획 등을 고려할 필요가 있다고 지적하고 있다. 미국 캘리포니아 ISO와 MISO에서 유연성자원 확보를 위하여 도입하고 있는 5분 단위 증감발 예비력 시장도 태양광발전설비와 같은 재생에너지 확대에 대한 대응방안으로 검토할 필요가 있다. 증감발 예비력시장은 향후 5분 뒤에 예상되는 수요변동 및 재생에너지 증감발량 등을 고려한 수급균형 확보를 위하여 필요한 긴급응동이 가능한 자원에 대한 별도 예비력 시장이며, 기존의 상정사고나 주파수 변동을 고려한 예비력시장과는 차이가 존재한다. 다만 기존의 일반적인 예비력시장과 유사하게 증감발 예비력시장 역시 별도의 예비력 가치에 대한 가격입찰이 없이 예비력 제공을 위하여 발생하는 기회비용 기준으로 상품의 거래가 가능하다(Navid and Rosenwald, 2012).

〈표 4〉 미국 ISO 증감발예비력 상품의 비교(Comparison of US ISO up and down ramping reserve products)

구분	MISO	CAISO
거래상품	Up & Down Ramp Capability	Flexible Ramping Product
시간요건	10분	15분, 5분
용량요건	불확실성 표준편차 예측오차 + 2.5	불확실성 예측오차 95% (+ 95th % 구간)

출처: 전력거래소(2017) 중 일부를 발췌.

Source: Excerpts of a part from Korea Power Exchange(2017).

Godoy-Gonzalez et al.(2020) 역시 증감발 예비력서비스를 에너지시장과는 별도로 운영하여야 기저발전기가 유연성 자원보다 이익을 보는 불균형 문제를 해결할 수 있다고 주장하였다. 특히 칠레와 같은 비용기반 전력시장 하에서도 증감발 자원확보를 위한 5분 단위 예비력시장은 충분히 작동 가능하며, 증감발 예비력 자원에 대한 기회비용 만으로는 충분한 보상이 부족하다 판단할 경우 옥션형태의 가격입찰도 허용이 가능하다고 주장하였다. 비용기반 예비력시장에서의 비용보상 문제는 유지보수비나 건설비, 환경계약비용 등 다양한 형태로 발생하는 기회비용을 정확하게 평가하는 것이 어려움에 따라 발생하는 문제로 비용기반 전력시장의 문제점으로 종종 지적되는 사항이기도 하다(Munoz et al., 2018; Wolak, 2003).

마지막으로 재생에너지에 대한 계통안정성 확보 책임부여를 위하여 타 발전원과 유사하게 실시간운전정보 제공과 자기 발전량에 대한 책임의무를 요구할 필요가 있다. FERC(2018)는 분산형자원에 대한 계량정보 부재로 인하여 계통안정성에 악영향을 미칠 가능성이 있으며, 계통운영자의 계통상황에 대한 정확한 판단도 어려워질 수 있다는 점을 지적하였다. 대용량 재생에너지에 대해서는 예측을 통한 전력계획량을 입찰하도록 제도화할 필요가 있다. 현재 전기사업법과 시행령에서는 1MW 이상의 태양광발전에 대해서 전력시장에서 거래를 하도록 하고 있다(법제처, 2019; 법제처, 2020). 다만 전기사업법 상의 우선구매원칙에 대한 보수적인 적용으로 현재의 전력시장운영규칙에서는 별도의 입찰행위없이 발전량 전량을 우선 구매하는 형태로 거래가 이루어지고 있다(전력거래소, 2020). 하지만 법률상에서의 우선구매조건은 '전력시장운영규칙으로 정하는 바에 따라 우선적으로 구매할 수 있다.'라는 형태로 되어있는 점과, 전력시스템이 참여전력설비들의 협력을 통하여 안정성이 확보되는 점을 고려할 때 앞으로 점차 규모를 늘려가고 있는 태양광발전에 대한 자기책임에 대한 강화는 피할 수 없다고 판단된다. 또한 IEA(2017)도 재생에너지 확대수준이 2단계에 들어갈 경우 가장 중요한 기술요건으로 재생에너지 예측을 강조하고 있어, 태양광발전 사업자의 발전량 예측결과 제공을 통하여 자기책임의 완성을 유도할 필요가 있다.

