

태양광 및 풍력 발전의 전력계통 영향과 시사점

이유수 에너지경제연구원 선임연구위원(yslee@keei.re.kr)



1. 서론

금년 8월 중순 미국 캘리포니아주에서 발생한 순환정전의 원인에 대해서 많은 논란이 있었다. 일각에서는 발전설비의 부족, 특히 공급예비력 확보의 미흡, 변동성 재생에너지의 확대 등을 원인으로 거론하기도 하고, 또 한편으로는 폭염으로 인한 전력수요의 예측실패와 전력당국의 부실대응 등을 언급하기도 했다. 사고원인에 대한 의견은 분분하지만, 늦은 오후 태양광 발전 출력의 급격한 하락과 이상고온에 따른 전력수요의 증가에 제대로 대응하지 못한 것이 원인이다. 결국, 전력당국은 일정 지역을 중심으로 순차적인 부하차단을 통해서 전력수급 불균형의 문제를 해결한 것이다.

재생에너지의 비중이 높은 캘리포니아주의 순환정전은 우리에게 시사하는 바가 크다. 비록 우리나라는 전체 발전량에서 차지하는 변동성 재생에너지의 비중이 높지 않지만, 이미 지역적으로 태양광 및 풍력 발전으로 인한 전력계통의 불안정 문제가 나타나고 있다. 제주도 풍력발전의 출력제한 횟수 증가와 전라도 지역의 태양광 발전에 따른 과전압 문제, 그리고 대형발전기 고장에 따른 재생에너지 발전설비의 전력생산 중단 문제 등¹⁾ 재생에너지가 증가하면서 전력계통의 안정성을 위협하고 있는 사건들이 나타나고 있다.

세계적으로도 태양광 및 풍력 등 변동성 재생에너지의 비중이 높아지고 있는 과정에서 전력계통의 안정성 문제는 가장 중요한 관심사가 되고 있다. 2016년 9월 및 2017년 2월 남호주의 정전사고와 2019년 8월 영국의 대규모 정전사고는 공통적으로 변동성 재생에너지의 비중이 늘어난 상황에서 사고에 의한 전력계통의 발전량 급감과 주파수 하락에 대한 적절한 대응이나 공급여력의 부족에서 비롯된 것이다.²⁾ 이에 따라 각국마다 변동성 재생에너지의 확대에 인해서 빈번해진 전력계통의 수급불균형에 따른 주파수와 전압을 어떻게 일정수준으로 유지할지를 고민하고 전력계통 신뢰도의 기준을 강화하는 등 대책마련에 분주하고 있다. 그 동안 원자력 및 화력발전 위주의 대규모 발전소를 중심으로 장거리 수송을 통해 각 소비지로 전력을 공급하던 시스템에서는 비교적 안정적인 계통운영이 가능했다. 반면에 태양광 및 풍력 등 불확실성과 출력 변동성의 특성을 가진 발전설비가 전력계통에 접속하면서 전력수급의 불균형 심화와 계통 주파수 및 전압의 일정 수준을 유지하기가 더 어려워지고 있다. 그렇지만 우리나라를 포함한 대부분의 국가에서 온실가스 감축과 에너지전환정책의 중요한 수단인 태양광 및 풍력 발전의 비중은 더욱 커질 것으로 전망되고 있다. 이미 많은 국가들에서 태양광 및 풍력 발전이 타 발전원에 비해서 전력시장에서 가격경쟁력을 가지고 있기 때문에 더욱 그러하다. 향후에도 전력산업에서 가장 중요한 관심사는 태양광 및 풍력 등 재생에너지의 비중증가로 출력변동성이 심해진 전력계통 운영의 안정성과 효율성 확보에 집중될 것으로 예상된다. 본고에서는 원자력 및 화력 발전을 중심으로 구축된 교류 계통의 운영방식을 검토한 후 태양광 및 풍력 발전의 기본적인 특성과 현황을 살펴보고, 태양광 및 풍력 발전설비가 전력계통에 연계되는 비중이 높아질 경우, 어떤 영향을 미치게 되는지를 분석해 보기로 한다. 그리고 전력계통의 안정적 운영을 위한 대응 방법과 제도적 개선 등에 대한 시사점을 도출할 것이다.

2. 교류 전력계통의 운영 방식

가. 교류 발전기와 전력계통 운영

1) 교류 발전기의 특성

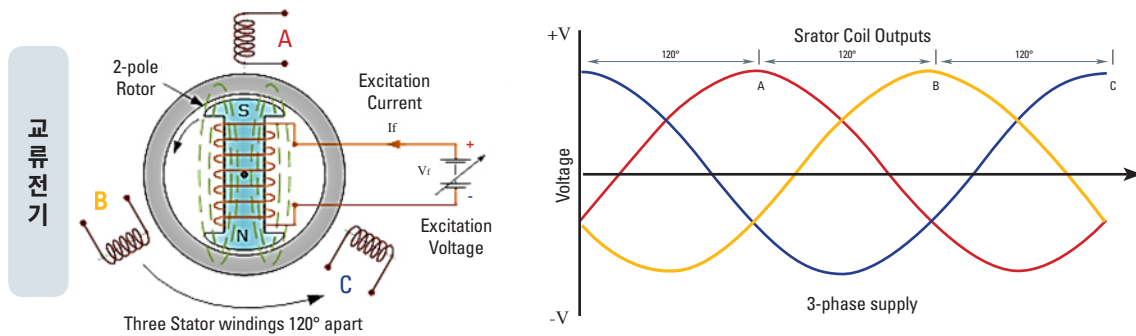
우라늄, 석탄, 천연가스 등의 연료를 연소하여 증기의 힘으로 회전체의 터빈을 돌려서 전기를 생산하는 대형 발전기들은 관성(inertia)이 주어진다. 즉, 발전기는 회전체의 관성을 통하여 터빈의 회전속도를 나타내는 주파수를 일정하게 유지하고, 전압도 일정시간 단위로 변화하게 된다. 따라서 주파수가 0으로 변화가 없는 전압은 직류를 생성하고, 일정 시간대에 변화를 나타내는 전압은 교류를 생성하게 된다. 우리나라는 미국과 같이 초당 60Hz의 주파수(3,600rpm)를 가지는 계통을 운영하고 있는 반면, 유럽은 50Hz의 주파수로 계통을 운영하고 있다.

1) 국내에서 재생에너지로 인해 발생한 전력계통의 불안정 사례는 제4장 다. 국내전력계통 영향 사례에서 자세하게 다루기로 한다.

2) 2016년 9월 남호주의 정전사고는 풍력발전 설비의 비중이 높아진 가운데, 토네이도에 의한 송전선로 고장으로 저전압 상태가 지속되어 풍력발전기의 출력이 급감하였으나 대응부족으로 정전이 발생하였다. 2017년 2월의 정전사고는 변동성 재생에너지의 비중이 높은 상황에서 저녁시간대 폭염에 따른 전력수요 예측 오류와 발전량 급감에 빠르게 대응하지 못함으로써 발생하였다. 2019년 8월에 영국에서 발생한 대규모 정전사고는 낙뢰로 인한 송전선로 문제로 대형발전기가 고장나고 이어서 풍력단지의 탈락에 의한 주파수의 급격한 하락으로 발생하였다. 이처럼 변동성 재생에너지 증가에 따른 전력계통의 불안정과 대규모 정전의 발생 가능성이 높아지고 있다.

원자력 및 화석연료 발전기는 회전체의 관성을 통하여 교류전력을 생산하면서 60Hz를 기준으로 주파수 변동의 허용범위($\pm 0.2\text{Hz}$) 내에서 주파수와 전압을 유지하도록 설계되어 있다. [그림 1]과 같이 운전 중인 모든 발전기들은 초당 동일한 속도의 회전을 통하여 전력을 생산하고, 전력계통으로 공급하는 동기발전기(synchronous generator)로서의 역할을 하고 있다.

그림 1 교류 및 동기발전기



자료: 옥기열, '국내 전력시장 개편방향', 국회 정책좌담회 발표자료, 2020.7.29.

개별 발전기는 시스템의 부하가 증가하거나 감소할 경우, 주파수의 변화가 발생하고 그 변화에 맞추어 자동으로 주파수를 허용범위 내에서 유지할 수 있도록 작동한다. 시스템의 부하가 상승할 경우, 발전기는 공급 부족으로 인해 계통에 운동에너지를 공급함에 따라 터빈의 회전속도가 감소하면서 주파수가 하락하게 된다. 이때 일시적으로 스팀의 양을 증가시켜 회전속도를 일정수준으로 높이게 되는데, 부하의 수준에 맞게 주파수를 조정하는 역할을 하는 것이 조속기(Governor)이며, 이를 주파수추종운전(GF: Governor Free)이라고도 한다. 반대로 부하가 하락할 경우, 발전기는 계통의 운동에너지를 흡수함에 따라 터빈의 회전속도가 증가하면서 주파수가 상승한다. 이에 대응하여 조속기는 스팀의 양을 감소시켜 회전속도를 일정수준으로 낮추어 주파수를 조정하는 역할을 하게 된다.

기저부하를 담당하는 원자력 발전은 이러한 기능이 있지만, 24시간 지속적으로 발전하도록 설계되어 있어서 기능이 작동하지 않도록 한다. 특히, 원자력 발전은 출력조정에 대한 안전성 검증의 논란이 있는 가운데, 기본적으로는 기저부하용으로 상시 운전하도록 하고 있다. 석탄발전은 기저부하를 담당하고 있지만 이 기능이 작용하여 주파수 조정에 활용되고 있다. 첨두부하를 담당하고 있는 천연가스 발전의 경우는 부하 추종 운전을 하는 발전기의 특성상 비교적 빠른 시간에 주파수 추종 운전을 통해서 특정 수준의 주파수를 회복하는데 기여하고 있다.

