



재생에너지 고속도로의 과속방지턱

화력발전기 최소발전용량

재생에너지 고속도로의 과속방지턱

화력발전기 최소발전용량

목차

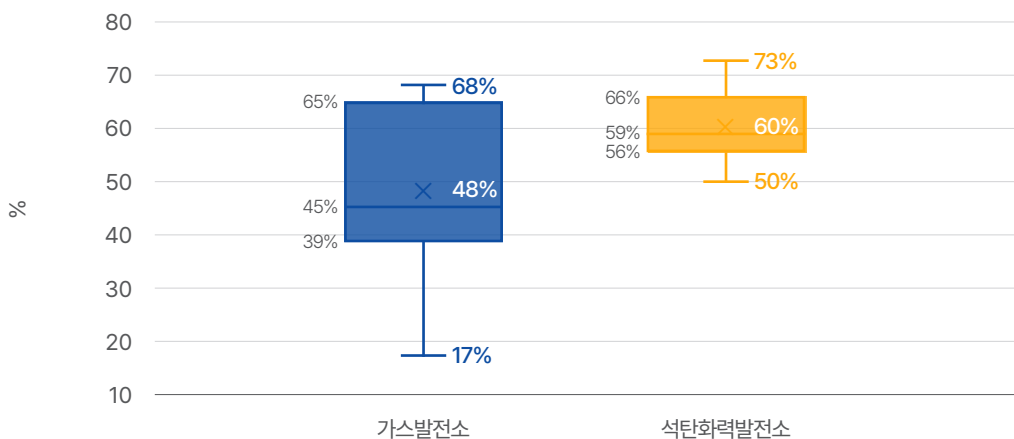
I. 요약	3
Executive Summary	5
II. 배경	7
III. 재생에너지 수용을 제한하는 최소발전용량	8
A. '최소발전용량'이란	8
B. '필수운전(must-run)발전기'란	8
C. 재생에너지 수용성에 미치는 영향	8
IV. 최소발전용량의 기준과 쟁점	10
A. 최소발전용량의 기준과 근거	10
1. 환경규제 준수	10
2. 안정적 운전 유지	11
B. 최소발전용량의 검증 절차에 대한 투명성 부족	12
V. 최소발전용량 하향 조정 사례	14
A. 해외 사례	14
1. 일본	14
2. 인도	15
3. 중국	15
B. 국내 사례	16
VI. 결론 및 정책 제언	18

I. 요약

2050년 탄소중립 목표를 향해 나아가야 할 한국은 여전히 전체 발전량의 약 60%를 화석연료에 의존하고 있으며, 재생 에너지로의 전환이 지연되어 왔다. 에너지 전환을 보다 속도감 있게 이행하기 위해서는 정부의 정책적 지원이 필수적이 나, 2024년 신규 재생에너지 설비의 계통연계를 차단하는 등 재생에너지 보급을 제한하는 각종 조치가 등장했다. 이러한 조치들은 글로벌 에너지 전환 추세에 비추어 볼 때, 계통 운영상의 불가피한 조치로 볼 수 없다.

본 이슈 브리프는 재생에너지 확대를 위한 핵심 과제로서 화력발전기의 최소발전용량의 하향 조정을 제시한다. ‘최소발전용량’이란 발전기의 안전 운전 및 환경규제 준수를 이유로 각 발전기가 운전 시 보장받는 최소 출력 수준을 의미하며, 주로 석탄·가스·원자력 발전 등 대규모 설비에 적용된다. 국내의 경우, 평균 50~60%에 달하는 과도한 최소발전용량을 보장하고 있어 재생에너지 발전량은 제한될 수밖에 없다 (아래 표 참조).

한국전력공사 발전자회사 화력발전기 최소발전용량 분포



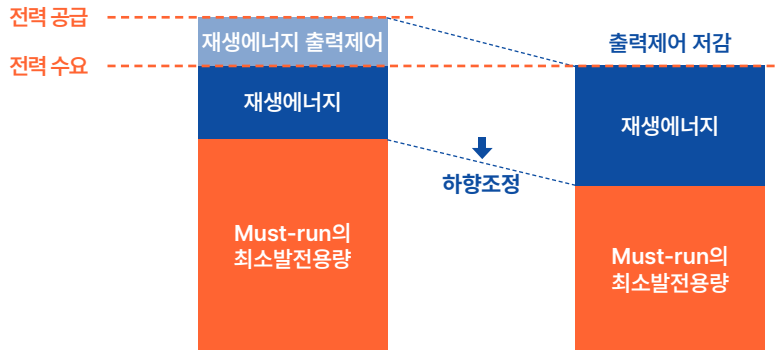
이처럼 대규모 기존 발전기의 최소발전용량을 과도하게 보장하는 경우 재생에너지 발전은 제한된다. 계통평가세부운영 규정에 따르면, 아래와 같이 필수운전 발전기¹들의 합산된 최소발전용량을 보장한 뒤, 남은 전력 수요량 범위 내에서 재생에너지 발전을 허용한다.² 재생에너지의 예상 발전량이 수용한계량을 초과하는 시점부터 출력제어가 시행된다(동 규정 제8.3.1조). 반대로, 필수운전 발전기들의 최소발전용량을 하향 조정할 경우 재생에너지 출력제어를 저감할 수 있고 계통 안정화에 기여할 수 있다 (아래 그림 참조).³

1 '필수운전 발전기'는 계통제약 및 하한제약 입찰 등 발전기 자기사유로 인하여 특정 거래시간에 반드시 운전해야 하는 발전기를 의미한다 (전력시장운영규칙 별표 9 제5.12)

2 제주의 경우 연계선의 최소출력도 포함된다.

3 전력거래소 전력시장운영규칙 개정 내용, 제24-긴급3차 (24.7.15).

필수운전 발전기의 최소발전용량과 재생에너지 수용성의 관계



국제적으로는 기술적으로 안전한 최소발전용량 수준으로 20~40%를 권고하고 있고,⁴ 주요국들은 이를 반영해 제도를 개선했다. 실제로 일본은 2024년 화력발전소의 최소발전용량을 기존 50%에서 30%로 하향 조정했으며, 인도는 2023년 기준 70%에서 55%로 조정한 데 이어 40% 달성을 위한 로드맵을 수립했다. 중국 역시 2019년 설비 개조와 보상 체계 도입을 통해 기존 60~70%였던 하한치를 30~40%로 낮추고, 출력제어율을 크게 줄였다.

국내에서도 일부 진전이 있었다. 제주 계통에도 2024년 8월 '최소발전용량 이하 운전시 출력하한치' 개념을 도입하여 필수운전 발전기의 최소발전용량 이하 운전이 가능하도록 규칙을 개정한 바 있다. 그러나 이러한 제도 개선은 여전히 육지 계통에는 적용되지 않고 있으며, 재생에너지 출력제어가 심화하고 신규 설비의 접속이 제한되고 있다. 육지 계통에도 조속히 시장 제도를 개선하여 기존 발전기의 유연성을 높이고, 재생에너지가 실질적으로 기존 전력망 인프라를 더 활용할 수 있도록 해야 한다. 그 출발점이 바로 최소발전용량 조정이다.

효율적인 에너지 전환을 위해서는 첫째, 화력발전기의 최소발전용량을 국제 기준에 부합하는 40% 수준으로 일괄 하향 조정해야 한다. 더 나아가, 발전사들이 자발적으로 더 낮은 최소발전용량을 제시할 수 있도록, 용량요금 제도 개선 등을 통해 실효성 있는 보상 체계를 마련해야 한다.