VI. 결 론

전 지구적인 온난화 대응을 위하여 2016년부터 모든 나라가 참여하고 있는 파리협약의 NDC 달성을 위하여 우리나라를 비롯한 많은 국가들은 재생에너지 확대를 위한 여러 가지 정책수단을 사용하고 있다. 재생에너지 자원이 척박한 우리나라의 경우 재생에너지들의 grid parity 달성이 현재 불가능한 상황에서 여러 가지 지원책을 고민하고 있다. 과거 2002년부터 FIT를 도입하였으나, 막대한 재정투입에도 당초 목표를 달성하지 못하고 2012년부터 RPS로 지원정책을 전환하였다. 또한 2018년부터 한시적으로 소규모 태양광을 대상으로 FIT를 도입하여 재생에너지 확대를 위한 다양한 정책수단을 동원하고 있다.

본 연구에서는 이러한 FIT와 RPS 간의 장단점에 대하여 개략적으로 비교하였으며, 해외의 경우 FIT 제도를 통하여 태양광발전설비 확대현상이 나타나고 있음을 알아보았다. 또한 이미 충분한 규모의 태양광을 확보한 나라들의 경우는 지원정책을 FIT에서 FIP나 옥션으로 전환하고 있는 점도 지적하였다.

또한 급격한 태양광발전 보급에 따라 우리나라도 미래 맞닥뜨리게 될 여러 가지 현상에 대하여 검토해보았다. 태양광설비 급등에 따른 전력시스템의 영향 중 수급불안요소로는 duck curve 현상에 따른 최저부하 수준하락과 수요패턴 변화에 따른 급격한 수요 증감발, 태양광예측의 불확실성 등에 따른 기저설비에 대한 비효율적인 운영, 유연성자원에 대한 필요성 등을 들었다. 계통불안요소로는 회전관성이 존재하지 않는 인버터 기반의 재생에너지 확대에 의한 계통관성 부족으로 계통전체의 강건성이 하락하는 현상을 지적하였다.

또한 이러한 각각의 문제를 해결하기 위한 방법으로 수급불안에 대해서는 유연성 자원 확보방안을 해결책으로 제시하였으며, 유연성자원에 대한 전력시장 진입유도를 위하여 거래단위를 1시간보다 짧은 15분에서 5분으로 축소해야 할 필요성에 대하여도 논하였다. 또한 계통안정성에 대해서는 인버터 기반의 전원체제에서 ESS나 풍력의 회전체 등을 이용한 인공관성 확보가 필요하며, 이러한 계통서비스 확보를 위해서 현재의 에너지 중심 시장체제에서 다양한 보조서비스 중심 시장체제로 패러다임을 전환해야함을 이야기

하였다.

끝으로 태양광발전 확대에 대한 제언으로 다음의 4가지 방안을 제시하였다. 첫 번째로 하루 전-당일-실시간으로 이어지는 다중거래체제 도입을 제시하였으며, 두 번째로 속응성 자원유도를 위한 거래단위의 축소를, 세 번째로 기저발전기의 무임승차를 배제하기 위하여 에너지시장과 예비력시장을 구분하는 것이 필요하다는 것을 지적하였다. 마지막으로 태양광의 실시간 운전정보제공과 자기 발전량에 대한 책임의무 부여를 방안으로 제시하였다.

본 연구는 이러한 논의 등을 통하여 앞으로 재생에너지 확대와 함께 우리나라 전력시스템이 발전해야할 방향을 개략적으로나마 제시하였다는 점에서 함의를 지니고 있다. 하지만 본 연구에서는 정책적 방향만을 제시하고 있어, 앞으로 다양한 형태의 우리나라 상황에 적합한 실증연구가 필요하며 이를 통하여 보다 실질적인 논의가 진행될 것으로 판단된다. 본 연구에서 보다 진척된 실증적인 논의들은 앞으로 지속적인 연구를 통하여 해결하고자 한다.

투고 일자: 2020. 5. 21. 심사 및 수정 일자: 2020. 6. 4. 게재 확정 일자: 2020. 6. 15.