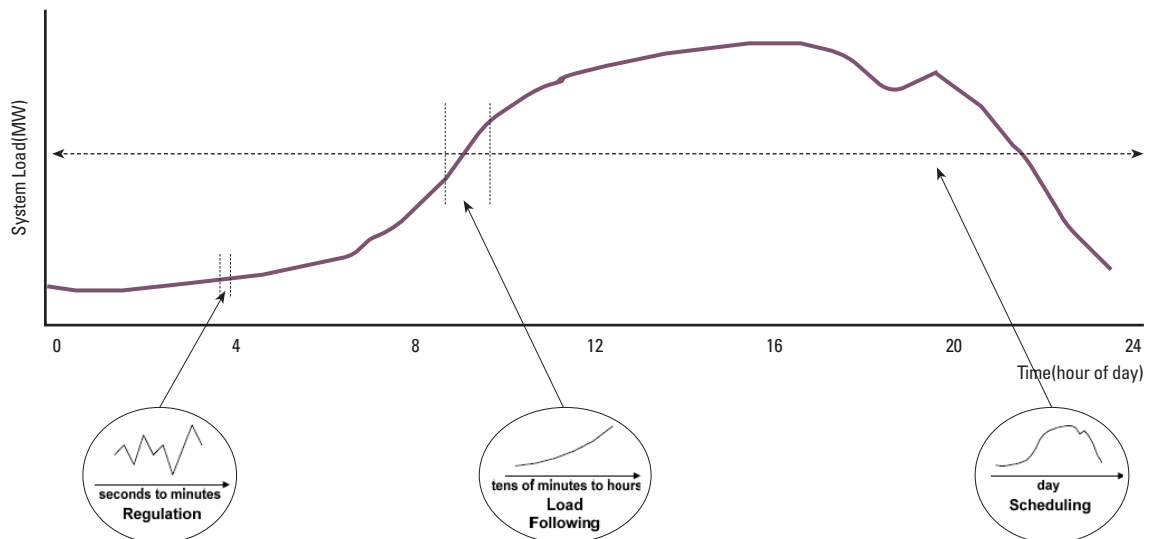
결국 전력수요와 공급의 불균형이 발생할 경우, 전력수요의 증감에 따라 발전기의 전력생산 및 공급 대응력이 얼마나 갖춰지느냐에 따라서 전력계통의 안정적 운영에 영향을 미치고 있다. 기존 원자력 및 화력 발전기의 비중이 높은 전력계통은 대부분 동기발전기들로 구성되어 관성이 크게 작용하기 때문에 전력수급 불균형으로 인한 주파수 및 전압의 변화가 나타나더라도 특정 주파수와 전압의 범위 내로 복원할 수 있다.

이런 측면에서 교류 전력계통은 초단위에서 전력수급의 불균형이 발생하지만 특별한 사고가 발생하지 않는 한 정상적인 상태에서 계통의 안정적 운영이 가능하다.

2) 정상적 상태의 계통운영 방식

전력계통의 운영은 실시간으로 변화하는 전력수요의 변동성에 대해 어떻게 전력공급량을 충족시킬 것인가에 초점이 맞춰져 있다. 전력수급 균형을 유지하는 과정에서 주파수와 전압이 일정범위 내에서 움직이도록 공급능력을 확보하여 수급불균형에 빠르게 대응하는 것이 안정적인 전력계통 운영의 관건일 것이다. [그림 2]는 하루 중 전력계통의 부하패턴을 나타내고 있으며, 정상적인 상태에서 수급균형을 위한 시간별 대응수단들을 보여주고 있다. 우선 전력계통의 사전계획(Forward Scheduling)은 하루의 일반적 부하패턴을 충족시키기 위한 여러 계획들과 발전기의 기동정지계획(Unit Commitment)을 포함하고 있다. 부하추종(Load Following)은 일반적으로 추세적 부하패턴을 따라 경제급전에 의해서 전력을 공급하는 것을 의미하는데, 빠른 기동시간의 연소터빈과 수력발전 설비의 기동과 정지가 관련되어 있다. 주파수 조정(Regulation)은 부하나 발전에서 초단위 또는 분단위의 임의적인 변동에 대한 균형유지를 의미하고, 중앙 제어센터에서 발전설비 또는 반응적 수요에 제어신호를 보내 설정값으로 빠르게 조정하도록 하고 있다.³⁾ 정상적인 계통운영 상태에서는 실시간으로 변화하는 시스템의 전력수요와 공급력이 일치할 때 주파수는 60Hz를 유지하게 된다. 이 때, 전력수급 균형과 주파수 유지를 위한 예비력 확보가 안정적 전력계통 운영에서 중요한 요소로 작용하고 있다.

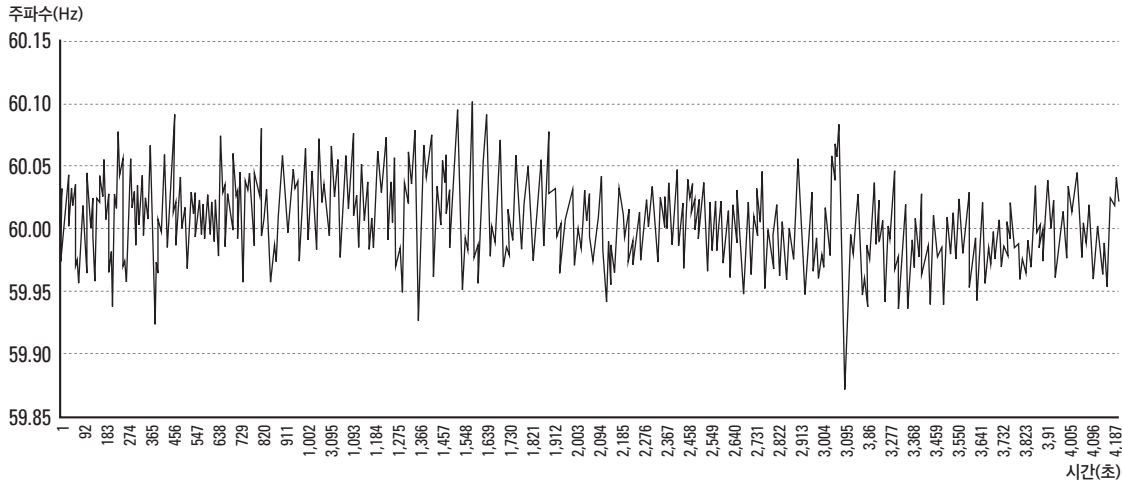
그림 2 전력계통 운영 시간대별 대응 방법



자료: Ela, Erik et al, Operating Reserves and Variable Generation, NREL, August 2011, p. 4.

3) Ela, Erik et al, Operating Reserves and Variable Generation, NREL, August 2011, p. 4.

그림 3 정상적인 상태의 계통주파수



자료: 김영창·유재국, 블랙아웃과 전력시스템 운용, 2015.8.25., p. 354.

예비력은 공급예비력과 운영예비력으로 구분되는데⁴⁾, 실제 전력수급 균형과 주파수 유지를 위한 대응차원 측면에서 보면, 운영예비력과 관련성이 더 크다고 할 수 있다. 운영예비력은 부하의 변화에 대해 공급력의 대응역량을 강화하거나 부하예측 오차의 영향을 완화하는데 필요하다. 현재 운전 중인 발전기뿐만 아니라 대체자원의 응동 시간과 응동 지속시간에 따라 세분화될 수 있지만 여기서는 평상시 계통의 부하와 공급력의 균형유지를 위한 예비력 차원에서 다루기로 한다.

우선, 주파수의 조정과 관련된 예비력은 두 가지 측면에서 주파수제어가 가능하다. 앞서 언급한 개별 발전기의 조속기에 의한 주파수추종과 중앙제어시스템에서 계통상황을 고려하면서 제어신호를 통하여 발전기 출력을 제어하는 자동발전제어(AGC: Automatic Generation Control)이다.

전력계통의 정상운영 상태에서 계통의 부하 및 공급력의 변화에 따른 불균형을 즉각적으로 해소하기 위한 운전방식은 GF와 AGC 예비력 모두 관련된다. [그림 3]에서처럼 정상적 운전 상태에 있는 동안 시스템 부하와 공급력의 미세한 차이를 조정하여 수급균형을 유지하도록 작동한다. 우선 GF는 발전기 자체 내 조속기의 작동으로 주파수변동에 대응하는⁵⁾ 한편, AGC는 계통의 관리시스템(EMS)에서 주파수를 측정하여 60Hz를 유지하도록 제어기에 의한 출력 보상량을 각 발전기의 출력증감발률에 따라서 발전량을 배분하도록 되어 있다.⁶⁾ 주파수조정 예비력 외에 정상적 상태에서 또 다른 예비력에는 부하추종 예비력이 포함될 수 있다. 부하추종 예비력은 이전 계획과 업데이트된 계획사이의 예측오차에 대한 불확실성을 수정하여

4) 공급예비력은 전력수요를 초과하여 확보하는 공급능력을 의미하고, 운영예비력은 평상시 안정적 주파수 유지를 위한 주파수제어예비력과 고장발생시 주파수 회복을 위한 1차 예비력, 2차 예비력, 제3차 예비력을 의미한다. (전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준, 제1장 총칙, 제2조(용어의 정의))

5) 우리나라의 평상시 주파수 유지범위는 $60 \pm 0.2\text{Hz}$ 이지만 미세한 주파수 변동은 개별 발전기의 지속적 출력변동으로 에너지 손실을 유발시키는 현실성을 고려하여 설정된 주파수 불감대(dead band)인 $60 \pm 0.036\text{Hz}$ 를 벗어나는 경우 개별 발전기의 조속기가 작동하도록 되어 있다. 그런데, 미국의 경우 계통의 규모가 크기 때문에 평상시 주파수조정에서는 개별 발전기의 조속기가 작동하지 않고 사고발생시 대응하는 것으로 되어 있다.

6) 조성민 외, '주파수추종 운전 적용을 위한 BESS의 운용 방법 및 효과', The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64, No. 1, 2015, p. 16.

