

탄소중립 시대의 전력계통 유연성 확보와 기존 댐 활용 양수발전의 역할

Case Analysis for Dam safety Improvement Project



가필순 한국수자원공사
에너지기획처 신사업부 부장
itischance@kwater.or.kr

요약 (Abstract)

탄소중립 정책에 따른 재생에너지 확대로 전력계통 유연성 확보가 시급해짐에 따라, 대용량 저장 가능한 양수발전이 핵심 대안으로 부각된다.

기존 방식은 상·하부 댐 신축으로 인한 환경 훼손과 막대한 비용, 사회적 갈등을 유발하였다. 이를 극복하기 위한 '기존 댐 활용형 양수발전'은 기존 댐을 하부저수지로 활용하고 상부댐만 신규 건설하는 방식이다. 이를 통해 자연 훼손을 차단하고 기존 인프라를 활용하여 투자비와 사업 기간을 대폭 단축하였으며, 수몰지 미발생으로 사회적 수용성 확보에도 매우 유리하다. 이러한 친환경 방식은 전력망의 블랙아웃을 막는 구원투수 역할을 수행한다. 향후 관련 법령 정비와 AI 등 운영 기술 고도화가 뒷받침될 경우, 환경과 경제성, 수용성을 모두 갖춘 탄소중립 시대의 국가 핵심 인프라로 확고히 자리매김한다.

키워드: 탄소중립, 전력계통 유연성, 양수발전, 기존 댐 활용, 장주기 대용량 에너지저장장치, 재생에너지 변동성

Keywords: Carbon Neutrality, Power Grid Flexibility, Pumped Storage Hydropower, Utilization of Existing Dams, Long-duration Energy Storage System (ESS), Renewable Energy Volatility

1. 배경

전 세계적으로 탄소중립 정책이 가속화되면서 태양광과 풍력 중심의 재생에너지 보급이 빠르게 확대되고 있다. 우리나라 역시 국가온실가스감축목표(NDC) 달성과 국가 전력수급기본계획 등에 따라 재생에너지 확대 정책을 추진하고 있으며, 전력 생산구조 또한 기존 화력 중심에서 재생에너지 중심으로 점차 전환되고 있다.

그러나 태양광과 풍력은 자연조건에 따라 발전량이 급변하는 간헐성과 변동성을 가지고 있어 전력계통 운영 측면에서 새로운 과제를 야기하고 있다. 이미 제주도를 넘어 호남까지 확산되고 있는 재생에너지 출력제어 사태에서 보듯, 재생에너지 발전 비중이 증가할수록 계통 주파수 유지, 공급 안정성 확보, 출력제어 최소화, 예비력 확보 등 전력계통 유연성(Flexibility) 확보가 매우 중요해지고 있다.

이러한 상황에서 대규모 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS) 역할을 수행할 수 있는 양수발전(Pumped Storage Hydropower)의 중요성이 다시 부각되고 있다. 양수발전은 이미 검증된 기술을 기반으로 대규모 장주기 저장이 가능하며, 신속한 출력 조정과 높은 계통 안정화 기능을 보유하고 있어 재생에너지 확대 시대의 핵심 인프라로 평가받고 있다. 이에 따라 정부는 전력망 안정을 위해 신규 양수발전소 건설을 적극 지원하고 있다. 하지만 전통적인 산지 개발 방식의 양수발전 건설은 7년 이상의 긴 공사 기간과 천문학적 투자비가 소요된다는 한계가 있다. 더욱이 대규모 산림 훼손에 따른 환경단체 반발과 수몰 지역 주민들의 수용성 확보 등 여러 사회적 갈등이 존재한다.