◆ 참고문헌 ◆

- 김두천·김광진·박중구 (2019), “태양광·풍력 발전 증가에 따른 한국의 전력시스템 내 통합비용에 관한 연구,” 『에너지공학』, 28(3), 42-54.
- Kim, D., K. Kim and J. Park (2019), “A study on the Integration Costs in Korean Electricity System in Accordance with Increasing Solar and Wind Power Generation,” *Journal of Energy Engineering*, 28(2), 42-54. (written in Korean)
- 김완수·조하현 (2019), “지역별 기상자료를 고려한 태양광발전출력 모형 연구,” 『전기학회 논문지』, 68(9), 1109-1117.
- Kim, W. and H. Jo (2019), “PV Generation Modeling using Regional Weather Factors for Dispatch Planning,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 68(9), 1109-1117. (written in Korean)
- 김완수·옥기열·조하현 (2020), “정상상황에서의 확률분포를 고려한 운영예비력

- 소요량 추정,” 『전기학회 논문지』, 69(6), 861-868.
- Kim, W., K. Ok and H. Jo (2020), “Operational Reserves Requirement Estimation Using Probabilistic Approach,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 69(6), 861-868. (written in Korean)
- 김창수·정다연 (2018), “신재생 보급 확대에 따른 순부하의 변동성과 기저부하 영향,” 『대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회』, 218-220.
- Kim, C. and D. Jung (2018), “The Effect of Renewable Generation Expansion on net Load Variability,” *Proceedings of the KIEE*, 218-220. (written in Korean)
- 김헌태·장성수 (2018), “3020 신재생에너지 정책의 성공적 달성을 위한 전력계통 안정화 핵심기술 개발 방향,” 『전기학회 논문지』, 67(2), 149-157.
- Kim, H. and S. Jhang (2018), “Key Technologies for Stabilization of Power System for Successful Achievement of 3020 Renewable Energy Policy,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(2), 149-157. (written in Korean)
- 남일충 (2012), “전력산업에 대한 경쟁정책,” 『연구보고서』, 2012(02), 한국개발연구원.
- Nam, I. (2012), “Competition Policy for the Electricity Industry of Korea,” *Research Report*, 2012(02), Korea Development Institute. (written in Korean)
- 명호산·김형철·강남호·김영환·김세호 (2018), “제주지역 풍력발전 및 태양광발전의 전력계통 부하기여 분석,” 『한국태양에너지학회 논문집』, 38(1), 13-24.
- Myung, H., H. Kim, N. Kang, Y. Kim and S. Kim (2018), “Analysis of the Load Contribution of Wind Power and Photovoltaic Power to Power System in Jeju,” *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 38(1), 13-24. (written in Korean)
- 법제처 (2002), 『대체에너지개발및이용·보급촉진법』.
- Ministry of Government Legislation (2002), *Act on the Promotion of the Development and use of Alternative Energy*. (written in Korean)
- _____ (2019), 『전기사업법』.
- Ministry of Government Legislation (2019), *Electric Utility Act*. (written in Korean)
- _____ (2020), 『전기사업법 시행령』.

Ministry of Government Legislation (2019), *Enforcement Decree of the Electric Utility Act*. (written in Korean)

산업통상자원부 (2002), “대체에너지 개발 및 보급활성화 기틀 마련,” 자원기술과 보도자료, 3. 7.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2002), “Laying the Foundation for the Development and Supply of Alternative Energy,” Press release. (written in Korean)

_____ (2015), 『제7차 전력수급기본계획』.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2015), *The 7th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand*. (written in Korean)

_____ (2017a), 『재생에너지 3020 이행계획(안)』, 12. 20.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2015), *Renewable Energy 3020 Initiative*. (written in Korean)

_____ (2017b), 『제8차 전력수급기본계획』.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2017b), *The 8th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand*. (written in Korean)

_____ (2018a), “소규모 태양광 발전사업자를 위한 한국형 발전차액지원 제도(FIT) 본격 시행,” 신재생에너지정책과 보도자료, 7. 11.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2018a), “Implementation of Korean FIT for Small PV,” Press release. (written in Korean)

_____ (2018b), 『제3차 에너지기본계획』.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2018b), *The 3rd Energy Master Plan*. (written in Korean)

_____ (2019), 『전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준』.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2019), *Standard for Reliability and Electrical Quality of Power System*. (written in Korean)

_____ (2020), 『제9차 전력수급기본계획 워킹그룹 주요 논의결과 브리핑』, 5. 8.

Ministry of Trade, Industry and Energy (2020), *Briefing on Key Discussion Result of Working Group for the 9th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand*. (written in Korean)

신동현 · 임형우 · 조하현 (2019), “태양광 발전의 그리드 패리티 결정요인 분석: 126개국 가정용 태양광을 중심으로,” 『국제경제연구』, 25(1), 39-66.