실시간의 경제급전으로 부하를 충족시키는 역할을 하고 있다. 하루의 전력수요는 유사한 경로를 따라 움직이고 있기 때문에 수요예측에서 큰 변동성은 없지만 태양광 발전이 관련되어 있으면 불확실성과 변동성이 커지게 되므로 더 높은 출력증감발률을 가지거나 유연성을 가진 설비를 필요로 하게 된다.⁷⁾

나. 비정상적 상태의 전력계통 대응

1) 비정상적 상태의 전력계통⁸⁾

전력계통에서 갑작스러운 대형발전기의 고장 및 탈락 또는 송배전선로의 이상, 변압기의 고장 등으로 인한 사고가 발생할 경우 전력수급 불균형에 따른 계통의 대응방식은 달라진다. 사고로 인한 수급불균형의 차이와 주파수의 하락폭이 정상적인 상황보다 더 큰 차이가 나므로 사고대응 차원에서 빠르게 주파수를 정상적인 범위 내로 회복해야 하는 상황에 직면하기 때문이다. 발전기의 고장정지는 공급력 부족에 따른 주파수 강하를 유발하는데, 기준치 이하로 주파수가 급격하게 낮아지면 기기의 손상을 유발할 수 있으므로 강제로 부하를 차단할 수 있다. 또한 송전선 탈락은 다른 정상적인 송전선에 과부하를 발생시키거나 정격 전압에서 벗어나게 하는 전력조류의 변화를 가져 온다.⁹⁾ 따라서 전력당국은 사고의 상황에 맞게 주파수 유지범위를 정하여 계통을 안정적으로 유지할 수 있도록 하고 있다.

우리나라 전력계통 신뢰도 기준 관련 고시에 따르면, 상정고장¹⁰⁾ 시 계통 주파수의 유지 기준을 정하여 발전기 1기 고장과 발전기 2기 고장, 비상상황¹¹⁾의 경우에 적용하고 있는데, 주파수의 유지범위가 정상적 상태보다 더 크다. 발전기 1기 고장은 최저 계통주파수를 59.7Hz 이상으로 유지하고 1분 이내 59.8Hz로 회복하도록 하고, 발전기 2기 고장 또는 발전기 탈락 시 계통주파수를 최저 59.2Hz 이상으로 유지하고, 1분 이내 59.5Hz, 10분 이내 59.8Hz로 회복시킬 것을 명시하고 있다. 비상상황의 경우, 계통주파수를 62~57.5Hz 범위 내에서 유지할 수 있도록 되어 있다. 설비의 고장이나 사고 시 주파수의 유지범위는 계통 전체 주파수의 유지, 전기기기 및 산업체의 생산 활동 영향과 함께 발전기의 보호 차원에서 적절한 수준을 유지해야 한다. 발전기 고장 또는 비상상황으로 인해 주파수가 하락된 경우 운영 중인 발전기의 보호차원에서 주파수계전기에 의해 전력생산이 차단되면 계통주파수의 추가적 하락 등 더 심각한 문제가 발생할 수 있다.¹²⁾ 발전기가 어느 정도의 주파수 범위 내에서는 계속 운전될 수 있도록 설계될 필요가 있지만 비용 상승의 문제가 있다. 따라서 비정상 상황 하에서 계통주파수의 유지범위는 이러한 관계들을 종합적으로 고려하여 적절한 수준으로 규정되고 있다.

7) Ela, Erik et al., Operating Reserves and Variable Generation, National Renewable Energy Laboratory (NREL), August 2011, p. 18.

8) 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준에서는 “신뢰도”를 정상상태 또는 상정고장발생시 소비자의 필요 전력수요를 공급해 줄 수 있는 “적정성”과 예기치 못한 비정상 고장 시 계통이 붕괴되지 않고 견디어 낼 수 있는 “안전성”으로 정의하고 있지만 여기서는 주파수 및 전압 유지를 위한 대응수단을 고려하여 상정고장과 비정상 고장을 동시에 비정상적 상황으로 간주하여 설명하기로 한다.

9) Ela, Erik et al., Operating Reserves and Variable Generation, NREL, August 2011, p. 5.

10) 상정고장(contingency)이란 전력계통에서 발생할 수 있는 가상의 단일, 이중 또는 다중의 전력설비 고장을 말한다.(전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 (2019.11.1.) 제1장 총칙 제2조(용어의 정의) 14. ‘상정고장’)

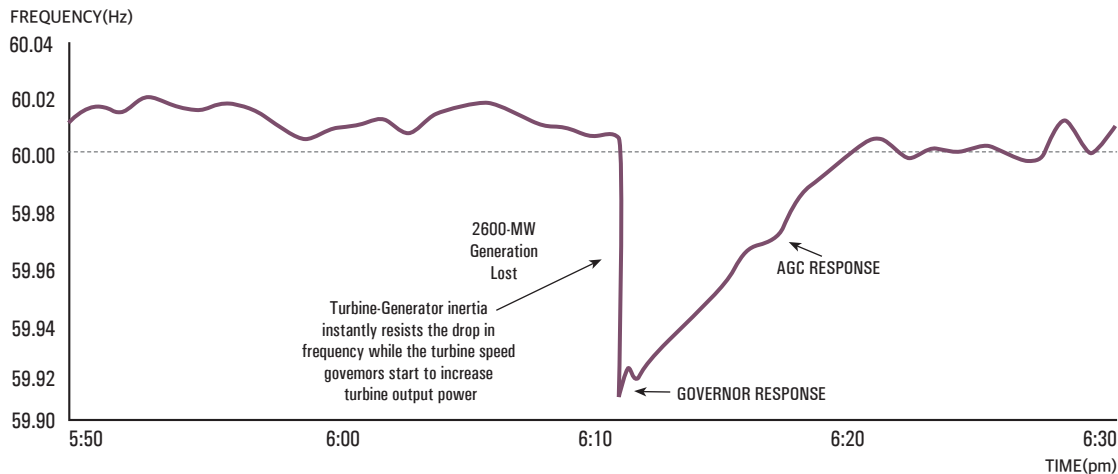
11) 비상상황이란 전력계통의 다중고장, 예비력 부족 등과 같은 내부 원인이나 폭풍 및 그 밖의 자연현상, 사회혼란, 태업 등과 같은 외부 원인에 의하여 전력계통에 광역정전이 야기될 수 있는 상태 또는 전력수급의 균형유지가 어렵거나 어려움이 예상되는 상태로 규정하고 있다.(전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 (2019.11.1.) 제1장 총칙 제2조(용어의 정의) 21. ‘비상상황’)

12) 배주천, 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 해설, 전기저널 2003. 8., p. 5.

2) 전력계통의 대응 방식

사고 발생 시 전력계통의 대응방식은 우선 공급력 부족에 따른 주파수 강하를 저지하기 위해서 수초에서 수십 초 단위의 빠른 시간 내에 일정수준의 주파수 회복이 필요하다. 가장 먼저 이 역할을 수행하는 것이 발전기의 조속기인데, 앞서 교류 발전기의 특성에서 설명한 바와 같이 중앙전력관제센터의 원격지시 이전에 발전기가 자동적으로 주파수 변화를 감지하여 일정수준으로 안정화시키고, 동시에 발전기의 출력변화도 수반한다. 사고가 발생하는 경우는 대체로 부하 대비 공급력의 부족에서 오기 때문에 [그림 4]와 같이 특정 시간에 주파수가 급격하게 하락하게 된다. 이 때, 계통에 관성이 크게 작용할수록 주파수의 하락이 서서히 진행되기 때문에 그 만큼 공급력 회복이 용이해질 수 있다. [그림 4]와 <표 1>처럼 우선 발전기의 조속기를 통해 스스로 스팀의 양을 조절하여 출력을 높임으로써 주파수를 일정수준으로 안정화시키는 역할을 수행한다.¹³⁾ 그 이후에도 정격주파수로 회복되지 못하거나 다른 추가적 사고가 발생하여 정전의 위험이 있기 때문에 중앙관제센터가 경제급전 순서에 입각하여 AGC 형태의 대응으로 정격 주파수로 회복을 하도록 제어하게 된다.

그림 4 비상 상황 시 주파수 조정과정 예시



자료: Ela, Erik et al., Operating Reserves and Variable Generation, NREL, August 2011, p. 21

표 1 고장 발생 시 주파수 회복을 위한 예비력 종류

사고 대응 운영예비력 구분	응동시간과 응동지속시간
1차 예비력(조속기 운전(GF)과 ESS)	주파수 변동 10초 이내 동작, 5분 이상 출력유지
2차 예비력(자동발전제어(AGC))	주파수 변동 10분 이내 동작, 30분 이상 출력유지
3차 예비력(중앙급전발전기)	30분 이내에 확보할 수 있는 예비력

자료: 산업통상자원부 고시 제2019-176호, 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준, 2019.11.1

그런데, 사고가 발생한 후 주파수 회복에 사용되는 예비력의 출력이 변화하게 되면, 이 과정에서 다른 사고에 대응할 추가 예비력이 부족해진다. 이에 따라 3차 예비력으로 사고발생 시부터 다른 추가적 사고에 대비하여 30분 이내에 응동할 수 있는 대체 발전원의 확보가 중요하다. 이 부분은 앞의 주파수조정으로 제어 가능한 범위를 넘어서서 운전상태에 있는 발전기의 출력 여유분이 있는 상태의 예비력과 정지상태에 있으나 급전지시로 기동이 가능한 예비력으로 구분될 수 있다. 전자는 동기속도의 무부하로 운전 중인 발전기나 출력증가가 가능한 발전기, 양수발전기의 펌프운전 모드에서 부하차단이 가능할 때의 예비력에 해당되고, 후자는 20분 이내 기동이 가능한 수력, 양수, 가스터빈 발전기 등이 이에 해당 된다.¹⁴⁾ 이 밖에 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준에서는 운영예비력과 별도로 중앙급전발전기 중 20분 이내 동작하여 4시간 이상 출력을 유지할 수 있는 속응성 자원을 정의하고 있다. 이상에서 설명한 바와 같이 전력계통에서 사고 발생으로 인한 수급불균형이 발생하여 주파수가 과도하게 하락하게 될 경우, 1차, 2차, 3차 예비력 활용을 통하여 순차적으로 주파수를 회복시키지만, 공급예비력이 부족하게 될 경우 대규모의 정전이 발생할 가능성이 높다. 다만 사전에 대규모 정전의 위험성을 인지하고, 변전소의 저주파수 계전기(UFR: Under Frequency Relay)가 작동하여 지역적으로 순차적으로 부하를 차단하는 순환정전(Rolling Blackout)으로 대응할 수밖에 없다.

