

KEEI ISSUE PAPER

정책 이슈페이퍼 20-15

저탄소 전력시스템으로의 전환을 위한 전력시장 제도개선 방안 연구(2/3)

안재균



정책 이슈페이퍼 20-15

저탄소 전력시스템으로의 전환을 위한 전력시장 제도개선 방안 연구(2/3)

안재균

목 차

I. 배경 및 문제점 / 1

II. 조사 및 분석 결과 / 3

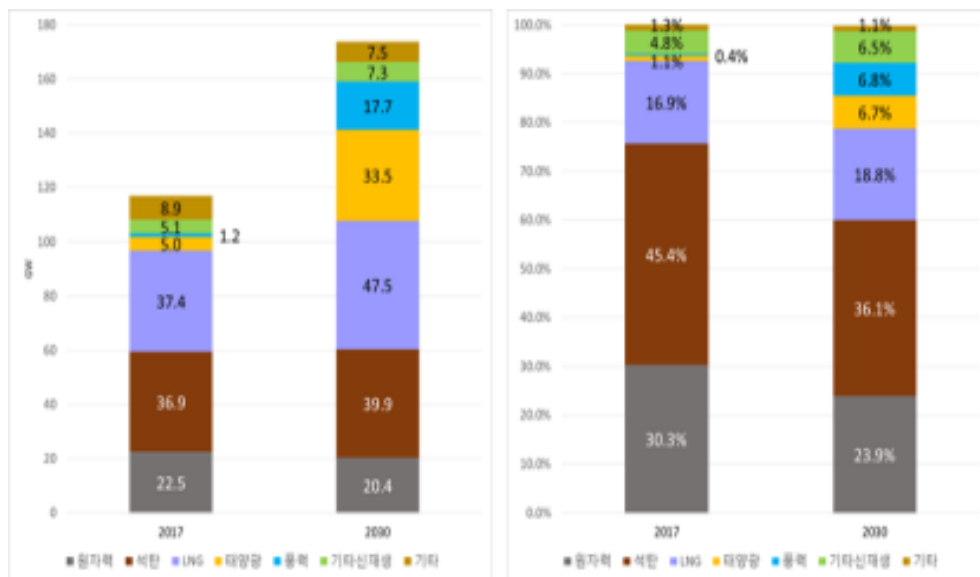
III. 정책 제언 / 18

〈참고자료〉 / 21

I 배경 및 문제점

- 정부의 재생에너지 3020 비전에 따라 2030년 기준 신재생 발전량 비중은 20%, 설비용량은 60GW 수준으로 증가할 것으로 예상되어 재생에너지를 대상으로 하는 출력제한의 필요성이 제기되고 있음.
- 태양광, 풍력발전과 같은 변동성 재생에너지(VRE)의 발전비중은 약 13.5%, 설비용량은 약 51GW까지 확대될 것으로 예상

[그림 1] 전원별 설비용량(좌), 발전량 비중(우) 현황과 목표



출처: 산업통상자원부(2017, p.36, 79, 80, 83)를 참조하여 저자 작성

- 변동적 재생에너지 출력제한(Curtailment)은 재생에너지의 출력변동성과 예측 불확실성을 완화하는 동시에 전력수급 불균형, 송전제약, 계통 신뢰도 저하 등의 문제에 효과적인 방안으로 평가

○ 국내의 현행 제도에는 출력제한 수행방법에 대한 명시, 근거, 구체적 절차를 다룬 세부규정이 부재한 상황으로 합리적인 재생에너지 출력제한 적용기준을 모색해야 할 시점임.

□ 본 연구에서는 변동적 재생에너지 출력제한의 당위성을 검토하고 향후 출력제한량을 추정 및 출력제한 수행방법을 고찰하는 한편, 경제적으로 사회후생을 극대화할 수 있는 출력제한 보상제도 고찰과 재생에너지 출력제한 완화를 위한 방안을 모색

II 조사 및 분석 결과

1. 재생에너지 출력제한의 필요성

- 재생에너지 출력제한(Curtailment)은 재생에너지의 공급과잉(Oversupply -ing) 및 변동성(Variability)으로 인해 전력수급 안정을 위해 인위적으로 재생에너지의 출력을 제한하는 것으로 정의
 - 전 세계 다수의 기관 및 계통운영자는 송전선로의 혼잡문제를 해결하고 수급 균형을 유지시키기 위해 재생에너지 출력제한을 수행하며, 일부 기관 및 계통 운영자는 계통안정도를 유지시키기 위해 재생에너지 출력제한을 수행
 - 송전선로 혼잡 : 송전망 건설 속도가 재생발전기 건축 속도보다 송전망 건설이 늦어지거나 노후화된 경우, 송전 가능용량 부족으로 발생
 - 수급 균형 : 재생에너지 발전량은 많으나, 부하가 적은 시간대(심야시간)에 수급 균형을 유지하기 위하여 발생
 - 계통안정도 : 계통전압 및 주파수에 변동이 생길 시 재생에너지 출력제한으로 안정도 유지
- 출력제한은 변동적 재생에너지의 계통수용비용(Integration cost)을 감소시키며 총 발전비용 감소로 사회후생을 증대
 - 변동적 재생에너지의 비중이 높을 경우 재생에너지의 출력변동성과 예측 불확실성이 증가하기 때문에, 발전계획 및 운영에서 출력제한을 반영함으로써 재생에너지의 급격한 출력변동성이 완화되도록 할 수 있음.