Shin, D., H. Lim and H. Jo (2019), “Determinants of Solar Grid Parity:

- Based on Household PV of 126 Countries,” *International Economic Journal*, 25(1), 39-66. (written in Korean)
- 안재균 (2017), “신재생에너지 보급 확산을 대비한 전력계통 유연성 강화방안 연구,” 『수시연구보고서』, 17(6), 에너지경제연구원.
- Ahn, J. (2017), “A Study on Strengthening Flexibility of Power System in Preparation for Expansion of Renewable Energy,” *Research Paper*, 17(6), Korea Energy Economics Institute. (written in Korean)
- 에너지경제연구원 (2011), “세계 태양광 시장 및 정책 동향,” 『세계 에너지시장 인사이트』, 11(24), 2-8.
- Korea Energy Economics Institute (2011), “The Trend of World Solar Power Market and Policy,” *World Energy Market Insight*, 11(24), 2-8. (written in Korean)
- _____ (2012), “2020년 유럽 송전망 개발계획,” 『세계 에너지시장 인사이트』, 12(12), 8-11.
- Korea Energy Economics Institute (2012), “The Development Plan for European Transmission Network in 2020,” *World Energy Market Insight*, 11(24), 2-8. (written in Korean)
- _____ (2019a), “증가하는 태양광 발전, 전력망의 새로운 도전: 규슈 전력의 태양광 발전 출력억제 사례,” 『세계 에너지시장 인사이트』, 19(19), 3-15.
- Korea Energy Economics Institute (2019a), “The High Rocketing PV Generation, the New Challenge of Electricity Network: The Case of PV Curtailment in Kyushu,” *World Energy Market Insight*, 19(19), 3-15. (written in Korean)
- _____ (2019b), “2019년 11월 FIT제도 매입기간 만료 이후 일본 태양광발전사업의 전개 방향,” 『세계 에너지시장 인사이트』, 19(39), 3-21.
- Korea Energy Economics Institute (2019b), “The Deployment Direction of Japanese PV Business After Expiration of FIT Since November 2019,” *World Energy Market Insight*, 19(39), 3-21. (written in Korean)
- 오진규 (2018), “주요국의 2030 온실가스 감축목표에 대한 비교분석과 시사점,” 『한국기후변화학회지』, 9(4), 357-368.
- Oh, J. (2018), “Comparative Analysis of the 2030 GHG Reduction Target for Eleven Major Countries and its Implications,” *Journal*

- of Climate Change Research*, 9(4), 357-368. (written in Korean)
- 유향재 (2016), "Post-2020 국가 온실가스 감축목표 평가 및 해외배출권 확보 방안 분석," 『사업평가』, 16(15), 국회예산정책처.
- Ryu, H. (2016), "Evaluation of the Post-2020 Korean GHG Reduction Target and Analysis of Measures to Secure Overseas Emission Rights," *Business evaluation*, 16(15), National Assembly Budget Office. (written in Korean)
- 윤지영 · 최광환 (2017), "EU의 재생에너지 현황과 정책," 『한국동력기계공학회지』, 21(3), 5-11.
- Yoon, J. and K. Choi (2017), "Status and Policy of Renewable Energy in EU," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 21(3), 5-11. (written in Korean)
- 이강혁 · 김우제 (2016), "서포트 벡터 회귀를 이용한 24시간 앞의 태양광 발전량 예측," 『한국정보기술학회논문지』, 14(3), 175-183.
- Lee, K. and W. Kim (2016), "Forecasting of 24 Hours Ahead Photovoltaic Power Output using Support Vector Regression," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, 14(3), 175-183. (written in Korean)
- 이만희 · 박선경 (2017), "OECD 국가의 온실가스 감축공약(NDC)의 비교 분석을 통한 우리나라 온실가스 감축 목표 평가," 『한국기후변화학회지』, 8(4), 313-327.
- Lee, M. and S. Park (2017), "Assessment of Korea's GHG Reduction Targets Through Comparative Analysis of OECD Countries' Nationally Determined Contributions(NDCs)," *Climate Change Research*, 8(4), 313-327. (written in Korean)
- 이수일 · 노재형 · 백철우 (2015), "신재생에너지 보급정책의 효율화 방안 연구," 『정책연구시리즈』, 2015(17), 한국개발연구원.
- Lee, S., J. Roh and C. Baek (2015), "A Study on Efficient Renewable Energy Policy," *Research Report*, 2015(17), Korea Development Institute. (written in Korean)
- 이창우 · 김영환 · 김세호 (2019), "재생에너지 출력제한 최소화 에너지 믹스 및 저감 방안," 『조명·전기설비학회 논문지』, 33(12), 41-48.
- Lee, C., Y. Kim and S. Kim (2019), "Minimization of Renewable Energy Output Limits and Reduction Methods," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*,