둘째, 최소발전용량 산정 및 검증 절차의 투명성을 제고하고, 발전기별 관련 자료를 공개할 수 있는 제도적 장치를 마련해야 한다. 이는 자발적 유인 체계가 미비한 경우에 특히 중요하다. 최소발전용량의 과다 산정으로 인해 계통이 비효율적으로 운영되지 않도록 계통 운영자의 철저한 감시와 감독이 이뤄져야 한다.

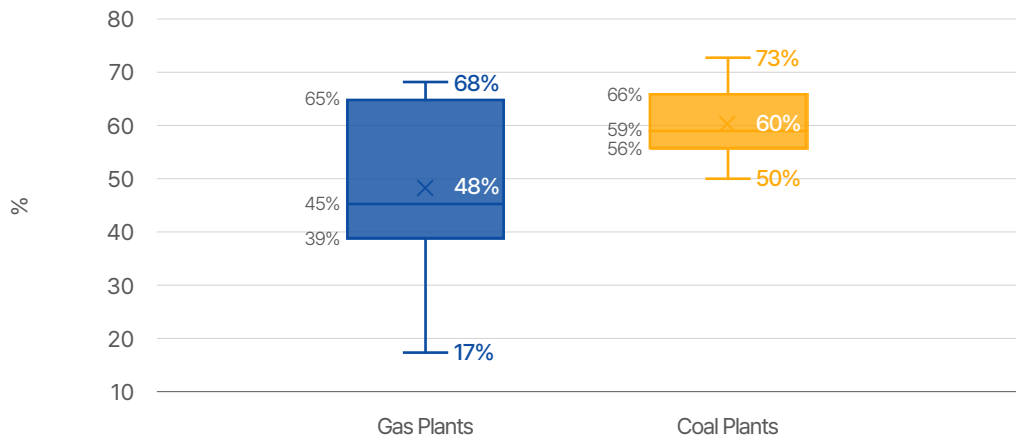
4 Agora Energiewende (2017). "Flexibility in thermal power plants – With a focus on existing coal-fired power plants".

Executive Summary

Despite Korea's 2050 carbon neutrality pledge, the country still relies on fossil fuels for roughly 60% of its power generation, while the transition to renewables has lagged. Accelerating this transition requires strong policy support, yet recent measures—such as the 2024 restriction on new renewable energy grid connections for roughly one-third of the country's substations—have instead restricted renewable deployment. These actions cannot be regarded as unavoidable from a system operation standpoint, particularly in light of global energy transition trends.

This issue brief highlights the reduction of thermal power plants' minimum generation levels as a key task for expanding renewable energy. Minimum generation levels refer to the guaranteed minimum output of generators, justified by claims of safety and environmental compliance, and typically applied to large-scale coal, gas, and nuclear facilities. In Korea, excessively high minimum generation levels—averaging 50–60% of capacity—are guaranteed, inevitably constraining renewable output (see table).

GENCO Thermal Power Plant Minimum Generation Levels



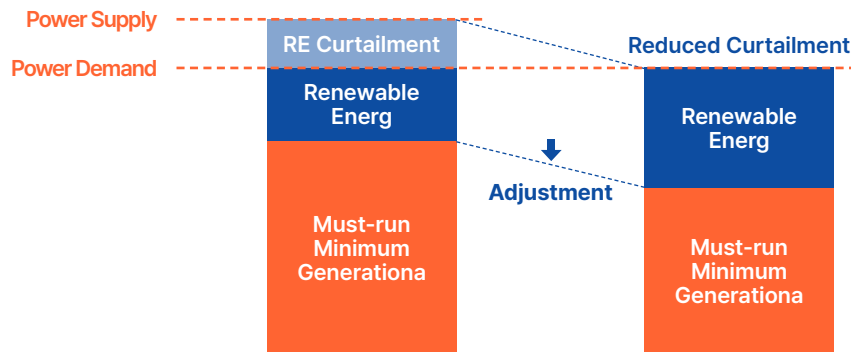
Under current grid operation rules, the combined minimum generation levels of must-run generators¹ are guaranteed first, and renewables are permitted only within the remaining demand range.² Once projected renewable generation exceeds this threshold, curtailment begins (Detailed Rules on Grid Evaluation and Operation Article 8.3.1). Conversely, lowering must-run generators' minimum generation levels would reduce curtailment and enhance system stability (see figure).³

¹ "Must-run generators refer to generators that must operate during a given trading period due to generator-specific reasons such as system constraints or minimum output constraints (Rules on Electricity Market Operation, Annex 9, Article 5.12).

² In Jeju Island, HVDC minimum generation is also included.

³ Korea Power Exchange Revision of the Rules on Electricity Market Operation, No.24-3rd (24.7.15)

Relationship Between Must-Run Minimum Generation and Renewable Energy Integration Capacity



International practice demonstrates that safer and more flexible operation is possible. Global guidelines recommend 20–40% as a technically sound minimum generation range,⁴ and major countries have already reformed accordingly. Japan lowered thermal plant minimum generation from 50% to 30% in 2024; India reduced from 70% to 55% in 2023 with a roadmap to reach 40%; and China, through retrofits and compensation schemes, cut levels from 60–70% to 30–40%, significantly reducing curtailment.

Korea has made limited progress. In August 2024, Jeju's grid introduced the concept of an "output floor below minimum generation," enabling must-run generators to operate below their conventional thresholds. However, such reforms have yet to be applied on the mainland grid, where curtailment is worsening and new renewable projects face connection bans. Mainland reforms must be expedited to enhance flexibility of existing plants and unlock fuller use of the existing grid infrastructure. The starting point is minimum generation level adjustment.

For an effective energy transition, two measures are essential:

1. Lowering thermal plant minimum generation levels: Establish a uniform cap of at least 40% in line with international standards, while creating effective compensation mechanisms—such as reforms to the capacity payment system—to incentivize generators to propose even lower thresholds.
2. Ensuring transparency and oversight: Improve procedures for calculating and verifying minimum generation levels, and establish institutional mechanisms for public disclosure of plant-level data. Robust monitoring by the system operator is critical to prevent excessive levels that hinder grid efficiency, especially in the absence of strong voluntary incentives.

4 Agora Energiewende (2017). "Flexibility in thermal power plants – With a focus on existing coal-fired power plants".

II. 배경

2025년 6월에 출범한 이재명 정부는 2050 탄소중립 달성을 위한 핵심 전략으로 2040년까지 석탄화력발전을 폐지하겠다는 계획을 발표하고, 재생에너지 확대에 박차를 가할 것을 천명했다. 이전 정부는 재생에너지 목표를 2030년까지 18.8%, 2038년까지 29.2%로 확대하겠다는 목표를 수립했으며, 이에 따라 2038년까지 태양광 77.2GW, 풍력 40.7GW 보급을 계획한 바 있다.⁵ 이러한 재생에너지 목표는 증가하는 산업계의 재생에너지 수요를 충족하기 불충분하다는 우려가 제기되고 있어, 목표가 상향 조정될 가능성이 거론되고 있다.