- 즉, 발전계획 단계에서 적절한 출력제한을 반영하는 것은 적절한 예비력을 확보하게 하는 동시에 기존 발전기의 출력증가 및 감소능력을 확보하여 안정적인 전력공급이 되게 함.

○ EnerNex(2007)의 연구결과에 따르면 재생에너지에 대한 출력제한은 재생에너지 계통통합비용(Integration cost)을 감소시킴.

- 계통 내 풍력 발전설비 비중이 약 20%인 경우, 1% 정도의 에너지 출력제한 만으로도 풍력의 계통통합비용을 약 20% 이상 줄일 수 있다는 결과를 나타냄 (<표 1 참조>).

<표 1> 국외 풍력 출력제한의 Integration cost에 대한 영향

풍력 설비 용량 (MW)	계통 내 풍력설비 비중 (%)	풍력 출력 제한량 (%)	풍력 위치	출력제한 시 Integration cost (\$/MWh)	미 출력제한 시 Integration cost (\$/MWh)	변화량 (%)
100	5%	0.4%	1 풍력단지	2.75	3.78	37%
200	10%	0.9%	2 풍력단지	6.99	8.49	21%
400	20%	0.9%	넓게퍼짐	6.65	7.98	20%
600	30%	1.4%	넓게퍼짐	8.84	10.69	21%

출처: EnerNex(2007, p.48)을 참조하여 재구성

○ Henriot(2015)는 변동적 재생에너지의 불확실성을 고려한 2기간 기동정지 계획의 분석적 방법(Analytical method)로 출력제한이 사회후생(Social welfare)을 증가시킴을 증명

- 해당 모형은 전력계통의 유연성, 재생에너지의 변동성과 용량을 주요 변수로 채택하여 각 계수에 따른 최적 감축 수준 사이의 관계를 설명

- 분석적 해(Analytical solution)의 결과에 따르면 유연성(φ)이 낮고 변동적 재생에너지의 불확실성이 큰 전력시스템에서 변동적 재생에너지의 출력제한(Curtailment)은 총 발전비용의 절감을 가져다 줌.
- 따라서 유연성이 부족한 화력발전의 기동 또는 급격한 증발 비용이 높을 경우에는 변동적 재생에너지의 출력을 제한하는 것이 합리적이며, 전기 소비자는 최적의 출력제한(Curtailment)에 따른 발전비용 절감으로부터 이익을 얻게 됨.

2. 국내외 재생에너지 출력제한 현황

- 국내에서는 제주지역에 한하여, 계통특성을 고려해 일부 시간대에 재생에너지 출력제한을 시행
 - 제주 지역 재생에너지 출력제한은 2015년부터 2018년까지 모두 41회 발생
 - 배전전용선로(22.9kV) 이상에 연계된 풍력발전기에 한정하여 시행하며, 2015년에 3회, 2016년 6회, 2017년 16회, 2018년에 16회로 출력제한 빈도가 증가 추세에 있음.
 - 태양광의 경우에는 소규모 태양광(1MW 이하)이 전체 태양광 설비용량 중 82%를 차지하여, 현실적으로 출력제어가 불가능하기에 출력제한이 시행된 사례가 아직 없음.
 - 출력제한의 대부분은 전력수요가 적고 재생에너지 발전량이 많은 새벽시간에 발생하였으며, 출력제한의 목적은 계통 안정 및 수급균형을 위해 시행

□ 변동적 재생에너지 수용률이 최고 수준인 덴마크, 독일, 아일랜드, 이탈리아, 포르투갈, 스페인의 출력제한이 4% 미만임.

○ 이는 상기 5개 국가의 계통 및 송전운영자(Transmission System Operator)가 지난 10년 간 입법 및 규제 체계와 함께, 많은 변동적 재생에너지를 수용하기 위해서 계통을 적절히 계획하고 운영한 결과