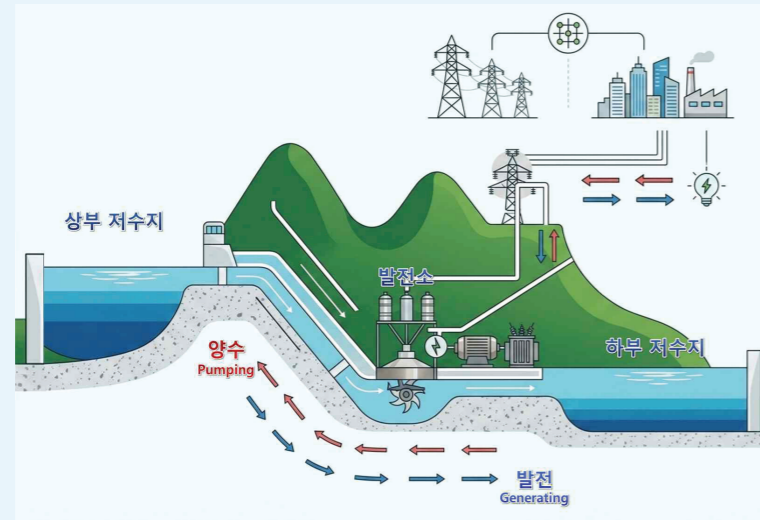
최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 대규모 댐 건설 방식에서 벗어나 기존 다목적 댐, 용수댐, 발전댐 등을 하부저수지로 활용하는 '기존 댐 활용형 양수발전'이 환경훼손과 사회적 갈등을 최소화할 수 있는 친환경 개발모델로 주목받고 있다. 본 고에서는 양수발전의 개요와 필요성, 기존 댐 활용형 양수발전의 특징과 장점, 그리고 향후 정책적·기술적 과제에 대해 살펴보고자 한다.

2. 양수발전의 개요

2.1 양수발전의 정의

양수발전은 전력 수요와 공급을 조절하기 위해 물을 저장매체로 활용하는 대표적인 대

규모 에너지 저장방식이다. 일반적으로 상부저수지와 하부저수지 사이의 위치에너지 차이를 이용하여 발전하며, 전력 수요가 낮고 전력가격이 저렴한 시간대에는 하부저수지의 물을 상부저수지로 양수하고, 전력 수요가 높은 시간대에는 상부저수지의 물을 하부저수지로 방류하여 발전한다.



[그림 1] 양수발전 기본 운영 개념도

과거 양수발전은 심야 잉여전력을 활용하여 기저부하를 보조하는 역할이 중심이었다. 그러나 최근에는 재생에너지 확대에 따라 잉여 태양광·풍력 전력을 저장하고 계통 변동성을 완화하는 유연성 자원으로 역할이 확대되고 있다.

양수발전은 장기간 운영이 가능한 검증된 기술로서 대규모 에너지를 장주기로 저장하고, 빠른 기동 및 출력조정과 계통 주파수 조정 및 예비력 제공이 가능한 특징을 가진다. 특히 수 기가와트(GW) 규모의 전력을 수 시간 이상 저장할 수 있어 배터리 기반 ESS 대비 장주기·대용량 저장 측면에서 경쟁력을 가진다.

2.2 국내 양수발전 현황

국내 양수발전은 1980년대 이후 본격적으로 도입되어 현재 청평, 삼랑진, 무주, 산청, 양양, 청송, 예천 등 다수의 발전소가 운영 중이며, 총 설비용량은 약 4.7 GW 규모다. 기존에는 원자력 및 석탄화력 중심 전력계통의 심야 잉여전력 활용 목적이 컸으나, 최근에는 재생에너지 확대와 함께 계통 안정화 기능의 중요성이 더욱 커지고 있다.

과거에는 심야 시간에 전력을 소비해 물을 끌어올리고, 낮 피크 시간에 전력을 생산하

는 단순한 일일 패턴을 보였다. 그러나 최근 태양광 발전량이 급증해 전기가 남아도는 한 낮에도 양수를 가동하여 잉여 전력을 흡수하고, 해가 진 후 전력 수요가 급증하는 이른바 ‘덕 커브(Duck Curve)’ 현상에 대응해 저녁 시간에 발전을 수행하는 등 하루에도 수차례 양수와 발전을 반복하며 계통의 구원투수 역할을 해내고 있다.