- 33(12), 41-48. (written in Korean)
- 임형우 · 조하현 (2017), “RPS 및 FIT 제도가 신재생에너지 보급에 미치는 효과 분석 : 104개국 패널토빗분석,” 『에너지경제연구』, 16(2), 1-31.
- Lim, H. and H. Jo (2017), “Analysis on the Effects of RPS and FIT Policies on the Renewable Energy Supply : Panel Tobit Analysis of 104 Countries,” *Korean Energy Economic Review*, 16(2), 1-31. (written in Korean)
- 전력거래소 (2017), 『2017년 해외 전력시장 동향』.
- Korea Power Exchange (2017), *World Power Market Trend 2017*. (written in Korean)
- _____ (2018), 『지역별 태양광 · 풍력 이용률 및 발전원가 분석』, 신시장개발처.
- Korea Power Exchange (2018), *Analysis of Solar and Wind Power Utilization Rates and Power Generation Costs by Region*. (written in Korean)
- _____ (2020), 『전력시장운영규칙』.
- Korea Power Exchange (2020), *Electricity Market Rule*. (written in Korean)
- 장길수 · 송성윤 · 이수민 · 김성수 · 윤민한 · 정해성 · 윤정원 · 윤필용 · 안대수 · 김명규 (2019), “국가간 전력망 연계시 전력계통 · 시장 영향 및 대응방안 연구,” 『연구과제 최종보고서』, 전력거래소.
- Jang, G., S. Song, S. Lee, S. Kim, M. Yoon, H. Jung, J. Yoon, P. Yoon, D. Ahn and M. Kim (2019), “A Study on the Power System/market Impact and Countermeasure of the International Power Network Connection,” *R&D Report*, Korea Power Exchange. (written in Korean)
- 전영환 · 김성수 · 정해성 외 (2013), “계통신뢰도를 고려한 양수발전기 운영방안에 관한 연구,” 『연구과제 최종보고서』, 전력거래소.
- Chun, Y., S. Song and H. Jung et al. (2019), “A Study on the Operation Method of Pumping Generator Considering System Stability,” *R&D Report*, Korea Power Exchange. (written in Korean)
- 전영환 · 정승훈 · 김성은 · 김우중 (2019), “미래 신재생 변동성을 고려한 실시간 운영예비력 확보 전략 연구,” 『연구과제 최종보고서』, 전력거래소.
- Chun, Y., S. Jung, S. Kim and W. Kim (2019), “A Study on the