〈표 2〉 유럽 국가별 변동적 재생에너지 출력제한 통계 자료

Country	Year	Total Generation (GWh) A	Wind (GWh) B	PV (GWh) C	Curtailed Energy (GWh) D	Penetration Ratio E=(B+C)/A	출력제한 Ratio F=D/(B+C)
Denmark	2014	31,905	13,079	5%	almost zero	42.9%	0.00%
Germany	2011	613,068	48,883	19,599	0.421	11.2%	0.61%
	2012	629,812	50,670	26,380	0.385	12.2%	0.50%
	2013	635,267	53,400	30,000	0.127	13.1%	0.15%
Ireland	2011	27,472	4,380	-	0.106	15.9%	2.42%
	2012	27,592	4,010	-	0.103	14.5%	2.57%
	2013	26,041	4,541	-	0.171	17.4%	3.77%
Italy	2009	292,641	6,543	676	0.700	2.5%	9.70%
	2010	302,064	9,126	1,874	0.527	3.6%	4.79%
	2011	302,584	9,856	10,688	0.264	6.8%	1.29%
	2012	299,277	13,407	18,637	0.166	10.7%	0.52%
	2013	289,807	14,811	21,228	0.152	12.4%	0.42%
	2014	277,897	14,966	23,299	0.121	13.8%	0.32%
Portugal	2014	52,886	12,103	630	0	24.1%	0.00%
Spain	2008	313,758	31,777	2,562	0.108	10.9%	0.31%
	2009	294,620	36,991	5,961	0.070	14.6%	0.16%
	2010	301,527	43,692	6,425	0.315	16.6%	0.63%
	2011	293,848	42,160	14,882	0.073	19.4%	0.13%
	2012	297,559	48,126	16,386	0.121	21.7%	0.19%
	2013	285,260	54,338	17,950	1.166	25.3%	1.61%

출처: Yasuda et al.(2015, p.2)

- 스페인의 TSO인 REE(Red Eléctrica de España)는 실시간 출력제한 관리를 통해 제어 센터가 기상 조건에 따라 지령값을 수정하는 한편, 가능한 범위에서 지속적으로 출력을 낼 수 있도록 손실을 최소화하는 새로운 메커니즘을 제시
- 영국의 주요 출력제한 원인은 스코틀랜드에서 발생하는데, 이는 웨일즈나 잉글랜드로의 송전용량이 부족하기 때문이며, 출력제한에 따른 보상은 전력 시장에서 입찰을 통해 결정
- 독일에서의 대부분의 출력제한은 송전망 제약으로 인해 발생하고, 송전망 또는 배전망에 접속된 풍력사업자의 출력제한의 양은 거의 동일한 수준에서 설정
- 이탈리아에서의 대부분의 풍력발전단지는 남쪽 지역에 150kV 송전망에 연계되어 있고, 수요는 북쪽 지역에 위치함에 따라 남과 북을 연계해주는 송전망에 혼잡이 발생하며, 배전계통에서 태양광 단지에서 출력제한이 발생
- 변동적 재생에너지의 수용률이 높은 아일랜드에서는 전력계통 운영으로 인해 발생 하는 출력제한을 Curtailment라고 부르고, 송전망의 제약으로 인한 출력제한을 Constraint로 구별
 - 송전망 제약에 의한 출력제한(Constraint), 대부분 북서지역과 남서 지역의 송전망의 경우에는 혼잡으로 인해 낮 동안 발생
 - 출력제한이 불가피한 5가지의 Security 제약 조건으로는 전력계통 안정도, 운영 예비력, 전압 제어, 오전 부하 상승, 비동기 발전기 50%에 한계가 있음.

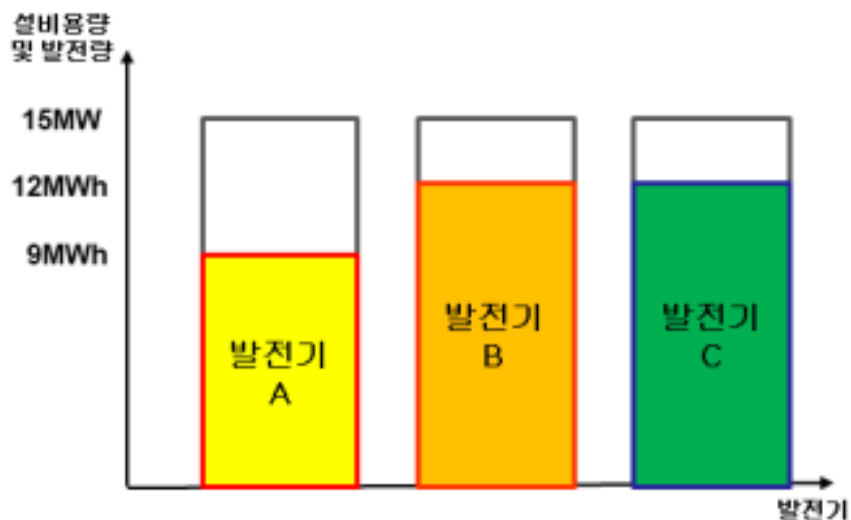
3. 재생에너지 출력제한 방법

- 대표적인 비시장적인 출력제한 방법은 LIFO(Last In First Out), Pro rata, Rota가 있음.

○ 출력제한 방법의 예시로 발전기별 특징과 발전량은 아래와 같음.