정부는 「제11차 전력수급기본계획」 등을 통해 신규 양수발전 확대 필요성을 제시하고 있으며, 합천, 구례, 곡성 등 한국수력원자력(주) 외에도 발전 5사에서 신규 사업자가 잇따라 선정되며 예비타당성검토를 준비하고 있다. 양수발전은 장기적으로 재생에너지 확대에 대응하기 위한 유연성 자원 확보 차원에서 역할이 지속해서 증가할 것으로 전망된다.



[그림 2] 국내 양수발전소 현황

[표 1] 운영 중인 양수발전 현황

구분	운영자	설비용량	준공년도	지역	비고
청평양수	한국수력원자력	400 MW	1980	경기	
삼랑진양수	한국수력원자력	600 MW	1985	경남	
무주양수	한국수력원자력	600 MW	1995	전북	
산청양수	한국수력원자력	700 MW	2001	경남	
양양양수	한국수력원자력	1,000 MW	2006	강원	
청송양수	한국수력원자력	600 MW	2006	경북	
예천양수	한국수력원자력	700 MW	2011	경북	

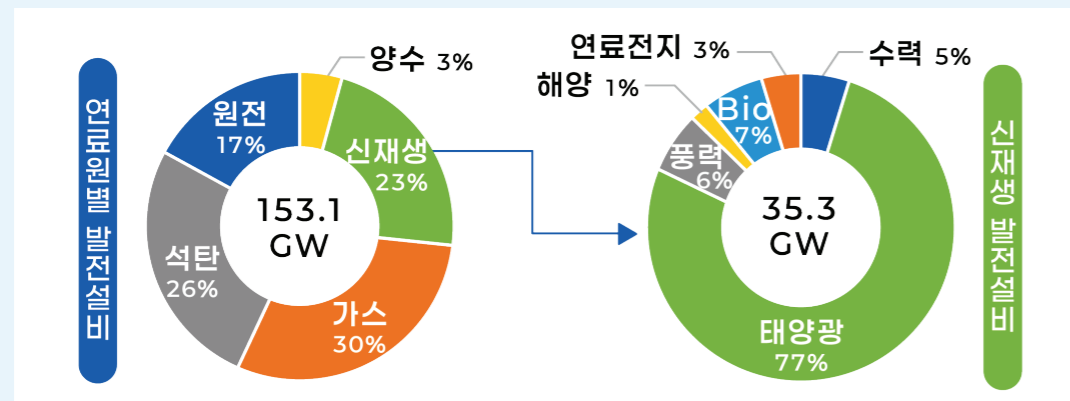
[표 2] 개발 예정 양수발전 현황

구분	운영자	설비용량	준공년도	지역	비고
제9차 전력수급기본계획 ('20~'34)	한국수력원자력	500 MW	2030	충북 영동	건설중
		600MW	2032	강원 홍천	
		700 MW	2033	경기 포천	
제10차 전력수급기본계획 ('22~'36)	한국수력원자력	700 MW	2035	경남 합천	계획중
	한국중부발전	1,000 MW	2035	전남 구례	
제11차 전력수급기본계획 ('24~'38)	한국수력원자력	1,000 MW	2038	경북 영양	
	한국중부발전	500 MW	2038	경북 봉화	
	한국동서발전	500 MW	2038	전남 곡성	
	한국남동발전	50,000 MW	2038	충남 금산	

2.3 국내 전력계통 현황

2024년 기준 국내 발전설비 용량은 약 153.1 GW 수준이며, 발전원별 구성은 가스 30%, 석탄 26%, 신재생 23%, 원자력 17%, 양수발전 3% 수준으로 나타나고 있다.

특히 신재생에너지 설비 비중은 최근 수년간 빠르게 증가하고 있으며, 전체 신재생 발전 설비 중 태양광이 약 77%를 차지하고 있어 국내 재생에너지 확대가 사실상 태양광 중심으로 이루어지고 있음을 보여준다. 또한, 태양광 발전 비중은 2018년 6.1%에서 2023년 11.3%, 2024년 23.1% 수준까지 증가하는 등 급격한 확대 추세를 보이고 있다. 이는 탄소 중립 정책과 REC 제도, 분산형 전원 확대 정책 등이 복합적으로 작용한 결과로 평가된다.