3. 태양광 및 풍력 발전의 특성 및 현황

태양광 발전 및 풍력 발전은 일사량과 바람의 속도 등 자연조건에 의존하기 때문에 발전출력의 변동성이 심하고 예측이 어렵다는 특성을 가진다. 또한, 태양광 및 풍력 발전설비의 기술적 특성이 교류 발전기와 달라서 계통에서 전력수급 균형 유지와 주파수 및 전압의 안정적 운영이 어려워지고 있다. 재생에너지의 비중이 증가하면서 전력계통은 주파수 및 전압의 불안정이 심화되고 사고로 인한 정전의 위험가능성이 높아져 이전보다 훨씬 더 유연하게 운영될 필요가 있다. 제3장에서는 태양광 및 풍력 발전이 전력계통에 미치는 영향을 분석하기 전에 태양광 및 풍력 발전설비의 기술적 특성과 발전 현황 및 확대 계획에 대해서 살펴볼 것이다.

가. 태양광 발전의 특성과 현황 및 계획

1) 태양광 발전의 특성

태양광 발전은 태양의 빛에너지를 변화시켜 전기를 생산하는 발전기술을 활용하고, 태양광 발전시스템은 태양전지로 구성된 모듈과 축전지 및 전력변환장치로 구성되어 있다.¹⁵⁾ 태양광 발전량은 일사량에 가장 큰

13) 조속기 운전은 1차 예비력으로 과도한 주파수 하락에 따른 발전기의 손상을 막아주고, 계획된 설정값으로 주파수를 회복시키는데 필요한 2차 예비력의 응동시간 확보에 기여를 한다.(Ela, Erik et al., Operating Reserves and Variable Generation, NREL, August 2011, p. 26~27.)

14) 이정호, 전력계통운영 보조서비스(Ancillary Service) 역할과 이해, 전기저널 스페셜 이슈, (<http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=3477>, 접속일자 2020. 9. 5.)

15) 한국에너지공단 신재생에너지센터, 태양광의 원리 및 개요(https://www.knrec.or.kr/energy/sunlight_summary.aspx, 접속일자 2020. 9. 5.)

영향을 받고 바람, 기온, 습도 등 기본적 기상요소들도 영향을 미치고 있다. 태양광 발전은 실질적으로 태양광 패널의 표면 및 내부 물리적 상태에 따라 설비용량에 차이가 있는데, 일반적으로 10~25% 정도로 알려지고 있다.¹⁶⁾

그리고 태양광 발전 모듈에서 생산되는 전기는 직류이기 때문에 전력변환장치인 인버터를 통해서 교류형태로 변환되어 사용된다. 태양광은 주로 인버터를 통한 교류전기가 배전계통을 통해 접속되지만, 기존의 터빈을 활용한 회전체 발전기가 가지는 관성이 없으며, 동기발전기로서 역할을 하지 못하는 기술적 특성을 가지고 있다.

한편, 태양광 발전은 많은 국가에서 하루 중 전력수요 증가시점과 부합하는 상관관계를 보여주고 있다. 풍력 발전은 육상이나 해상의 위치에 따라서 밤과 낮에 발전량의 증가가 달라지지만 태양광은 개별 발전량을 합산하면 전체 발전량에서는 현저하게 달라지지는 않는다. 다만 태양광의 일사량에 따라 아침 및 저녁의 급격한 출력증감발이 발생하므로 이에 대한 공급여력의 대응방식이 요구 된다.¹⁷⁾

표 2 신재생에너지 발전량의 총발전량 대비 실적

단위(Gwh)

	2018년		2019년(잠정치)		전년대비 증감	
	발전량	비중(%)	발전량	비중(%)	발전량	증감률(%)
총발전량	593,639	100.00	588,096	100.00	-5,543	-0.93
신재생에너지	52,718	8.9	57,467	9.8	4,738	9.0
태양광	9,208	17.5	13,109	22.8	3,901	42.4
풍력	2,465	4.7	2,679	4.7	214	8.7

주: 태양광 및 풍력의 발전량 비중은 신재생에너지 발전량 대비 수치임.

자료: 한국에너지공단 신재생에너지센터 신재생에너지정책실, 2019년 신재생에너지 보급통계 잠정치(2020년 공표) 결과 요약, 2020. 8., p. 3.

2) 태양광 발전의 현황 및 계획

<표 2>에 의하면 2019년 기준 국내 총 발전량 대비 신재생에너지의 비중은 9.8%로서 전년대비 약 9.0%가 상승한 수치를 나타내고 있다.¹⁸⁾ 신재생에너지 발전량 중 태양광의 비중은 22.8%로서 재생에너지에서 여전히 큰 비중을 차지하고 있는 폐기물(42.9%)에 이어 두 번째로 큰 비중을 차지하고 있다. 태양광이 국내 총 발전량에서 차지하는 비중은 2.2%로 낮지만 전년대비 증가율은 42.4%로서 괄목할만한 성장세를 보이고 있다.

태양광 발전량의 지역적 순위를 살펴보면, 2018년 기준으로 전라남도가 199만 MWh로 1위이고, 전라북도

16) OECD/IEA, Getting Wind and Sun onto the Grid, A Manual for Policy Makers, 2017. p. 42. 우리나라 태양광 발전의 평균 설비용량은 2017년 기준 약 15.6%에 이르는 것으로 분석되고 있다.(전력거래소 기후신재생전략팀, 지역별 태양광·풍력 이용률 및 발전원가 분석, 2018.12, p. 2.)

17) OECD/IEA, Getting Wind and Sun onto the Grid, A Manual for Policy Makers, 2017. p. 41.

18) 한국에너지공단 신재생에너지센터에서 발표하는 재생에너지 보급통계의 2019년 수치는 잠정치이며, 확정치는 11월중에 발표할 예정이다.

(156만 MWh), 경상북도(113만 MWh), 충청남도(111만 MWh) 순으로 나타나고 있다. 전라도와 경상도가 타 지역에 비해서 태양광 발전량이 높은 지역이지만, 배전계통의 접속설비 부족으로 인한 접속지연이 심화되고 있다. 1MW 이하의 태양광 발전설비의 계통접속에 대한 신청은 두 지역이 전체 73%의 비중을 차지하고 있으며, 2019년 3분기까지 계통접속은 전체 6.7GW가 지연되고 있다.¹⁹⁾

다음으로 태양광 발전설비의 계획을 살펴보면, 우선 신재생에너지 3020 이행계획에 따라 2030년 신재생에너지의 발전비중을 20%로 확대하겠다는 목표를 제시하였다. 이 목표에 근거하여 8차 전력수급기본계획에서 2030년 태양광 발전설비를 33.5GW로 확대하는 목표를 설정하였는데, 신재생에너지 발전설비 전체의 57.4%에 해당된다.

표 3 2030년 신재생에너지 보급목표와 태양광 및 풍력 발전설비 계획

신재생에너지 ¹⁾				태양광 ²⁾ (GW)				풍력 ²⁾ (GW)					
발전량(TWh)		발전설비(GW)		정격용량		피크 기여도		실효용량		정격용량		피크 기여도	
비중 (%)		비중 (%)		비중 (%)		기여도 (%)		비중 (%)		비중 (%)		기여도 (%)	
125.8	20.0	58.5	33.7	33.5	57.4	15.6	5.2	59.6	17.7	30.2	1.9	0.3	3.8

주: 1) 신재생에너지 발전의 비중은 총발전량 및 발전설비 대비 비중임.

2) 태양광 및 풍력의 설비용량 비중은 신재생 발전설비 비중임.

자료: 산업통상자원부, 제8차 전력수급기본계획(2017~2031), 2017.12.29., p. 36.

한편, 3차 에너지수급기본계획에서는 2040년까지 재생에너지 발전비중을 30~35%까지 확대하기로 목표를 설정하였으나 태양광 발전에 대한 구체적인 설비용량 계획을 제시하지는 않았다. 다만 신재생에너지 발전량 비중을 35%로 제약한 근거로 변동성 재생에너지의 출력 급변동 시 출력제한 및 백업설비 비용의 급증을 이유로 들고 있다. 2040년 재생에너지 비중이 25%~40%일 때 연간 출력 제한량의 비율을 1.0~21.5%로 추정하고 있다.

나. 풍력 발전의 특성과 현황 및 계획

1) 풍력 발전의 특성

풍력발전은 바람에너지를 이용하여 전기를 생산하는 발전방식으로 블레이드가 회전하면서 발생하는 기계에너지를 발전기를 통해 전기에너지로 변환하는 원리에 기반을 두고 있다.²⁰⁾ 풍력발전은 풍속의 영향으로 출력의 변동이 심해지고 이로 인한 계통의 주파수 및 전압의 변동성에도 영향을 미친다. 풍력발전에서 사용되는 발전기는 유도발전기와 동기발전기의 두 종류가 있으며, 일반적으로 유도발전기는 전력계통에 연결할 경우 교류전력이 그대로 연계되고 동기발전기는 생산되는 교류전력을 컨버터를 통해 직류로 변화시킨

19) 조성수, 재생에너지 증가가 계통에 미치는 영향 및 대책, 재생에너지 증가에 따른 전력안보 확보방향 전문가 세미나 토론회자료, 에너지경제연구원, 2020. 9. 17, p. 53.

20) 한국풍력산업협회, 풍력발전이란 기본원리, (http://www.kweia.or.kr/bbs/page.php?hid=sub02_01, 접속일자, 2020. 9. 5.)

후 인버터에서 교류로 다시 변환하여 계통과 동기화하는 방식을 사용 한다.²¹⁾ 풍력발전은 터빈에 의한 회 전으로 전력을 생산하여 인버터를 통해 계통에 전력을 공급하지만 전통적인 교류 발전기의 회전체에 비해 제한적이기 때문에 물리적 관성이 약하거나 없는 비동기 발전기로 분류되고 있다.

그리고 풍력발전은 전형적으로 태양광보다 설비용량이 더 높는데, 일반적으로 20~40%²²⁾에 이르고 있 으며, 설치 위치와 기술에 따라 편차가 크지만 태양광 발전설비에 비해 약 두 배 정도 높다. 이런 이유로 풍 력이 태양광보다 더 높은 보급률에 더 빠르게 도달하는 경향이 있다.²³⁾ 그러나 우리나라는 입지문제, 주민 수용성, 부품 조달 등 여러 측면에서 태양광보다는 여건이 불리하여 아직 보급률이 저조하다.