- 신재생 발전기: A, B, C (총 3대)
- 발전기 설비용량: 15MW로 모두 동일
- 출력제한 전 전체 발전량: 33MWh
- 출력제한 전 A 발전기 발전량: 9MWh
- 출력제한 전 B 발전기 발전량: 12MWh
- 출력제한 전 C 발전기 발전량: 12MWh

[그림 2] 출력제한 전 발전기별 발전량



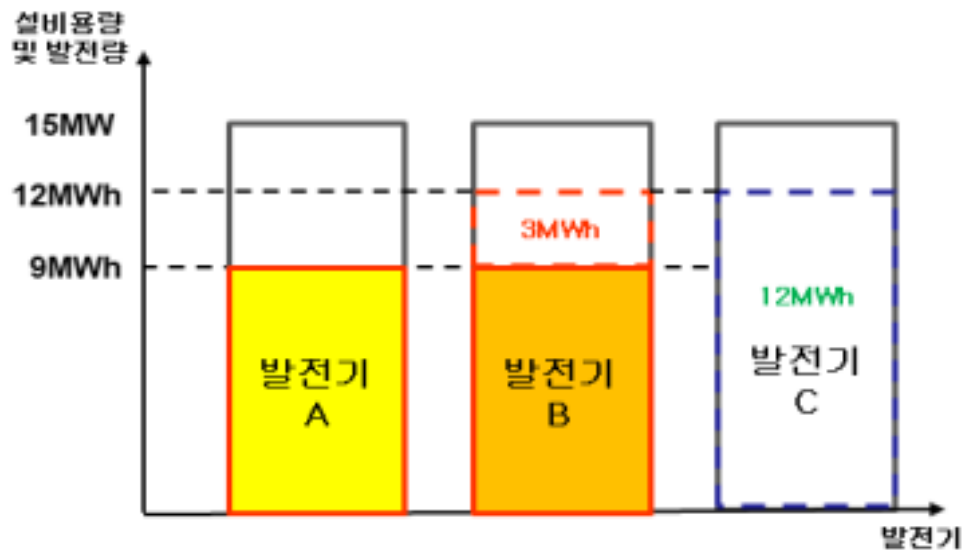
출처: Anaya and Pollitt(2012, p.9)를 참조하여 저자 재구성

○ LIFO(Last In First Out) 방식: 발전기 진입의 역순으로 출력제한을 수행하는 방식

- 진입 순서: A → B → C
- 감발 순서: C → B → A

- A 감발량: 0MWh
- B 감발량: 3MWh
- C 감발량: 12MWh

[그림 3] LIFO 방법 예시

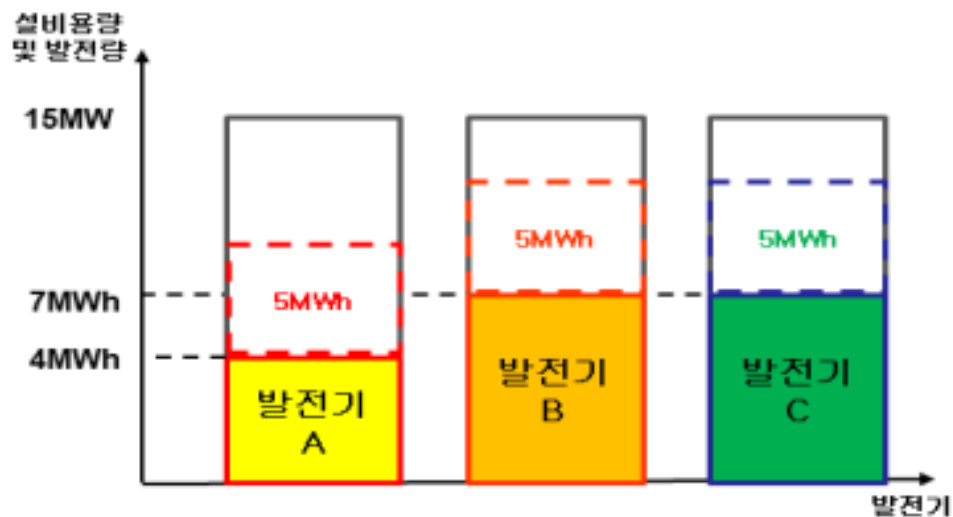


출처: Anaya and Pollitt(2012, p.9)를 참조하여 저자 재구성

- LIFO 방법의 경우에는 계통에 늦게 진입한 발전기부터 출력제한을 수행하기 때문에 기존 발전사업자의 권리를 보호할 수 있음.
 - 반면에, 계통 문제에 직접적인 원인이 되는 발전기를 출력제한하는 것이 아니라 진입순서에만 의존하기 때문에 효과적인 출력제한을 수행하지 못하는 경우가 발생할 수 있고 신규 발전사업자의 계통 진입 의지를 저해
- Pro rata 방식: 발전기를 균등한 용량으로 출력제한을 수행하는 방식
- 감발 순서: 진입 순서 상관없이 균등 감발
 - 총 감발 필요량: 15MWh