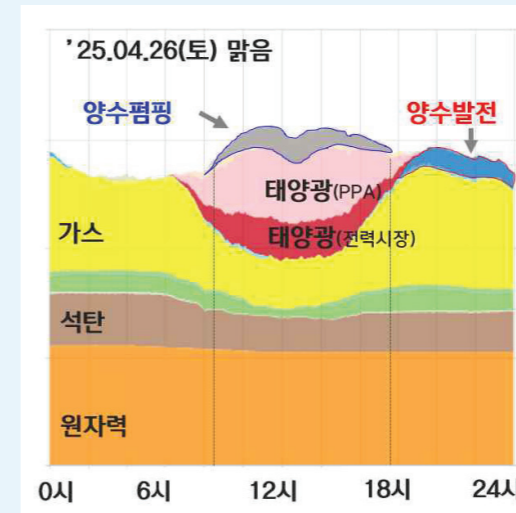


[그림 3] 발전설비 및 신재생에너지 설비 현황

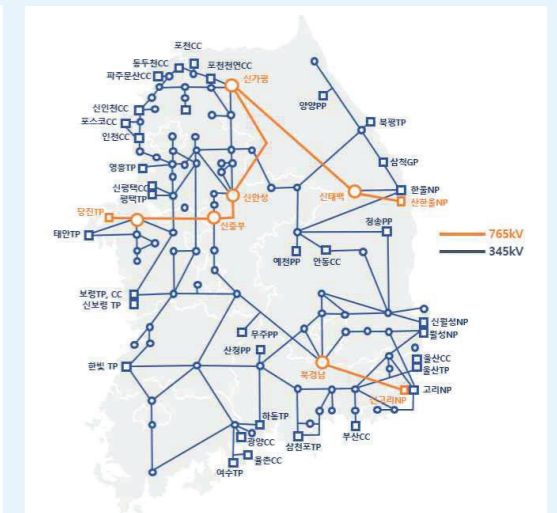
재생에너지 확대는 발전원 구성 변화 이상의 의미를 가진다. 특히 태양광과 풍력은 기존 화력 및 원자력과 달리 자연조건에 따라 출력이 급변하는 특성을 가지므로, 계통 운영 측면에서 새로운 부담요인으로 작용하고 있다.

태양광 발전은 일사량에 따라 출력이 변동하며, 오후 시간대 급격한 출력 저하가 발생한다. 특히 봄·가을철 경부하 시간대에는 재생에너지 출력 증가로 인한 공급과잉 문제가 발생하고 있으며, 일부 지역에서는 출력제어(curtailement)가 증가하는 상황도 나타나고 있다. 반면 저녁 최대부하 시간대에는 태양광 출력 감소와 함께 급격한 수요 대응이 요구되어 계통 변동성이 확대되고 있다. 이에 따라 계통 운영자는 단시간 내 대규모 출력 조정이 가능한 유연성 자원을 확보해야 하며, 기존의 기저발전 중심 운영체계만으로는 안정적인 계통 운영에 한계가 발생할 수 있다.

또한 재생에너지 확대는 송전망 운영 측면에서도 새로운 과제를 야기한다. 대규모 태양광 발전설비는 주로 호남권 및 비수도권 지역에 집중되어 있고, 전력 수요는 수도권에 편중되면서, 공급과 수요 불균형이 심화하고 있다. 이로 인해 비수도권에서 생산한 전기를 수도권으로 실어 나르는 송전망이 일부 막히는 병목현상이 갈수록 커지고 있다. 이에 따라 장거리 송전망 확충과 계통 보강 필요성이 증가하고 있으나, 신규 송전선로 건설에 대한 사회적 갈등과 주민수용성 문제로 인해 계통 확충 속도가 발전설비 증가 속도를 따라가지 못하는 상황이 지속되고 있다.