풍력 발전설비의 규모는 육상에서는 1~3MW의 풍력터빈, 해상에서는 4~6MW의 풍력 터빈을 사용하는 데, 배전망 이상의 수준에서 연결되고 있다. 특히 송전망과 연계하여 수백 메가와트급의 대형발전소를 구 축할 수 있다.²⁴⁾

2) 풍력발전의 현황 및 계획

<표 2>에 의하면 2019년 기준 신재생에너지 발전량 중 풍력 발전의 비중은 4.7%로 태양광보다 훨씬 낮 은 비중을 차지하고 있다. 풍력이 국내 총 발전량에서 차지하는 비중은 0.46%, 전년대비 증가율도 8.7% 로 태양광에 비해 증가세도 크지 않다. 풍력 발전량의 지역적 순위를 살펴보면, 2018년 기준으로 경상북 도가 73만 MWh로 1위이고, 강원도(69만 MWh), 제주도(54만 MWh), 전라남도(35만 MWh) 순으로 나 타나고 있다.

다음으로 풍력발전 설비계획을 살펴보면, <표 3>과 같이 8차 전력수급기본계획에서 2030년 풍력 발전설 비를 17.7GW로 확대하는 목표를 설정하였는데, 신재생에너지 발전설비 전체의 30.2%에 해당된다. 우리나 라에서 풍력발전 설비의 확대는 태양광 발전설비에 비해 입지여건과 설비건설 과정의 문제, 사업성 등 여러 이유로 어려움이 있기 때문에 현재의 보급량과 계획량이 상대적으로 작은 경향을 보이고 있다.

4. 태양광 및 풍력 발전의 전력계통 영향과 대응 방식

가. 태양광 및 풍력 발전의 전력계통 영향

발전원의 믹스에서 태양광 및 풍력 발전의 비중이 증가함에 따라 계통의 관성은 낮아지기 때문에 전력수 급 불균형이 발생하면 계통의 주파수가 빠르게 변화되면서 계통을 더욱 불안정하게 한다. 주파수의 빠른

21) 유도발전기는 여자전류를 계통에서 공급받기 때문에 사고에 따른 전원차단은 여자전류가 상실되어 단독운전이 불가능하지만 풍속에 따라서 회전수가 변화하 여 운전이 가능하고, 동기발전기는 풍속이 급변할 경우 동기탈조가 발생할 가능성 때문에 직접연계하지 않고 전력변환장치를 통해서 계통에 접속한다.(김현한, 풍력발전기 운전특성 분석, 강원대학교 전기공학과 석사논문, 2007.8. p.7~10)

22) 전력거래소(2018.12)에 따르면, 2017년 기준 우리나라 육상풍력의 평균 설비용량은 약 22% 정도로 태양광에 비해 높게 나타나고 있지만 외국과 비교해 높 지 않은 수치이다.

23), 24) OECD/IEA, Getting Wind and Sun onto the Grid, A Manual for Policy Makers, 2017. p. 42.

변화는 전기기기나 설비가 손상되기 쉬워 빠르게 대응하지 않으면 과거에 비해 정전사고의 위험이 훨씬 높아진다. 이미 선진국에서는 설비가 손상되지 않고 더 빠른 주파수 변화를 다룰 수 있도록 재생에너지의 계통연계기준을 강화하고 있다. 이 기준을 통하여 비상시 재생에너지가 계통에서 탈락하지 않고 일정시간 동안 유지될 수 있도록 함으로써 과도한 주파수 변동을 방지하고 있다. 본 절에서는 태양광 및 풍력 발전이 확대되면서 전력계통에 미치는 영향을 구체적으로 살펴보고자 한다.

1) 전력수급 불균형의 심화

교류 전력계통에서 대부분의 발전기는 출력예측과 주파수 및 전압제어가 가능하기 때문에 전력수급의 불균형이 발생하더라도 비교적 대응하기 용이하다. 그러나 태양광 및 풍력 발전이 증가하면서 전력수요의 변동에 대응할 수 있는 공급력의 변화도 더 심화되고 있다. 변동성 재생에너지는 출력예측에 대한 오차가 크고, 제어가 어렵기 때문에 계통관리 하에서 수급운영이 더 복잡하고 어려워지고 있다.

[그림 5]와 [그림 6]은 미국 캘리포니아주에서 각각 태양광 발전의 증가에 따른 순부하와 변동성 재생에너지의 잉여전력을 나타내고 있다. 전력수요의 수준이 높지 않은 봄과 가을철이나 주말 낮 시간대에 태양광 발전의 발전량이 증가하여 부하량의 일부를 차감함으로써 순부하는 급격하게 감소하고, 오후 저녁 무렵 다시 급격하게 증가하는 패턴을 보이고 있다. 전력계통에서는 부하가 증가하는 낮 시간에 태양광 발전량을 최대한 수용하기 위해서는 기존 발전기의 출력을 최소로 낮추고, 저녁 무렵 발전기의 출력을 최대한 상승시키는 등 출력의 변동성이 커진다. 기존 발전기의 최소출력 운전에도 불구하고 그 이상으로 태양광의 발전량이 증가하면 [그림 6]처럼 잉여전력이 발생하게 된다.

태양광 및 풍력 발전이 증가하면서 전력계통 운영에 어려움이 있는 상황은 부하량의 수준에 따른 풍력 및 태양광 발전량의 수준이다. 간단하게 살펴보면, 재생에너지의 비중이 높을 때, 계통의 부하가 높지만 재생에너지의 발전량이 작은 경우와 계통의 부하가 낮지만 재생에너지의 발전량이 높은 경우이다. 계통의 부하와

그림 5 캘리포니아의 순부하¹⁾

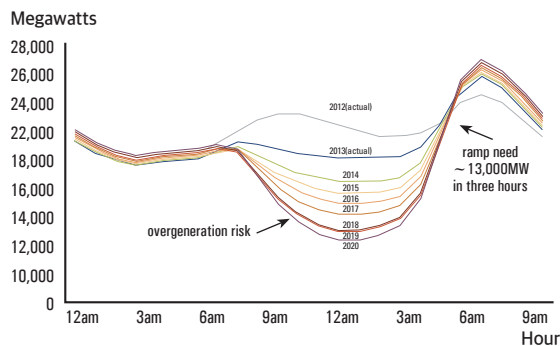
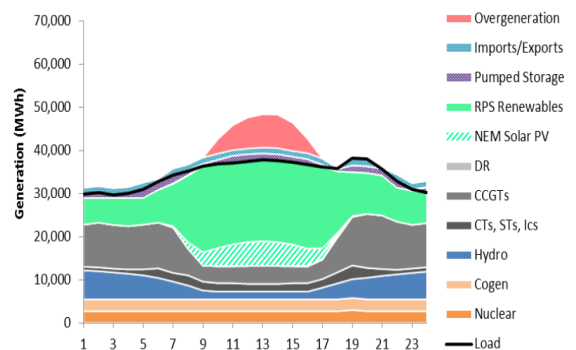


그림 6 변동성 재생에너지의 잉여전력²⁾



주: 1) 봄철 부하가 낮을 때 하루 태양광 발전량을 제외한 순부하로서 덩크브 형태를 나타냄.

2) 변동성 재생에너지로 인한 순부하 형태에 대한 영향과 결과로서 부하를 초과하는 잉여전력을 나타냄.

자료: Dneholm, P. et al, Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart, National Renewable Energy Laboratory(NREL), November 2015, p. 3 & p. 9.

재생에너지 발전량이 다 같이 높거나 낮으면 어느 정도 수급균형을 유지하는데 어려움이 덜하지만, 서로 반대 방향으로 움직일 때 수급의 불균형이 심화되고 있다.

표 4 부하량의 수준과 변동성 재생에너지 발전량 수준의 관계

구 분		재생에너지 발전량 수준	
		높음	낮음
부하량 수준	높음	- 수급불균형, 미세조정	- 수급불균형, 공급력 부족 - 주파수 하락, 예비력 확보
	낮음	- 수급불균형, 공급력 과잉 - 주파수 상승, 출력제한	- 수급불균형, 미세조정

재생에너지가 확대되어 전원믹스에서 비중이 높을 때, 부하수준과는 반대 방향으로 움직일 가능성이 더 높고, 변동성이 더 커지기 때문에 수급의 불균형은 확대될 가능성이 클 것이다. 예를 들면, 부하수준은 높지만 재생에너지의 발전량이 낮고 공급예비력이 부족하면, 주파수는 하락하여 수급불균형에 따른 정전의 위험이 높아진다. 반대로 부하수준은 낮지만 재생에너지의 발전량은 높고 화력발전의 최소출력 이상으로 재생에너지가 많아지면 출력제한이 이루어진다.

2) 전력품질 유지의 문제

가) 주파수 변동 심화

태양광 및 풍력 발전의 비중 확대에 의해 전력수급 불균형이 심화되면 계통의 주파수 변동도 심화될 것이다. 전력계통이 정상적인 상황 하에서도 기존 태양광 및 풍력 발전의 출력예측에 대한 오류와 실시간 출력 변동의 심화는 자연조건에 따라 예기치 않은 공급력의 과잉과 부족으로 이어질 수 있기 때문이다. 2장에서는 주로 전력수요에 대한 공급력의 부족과 관련한 주파수의 하락에 대한 대응이 주요 내용이었으나 여기서는 재생에너지로 인해 공급 과잉과 부족이 나타날 수 있다. 이때 주파수의 변화도 상승과 하락이 나타날



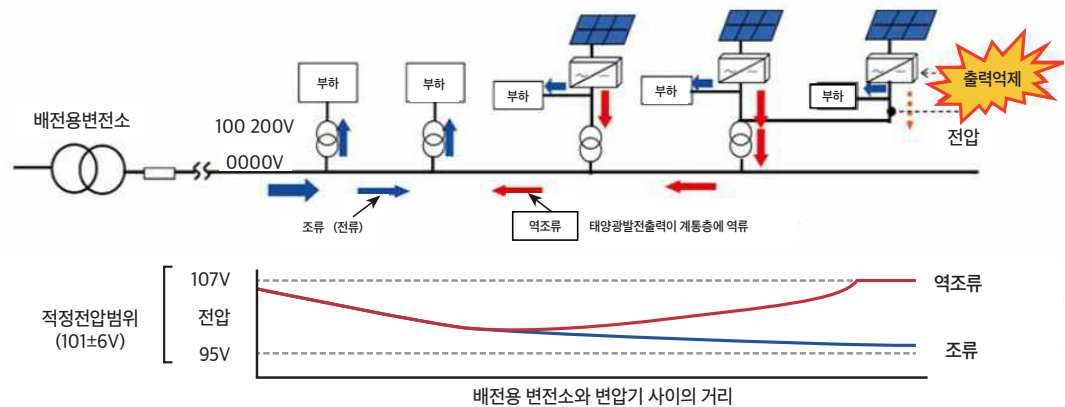
수 있으므로 주파수 조정에 대한 운영예비력의 역할이 중요해진다.