- A 감발량: 5MWh
- B 감발량: 5MWh
- C 감발량: 5MWh

[그림 4] Pro rata 방법 예시

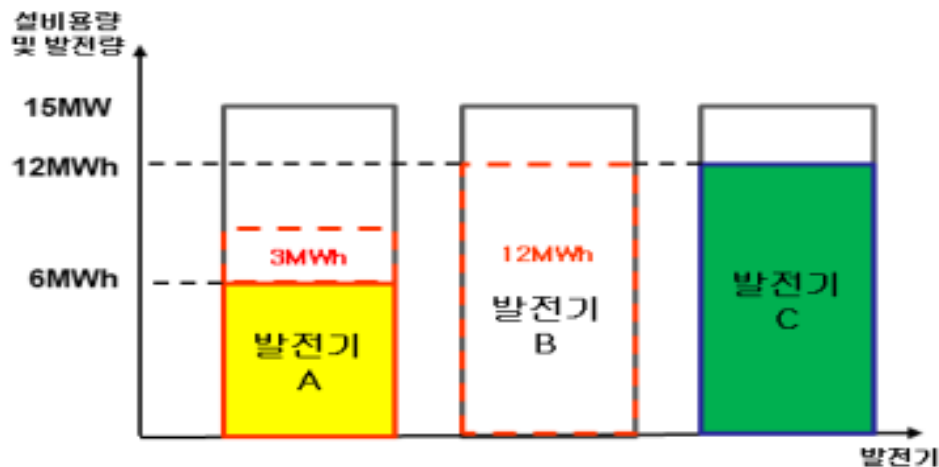


출처: Anaya and Pollitt(2012, p.9)를 참조하여 저자 재구성

- 총 출력제한 용량을 발전기마다 고르게 분배하는 방법인 Pro rata 는 계통 내에 재생발전기가 많아질수록 총 출력제한용량을 계산하는 것이 어려움.
- 이는 각 발전기의 최대 출력가능용량(Max Cap)을 미리 설정해놓음으로써 어느 정도 해결할 수 있지만 재생발전기의 이용률에 직접적인 영향을 미칠 수 있음.
- Rota 방식: 사전에 정해진 순서로 순환해가면서 출력제한을 수행하는 방식
 - 감발 순서: B → A → C → B
 - 총 감발 필요량: 15MWh

- A 감발량: 3MWh
- B 감발량: 12MWh
- C 감발량: 0MWh

[그림 5] Rota 방법 예시



출처: Anaya and Pollitt(2012, p.9)를 참조하여 저자 재구성

- 사전에 정해진 순서대로 순환감발을 수행하게 되며, 계통 운영자의 지시에 따라 일/주/월별로 변경될 수 있는 Rota 방법은 계통 내에 재생발전기가 많아 질수록 출력제한량은 많아지게 되고 자주 출력제한을 수행해야할 수 있음.
 - 이는 각 발전기의 연간 이용률의 불확실성이 커질 수 있다는 단점이 있으나 계통운영자가 미리 발전기마다 최소한의 보장된 출력용량(Min Cap)을 설정하여 어느 정도 해결할 수 있음.
- 국내의 경우 아직까지 재생에너지 관련 시장이 없기 때문에, 단기적으로 위와 같은 비시장적인 방법으로 출력제한을 시행하고, 중장기적으로는 시장적인 방법으로 단계적인 개선을 통해 출력제한을 시행하는 것이 바람직

4. 재생에너지 출력제한 보상 방법

□ 미국의 풍력발전의 출력제한에 대한 보상은 TSO 및 출력제한의 원인에 따라 다르게 나타남.

- 대표적 ISO를 살펴보면, CAISO는 수급 불균형, 송전선로 혼잡으로 인한 출력제한은 보상하며 계통 안정도를 위한 출력제한은 보상하지 않음.
- 대표적인 유틸리티의 보상을 살펴보면, PSCO에서는 의무인수계약(Take-or-pay) 방식이 바뀌고 있는데 서부지역의 많은 발전회사에서 무조건대금지급방식을 이용하고 있지만, 최근의 계약에는 보상 규정이 달라짐.
 - 일반적으로 송전계약 관련 출력제한은 보상하지 않으며, Balancing을 목적으로 출력제한을 실시한 경우에는, 기회비용인 에너지와 생산세액 공제(Production tax credit, PTC)의 가치로 보상
 - 최근 PSCO는 14개 중 5개의 풍력발전소와 연간 출력제한 시간을 협상

〈표 3〉 북미 출력제한에 대한 보상 현황

기관		보상 내용
계통 운영자	AESO	수급 불균형으로 인한 감발은 보상, 풍력은 보상 없음
	BPA	수급 불균형으로 인한 감발은 보상, 송전선로 혼잡으로 인한 감발은 보상 없음
	CAISO	수급 불균형, 송전선로 혼잡으로 인한 감발 보상, 계통 안정도로 인한 감발은 보상 없음
	ERCOT	풍력은 보상 없음
유틸리티	PSCO	수급 불균형으로 인한 감발은 보상, 송전선로 혼잡으로 인한 감발은 보상 없음
	PSE	수급 불균형으로 인한 감발 보상
	SPP	계통 안정도로 인한 감발은 일반적으로 보상 없음. 최근에는 송전선로 혼잡으로 인한 감발도 비상 감발로 포함하여 보상하지 않으려는 추세
	APS	계약에 따라 보상, 비상 감발은 보상 없음