하지만 현재의 재생에너지 보급 속도로는 기존의 목표 달성조차 어려운 상황이다. 2038년까지의 재생에너지 보급 목표인 121.9GW는 2024년 기준 설비용량(약 30GW)의 4배에 달하며, 이를 달성하려면 향후 14년간 매년 평균 태양광 4.7GW, 풍력 2.7GW 규모의 신규 설비가 보급되어야 한다. 그러나 2024년 기준 실제 연간 보급량은 태양광 3.2GW, 풍력 0.1GW에 그쳐 목표와 큰 격차를 보이고 있다.

이런 가운데 산업부는 2024년 5월 '계통포화대책'의 일환으로, 호남, 제주 등에 위치한 205개(국내 전체 변전소 중 20% 이상)의 변전소를 '계통관리변전소'로 지정하여, 무제한 출력제어⁶에 동의한 사업자를 제외한 모든 신규 재생에너지 발전설비의 전력계통 연계를 원천적으로 봉쇄하는 조치를 내렸다. 변동성 재생에너지(Variable Renewable Energy, VRE)⁷ 발전 비중이 19.8%⁸에 이르는 제주도뿐만 아니라, 6% 미만에 불과한 육지 계통에서도 재생에너지 설비가 집중된 일부 지역에서는 출력제어가 증가하고 있기 때문이다.

햇빛과 바람을 이용하여 온실가스를 배출하지 않고 전력을 생산하는 재생에너지는 전력계통에 우선적으로 접속되어야 하며, 출력제어는 최후의 수단이어야 한다. 이를 위해서 비재생에너지 자원의 우선 감발⁹, 에너지 저장장치(Energy Storage System, ESS) 확충, 전력 수요의 분산, 그리고 시장 제도의 보완을 통해 재생에너지의 변동성이나 간헐성을 완화할 수 있는 다양한 수단을 촉진함으로써 계통 운영의 유연성을 극대화해야 한다.

2025년 2월 전력망 특별법이 통과되었지만, 송전망 건설에 따른 막대한 비용 부담과 주민 수용성 확보의 어려움은 지속될 것으로 보인다. 특히, 송전망 구축에는 상당한 비용과 기간이 소요된다. 이에 따라, 본 이슈 브리프는 석탄·가스 발전 등 기존 발전기의 유연성을 확대함으로써 신규 인프라 투자 없이 재생에너지의 수용성을 높일 방안을 살펴보고자 한다.

5 산업통상자원부(2025). "11차 전력수급기본계획".

6 '출력제어(Curtailment)'는 계통 운영자가 수급 및 계통 제약 등의 이유로 발전기의 출력을 강제로 제한하는 조치를 의미한다.

7 '변동성 재생에너지(Variable Renewable Energy, VRE)'는 태양광과 풍력 등 날씨와 자연 조건에 따라 출력이 시시각각 달라지는 재생 에너지를 의미한다.

8 한국전력거래소 (2025). "2024년 연간 제주지역 전력계통 운영실적".

9 '감발'은 발전설비 보호나 고장 등의 이유로 발전량을 의도적으로 줄이는 것을 의미한다.

III. 재생에너지 수용을 제한하는 최소발전용량

A. '최소발전용량'이란

최소발전용량(Minimum Generation)은 “환경규제를 준수하면서 안정적인 운전을 유지하기 위해 개별 발전기가 유지해야 하는 최소 출력 수준”으로 정의된다 (전력시장운영규칙 제11.2조). 이 개념은 주로 석탄, 가스, 원자력 등 중앙급전 발전기¹⁰에 적용되며, 각 발전기의 기술적 특성과 설비 조건을 기반으로 해당 발전기를 소유한 발전사업자가 산정하여 전력거래소에 제출한다. 발전기가 운전 시 출력이 보장되는 하한치이므로, 불가피한 응급상황을 제외하고는 최소발전용량 이하로 운전하지 않는다.

B. '필수운전(must-run)발전기'란

필수운전 발전기는 '계통제약 및 하한제약 입찰 등 발전기 자기 사유로 인하여 특정 거래시간에 반드시 운전해야 하는 발전기'를 의미하며, 계통 운영자가 다양한 조건을 고려하여 시간 단위로 지정한다 (동 규칙 별표 9, 5.12). 시스템 차원의 안정성을 위해 중앙급전발전기는 필수운전 발전기로 지정될 수 있고, 계통 안정성 또는 이와 무관한 자기 사유로도 지정될 수 있다.

계통제약¹¹으로 인해 필수운전 발전기로 지정되면 해당 시간 동안 운전이 보장되지만, 최대 부하까지 보장받지는 않는다. 수급제약¹²으로 인해 중앙급전자원¹³ 발전량을 줄여야 하는 상황에는 필수운전 발전기의 출력을 줄일 수 있다. 필수운전 발전기 역시 설비 특성에 따른 최소발전용량까지 보장받으며, 이 이하로 감발하지 않는다.

C. 재생에너지 수용성에 미치는 영향

필수운전 발전기들의 최소발전용량을 과도하게 보장하는 경우 재생에너지 발전을 제한할 수 있다. 계통평가세부운영규정에 따르면, 아래와 같이 필수운전 발전기들의 합산된 최소발전용량을 보장한 뒤, 남은 전력 수요량 범위 내에서 재생에너지 발전을 허용한다.¹⁴ 재생에너지의 예상 발전량이 수용한계량을 초과하는 시점부터 출력제어가 시행된다 (계통평가세부운영규정 제8.3.1조).

$$\text{재생에너지 수용한계량} = P_{\text{수요예측}} - P_{\text{MustRun}}^{\min} - P_{\text{연계선}}^{\min}$$

10 계통 운영자(한국전력거래소)가 중앙에서 출력을 통제·조정할 수 있는 발전기를 말한다. 이에 해당하지 않는 발전기는 '비중앙급전 발전기'라고 한다.

11 전력망의 한계로 인해, 전력을 생산하는 곳에서 소비자까지 안정적으로 송전하지 못하는 상황을 의미한다.

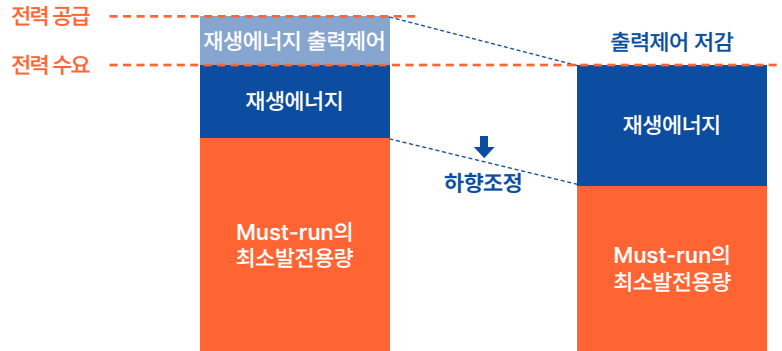
12 전력 공급량과 수요의 불균형으로 인해, 전력이 과잉 생산되거나 부족해지는 상황을 의미한다.

13 전력 시스템 내 모든 중앙급전 발전기를 통칭하는 용어이며, 제주도에 경우 연계선도 포함된다.

14 제주의 경우 연계선의 최소출력도 포함된다.