[그림 4] 태양광 확대에 따른 Duck Curve 개념도



[그림 5] 송전선로 현황

2.4 해외 양수발전 현황 및 전망

글로벌 에너지 시장에서 양수발전의 중요성은 날로 커지고 있다. 국제수력협회(IHA)와 국제재생에너지기구(IRENA)에 따르면, 전 세계 양수발전 설비는 2030년 238 GW를 넘어 2050년에는 325 GW까지 확대되어야 할 것으로 전망하고 있다.

특히 아시아와 북미 시장을 이끄는 중국과 미국의 행보가 매섭다. 중국은 2020년 31 GW 수준이던 설비 용량을 2030년 120 GW까지 끌어올리기 위해 110 GW가 넘는 신규 건설과 계획을 추진 중이며, 장기적으로는 680 GW까지 확대하는 방안을 논의하고 있다. 미국은 재생에너지 발전량의 20%를 양수 발전에서 얻고 있다. 2020년 22.9 GW인 발전 설비 규모를 2030년까지 40GW, 2050년까지 57 GW로 단계별로 늘릴 계획이다. 미국신재생에너지연구소(NERL)는 재생 에너지 변동성을 완화하려면 120 GW의 양수 발전 설비가 필요하다고 분석했다.

이처럼 해외 주요국들 역시 양수발전 확보를 단순한 인프라 확충이 아닌 ‘국가 전력망 안보’ 차원의 핵심과제로 다루고 있다. 해외 국가들의 발 빠른 행보를 교훈으로 삼아 우리나라 양수발전 인프라 확충에 국가적 역량을 집중하고 정책 지원을 뒷받침 할 때이다.

3. 기존댐 활용형 양수발전의 필요성

3.1 기존 양수발전 사업의 한계

전통적인 양수발전 방식은 상부댐과 하부댐을 모두 신규로 건설하는 구조가 일반적이다. 그러나 이러한 방식은 대규모 산림훼손과 수물 지역 발생을 동반하며, 환경영향평가 및 각종 인허가 과정에서 장기간이 소요되는 단점을 안고 있다.

실제로 상·하부 저수지를 조성하는 상황에서 생태계 파괴 우려로 인한 민원이 지속되고 있다. 일례로 현재 추진 중인 한 양수발전 사업의 경우, 100년 된 잣나무 11만 그루가 자생하는 약 1,800 헥타르 규모의 대표적 군락지가 예정지에 포함되며 심각한 진통을 겪고 있다. 환경단체에서 생태계 축 단절을 우려하며 원점 재검토를 요구 중이다. 또한, 저수지 건설은 주민들의 삶의 터전 상실로 직결된다. 과거 타 양수발전소 건설 당시 50여 가구의 주민들은 생활 터전이 수몰되는 아픔을 겪기도 했다.

최근에는 생태 자연도 1등급, 백두대간 보호지역, 상수원 보호구역 등 환경규제가 강화

되면서 신규 대규모 입지 확보가 더욱 어려워지고 있다. 여기에 원자재가격 상승으로 인한 초기 자본적 지출의 상승, 이주 보상 및 갈등 조정에 소요되는 매몰비용의 증가는 전체 사업기간을 증가시킴과 동시에 사업성 악화에도 영향을 미치고 있다.

3.2 기존 댐 활용형 양수발전의 가치

이러한 한계를 극복할 수 있는 현실적이고 합리적인 대안이 바로 ‘기존 댐 활용형 양수발전’이다. 이는 현재 운영 중인 다목적댐, 용수댐, 홍수조절댐, 발전용댐 등을 하부저수지로 그대로 활용하고, 고지대에 상부저수지를 신규 조성하는 방식이다. 즉, 기존 수자원 인프라를 최대한 활용함으로써 신규 댐 건설 규모를 반으로 줄이는 친환경 개발모델이다. 이 방식을 적용하면 신규 하부댐 건설이 불필요해지므로 대규모 수몰지 및 주민 이주 최소화, 산림 훼손 및 생태계 교란 방지, 사업 기간의 단축, 기존 접근도로 및 송전망 활용에 따른 사업성 향상 효과를 거둘 수 있다