출처: NREL(2014, p.21)를 참조하여 재구성

□ 유럽의 각 국가별로 출력제한 보상에 대한 형태에는 차이가 존재

- 일반적으로 시장 가치로 보상을 실시하며, 다른 유형의 지원으로 인한 수익은 포함하지 않게 보상(아일랜드 및 루마니아가 이에 속함)
- 발전기가 손실된 에너지의 일부분(15%~50% 또는 그 이상)을 보상하는 경우도 있고, 그리스는 연간 출력제한 되는 에너지의 30%를 보상(풍력 설비에만 적용)
- 출력제한이 발생하는 특정 유형에 대한 보상을 실시하는 경우가 있는데 벨기에 및 독일은 송전제약에 따른 제한은 보상하지만, 계통 안정에 대한 보상을 하지 않음.
- 스페인은 실시간으로 제어되는 출력제한에 대해서는(15%) 보상하지만, 기술적 제약에 인한 출력제한은 보상하지 않음.
- 일본, 구주전력에서는 재생에너지에 대한 출력제한 기준을 구 규칙, 지정 규칙, 신 규칙 대상 사업자로 구분하여 보상 규정을 달리하고 있음.
 - '15년 1월 25일까지는 전력수급상황에 따라 태양광 발전설비의 출력을 제어해야하는 경우 500kW 이상의 대규모 발전설비에 한하여 연간 30일까지 출력을 제어하는 것이 인정
 - 그러나, 새로운 규칙에 따르면 출력제한 대상을 10kW~500kW미만의 발전설비로 확대하였고 연간 360시간까지 출력제한이 가능

〈표 4〉 일본(구주전력) 출력제한에 대한 보상 현황

구분	적용 대상	출력제어 보상
구 규칙	2015.01.25까지 연계 승낙 (태양광), 접속계약신청 (풍력)의 사업자 (대상: 500kW 이상 태양광 / 풍력)	연간 30일까지 무보상
지정 규칙 (태양광만)	2015.01.26 이후 연계 승낙 사업자 (대상: 10kW 이상 태양광)	무제한 무보상
신 규칙 (풍력만)	2017.05.25까지 접속 계약 신청의 사업자	연간 720시간까지 무보상

출처: 九州電力(2018, p.10)

□ 학술연구로 Jacobsen and Schröder(2012)는 경제적 최적 출력제한 달성을 위한 보상제도로 네트워크(송배전망) 제약과 확장지연, 시스템 안전문제, 과잉 발전으로 구분하여 상이한 보상 실시를 주장

- (네트워크 제약에 따른 출력제한) 네트워크 과잉투자 방지를 목표로 보상제도는 합의 수준을 초과하는 출력제한에 대해서는 완전한 보상을, 합의수준 미만의 출력제한은 무보상
- (네트워크 확장지연에 따른 출력제한) 망사업자의 네트워크 증설지연을 방지해야 하므로, 망사업자가 네트워크 증설 지연에 대한 책임이 있는 경우에 우선적으로 급전권의 유무에 따라 보상기준을 차별화

〈표 5〉 경제적 최적 출력제한 보상안

구분	출력제한 근거	상황	출력제한에 따른 보상안
1: 네트워크 제약 (최적 출력제한)	네트워크 과잉투자 방지	합의되지 않은 수준의 출력제한	시장가격 (보조금 손실분과 함께)
		사전 합의된 수준까지 출력제한	• 합의 수준 미달: 보상 없음 • 합의 수준 초과: 완전한 보상
2: 네트워크 확장 (extension)지연	네트워크 증설지연 방지	우선 급전권 기부여 발전설비	완전한 보상
		우선 급전권 없는 신규 발전설비	시장가격 (보조금 제외)
3: 시스템안전문제	예비력비용 감소	시스템 안정성 목적 (일반적 경우)	없음 (비상조치 규칙에 의거)
		기술적 원인에 의한 출력제한 (통제불가 경우)	시장가격 (보조금 손실분과 함께)
4: 과잉발전 (시장가격 ≤ 0)	수급일치	과잉발전	시장가격 (단, 시장가격 $=0$)
		과잉발전상황에서 자발적 출력제한 인센티브	보조금 부분만 보상 (시장가격 초과분)

출처: Jacobsen and Schröder(2012, p.5)를 부분 인용

- (시스템 안전문제에 따른 출력제한) 예비력 비용을 감소시켜 당위성을 지니므로 일반적인 시스템 안정성 유지의 목적으로는 보상이 필요 없으나 계통운영자가 기술적 원인을 알 수 없는 경우에는 보상 필요
- (과잉발전) 전력수급 유지를 유도해야 하므로 보상이 불필요하나 자발적으로 출력 제한을 유도를 필요한 상황에서는 보상이 필요

5. 출력제한 완화 전략

- 출력제한 증가 시 에너지 손실, 보조금, 온실가스 배출량 증가를 초래하므로 이를 억제하기 위해 완화 전략 수립 필요하며, 출력제한 완화 전략은 운영적 측면, 시장적 측면, 기타로 구분
- PSCO는 풍력발전설비들이 AGC를 갖추고 이들을 Balancing에 참여하게 하여 풍력의 출력제한을 감소시켰으며, ERCOT은 수동식 출력제한을 자동 시스템으로 변경해서 보다 효율적으로 출력제한을 실시