- Strategy for Securing Real-time Operational Reserve Considering Variability of Renewable in the Future.” *R&D Report*, Korea Power Exchange. (written in Korean)
- 전우영 · 조상민 · 조일현 (2019), “태양광 및 풍력 확률모형을 이용한 2030 재생 에너지 순수요 불확실성 추정 연구,” 『신재생에너지』, 15(4), 28-38.
- Jeon, W., S. Cho and I. Cho (2019), “Estimating the Uncertainty of Net Load of 2030 Renewable Generation,” *New and Renewable Energy*, 15(4), 28-38. (written in Korean)
- 정승민 (2019), “전력수급계획을 위한 국내 태양광 일사량 데이터 분석,” 『차세대 융합기술학회논문지』, 3(3), 125-131.
- Jung, S. (2019), “An Analysis about Domestic Irradiation Statistic for Plan on Electricity Demand and Supply,” *Journal of Next-generation Convergence Technology Association*, 3(3), 125-131. (written in Korean)
- 정영범 · 김길신 · 박창호 · 윤용범 (2011), “발전기 출력특성을 고려한 최적전원구성 연구,” 『조명 · 전기설비학회 논문지』, 25(10), 28-37.
- Jung, Y., K. Kim, C. Park and Y. Yoon (2011), “A Study of Optimal Fuel-mix Considering Power Generation Operation,” *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 25(10), 28-37. (written in Korean)
- 조강욱 (2018), “신재생에너지 3020의 도전과 전력시장 개선을 통한 응전,” 『전기저널』, 502, 23-32.
- Cho, K. (2018), “The Challenge of Renewable Energy 3020 and Reaction by Improving the Electricity Market,” *Journal of Electrical World Monthly Magazine*, 502, 23-32. (written in Korean)
- 조상민 · 조일현 (2018), “변동성 재생에너지 확대에 대비한 계통안정화 방안 연구,” 『기본연구보고서』, 18(28), 에너지경제연구원.
- Cho, S. and I. Cho (2018), “A Study on the Stabilization of System for the Expansion of Variable Renewable Energy,” *Research Paper*, 18(28), Korea Energy Economics Institute. (written in Korean)
- 조주현 (2017), “전력 저장장치 특성을 반영한 합리적 운영예비력 제도 및 보상방안에 대한 연구,” 『기본연구보고서』, 17(23), 에너지경제연구원.
- Cho, S. (2017), “A Study on the Reasonable Operational Reserve and Compensation Mechanism Reflecting the Characteristics of

- Energy Storage System,” *Research Paper*, 17(23), Korea Energy Economics Institute. (written in Korean)
- 조하현 · 임형우 (2017), “신재생에너지 보급과 경제성장의 비선형 동태패널분석,” 『국제경제연구』, 23(2), 31-66.
- Jo, H. and H. Lim (2017), “Nonlinear Dynamic Panel Analysis of the Relationship between Renewable Energy Expansion and Economic Growth,” *International Economic Journal*, 23(2), 31-66. (written in Korean)
- 최우영 · 권한나 · 국경수 · 김동현 · 백남길 (2017), “국내 FR용 BESS의 전력계통 관성응답 보상효과 분석,” 『대한전기학회 하계학술대회』, 176-177.
- Choi, W., H. Kwon, K. Kook, D. Kim and N. Paik (2017), “Compensating Effect Analysis of BESS for FR on the Inertia Response of Korean Power System,” *Preceedings of the KIEE*, 176-177. (written in Korean)
- 최현정 (2015), “Post-2020 온실가스 감축목표의 문제점: 한국 INDC의 평가,” 『Issue brief』, 아산정책연구원.
- Choi, H. (2015), “Post-2020 GHG Reduction Target : Evaluation of INDC in Korea,” *Issue Brief*, The ASAN Institute for Policy Studies. (written in Korean)
- 환경부 (2018), “2030 온실가스 감축 로드맵 수정안 및 2018~2020년 배출권 할당계획 확정,” 기후경제과 보도자료, 7. 24.
- Ministry of Environment (2018), “The Revised Plan of the National Roadmap for Greenhouse Gas Reductions by 2030 and the Plan for the National Greenhouse Gas emission Permit Allocation from 2018 to 2020 are finalized,” Press release. (written in Korean)
- 한국에너지공단 (2019a), 『2018년 신·재생에너지 보급통계』, 국가통계 승인(협의)번호 제337001호.
- Korea Energy Agency (2019a), *New and Renewable Energy Supply Statistics 2018*. (written in Korean)
- _____ (2019b), 『공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙』.
- Korea Energy Agency (2019b), *Rules on the Issuance of Supply Certificates and the Operation of the Transaction Market*. (written in Korean)
- 한국전기연구원 (2009), “신재생에너지 의무할당제(RPS) 국내운영방안 수립.”