반대로, 필수운전 발전기들의 최소발전용량을 하향 조정할 경우 재생에너지 출력제어를 줄일 수 있고 계통 안정화에 기여할 수 있다 <그림 1>.¹⁵

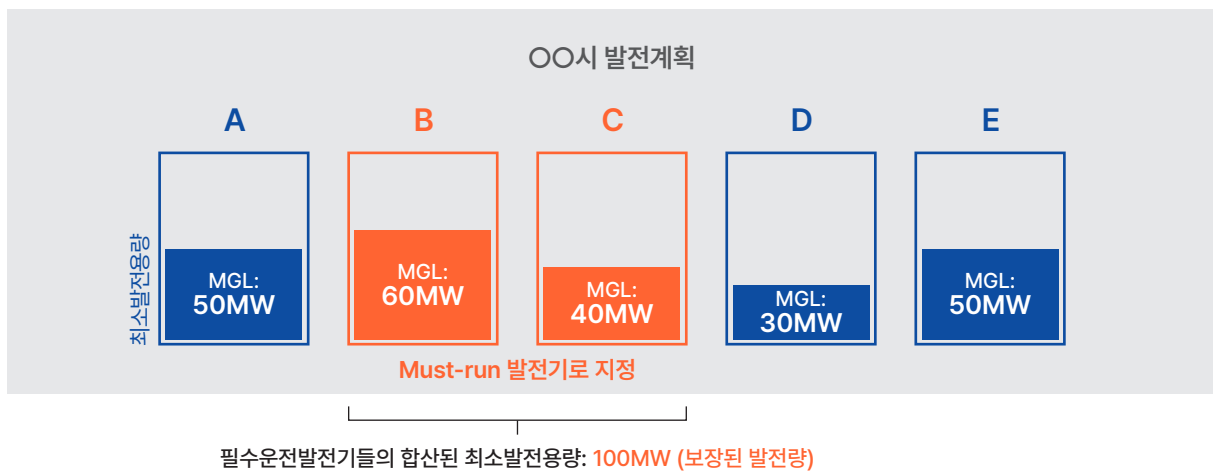
[그림 1] 필수운전 발전기의 최소발전용량과 재생에너지 수용성의 관계



하루전발전계획을 수립한다고 가정해 본다 <그림 2>. 계통 운영자가 계통 제약 혹은 발전기 자기 사유로 인하여 다음 날 특정 시간대에 반드시 운전해야 하는 화력발전기 B와 C를 필수운전 발전기로 지정한다. 발전기 B는 최소발전용량이 60MW이고, 발전기 C는 최소발전용량이 40MW이다. 불가피한 응급상황을 제외하고는 발전기는 최소발전용량 이하로 감발되지 않는다. 즉, 필수운전 발전기들의 최소발전용량을 합산한 100MW가 해당 시간대의 전력 수요를 먼저 차지하고, 남은 수요에 한해서만 재생에너지 발전이 허용된다.

결과적으로, 전력 수요가 공급보다 낮은 경부하 시간대에는 필수운전 발전기의 최소발전용량이 보장되는 반면, 재생에너지 발전기는 출력제어 지시를 받게 된다. 국내 재생에너지 출력제어는 주로 경부하 현상이 잦은 봄 및 가을철에 발생한다.

[그림 2] 필수운전 발전기와 최소발전용량의 관계



15 전력거래소 전력시장운영규칙 개정 내용, 제24-긴급3차 (24.7.15).

IV. 최소발전용량의 기준과 쟁점

문제는 수급 또는 계통제약에 따라 재생에너지에 대한 출력제어가 이루어지는 시점에 운전 중인 필수운전 발전기들이 어떤 사유로 얼마만큼의 최소발전용량을 보장받고 있는지가 투명하게 공개되고 있지 않다는 것이다. 재생에너지 수용량에 직접적인 영향을 미치므로, 해당 수준이 합리적으로 설정, 적용되고 있는지를 확인하는 것이 중요하다. 이를 위해 최소발전용량의 기준 및 근거를 검토하고자 한다.

A. 최소발전용량의 기준과 근거

앞서 언급하였듯이 최소발전용량은 발전기가 (a) 환경규제를 준수하면서 (b) 안정적인 운전을 유지하기 위하여 발전해야 하는 최소의 발전량을 의미한다.

1. 환경규제 준수

여기서 말하는 '환경규제'는 대기환경보전법이다. 대기환경보전법은 대기오염으로부터 국민의 건강과 환경을 보호하기 위해 제정된 법률이다. 이 법은 대기오염물질의 배출 기준을 설정하고, 화력발전기를 비롯한 배출시설의 관리 및 저감 조치를 통해 대기질을 지속적으로 개선하는 것을 목표로 한다. 석탄 및 가스 발전기에 해당하는 일부 대기오염물질 배출허용기준은 다음 표와 같이 설치 연도에 따라 다르게 규제하고 있다 <표 1>. 각 발전기는 해당하는 기준에 맞게 발전해야 하며, 기준치를 초과할 때 부과금을 납부한다.

[표 1] 대기오염물질 배출허용기준 (대기환경보전법 시행규칙 제15조, 별표 8)

연료	고체연료(석탄)*			기체연료(가스)			
설치연도 오염물질	1996.6.30 이전	2014.12.31 이전	2015.1.1 이후	2001.6.30 이전	2014.12.31 이전	2019.12.31 이전	2020.1.1 이후
황산화물 SOx (ppm)	60(5)	50(5)	25(5)	20(15)		15(15)	10(15)
질소산화물 NOx (ppm)	70(6)	50(6)	15(6)	40(15)	25(15)	20(15)	10(15)
먼지 TSP (ppm)	12(6)**	10(6)	5(6)	10(15)			

* 설비용량 100 MW 이상

** 2001.6.30 이전

위 표에서 확인할 수 있듯이, 배출허용기준은 ppm(parts per million, 백만분율) 단위로 설정되어 있으며, 이는 오염물질의 절대량이 아닌 농도 기준을 의미한다. 이러한 특성으로 인해, 화력발전기는 오염물질 농도가 일정 기준을 초과하지 않기 위해 일정 수준 이상의 부하를 유지해야 하는 경우가 있다.

일반적으로 발전기는 저부하 운전 시 발전 효율 저하¹⁶, 불완전 연소¹⁷ 등으로 인해 오염물질 농도가 증가하는 경향이 있다. 이에 따라, 화력발전기의 출력을 낮출 경우 오히려 환경 피해가 커질 수 있다는 우려가 제기되어 왔으며, 이는 최소발전용량 수준을 유지해야 한다는 주장의 근거로 활용되고 있다.

그러나 오염물질 농도의 증가와 절대 배출량의 증가를 구분할 필요가 있다. 농도가 일시적으로 증가하더라도 발전기의 전체 출력이 낮다면, 실제 배출량(절댓값)은 오히려 감소할 수 있다. 이는 서부 전력 계통(Western Interconnection)¹⁸ 운영을 바탕으로 한 연구에서 확인된 바 있다. 연구 결과에 따르면, 풍력 및 태양광 발전으로 인해 화력발전기의 출력을 조절할 때 발생하는 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NOx), 황산화물(SO₂) 배출 영향은 풍력 및 태양광 발전으로 인해 회피되는 전체 배출량에 비해 매우 적은 비율에 불과한 것으로 나타난다.¹⁹ 화력발전을 재생에너지로 대체하는 한, 화력발전기 감발로 발생한 비용(배출)보다 이익(회피)이 더 크다는 의미다.