재생에너지의 공급이 과잉될 경우 주파수 상승으로 이어지고, 이를 위험신호로 받아들여 설비보호 장치의 작동으로 재생에너지 발전설비가 계통에서 탈락하고, 이는 공급부족으로 이어져 주파수 하락으로 귀결된다. 결국 저주파수 계전기의 작동으로 파급확대방지를 위해 일부 지역의 부하를 차단하는 방법으로 문제를 해결하는 상황으로 전개될 수 있다.

나) 전압의 상승

전기사업법에서 전기사업자는 배전계통에서 전압관리를 수행하는데, 변전소에서 변압기에 이르기까지 공급전압을 적정 범위의 저압으로 유지할 의무가 있다. 전압관리는 전력조류가 단방향이라는 전제조건 하에서 이루어지고 있으며, 부하의 변동으로 배전선에 흐르는 전류가 변화하여 전압이 변동하더라도 전압의 단조감소로 선로의 전압조정은 쉽게 이루어진다. 그러나 [그림 7과 같이 배전선로에 연결되는 재생에너지가 증가하면, 역조류(reverse power flow)가 발생하여 연계지점의 전압상승 때문에 기존의 전압제어방식으로는 적정전압조정능력을 잃게 될 수 있다.²⁵⁾ 태양광 및 풍력 발전설비가 계통에 연계되어 전력생산을 하면 전압의 상승으로 설비나 기기의 이상이 발생할 가능성이 높다. 전압의 변동은 재생에너지원에서 투입되는 유효전력과 무효전력에 의해서 계통의 전압상승으로 나타나는데, 무효전력을 흡수하여 전압상승을 완화할 수 있다.

그림 7 신재생발전 설비의 배전선로 연계에 따른 전압상승



자료: 김헌태·장성수, 3020 신재생에너지 정책의 성공적 달성을 위한 전력계통 안정화 핵심기술 개발 방향, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.67, No. 2. 2018, p. 151.

25) 일반적으로 부하는 유효전력 및 무효전력을 흡수하여 계통의 전압을 강하시키지만 발전기는 계통으로 전력을 주입하여 계통의 전압을 상승시킨다. 전력조류에 의한 전압변동은 계통의 저항이 클수록, 송전선로의 길이가 길수록 증가하기 때문에 전력조류에 의한 전압변동이 높게 나타난다.(김수빈·송승호, 재생 발전원의 무효전력제어 전략에 따른 송전망 전압상승 완화 효과 비교, 전력전자학술대회논문집, 2019.7.2~7.4, p. 41)

3) 전력시스템의 관성 약화

태양광 및 풍력 발전은 발전기의 특성상 계통의 주파수와 동일하게 운영되지 않는 비동기 발전기(non-synchronous generator)로서 관성이 없거나 약화되어 있다. 태양광 및 풍력 발전의 비중이 크지 않을 경우에는 계통의 관성을 유지시켜주는 기존 전통적 발전기로 인해 전력수급 불균형에서 발생하는 주파수와 전압에 변동이 발생하더라도 큰 문제없이 회복될 수 있지만, 이들 발전의 비중이 높은 경우 관성이 약화되어 주파수와 전압의 변동이 빠르게 진행되고, 정격주파수로 복원하는 힘이 약해진다.

특히 사고발생에 따른 수급불균형으로 공급력이 약해지면 계통의 관성이 낮기 때문에 주파수가 급격하게 저하되어 정전으로 이어질 가능성이 더 커진다. 낮아진 계통의 관성을 대체하기 위해서는 빠르게 대응할 수 있는 대체자원의 확보를 통하여 문제를 해결할 수 있는데, 이것이 계통의 유연성을 높이는 방향과 직결되어 있다.

4) 대규모 정전의 위험성 가중

변동성 재생에너지의 비중이 높은 전력계통에서 대형 발전기의 고장 및 탈락 또는 송배전선로의 이상 등에 따른 사고 발생 시 태양광 및 풍력 발전은 전력생산을 중단하지 않으면 설비손상 및 인버터 고장 등의 위험 때문에 계통에서 분리된다. 일반적으로 계전기에서 신호를 감지하고 차단이 가능하지만 전기적으로 분리된 상태에서도 단독운전방지²⁶⁾ 장치가 설치되어 단독운전 여부를 점검한 뒤 계통의 이상신호를 감지하면 자동으로 탈락하여 생산을 중지한다.

이 경우, 전력수급 불균형으로 이미 주파수의 하락이 발생하고, 단독운전방지 기능으로 재생에너지가 계통으로부터 완전히 분리되어 추가적인 주파수 하락에 직면하게 된다. 이 뿐만 아니라 전력계통 고장이나 전력공급 지역의 큰 부하변동, 또는 전기 공급 설비의 불량 등으로 순시 전압강하가 발생할 경우에도 재생에너지의 전원공급이 차단되어 정전의 위험에 직면할 수 있다.

나. 사고 발생 시 전력계통의 대응 방식

전력계통에서 예기치 않은 사고가 발생하면 부하가 일정해도 공급여력의 부족으로 수급불균형이 발생하면서 주파수가 하락한다. 대형 교류발전기가 다수인 계통에서 관성이 높고 예비력이 확보된 상태에서 수요 예측이 비교적 정확하다면, 특정 주파수 범위 내로 복원이 가능하다. 그러나 변동성 재생에너지의 비중이 높아질 경우 얘기는 달라질 수 있다. 계통의 관성이 약화되고 있는 상태에서 전력계통의 유연성이 충분히 확보되지 않으면 정전의 위험도 그 만큼 커질 수 있다.

태양광 및 풍력 발전이 증가하는 가운데 사고가 발생할 경우, 재생에너지의 영향으로 주파수 및 전압이 더 큰 폭으로 하락하여 정전의 위험성이 높기 때문에 재생에너지의 계통연계 기준을 강화하는 방식으로 문제를 해결하고 있다. 계통의 주파수 변동문제는 주로 송전망 위주의 전국단위에서 다루고 있으며, 전압의 변동문제는 배전망 위주의 지역단위에서 다루어지고 있다.

26) '단독운전'이란 배전계통의 일부가 배전계통의 전원과 전기적으로 분리된 상태에서 신재생에너지발전기에 의해서만 가압되는 상태를 말함으로 정의되어 있다.(한국전력공사의 송배전용 전기설비 이용규정의 [별표 6] 신재생발전기 계통연계기준 3. 정의, 2020.7.1. p. 59)

1) 비정상 주파수 대응

우선, 전력수요가 낮을 때 태양광 및 풍력 발전이 증가하는 가운데 전통적 발전기의 최소발전에도 불구하고 전력공급의 과잉으로 인해 과주파수가 발생한다. 이때 태양광과 풍력 발전의 출력을 제한하거나 잉여 전력의 활용방안을 마련함으로써 전력수급 균형과 주파수를 회복하게 된다. 재생에너지에 대한 출력제한의 횟수가 증가하는 것은 그만큼 전력계통의 유연성이 부족할 수 있다. 따라서 기존 발전설비의 유연성을 높여 응동 속도와 발전가능 범위에 따라 재생에너지에 대한 출력제한을 줄일 수도 있을 것이다. 즉, 발전기의 최소출력 수준과 출력증감발률에 따라서 재생에너지의 출력제한에 대한 대응방식도 달라질 수 있다. 한편, 상정고장으로 인해 일부 재생에너지가 추가적으로 정지함으로써 주파수가 하락하는 경우에 대체자원에 의해 공급대응력이 부족하면 저주파수 계전기에 의한 지역적 순차적 부하차단의 방법을 사용하게 된다. 따라서 사전에 사고 시에도 재생에너지 발전설비가 추가 탈락하지 않고 인버터에 연계유지 또는 사고 시운전계속(FRT: Fault Ride-Through)에 대한 의무를 부여함으로써 추가적 주파수 하락을 방지하는 방식으로 대응할 수 있다.

그런데, 사고 발생 시 재생에너지 설비 보호차원의 계통에서 탈락하도록 설치된 단독운전방지 기능과 사고 시운전계속 기능이 상충되고 있어 상호작용을 방해하지 않도록 각 기능의 작동시간을 적절히 선정할 필요가 있다.²⁷⁾

2) 비정상 전압 대응

비정상 주파수 대응과 동일하게 전력수요가 낮을 때 재생에너지 발전이 증가하여 전력공급이 과잉되면 과전압이 발생하는데, 이때에도 대형 발전설비나 변전소의 조상설비를 통하여 무효전력을 흡수, 과전압 문제를 해결하도록 하고 있다.

한편, 자연적인 낙뢰로 인한 지락, 기기의 시공불량 및 노후화에 따른 지락 또는 단락 사고로 순시전압강하가²⁸⁾ 발생하면, FRT가 적용되지 않는 풍력 및 배전망에 연결된 태양광 등이 저전압의 위험을 인지하여 계통에서 탈락한다. 이 경우도 계통사고에 따른 저전압이 발생하여 설비보호 차원에서 계통과 분리되는 것을 의미한다. 이와 같이 계통사고로 인한 일정규모 이상으로 재생에너지 설비가 동시에 탈락하면 대규모 정전으로 이어질 가능성이 높다. 따라서 저전압 사고에도 재생에너지 설비가 계통연계를 유지(LVRT: Low Voltage Ride-Through)하는 것을 재생에너지 발전설비의 전력계통 연계규정을 마련하여 시행하고 있다.

27) 조창희, 해외 FRT 기준 및 단독운전방지 기준의 양립성, 재생에너지 계통연계 기술워크숍 발표자료, 2020. 6. 25. p. 6.