〈표 6〉 미국 주의 재생에너지 출력제한 완화 전략

구분	방법	기관 및 계통운영자
운영 측면	풍력 등 재생에너지 Balancing을 위한 AGC로 활용	ERCOT, PSCO
	출력제한 된 발전자원을 예비력으로 활용	PSCO
	일반 발전기의 최소 발전용량 수준 감소	HECO(Maui)
	계통운영 스케줄링 빈도수 증가(주기 감소)	WAPA
시장 측면	재생발전자원 시장 참여(시장기반 출력제한)	ERCOT, MISO, SPP
	발전기 입찰을 억제하는 Negative 입찰을 이용해 경부하지 과잉공급 방지	CASIO, ERCOT, MISO, PJM, ISO-NE
	Balancing 시장 도입	CAISO, PacifiCorp
기타	풍력발전 증감발 up management system을 통한 풍력발전 제어	AESO
	송전 용량 확장을 통해 풍력발전 출력제한 완화	ISO-NE, ERCOT, MISO, PJM, SPP
	예측수준 제고를 통해 풍력발전 출력제한 완화	ISO-NE, PSCO, NV Energy, SMUD

출처: NREL(2014, p.24)를 참조하여 재구성

- HECO는 기저 발전기의 최소 출력 감소, 발전기들의 더 낮은 출력에서 작동, 주간에는 발전기를 정지할 수 있도록 변경, 신속한 기동(Quick Start)를 위한 예비력 감소, 수요반응(Demand response)을 예비력에 포함, 소규모 태양광 발전의 제어 성능을 향상함.
- ERCOT에서는 풍력발전을 시장에 통합하는 한편, 출력제한을 수동에서 자동으로 변경함으로써 효율적으로 급전 순서를 결정할 수 있도록 하였음.
- MISO, ERCOT, CAISO에서는 공급과잉 기간을 해결하는 한편, 수동 출력제한을 감소시키기 위해 음의 가격 입찰(Negative bidding)을 사용
 - 부하가 낮은 기간 동안에 음의 가격(Negative prices)을 설정할 경우, 발전기가 입찰에 참여하지 않고 전력생산을 하지 않게끔 하여 공급 과잉을 감소시킴.
- CAISO와 PacifiCorp가 도입한 에너지 임밸런스 시장(Energy imbalance market)은 다음과 같은 장점이 있음.
 - 변동성이 심한 변동적 재생에너지를 수급일치(Balance) 가능 자원으로 증가, 혼잡을 최소화하기 위해 송전선을 보다 효율적으로 관리, 수동보다는 자동 방식을 풍력발전 증감발을 더 효과적으로 관리
- AESO는 2011년 겨울에 풍력 증감발의 관리를 위해서 풍력발전 증발 관리 시스템(Wind power ramp up management system)을 도입하여 풍력의 수용률을 점차 증가시킴.
- ERCOT은 CREZ 프로그램을 통해 송전망을 확장하여 출력제한 문제를 해소 하였으며 2014년에는 추가로 345kV급 송전망을 확충
- PSCO의 개선된 풍력 예측 모델을 통해서, 풍량이 많을 것으로 예상되는 기간에 기존 전원의 출력을 줄임으로써, 공급과잉에 따른 출력제한을 감소시켰으며, 개선된 풍력 예측을 토대로 증감발과 관련한 출력제한도 감소하였음.

6. 미래 출력제한량 추정

□ 모형 구축 및 분석을 통해 2040년 재생에너지 시나리오에 따른 출력제한량을 추정

- 국내 재생에너지 출력제한량 추정 모형은 크게 공급과잉과 변동성으로 인한 출력제한량 두 부분으로 구분
 - 출력제한량 산정과정은 1) 자료수집, 2) 시나리오 설정, 3) 잔여 수요곡선 (Residual Load) 산정, 4) 기동정지계획(UC) 및 경제급전(ED) 수행, 5) 계통 유연성 분석으로 구분
 - 공급과잉으로 인한 출력제한량 산정은 1), 2), 3) 과정에 의해 도출될 수 있으며, 변동성으로 인한 출력제한량을 산정하기 위해서는 4), 5)와 같은 추가적인 과정 요구
- 본 연구의 모형을 통해 추정한 결과를 살펴보면, 2040년 재생에너지 비중 30%와 35% 시나리오의 출력제한량은 각각 4.3%, 12.1%로 추정
 - 결과와 네트워크로 인한 출력제한이 주요 원인인 해외사례를 모두 고려할 때, 국내 출력제한 관련 제도를 선제적으로 갖춰나갈 필요가 있음을 시사

〈표 7〉 시나리오별 출력제한량 산정 결과

구분	4030 시나리오 (재생E 발전량 비중 30%)	4035 시나리오 (재생E 발전량 비중 35%)
총 출력제한량 비율(연간)	약 4.3%	약 12.1%

출처: 저자 작성

III 정책 제언

1. 출력제한 제도 마련

- 정부, 한국전력거래소, 송배전사업자와 이해당사자 등으로 구성된 협의체를 구성하여 관련 출력제한 규정 수립을 위한 논의를 시작해야 할 것으로 판단
 - (출력제한 수행) 본 연구에서 제시한 비시장적 방법으로 수행이 가능하므로 현행 전력시장운영규칙 급전지시에 출력제한 요청조항 신설 필요
 - (출력제한 보상) 송배전망 비용 최소화, 증설지연 방지, 안전도 제고, 과잉발전과 같이 출력제한 원인별로 상이하게 설계함으로써 사회후생 극대화를 유도하는 것이 중요

2. 출력제한 완화 기술개발 및 관련 제도

- 출력제한 완화 기술개발 및 관련 제도로는 실시간 측정 및 분석, 발전량 예측, 사전분석 및 출력제어를 위한 구분하여 각각의 기술개발과 제도개선 사항이 요구됨.