대기오염 방지를 목적으로 한 환경 규제가 오히려 화석연료 발전기의 최소발전 수준을 유지하게 만들고 있으며, 이에 따라 재생에너지의 출력제어가 증가하는 결과를 초래하고 있다. 재생에너지는 대기오염물질을 배출하지 않음에도 불구하고 발전이 제한되는 반면, 오염물질을 배출하는 화력발전기는 환경 기준을 충족하기 위해 일정 수준 이상의 출력을 유지한 채 운전이 보장되고 있는 실정이다. 환경적 피해는 발전기 단위의 오염물질 농도뿐만 아니라 시스템 차원의 총 배출량(절댓값)도 고려해야 하며, 환경보호 기준으로 인해 오히려 환경적 이익이 저해되는 상황은 방지할 필요가 있다. 환경 기준이 실질적인 환경 개선에 효과적으로 기여할 수 있도록 규제의 기준과 설계 방식에 대한 정밀한 분석과 개선이 필요하다.

2. 안정적 운전 유지

다음으로, '안정적 운전'은 발전기의 기술적 특성을 고려하여 고장을 방지하기 위한 운전기준을 의미한다. 화력발전기는 일반적으로 최적 부하 구간에서 운전될 때 가장 높은 효율성과 설비 안정성을 확보할 수 있도록 설계되어 있다. 저부하 상태에서 장시간 운전하게 될 경우, 연소 불균형, 증기 온도 불안정, 그리고 열적 스트레스 증가 등의 현상이 발생하게 되며, 이는 주요 설비의 마모 및 손상을 가속하는 요인으로 작용한다. 특히, 보일러 튜브, 터빈 블레이드, 배관 등의 구성 요소는 반복적인 열팽창과 수축에 따라 피로 손상이 누적되기 쉬우며, 이는 정비 주기 단축과 유지보수 비용 증가로 이어질 수 있다. 또한, 저부하 운전 시 연료의 불완전 연소로 인해 슬래깅(slagging), 파울링(fouling) 등 내부 오염이 심화되어 설비 효율 저하 및 고장 가능성이 높아진다.

이에 따라, 현대 가스복합 발전기는 최대 출력의 20~30%, 석탄화력발전기는 30~40% 수준의 최소출력을 유지하는 것을 권장한다.²⁰ 아래 표는 한전 발전자회사가 보유한 화력발전기의 최소발전용량 분포도를 보여준다 <표 2>.²¹ 발전

16 비교적 낮은 온도로 인해 연료 효율성이 떨어진다 (heat rate 증가). 즉, 동일한 전력을 생산하기 위해 더 많은 연료를 소비하게 된다.

17 발전기의 연료 연소 과정에서 연료가 완전히 타지 않아 일부가 미연소 상태로 배출되는 현상을 의미

18 서부 전력 계통 (Western Interconnection)은 미국 서부, 캐나다 일부 지역, 그리고 멕시코 북부를 포함하는 대규모 전력망이다.

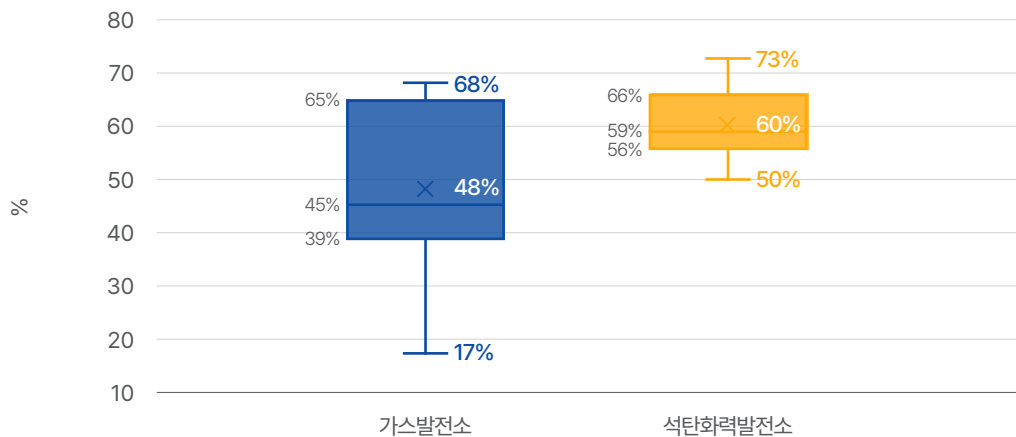
19 NREL (National Renewable Energy Laboratory)(2013). The Western Wind and Solar Integration Study Phase 2. Technical Report. Colorado.

20 Agora Energiewende (2017). Flexibility in thermal power plants – With a focus on existing coal-fired power plants.

21 국회의원실 자료요청을 통해 확보

5사²² 소유 가스 발전기의 평균 최소발전용량은 48%이고, 석탄화력 발전기 평균값은 60%이다. 권장된 수준과 상당한 차이가 있으며, 기존(현대적이지 않은) 설비 기준의 권장 최소발전용량보다도 높은 편이다.²³ 또한, 발전기 간의 격차도 크게 나타난다. 2025년 3월 기준으로, 총 85개 가스발전기의 최소발전용량 수준이 가장 낮게는 17%부터 가장 높게는 68%까지, 총 48개 석탄발전소는 50%부터 73%까지였다.

[표 2] 한국전력공사 발전자회사 화력발전기 최소발전용량 분포 (의원실 자료 요청)



이렇게 발전기별 최소발전용량의 차이가 큰 배경으로, 발전사업자와 전력거래소가 설정한 최소발전용량이 '환경규제(대기환경보전법 등)를 준수하면서 안정적으로 운전을 유지하기 위하여 발전해야 할 최소한의 발전량'과 부합하는지에 대해 합리적으로 의심할 수 있다.

원칙적으로 최소발전용량이 설정되는 근거는 발전기 저부하로 운전할 경우 단위 발전량당 대기오염물질 배출 농도가 증가하고, 발전설비의 기계적 손상이 가속화되는 경향이 있기 때문이다. 별도의 기준이지만 두 사항 모두 발전설비의 기술적 특성에 기반한다. 그리하여 석탄, LNG, 원전 등 비재생에너지 자원은 발전기별로 설비 특성을 고려하여 최소발전용량을 계통평가위원회에 보고해야 하며, 적절하다고 판단되면 해당 발전기의 출력 하한치로 정해진다.

B. 최소발전용량의 검증 절차에 대한 투명성 부족

계통평가세부운영규정에 따르면, 발전사업자는 발전기의 최소발전용량에 관한 기술적 특성 자료를 전력거래소에 제출하며, 해당 자료는 전력거래소 계통평가위원회의 검토 및 승인을 거친다 (계통평가세부운영규정 제3.6.2조). 이후 전력거래소는 '안정적인 계통운영의 범위 내에서 급전지시를 통해 발전기의 공급가능 용량시험 및 최소발전용량시험(최소발전용량 이하 운전 시 출력하한치 포함)을 수행하고 필요시 별도의 조치를 취할 수 있다'고 규정하고 있다 (전력시장운영규칙 [별표11] 제7.1.5조)

22 남동발전 (KOEN), 남부발전 (KOSPO), 동서발전 (EWP), 중부발전 (KOMIPO) 및 서부발전 (WP).

23 기존 석탄화력발전소의 권장 최소발전 비중은 40-60%이며, 현재 한전 발전자회사 소유 화력발전기의 평균 최소발전비중은 60%(50-73%)이다.