28) 순시전압강하는 전력계통에서 낙뢰 등에 의해 고장이 발생한 경우 차단기를 개방하여 고장설비를 분리하는 사이 순시전압저하가 발생하거나 지락 및 단락사고가 발생하면 사고점이 분리되는 사이 순간전압저하 및 순간정전이 발생하는 경우를 말한다.

다. 국내 전력계통 영향 사례

제3장에서 살펴본 바와 같이 우리나라의 태양광 및 풍력 발전이 총발전량에서 차지하는 비중은 3%미만으로 매우 낮다. 일반적으로 변동성 재생에너지의 비중이 낮을 경우 전력계통에 미치는 영향은 미미하여 계통의 안정적 운영에는 지장을 초래하지 않는 것으로 인식되고 있다.²⁹⁾ 그러나 우리나라는 현재 변동성 재생에너지의 비중이 낮더라도 증가세가 가파르고, 이미 지역적으로 전력계통의 불안문제가 발생하고³⁰⁾ 있다는 것을 주목할 필요가 있다. 본 절에서는 국내에서 발생하고 있는 재생에너지 관련 전력계통 이슈들을 살펴보고자 한다.

1) 태양광 및 풍력 발전의 출력제한

전력거래소에 따르면 제주도의 태양광 및 풍력 발전은 설비용량 기준으로 2015년 293MW에서 2019년 551MW에 달하여 두 배에 약간 못 미치는 증가세를 나타내고 있다. 풍력은 발전설비가 2019년 290MW로서 2015년 대비 약 1.3배가 상승하였고, 태양광은 261MW로 2015년 대비 3.5배 이상 상승하였다.³¹⁾ 한편, 제주도의 전력수요는 금년 들어 최소 420MW(4월 5일)에서 최대 1,037MW(8월 14일)에 이르고 있어서³²⁾ 전력수요가 작은 경우에는 타 발전설비의 출력을 최소화하더라도 전력계통의 주파수 및 전압의 안정성을 고려하여 수요를 초과하는 재생에너지의 출력을 제한할 수밖에 없는 상황이 발생하고 있다. 만약 풍력발전의 출력제한을 하지 않으면 과잉공급으로 인한 과주파수가 나타나고, 이 때문에 태양광 발전설비가 대규모로 탈락하면서 급격한 주파수 하락을 유발하여 저주파수 계전기에 따른 부하차단으로 정전이 발생할 수도 있다.

<표 5>에 의하면, 금년 상반기까지 풍력발전에 대한 출력제한 횟수는 44회로서 작년 한해의 출력제한 횟수와 근접하고, 출력 제어량도 작년보다 4,215MWh가 증가한 13,408MWh에 이르고 있다. 풍력발전량 대비 제어량의 비율도 3%를 넘어섰으며, 출력제한에 따른 2015년부터 상반기까지 총비용도 약 46억 2,500만원으로 추정³³⁾ 되고 있다. 특히 금년 3~5월은 전력수요가 코로나19로 인해 -3%로 하락하여 전력공급 과잉량이 늘어나면서 풍력발전의 출력제한 횟수가 증가한 것으로 파악되고 있다.³⁴⁾

29) IEA는 태양광 및 풍력의 전력망 수용에 대한 정책 설계자를 위한 안내서를 통하여 변동성 재생에너지의 보급에 따른 비중정도에 따라 4단계로 구분하고 당면 과제와 성공적 관리 방법을 제시하고 있다. 단계별 구분은 발전량기준으로 1단계는 3%미만, 2단계는 3~15%, 3단계는 15~25%, 4단계는 25~50%로 되어있다. 이 기준에 따르면 1단계에서는 재생에너지의 발전량과 변동성이 일일 전력수요 변화에 비해 매우 미미하여 큰 문제가 안 되는 것으로 분석하고 있다.(OECD/IEA, Getting Wind and Sun onto the Grid, A Manual for Policy Makers, 2017.)

30) 특히, 제주도는 풍력 및 태양광 발전량이 2019년 약 14%로서 IEA(2017) 기준의 2단계에 해당되지만, 2018년에 발간된 World Energy Outlook(2018)에서 제시된 6단계에서는 재생에너지가 발전운영 패턴을 결정하는 3단계(10~20%)에 해당되고 있다.(이태의, 재생에너지 변동성 대응을 위한 P2G 활용방안 연구, '재생에너지 증가에 따른 전력안보 확보방향' 전문가 세미나 발표자료, 2020. 9. 17, p. 6.)

31) 태양광 및 풍력 발전의 설비용량은 전력거래소 EPSIS 통계자료의 수치이다. 발전설비 용량은 전력거래소의 거래관련 발전설비로서 한전의 PPA 설비와 BTM 재생에너지자원들은 포함되지 않는 수치이다. 이 자원들이 포함될 경우 그 규모는 더 클 것으로 예상된다.

32) 제주도 전력수요의 최소치와 최대치는 전력거래소 제주계통 운영정보 현황 데이터에서 얻은 수치이다.

33) 현재 풍력발전 출력제한에 대한 순서 및 보상에 대한 기준이 마련되어 있지 않지만, 전력도매시장의 가격기능이 수급을 반영하지 않는 이상 향후에도 비자발적인 출력제한에 대한 보상방안이 마련될 필요가 있다. 보상기준에 대한 근거는 기회비용 개념으로 풍력발전에 따른 수익과 동일하게 지급되는 것이 타당할 것이다.

34) 전력거래소 제주본부에 따르면, 금년 봄철 전력수요가 비정상적으로 예측한 수치보다 6%이상 하락한 -3%로 하락하면서 출력제한 횟수가 늘어난 것으로 파악되고 있다.

표 5 제주도 전력계통의 풍력발전 출력제한 횟수

년도/구분	풍력발전 제어횟수	출력 제어량 (MWh)	제어비중(%) (제어량/풍력발전량)	제어비용 (백만원)
2015	3	152	0.04	27
2016	6	252	0.05	45
2017	14	1,300	0.24	234
2018	15	1,366	0.25	246
2019	46	9,223	1.66	1,660
2020. 1~6	44	13,408	3.31	2,413
합계	128	25,701	0.09	4,625

주: 제어비용은 REC 장기계약 평균비용(180원/kWh)을 적용한 추정치(제어량 × 180원/kWh)임.
자료: 전력거래소 제주본부 제공자료

그러나 향후에도 풍력 발전 및 태양광 발전의 추가 설비확대 계획과 수요의 변화에 따라서 급격히 증가할 가능성이 있기 때문에 잉여전력의 처리문제가 해결되지 않는 한 계통의 불안정은 더욱 커질 가능성이 있다. 특히 현재는 풍력발전 설비에 대해서만 제어하고 있지만, 태양광 발전은 설비의 증가 추세가 빠르게 나타나고 있어서 제어가 가능하다면 태양광 발전의 출력제한까지도 고려해야 될 상황이 도래할 수도 있다. 이 문제의 해결은 해저케이블(HVDC: High Voltage Direct Current)의 제3연계선 건설을 통한 육지로의 전송, 전력저장장치의 확충, 자체 전력수요 개발, 또는 잉여전력 발전시간대로 수요이동 등 다양한 방법이 강구될 수 있으나 당분간 전력수요가 크지 않을 경우 풍력발전의 출력제한 횟수는 확대될 것으로 보인다.

2) 배전계통의 과전압 문제

국내에서 발생한 배전계통의 과전압 문제는 2019년 10월부터 연말 사이에 태양광 발전이 밀집해 있는 전라도 지역에서 발생하였다. 그 원인은 당시 전력수요가 작고 배전계통에 연계된 태양광 설비의 전력생산량이 증가하여 필요이상의 전력이 공급된 시기였다. 배전선로에 전력공급이 많아지면 무효전력도 동시에 높아지면서 과전압이 발생되는데, 이를 흡수할 수 있는 대형 발전소인 한빛원전이 고장을 일으켜 정지된 상태였다. 결국 무효전력을 흡수하지 못하는 태양광 발전설비의 과도한 전력공급으로 인해 과전압 문제가 발생한 것이다.³⁵⁾ 배전계통에서 과전압 상태는 기기나 설비의 고장을 유발할 수 있다. 결국 이 문제는 송배전 선로의 조류변경과 변전소의 조상설비가 무효전력을 흡수함으로써 해결이 되었지만 향후에도 전라도 지역에서 이러한 문제가 발생할 가능성이 높을 것으로 보인다.

35) 이투뉴스, '전라권 전력망 한때 과전압 비상', 2020.2.18.일자 기사 요약

3) 대형 발전기 탈락 또는 송전선로 고장에 따른 주파수 하락폭 확대

대형 발전기 탈락에 따른 주파수 하락은 전력계통에서 종종 발생하는데, 태양광 및 풍력 등 변동성 재생 에너지 발전설비는 이 주파수 하락을 위험신호로 인지하고 설비의 보호차원에서 생산을 중단하는 경우가 발생한다.

국내에서 금년 3월 28일 신보령 1호기가 불시정지로 인해 계통주파수가 59.8Hz로 하락하였으며, 그 이후에 계통주파수가 59.67Hz까지 추가 하락한 사건이 발생했다. 그 이유는 태양광 발전설비의 인버터가 59.8Hz의 저주파수를 위험신호로 인식하고 전력생산을 중단하여 추가적인 주파수 하락으로 이어진 것이다. 현행 전기사업법에서 정격주파수는 60Hz로 $\pm 0.2\text{Hz}$ 까지만 허용하고 있으므로 그 범위를 벗어나면 계통신뢰도 기준을 위반하는 것으로 간주하고 있다. 이 사건이후 한전의 송배전용 전기설비 이용규정에서 신재생발전기 계통연계 기준의 개정을 통하여 변동성 재생에너지 신규접속 설비에 대한 계통연계 기준을 강화하여 고장 시에도 일정시간 동안 계통접속을 유지하도록 하고 있다.³⁶⁾

한편, 금년 1월 30일 새벽 제주도 내 154kV 송전선로 중 하나가 낙뢰로 인해 고장이 발생한 후 운전 중이던 160MW의 풍력발전 중 절반 가까이 탈락하는 상황이 발생했다. 제주도는 육지와 연결된 해저케이블(HVDC)에서 빠르게 전력을 공급받아 위험을 넘겼지만 육지의 경우 고립계통이기 때문에 위험상황에 대한 안이 부족한 것으로 인식되고 있다.³⁷⁾

최근 국내에서 대형 발전기의 고장이나 탈락 또는 송전선로 고장으로 인한 주파수저하가 태양광 발전설비의 전력생산 중단으로 이어지는 사례가 나타나고 있다. 이와 같은 주파수의 급격한 하락은 대응 여부에 따라 대규모 정전사태를 유발할 수 있는 심각한 사안이 될 수도 있다. 이미 외국에서도 유사한 원인으로 정전 사고로 이어진 사례가 보고되고 있는데, 우리나라와의 차이는 태양광 및 풍력 발전의 비중이 높은 상황에서 발생하고 있다는 점이다. 우리나라는 변동성 재생에너지의 비중이 낮은 상황에서도 지역적으로 전력계통의 불안정이 나타나고 있다는 사실에 주목하고 서둘러 대책마련에 노력을 기울일 필요가 있다.