- Korea Electrotechnology Research Institute (2009), "Establishment of Domestic Operation Plan for RPS." (written in Korean)
- 한국전력공사 (2019), 『2018년 한국전력통계』.
- Korea Electric Power Corporation (2019), *Statistics of Electric Power in Korea 2018*. (written in Korean)
- 행정안전부, 『지방행정 인허가 데이터개방』. <http://localdata.go.kr>.
- Ministry of the Interior and Safety, *Local Administrative Authorization Data Open*. <http://localdata.go.kr>. (written in Korean)
- Andrychowicz, M., B. Olek and J. Przybylski (2017), "Review of the Methods for Evaluation of Renewable Energy Sources Penetration and Ramping Used in the Scenario Outlook and Adequacy Forecast 2015. Case Study for Poland," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 703-714.
- California Independent System Operator (2016), *What the Duck Curve Tells us about Managing a Green Grid*, Fast Facts.
- Das, U. K., K. S. Tey, M. Seyedmahmoudian, S. Mekhilef, M. Y. I. Idris, W. V. Deventer, B. Horan and A. Stojcevski (2018), "Forecasting of Photovoltaic Power Generation and Model Optimization: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 912-928.
- Deutsche Bank (2014), "2014 Outlook: Let the Second Gold Rush Begin," Industry Update, on 6 January 2014.
- Dreidy, M., H. Mokhlis and S. Mekhilef (2017), "Inertia Response and Frequency Control Techniques for Renewable Energy Sources: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 144-155.
- Ela, E., M. Milligan, A. Bloom, A. Botterud, A. Townsend, T. Levin and B. Frew (2016), "Wholesale Electricity Market Design with Increasing Levels of Renewable Generation: Incentivizing Flexibility in System Operations," *The Electricity Journal*, 29, 51-60.
- Fernández-Guillamón, A., E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi and Á. Molina-García (2019), "Power Systems with High Renewable Energy Sources: A Review of Inertia and Frequency Control

- Strategies over Time,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109369.
- Fernandez-Jimenez, L. A., A. Munoz-Jimenez, A. Falces, M. Mendoza-Villena, E. Garcia-Garrido, P. M. Lara-Santillan, E. Zorzano-Alba and P. J. Zorzano-Santamaria (2012), “Short-term Power Forecasting System for Photovoltaic Plants,” *Renewable Energy*, 44, 311-317.
- Godoy-Gonzalez, D., E. Gil and G. Gutierrez-Alcaraz (2020), “Ramping Ancillary Service for Cost-based Electricity Markets with High Penetration of Variable Renewable Energy,” *Energy Economics*, 85, 104556.
- Gonzalez-Longatt, F. M. (2016), “Impact of Emulated Inertia from wind Power on Under-frequency Protection Schemes of Future Power Systems,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 4, 211-218.
- Graditi, G., S. Ferlito, G. Adinolfi, G. M. Tina and C. Ventura (2016), “Energy Yield Estimation of Thin-film Photovoltaic Plants by using Physical Approach and Artificial Neural Networks,” *Solar Energy*, 130, 232-243.
- Huber, M., D. Dimkova and T. Hamacher (2014), “Integration of Wind and Solar Power in Europe: Assessment of Flexibility Requirements,” *Energy*, 69, 236-246.
- Hur, D. and H. S. Jeong (2009), “Tailoring MIP-based Generation Scheduling Program for Korean Electricity Market,” Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Power Systems, 13-18.
- International Energy Agency (2017), *Getting Wind and Sun onto the Grid: A Manual for Policy Makers*, IEA Insight series 2017.
- _____ (2019a), *Electricity Information 2019*, IEA Statistics.
- _____ (2019b), *Renewable Information 2019*, IEA Statistics.
- _____ (2019c), *World energy balances 2019*, IEA Statistics.
- International Energy Agency Clean Energy Ministerial and the 21st