그러나 실제 운영에서는 제출된 최소발전용량이 엄격한 검증을 거쳤는지를 확인하기 어렵다. 발전사업자가 처음에 최소 발전용량으로 제시한 수준이나 전력거래소가 최종적으로 승인한 수준이 모두 영업비밀이라는 이유로 외부에 공개되지 않기 때문이다.²⁴ 하지만 최소발전용량은 환경 규제 및 설비의 기술적 특성 등 절대적인 기준에 기반한 값으로, 설비의 특성과 관련성이 높다. 이러한 정보를 비밀로 유지할 경우 최소발전용량의 과다 산정 가능성이 증가할 수 있으며, 이는 계통 신뢰성 유지와 무관한 재생에너지 출력 제한으로 이어질 수 있다.

효율적인 시스템 운영을 위해 미국과 일부 유럽 국가는 발전기별 최소발전용량 정보를 포함한 database를 주기적으로 공유하고 있다 <표 3>.²⁵ 약 2만 6천개의 발전기에 대한 다양한 정보가 포함된다. 충분한 근거 자료 없이는 적절성에 관한 판단이 어려우므로, 정부와 계통 운영기관은 최소발전용량 수준에 대한 자료 공개, 표준화된 산정 및 검증 절차 마련 등을 통해 정보의 신뢰성과 정합성을 확보할 필요가 있다.

[표 3] 미국 EIA-860 Database²⁶ (일부 화면 캡처)

Plant Name	State	County	Technology	Nameplate Capacity (MW)	Nameplate Power Factor	Summer Capacity (MW)	Winter Capacity (MW)	Minimum Load (MW)
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	59.5	0.900	45.4	60.8	10.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	231.2	0.850	221.0	231.0	60.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	231.2	0.850	221.0	231.0	60.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	59.5	0.900	45.4	60.8	10.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	59.5	0.900	45.4	60.8	10.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	59.5	0.900	45.4	60.8	10.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	59.5	0.900	45.4	60.8	10.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	59.5	0.900	45.4	60.8	10.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	59.5	0.900	45.4	60.8	10.0
Colbert	AL	Colbert	Natural Gas Fired Combustion Turbine	231.2	0.850	221.0	231.0	60.0
Guntersville	AL	Marshall	Conventional Hydroelectric	28.8	0.900	31.0	31.4	9.7
Guntersville	AL	Marshall	Conventional Hydroelectric	28.8	0.900	30.6	31.1	12.9
Guntersville	AL	Marshall	Conventional Hydroelectric	28.8	0.900	29.8	30.3	9.7
Guntersville	AL	Marshall	Conventional Hydroelectric	28.8	0.900	31.3	31.7	14.6
Wheeler Dam	AL	Lawrence	Conventional Hydroelectric	35.1	0.900	34.1	35.6	23.5
Wheeler Dam	AL	Lawrence	Conventional Hydroelectric	36.0	0.900	41.9	38.3	27.2
Wheeler Dam	AL	Lawrence	Conventional Hydroelectric	43.6	0.900	41.9	38.2	27.9

24 한전 발전자회사 최소발전용량 자료만 확보가 가능하며, 사기업 자료는 “영업 비밀” 이유로 확보할 수 없음.

25 개방된 전력시장에는 여러 전력 공급자와 여러 수요자 간의 거래가 이루어지기 때문에 발전기별 정보의 투명성이 필수적이다.

26 EIA-860 설문조사 양식은 정격용량이 합산 1메가와트 이상인 발전소의 기존 및 계획된 발전기와 관련 환경설비에 대한 발전기 수준의 구체적인 정보를 수집한다. 본 보고서에서는 편집된 “Generator ID(발전기 ID)”는 원본 데이터셋에서 확인할 수 있다. <https://www.eia.gov/electricity/data/eia860/>

V. 최소발전용량 하향 조정 사례

VRE 자원의 확대에 따라, 전 세계적으로 출력제어량을 최소화하고 재생에너지의 낭비를 줄일 수 있도록 기술적·제도적 개선이 지속적으로 추진되고 있다. 필요시 출력제어를 하지만, 이는 불가피한 상황에만 적용되는 최후의 조치로 인식된다. 결과적으로, VRE 비중이 높은 지역에서 출력제어율도 높게 나타나는 경향이 있다.

대표적으로, 일본, 미국, 그리고 유럽의 출력제어율이 증가하고 있지만, 이들 국가의 VRE 발전 비중은 각각 12.2%(2023-일본)²⁷, 15.6%(2023-미국)²⁸, 28.7%(2024-EU)²⁹이다. 한국의 VRE 발전 비중인 5.9%(2023)³⁰보다 현저히 높은 수준이므로, VRE 발전 비중을 고려하지 않고 출력제어율만 비교하는 것은 부적절하다.

국제에너지기구(IEA)가 석탄발전기 평균 최소출력을 기존 55%에서 40%수준으로 낮추면 재생에너지 출력제어를 절반가량 해소할 수 있다고 밝힌 바 있다.³¹ 일본, 인도, 중국과 같은 국가들에서는 재생에너지 보급률을 개선하기 위해 화력발전기 최소발전용량을 중앙정부에서 일괄적으로 조정하는 조치를 단행했다.

A. 해외 사례

1. 일본

일본은 태양광 설비 설치 지역과 전력 소비가 높은 도시의 거리가 먼 관계로 2020년부터 계통 혼잡이 악화되었다. 이 문제를 해결하기 위해 다양한 노력이 있었는데, 2024년에는 경제산업성(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI)이 재생에너지 출력제어 억제를 위한 대응책을 발표하였다. 공급 측면 대책의 일환으로 신규 화력발전소의 최소 발전용량을 기존 50%에서 30%로 하향 조정하는 계획을 아래와 같이 화력 발전사들에 공유했다.³² 신규 외에 기존 발전기도 설비 특성을 고려하여 최대한 낮은 수준으로 조정하도록 발전사들의 협조를 요청한 결과이다.

원문	번역문
長周期広域周波数調整時の出力引下げ協力依頼について (経済産業省)	장주기 광역 주파수 조정 시 출력 저감 협력의뢰 요청 (경제산업청)

27 IESP (Institute for Sustainable Energy Policies) (2024). 2023 Share of Electricity from Renewable Energy Resources in Japan [Preliminary Report].

28 EIA (Energy Information Administration) (2023). Electric Power Monthly.

29 EC (European Commission) (2025). Electricity from renewable sources reaches 47% in 2024.

30 한국에너지공단 (2023), 보급통계 보급량.

31 IEA(2018), Status of Power System Transformation, 89쪽

32 METI (2024). 장주기 광역 주파수 조정 시 출력 저감 협력의뢰 요청청. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/announce/20240829.pdf

第46回系統ワーキンググループにおいて、新設火力電源（混焼バイオマスを含む）の最低出力については、現行の50%から30%に引き下げることが合意されました。 ... また、既設火力電源等についても、自家消費を主な目的とした発電設備等を含め、技術的な困難性に配慮しつつ、出力制御時に発電停止できない設備に対しては、基本的に新設の場合と同様の基準の遵守について協力を求めることとなっております。	제46회 계통워킹그룹에서 신설 화력 전원(혼소 바이오매스 포함)의 최소 출력에 대해서는 현행 50%에서 30%로 하향 조정하기로 합의하였다. ... 또한, 기존 화력 발전원 등에 대해서도 자가 소비를 주된 목적으로 하는 발전 설비 등을 포함하여 기술적인 어려움을 고려한다. 출력제어 시 발전 정지가 불가능한 설비에 대해서도 기본적으로 신설 설비와 동일한 기준 준수에 협조를 요청하기로 하였다.
---	---

2. 인도

인도 중앙전기위원회(Central Electricity Regulatory Commission, CERC)는 출력제어율을 3.5%에서 1.4%로 감소시키는 목적으로 전력 계통운영규정을 2023년에 개정하고 화력발전소의 기술적 최소발전용량을 70%에서 55%로 낮추었다.³³ 같은 시기에, 인도 전력부(Ministry of Power) 지시에 따라 전력청(Central Electricity Authority, CEA)은 40% 출력 운영을 달성하기 위한 로드맵을 수립하였다. 개정된 규정에 해당 로드맵을 따르도록 명시되어 있다.