〈표 8〉 기술개발 및 관련 제도개선 사항

기술개발		내용
실시간 측정 및 분석	기술 개발	기존 계량기에 실시간 정보제공 기능 추가 기술 개발
		IOT 기술을 접목한 재생에너지 자료 취득 기술 개발
	제도 개선	신재생 관제 권한 부여 및 데이터 제공 의무 규정
		자료취득 규격 및 재생발전기 접속시 구비장치 장치 기준 규정
		기관별 역할 및 자료취득 방안, 기관 간 정보공유, 정보공개 등 기준 규정

기술개발		내용
발전량 예측	기술 개발	육지계통에 대한 신재생 출력 예측시스템개발 ICT 및 최신기술이론 등을 접목하여 신재생 출력 예측 능력 제고
	제도 개선	일정 규모 이상 재생발전기의 출력 예측정보 및 지역별 현장 정보 제공 의무 규정
사전 분석 및 출력 제어	기술 개발	원활한 제어가 이루어지기 위해 구비 장치에 대한 기술적 표준 기준 마련
		유·무효전력 출력제어 등 계통지원 기능이 적용된 인버터 기술개발
	제도 개선	신재생발전사업자의 접속 보장 수준을 고려한 송배전사업자의 설비화 기준 마련 사전분석, 제어절차 및 정보공개에 대한 세부 기준 명확화

출처: 저자 작성

- 현재는 재생에너지 비중이 작기 때문에 수급의 균형을 유지하는 데에 문제가 없지만, 향후 재생에너지 증가로 인해 재생에너지 출력 증가하게 된다면 정확한 재생에너지 데이터를 취득하는 것이 매우 중요
 - 기존 계량기에 실시간 정보제공 기능 추가 및 IOT 기술을 접목한 재생에너지 자료 취득과 같은 기술개발이 필요할 것으로 예상
 - 발전사업자의 데이터 제공 의무화, 재생에너지 측정장치 구비 의무화, 기관별 자료 공개 및 정보교환과 같은 제도적 밑받침을 통해 데이터의 공유를 통한 정확한 데이터 취득이 필요
- 전력수급균형을 위한 스케줄링은 향후의 데이터를 예측하여 반영하므로 예측의 정확성이 높아질수록 출력제한에 대한 위험이 감소할 수 있음.
 - 기술적으로는 육지계통에 대한 신재생 출력 예측시스템 개발과 최신기술을 접목하여 신재생 출력 예측 능력 향상을 위한 노력이 필요

-
- 제도적으로는 일정 규모 이상 재생발전기의 출력 예측정보 및 지역별 현장 정보 제공 의무 규정 등이 필요
 - 출력제어 능력이 향상될수록 출력제한으로 인한 위험을 줄일 수 있어 사전 분석 및 출력제어는 계통의 안정화에 반드시 필요한 사항임.
 - 기술적으로는 출력제어에 대한 기술적 표준 개발과 유·무효 출력제어 등 계통 기능이 적용된 인버터 기술 개발 등이 필요
 - 제도적으로는 신재생 발전사업자의 접속 보장 수준을 고려한 송배전 사업자의 설비화 기준 마련이 요구
 - 사전분석 및 제어절차 그리고 정보공개에 대한 세부 기준이 명확히 해야 할 필요

〈 참고자료 〉

1. 참고문헌

산업통상자원부. (2017). 제8차 전력수급기본계획(2017~2031).

Anaya, K. L., Pollitt, M. G. (2012). Experience of the use of smarter connection arrangements for distributed wind generation facilities. Cambridge University.

ENERNEX. (2007). Final report-Avista corporation wind integration study.

Henriot, A. (2015). Economic curtailment of intermittent renewable energy sources. *Energy Economics*, 49, 370-379.

NREL. (2014). Wind and Solar Energy Curtailment: Experience and Practices in the United States.

Yasuda, Y., et al. (2015). International comparison of wind and solar curtailment ratio. Wind Integration Workshop Brussels.

정책 이슈페이퍼 20-15

저탄소 전력시스템의 전환을 위한 전력시장 제도개선 방안 연구(2/3)

2020년 5월 31일 인쇄

2020년 5월 31일 발행

저 자 안 재 균

발행인 조 용 성

발행처 에너지경제연구원

44543 울산광역시 중구 405-11

전화: (052)714-2114(대) 팩시밀리: (052)714-2028

등 록 제 369-2016-000001호(2016년 1월 22일)

인 쇄 (사)한국척수장애인협회 인쇄사업소 (031)424-9347