5. 시사점

최근 전력산업을 둘러싼 에너지 환경은 급속하게 변화되고 있는데, 그 이유는 온실가스 감축 의무이행과 에너지전환정책에 따른 태양광 및 풍력과 같은 변동성 재생에너지의 확대가 가장 큰 영향을 미치고 있다. 발전원의 믹스에서 태양광 및 풍력 발전의 비중이 미미할 때, 전력계통의 운영은 전력수급 불균형이 나타나더라도 대다수 회전체 발전기의 관성과 자체 주파수 제어기능, 중앙관제센터의 급전지시를 통해 비교적 안정적인 대응이 가능하였다. 과거에는 전력수요의 변동성에 안정적으로 전력을 공급하는 것이 최우선 목적이었다면, 이제는 변동성 재생에너지가 늘어남에 따라 수요변동성은 물론 공급의 변동성과 함께 계통의 불안정성을 동시에 해결해야 하는 상황에 직면하고 있다.

36) 이투데이, '전력계통 주파수 하락 시 태양광 동시탈락 위험', 2020.7.16.일자 기사 요약

37) 전기신문, '재생에너지 확대 계통계획이 중요하다(하)', 2020.9.1.일자 기사 일부 발췌



우리나라는 현재 변동성 재생에너지의 비중이 낮지만 보급목표에 따른 재생에너지 비중이 2040년 최대 35%까지 증가하는 목표를 제시하고 있다. 현재는 외국에 비해서 변동성 재생에너지의 비중이 낮음에도 불구하고 지역적으로 전력계통에서 재생에너지 비중이 높은 국가와 유사한 경험을 하고 있다. 즉, 변동성 재생에너지의 영향으로 전력수급 불균형과 이에 따른 주파수 및 전압의 급격한 변동으로 인한 계통의 불안 사례가 나타나고 있다. 우리나라는 국가 간 계통연계가 이루어진 유럽과는 달리 섬나라와 같은 고립 계통으로 유사시에도 자체적으로 전력계통의 불확실성과 변동성에 대응할 수밖에 없다. 아직 정전사고가 발생하지는 않았지만 향후 대응여부에 따라서 정전사고의 발생가능성은 남아있다. 이에 따라 우선 외국과 같이 신재생발전기의 계통연계기준을 강화함으로써 기술적으로 계통의 대응력을 높이고 있다. 또한 변동성 재생에너지의 보급 확대에 따른 출력변동과 주파수 하락을 대응하기 위해 Fast DR(Fast Demand Response)을 도입할 계획을 세우고 있다. 일정 주파수 이하로 하락하면 속응성 자원으로서 저주파수 계전기(UFR)를 통한 산업체의 소비차단으로 빠르게 대응하려는 것이다.

그러나 근본적으로 시장이나 운영시스템의 개혁을 통해 변동성 재생에너지의 실시간 변화를 반영하거나 재생에너지의 변동성을 대체할 수 있는 자원의 활성화에 대한 유인체계를 조성하지 않으면 공급대응 능력이 저하될 수 있다. 전력시장을 비롯한 전력운영 시스템은 여전히 2001년 전력산업 구조개편 이후와 동일한 형태로 유지되고 있다. 도매시장은 하루 전 시장만을 운영하여 송전망제약을 비롯한 다양한 제약여건도 고려하지 않은 수요와 공급으로 계통의 시장가격을 결정함으로써 실시간 수급균형을 위한 추가비용은 더욱 늘어나는 방식으로 운영되고 있다. 이 과정에서 운영예비력을 비롯한 보조서비스에 대한 시장가치를 제대로 반영하여 보상하지도 않는다. 결국, 운영예비력과 대체자원을 어떻게 활용하느냐에 따라서 전력계통의 안정적 운영 여부가 좌우될 것이므로 이들 자원에 대한 투자비용을 시장가격으로 보상하는 체계의 구축과 유인제공은 무엇보다 중요할 것이다.

변동성 재생에너지의 증가속도가 빨라지고 있는 가운데, 그 비중이 더 확대되기 전에 재생에너지의 실시간 변동성이 반영될 수 있는 실시간 시장과 수급균형에 대처하기 위한 보조서비스 시장의 구축을 통하여 시장의 가격기능이 작동하는 체계로의 전환이 시급하다. 외국의 경우 도매시장 가격이 수급상황을 반영하



여 공급과잉이 나타날 경우 마이너스 가격까지 나타나서 변동성 재생에너지 발전사업자가 자발적으로 설비의 가동중단을 선택할 수 있다. 우리나라는 발전원별 비용자료와 발전량으로 도매시장 가격이 결정되고, 정산도 총괄원가규제로 배분하는 방식에 의해서 이루어지고 있다. 사실상 시장의 가격기구가 사업자의 입찰 선택을 자유롭게 하는 시스템이 아니다. 재생에너지 발전사업자도 입찰하지 않고, 출력제한도 비자발적으로 이루어지기 때문에 보상이 필요한 상황이다.

결국, 전력시장에서 재생에너지 사업자의 전력생산에 대한 선택이 가능한 경쟁적 시장시스템의 구축과 다른 발전사업자를 포함한 시장참여자의 공급여력확보 노력을 유인하는 체계에서 계통의 유연성을 확보하는 것이 합리적인 방향이 될 것 같다. 당장은 재생에너지의 기술적 보완을 통한 계통연계기준 강화로 정전 사고 위기에 대응할 수 있을지 모르지만 향후 전력운영 시스템이나 시장의 유연성강화 노력 없이는 언제 어느 순간에 공급대응 여력이 부족한 상황이 발생할지도 모를 일이다.

국내문헌

- 김수빈·송승호, '재생 발전원의 무효전력제어 전략에 따른 송전망 전압상승 완화 효과 비교', 전력전자기술대회 논문집, 2019. 7. 2.~7. 4.
- 김영창·유재국, 블랙아웃과 전력시스템 운용, 북코리아, 2015. 8. 25.
- 김현태·장성수, '3020 신재생에너지 정책의 성공적 달성을 위한 전력계통 안정화 핵심기술 개발 방향', The Transactions the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 2. 2018.
- 김현한, 풍력발전기 운전특성 분석, 강원대학교 대학원 전기공학과 석사학위논문, 2007. 8.
- 산업통상자원부 고시 제2019-176호, 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준, 2019. 11. 1.
- 산업통상자원부, 제8차 전력수급기본계획(2017~2031), 2017. 12. 29.
- 옥기열, '국내 전력시장 개편방향', 국회 정책좌담회 발표자료, 2020. 7. 29.
- 이정호, '전력계통운영 보조서비스(Ancillary Service) 역할과 이해', 전기저널 스페셜 이슈, (<http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=3477>, 접속일자 2020. 9. 5.)
- 이태의, 재생에너지 변동성 대응을 위한 P2G 활용방안 연구, '재생에너지 증가에 따른 전력안보 확보방향' 전문가 세미나 발표자료, 2020. 9. 17.
- 이투스, '전라권 전력망 한때 과전압 비상', 2019. 2. 18.
- 이투스, '전력계통 주파수 하락 시 태양광 동시탈락 위험', 2020. 7. 16.
- 전기신문, '재생에너지 확대 계통계획이 중요하다(하)', 2020. 9. 1.
- 조성민·장병훈·윤용범·전용재·김철우, "주파수추종 운전 적용을 위한 BESS의 운용 방법 및 효과", The Transactions the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64, No. 1, pp. 16~22, 2015.
- 조성수, 재생에너지 증가가 계통에 미치는 영향 및 대책, '재생에너지 증가에 따른 전력안보 확보방향' 전문가 세미나 토론자료, 에너지경제연구원, 2020. 9. 17.
- 조창희, 해외 FRT 기준 및 단독운전방지 기준의 양립성, 재생에너지 계통연계 기술 워크숍 발표자료, 2020. 6. 25.
- 한국에너지공단 신재생에너지센터 신재생에너지정책실, 2019년 신재생에너지 보급통계 잠정치(2020년 공표) 결과 요약, 2020. 8.
- 한국전력거래소 기후신재생전략팀, 지역별 태양광·풍력 이용률 및 발전원가 분석, 2018.12.
- 한국전력거래소, 제주본부 제공자료.
- 한국전력거래소, EPSIS 통계자료.
- 한국전력공사, "송·배전용 전기설비 이용규정", 2020. 7. 1.

외국 문헌

- Ela, E., M. Milligan, and B. Kirby, Operating Reserves and Variable Generation, National Renewable Energy Laboratory(NREL), August 2011.
- Committee on Climate Change, Net Zero - Technical Annex: Integrating variable renewables into the UK electricity system, 2 May 2019.
- OECD/IEA, Getting Wind and Sun onto the Grid, A Manual for Policy Makers, 2017.
- OECD/IEA, World Energy Outlook, 2018.
- Dneholm, P., M. O'Connel, G. Brinkman, and J. Jorgenson, Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart, National Renewable Energy Laboratory(NREL), November 2015.

웹사이트

- 한국에너지공단 신재생에너지센터, (https://www.knrec.or.kr/energy/sunlight_summary.aspx, 접속일자 2020. 9. 5.)
- 한국풍력산업협회, (http://www.kweia.or.kr/bbs/page.php?hid=sub02_01, 접속일자 2020. 9. 5.)