원문	번역문
Indian Electricity Grid Code (CERC)	인도 계통운영규정 (중앙전기위원회)
(12) Minimum turndown level for regional entity thermal generating stations: The minimum turndown level for operation in respect of a unit of a regional entity thermal generating station shall be 55% of the MCR of the said unit or such other minimum power level as specified in the CEA (Flexible Operation of coal based Thermal Generating Units) Regulations, 2023, as amended from time to time, whichever is lower.	(12) 지역 사업체 열병합 발전소의 최소 출력 저감 수준: 지역 사업체 열병합 발전소의 개별 설비에 대한 최소 출력 저감 수준은 해당 설비의 최대 연속 정격 출력의 55% 또는 수시로 개정되는 「중앙전력청(석탄 기반 열병합 발전 설비의 유연 운전) 규정, 2023」에 명시된 기타 최소 출력 수준 중 더 낮은 값을 적용한다.
Phasing Plan for Implementation of 40% technical minimum load (CEA)	40% 기술적 최소 부하 이행 단계별 계획 (중앙전력청)
As per the CEA Regulation, the coal fired generating units shall achieve minimum power level of 40% according to the phasing plan specified by the Authority.	중앙전력청 규정에 따라 석탄 화력 발전 설비는 당국이 지정한 단계별 계획에 따라 최소 출력 수준 40%를 달성해야 한다.

3. 중국

중국은 적극적인 재생에너지 보급으로 인해, 2010년대 중반부터 출력제어율이 급진적으로 증가했다. 이후 재생에너지의 활용률을 극대화하기 위해 다양한 제도적·기술적 개선을 추진하였다. 기존 발전소들은 최소 발전 출력 수준을 기존 60~70%에서 30~40%로 낮출 수 있도록 설비 개조를 2015년부터 실시하였으며, 기술적 향상은 규제 조정을 통해 더 강화되었다.³⁴ 특히, 2016년 국가에너지국(National Energy Agency, NEA)이 전력망 운영자에게 재생에너지

33 CERC (Central Electricity Regulatory Commission) (2023). Indian Electricity Grid Code (Amended). New Delhi. <https://cercind.gov.in/Regulations/180-Regulations.pdf>

34 IEA ((International Energy Agency) (2019). China Power System Transformation. OECD. Paris.

발전량의 최소 95%를 구매하도록 의무화한 점이 중요한 전환점으로 작용하였다.³⁵ 이에 국가전력망공사(State Grid Corporation of China, SGCC)는 재생에너지 우선 구매 정책을 통해 VRE 출력제어율을 5% 이내로 제한한다고 발표하였다. 또한, 발전기가 저부하 운전을 할 수 있도록 유도하는 보조시장(Ancillary Market) 도입도 병행되었으며, 이와 같은 조치들로 인해 2016년 약 20%에 달했던 출력 제어율은 2022년 2~3% 수준으로 대폭 감소하였다.³⁶

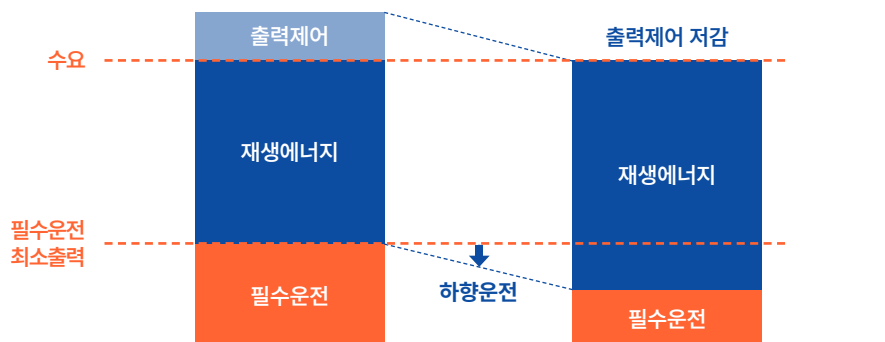
원문	번역문
《解决弃水弃风弃光问题实施方案》的通知 (国家发展改革委 国家能源局关于印发)	「폐수·폐풍·폐광 문제 해결 시행 방안」 발행에 관한 통지 (국가발전개혁위원회·국가에너지국)
(三) 总体目标 ... 其它地区风电和光伏发电年利用小时数应达到国家能源局 2016年下达的本地区最低保障收购年利用小时数 (或弃风率低于 10%、弃光率低于 5%)。	(3) 목표 ... 기타 지역의 풍력 및 태양광 발전 연간 이용 시간은 국가에너지국이 2016년에 해당 지역에 하달한 최소 보장 구매 연간 이용 시간(또는 풍력 발전 출력제어율 10% 미만, 태양광 발전 출력제어율 5% 미만)을 충족해야 한다.

B. 국내 사례

제주 계통에서도 재생에너지 출력제어가 심화하자 2024년 8월에 비슷한 조치가 시행되었다.³⁷ 전력거래소는 VRE 발전 비중이 19.8%로 비교적 높은 제주 지역의 재생에너지 출력제어를 줄이기 위해 필수운전 발전기의 최소발전용량보다 낮은 출력으로 운전할 수 있도록 운영 기준을 개정하였다 <그림3>. 이때 '중앙급전발전기의 최소발전용량 이하로도 안정적으로 운전이 가능한 출력 수준'을 뜻하는 '최소발전용량 이하 운전 시 출력하한치(lower minimum generation)'라는 새로운 개념이 도입되었다 (계통평가세부운영규정 제3.3.20.1조).

[그림 3] 제주 최소발전용량 이하 운전에 대한 규칙 개정안 (전력거래소 전력시장운영규칙 개정 내용, 제24-긴급3차)

최소발전용량 이하 운전에 따른 출력제어 저감 효과



35 NEA (2017), “解决弃水弃风弃光问题实施方案”. https://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3056.htm

36 2025년 이후 출력제어율이 5%를 넘을 것으로 예상되어, 임시(2025-2027)로 출력제어 허용율을 최대 10%로 상향하기로 하였다.

37 전력거래소 전력시장운영규칙 개정 내용, 제24-긴급3차 (24.7.15).

제주 발전기의 최소발전용량 이하 운전 시 출력하한치

구 분	최대발전용량(MW)	최소발전용량(MW)	최소발전용량 이하 운전 하한치 (MW)
남제주#1,2	94	60	39
제주기력#2,3	73	42	28
제주내연#1,2	39	26	24
제주복합#1,2	123	78	58

특히 과부하가 예상되는 경우, 계통 운영자가 필수운전 발전기의 출력을 기존 최소발전용량 이하로 감발할 수 있도록 전력시장운영규칙이 개정되었고(전력시장운영규칙 제16.4.3조 및 제16.4.5조), 각 발전기의 안정적인 운전을 유지하기 위해 기술적 특성 자료 중 선택 제출 항목이었던 '최소발전용량 이하 운전 시 출력하한치' 자료가 제주에 한해서 필수 제출 자료로 변경되었다(동 규칙 [별표 34] 제7.4.3조 제3항). 즉, 발전기 또는 전력 계통의 안정성에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 하향 조정할 수 있도록 추가 자료를 요구한 것이다. 이러한 하향 조정 사례는 기존 최소발전용량이 과연 어떤 기준에 따라 '최소'로 설정되었는지를 더욱 의문케 한다. 조정 가능한 수치였다면, 최초 설정값의 타당성에 대한 재검토는 불가피하며 육지에서도 동일한 절차가 적용되어야 한다.