- Century Power Partnership (2019), *Status of Power System Transformation 2019: Power System Flexibility*.
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis (2018), *Power-industry Transition, here and Now, Wind and Solar Won't Break the Grid: Nine Case Studies*.
- International Renewable Energy Agency, IEA and REN21 (2018), *Renewable Energy Policies in a Time of Transition*.
- _____ (2019a), *Innovation Landscape for a Renewable-powered Future: Solutions to Integrate Variable Renewables*.
- _____ (2019b), *NDC in 2020*.
- _____ (2019c), *Renewable Capacity Statistics 2019*.
- _____ (2019d), *Renewable Power Generation Costs in 2018*.
- Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers and W. W. Behrens III (1972), "The Limits to Growth," Universe Books.
- Milligan, M. and B. Kirby (2010a), "Market Characteristics for Efficient Integration of Variable Generation in the Western Interconnection," Technical Report, National Renewable Energy Laboratory.
- _____ (2010b), "Utilizing Load Response for Wind and Solar Integration and Power System Reliability," Conference Paper, National Renewable Energy Laboratory.
- Milligan, M., B. Frew and E. Zhou (2015), "Advancing System Flexibility for High Penetration Renewable Integration," Technical Report, National Renewable Energy Laboratory.
- Monteiro, C., T. Santos, L. A. Fernandez-Jimenez, I. J. Ramirez-Rosado and M. S. Terreros-Olarte (2013), "Short-term Power Forecasting Model for Photovoltaic Plants Based on Historical Similarity," *Energies*, 6, 2624-2643.
- Munoz, F. D., S. Wogrin, S. S. Oren and B. F. Hobbs (2018), "Economic Inefficiencies of Cost-based Electricity Market Designs," *The Energy Journal*, 39(3), 51-68.
- Navid, N. and G. Rosenwald (2012), "Market Solutions for Managing

- Ramp Flexibility with High Penetration of Renewable Resource,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3, 784-790.
- North American Electric Reliability Corporation (2014), *Essential Reliability Services Task Force: A Concept Paper on Essential Reliability Services that Characterizes Bulk Power System Reliability*.
- Ogliari, E., A. Dolara, G. Manzolini and S. Leva (2017), “Physical and Hybrid Methods Comparison for the Day Ahead PV Output Power Forecast,” *Renewable Energy*, 113, 11-21.
- Raza, M. Q., M. Nadarajah and C. Ekanayake (2016), “On Recent Advances in PV Output Power Forecast,” *Solar Energy*, 136, 125-144.
- RE100 (2019), *Annual Report, Going 100% Renewable: How Committed Companies are Demanding a Faster Market Response*.
- REN21 (2019), *Renewables 2019 Global Status Report*.
- Shaker, H., H. Zareipour and D. Wood (2016), “Impacts of Large-scale Wind and Solar Power Intergration on California’s Net Electrical Load,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 761-774.
- Solomon, A. A., D. Faiman and G. Meron (2010), “The Effects on Grid Matching and Ramping Requirements, of Single and Distributed PV Systems Employing Various Fixed and Sun-tracking Technologies,” *Energy Policy*, 38, 5469-5481.
- United Nations (2015), “Adoption of the Paris Agreement” on 12 December, 2015.
- Wolak, F. A. (2003), *Designing Competitive Wholesale Electricity Markets for Latin American Countries*, Inter-American Development Bank.
- World Meteorological Organization (2019), *The Global Climate in 2015-2019*.
- Zaman, A. (2018), *100% Variable Renewable Energy Grid: Survey of Possibilities*, University of Michigan.
- Zhang, W., H. Dang and R. Simoes (2018), “A New Solar Power Output Prediction Based on Hybrid Forecast Engine and Decomposition

Model,” *ISA Transactions*, 81, 105-120.

Zhang, Y., M. Beaudin, R. Taheri, H. Zareipour and D. Wood (2015),
“Day-ahead Power Output Forecasting for Small-scale Solar
Photovoltaic Electricity Generators,” *IEEE Transactions on
Smart Grid*, 6(5), 2253-2262.

Impact of Photovoltaic Generation Expansion on Korea's Electricity Power System and the Solutions: Focusing on Power System Stability and Supply-and-demand Stability

Wan-soo Kim* · Ha-Hyun Jo**

Abstract

To achieve the GHG reduction target, various eco-friendly policies are implemented by countries. The expansion of renewable energy is one of the most important policies in many countries including Korea. In order to cope with the unstable supply and demand and the system unstable due to the photovoltaic generation, it is necessary to consider securing flexible resources, discovering artificial inertia, and securing auxiliary services. Also, the introduction of a multi-layered trading system, the reduction of transaction time-units, the separating the reserve market from the energy market, and the granting the solar self-responsibility obligation should be concerned as a solution.

KRF Classification : B030902, D090100

Key Words : renewable, photovoltaic, power system stability, flexibility, electricity market

* First Author, Senior Manager, Electricity Power Research Centre, Korea Power Exchange, e-mail: lazywolf@kpx.or.kr

** Corresponding Author, Professor, Dept. of Economics, Yonsei University, e-mail: hahyunjo@hanmail.net