VI. 결론 및 정책 제언

전력 계통이 수용할 수 있는 총 전력량에는 계통제약 혹은 수급제약에 따른 한계가 존재한다. 따라서, 효율적인 에너지 전환 전략에는 비재생에너지 발전원의 유연성을 최대화하는 것이 필수적이다. 특히, 화력발전 비중이 여전히 높은 상황에서 계통 관련 이유로 재생에너지 확산이 지연되는 경우, 이러한 논의는 더욱 중요해진다. 한국 역시 이러한 사례에 해당하며, 전력망 보강뿐만 아니라 화력 발전량을 최대한 감축할 수 있는 조치를 적극적으로 모색해야 한다. 이미 존재하는 재생에너지 발전설비의 활용을 최대화하고, 신규 재생에너지의 계통 접속을 차단하는 행위를 지양해야 한다.

제주 지역에서의 최소발전용량 하향 조치는 출력제어 최소화를 위한 제도 개선이 국내에서도 국제적 흐름에 발맞춰 일부 진전되고 있음을 보여준다. 이러한 제도적 조치가 가능함에도 육지 계통에 조속히 도입하지 않는 것은, 재생에너지 보급 제한을 관망하는 것과 같다.

재생에너지를 제한하기에 앞서, 화력발전기의 최소발전용량 하향 조정 등 제도적 개선 조치를 우선적으로 추진하는 것이 에너지 전환을 위한 보다 효율적인 접근이다. 물론, 지역별 전력 계통의 상태와 참여 주체가 상이한 만큼, 그 어느 조치든 계통 안정성과 공정성을 충분히 고려하여 도입되어야 한다. 그러나 제2장에서 언급했듯이, 현재의 재생에너지 출력제어는 계통 안정성 외의 사유로도 이뤄질 수 있는 여지가 있으며, 제3장에서 다룬 바와 같이 최소발전용량의 기준과 수준 또한 공정성, 투명성에 대한 의문이 제기되고 있다. 이러한 점들을 종합적으로 고려할 때, 최소발전용량 조정과 같은 제도 개선은 재생에너지 보급을 촉진할 수 있는 중요한 수단이다.

따라서, 재생에너지의 보급 확대를 촉진하기 위해 다음과 같은 정책적 방향을 제안한다:

1. 전력거래소는 기존 화력발전기의 최소발전용량을 최대 30~40% 수준으로 하향 조정해야 한다.

전력 계통의 유연성을 높여 변동성 재생에너지(VRE)의 확대에 대응하기 위해, 전력거래소는 기존 화력발전기들의 최소발전용량을 현재보다 낮은 수준으로 조정하는 조치를 시행해야 한다. 일본, 인도, 중국 등 주요 국가들은 최소발전용량을 30~40%대로 하향 조정함으로써 재생에너지 수용성을 확대해 왔다. 한국 역시 이와 같은 추세에 발맞출 필요가 있으며, 제주도뿐만 아니라 육지에도 기존 최소발전용량 이하의 운전이 가능하도록 계통평가세부운영규정을 개정해야 한다.

현행 <대기환경보전법>상 오염물질 배출 농도 기준이 저부하 운전을 제한하는 요인으로 작용할 수 있으나, 전체 계통 차원에서 총배출량을 고려하는 방식으로 접근한다면, 오히려 환경적 효과성과 재생에너지 수용성을 동시에 제고할 수 있다. 이를 위해 전력시장운영규칙에서 정하는 최소발전용량의 정의를 재정립하고, 기술·환경적 요건을 반영한 합리적 조정 기준을 마련할 필요가 있다.

화력발전기의 기술적 특성상 저부하 운전은 장비의 마모와 손상을 가속시킬 수 있다. 그러나 현재 운영 중인 발전기의 최소발전용량은 국제 권고 수준이나 실제 기술적 한계에 비해 과도하게 높게 설정된 것으로 보인다. 이에 따라, 최소발전용량의 산정 방식과 필요성에 대해 전면적으로 재검토하고, 설비별 운전 특성과 제약 조건을 정밀 분석하여 점진적·탄

력적인 하향 조정 기준을 수립해야 한다. 아울러, 최소발전용량의 자발적 하향 조정을 유도할 수 있는 체계가 마련되어야 한다. 관련 보상 체계가 이미 존재하지만, 보상 수준이 충분하지 않아 실질적인 유인책으로 작동하고 있지 않다. 즉, 운전 범위가 넓은 발전기에 확실한 가산점을 혹은 반대의 경우 불이익을 부여하는 등 유연성을 자발적으로 개선하도록 유도하는 제도가 강화되어야 한다.

2. 발전기별 최소발전용량, 필수운전 발전기에 대한 정보를 투명하게 공개해야 한다.

현재, 발전기별 최소발전용량은 공개되지 않고 있으므로 출력제어량의 적정성을 검증하기 어렵다. 비록 최소발전용량은 환경 보호와 설비 안전을 위한 기준이지만, 그 효과성과 타당성에 대한 주기적인 재검토가 필요하다. 이를 위해 최소발전용량의 산정 기준과 검증 절차를 명확히 하고, 발전기별 최소발전용량과 관련 검증 이력을 외부에서도 확인할 수 있도록 정보 공개 수준을 높여야 한다. 이는 최소발전용량이 높은 발전기들에 특히 중요한 사안이다.

변동비반영시장의 특성상, 최소발전용량을 줄이고 재생에너지 수용성을 높이기 위해서는 기존 발전기들의 유연한 운전을 유도할 수 있는 별도의 시장 메커니즘이 필요하다. 그러나 이러한 유인책이 충분히 제공되지 않는다면, 최소발전용량의 과다 산정과 그로 인한 비효율적인 계통 운영을 방지하기 위해 계통 운영자가 더욱 적극적으로 개입할 필요가 있다.

이를 위해 전국적으로 발전사별 '최소발전용량 이하 운전시 출력하한치' 자료의 제출을 의무화하고, 그에 대한 검증 절차와 결과를 투명하게 공개하는 제도적 장치가 마련되어야 한다. 이러한 조치는 최소발전용량 산정의 신뢰성과 정당성을 높이는 동시에, 재생에너지 확대에 필요한 계통 유연성 확보에도 기여할 수 있다.



재생에너지 고속도로의 과속방지턱

화력발전기 최소발전용량

발간일	2025년 8월
저자	주다운 기후솔루션 전력시계통팀 연구원
도움주신 분	한가희 기후솔루션 전력시장계통 팀장
디자인	최예진 기후솔루션 제작팀 디자이너 Nature Rhythm

기후솔루션은 전 세계 온실가스 감축 및 올바른 에너지 전환을 위해 활동하는 비영리법인입니다.
리서치, 법률, 대외 협력, 커뮤니케이션 등의 폭넓은 방법으로 기후위기를 해결할 실질적 솔루션을 발굴하고,
근본적인 변화를 위한 움직임을 만들어 나갑니다.