[그림 6] 기존 댐 활용형 양수발전 모식도

4. 기존 댐 활용형 양수발전의 주요 장점

4.1 환경훼손 최소화

기존 댐 활용형 양수발전의 가장 큰 장점은 환경 훼손을 최소화할 수 있다는 점이다. 거대한 하부댐을 짓기 위해 골짜기를 막고 산을 깎아내는 과정이 없어 하천 생태계 변화와 수질 오염 리스크를 원천적으로 차단한다. 단순한 전력설비 확충을 넘어 환경성과 지속가능성을 동시에 고려하는 선진적인 에너지 개발모델로서 정책적 명분이 뚜렷하다.

4.2 사회적 수용성 확보

현대 인프라 사업에서 '주민 수용성'은 사업의 성패를 가르는 가장 중요한 잣대다. 기존 댐 활용 방식은 새로운 수몰 지역 발생을 막아 주민들의 강제 이주에 따른 반발 요인을 예방할 수 있다. 더불어, 댐 주변 지역은 이미 오랜 기간 수자원 시설 운영에 익숙해져 있고 진입도로 등 관련 인프라가 갖춰져 있어 새로운 발전설비 진입에 대한 심리적 장벽이 낮다. 사회적 갈등 비용을 최소화하면서 속도감 있게 전력망을 확충할 수 있는 최적의 조건인 셈이다.

4.3 경제성 및 인허가 효율성 극대화

신규 하부댐 축조 비용(토목공사비, 보상비 등)을 절감할 수 있어 초기 투자비를 낮출 수 있다. 또한, 기존 댐이 보유한 송전선로와 진입도로 등 인프라를 연계 활용함으로써 중복 투자를 막는다. 특히 인허가 측면에서 환경영향평가 난이도가 낮아져 사업 착공까지의 기간을 단축할 수 있다. 이는 곧 프로젝트 파이낸싱(PF) 등 금융비용 절감과 조기 상업 운전 개시로 이어져 발전 사업의 경쟁력을 끌어올린다.

4.4 장주기 유연성 자원 확보

재생에너지는 기상 조건에 따라 출력이 요동치며, 이를 보완하기 위해 대용량 배터리(BESS)가 보급되고 있으나 저장 시간이 2~4시간에 불과한 단주기라는 태생적 한계가 있다. 반면 양수발전은 8시간 이상의 잉여 전력을 저장할 수 있는 현존하는 가장 확실한 '장주기(Long-duration) 대용량 ESS'다.

더욱 중요한 것은 양수발전은 계통에 물리적인 '관성(Inertia)'을 제공한다는 점이다. 인버터 기반의 태양광 발전이 늘어날수록 전력망은 작은 충격에도 쉽게 흔들리는데, 양수발전은 묵직한 중심추 역할을 하며 국가 전력망의 블랙아웃을 막는 최후의 보루 역할을 수행한다.

5. 향후 과제 및 정책 제언

5.1 제도적 기반 정비 필요

기존 댐 활용형 양수발전은 기존 수자원시설과 발전시설이 복합적으로 연계되는 사업 특성을 가진다. 따라서 「전원개발촉진법」, 「댐건설·관리 및 주변지역지원 등에 관한 법률」, 「하천법」, 「환경영향평가법」 등 다양한 법령 간 연계 검토가 필요하다.

특히 기존 다목적댐 활용 시 용수공급 및 홍수조절 기능과의 운영 조정, 발전용수 사용권 문제, 저수운영 기준 정립 등이 중요 과제로 제시될 수 있다. 따라서, 앞으로는 기존 댐 활용형 양수발전에 특화된 제도적 기준과 운영체계 마련이 필요할 것으로 판단된다.

5.2 환경성과 주민수용성을 고려한 입지전략

양수발전 확대 과정에서는 단순한 경제성 중심 접근이 아니라 환경성과 주민수용성을 종합적으로 고려한 입지전략이 필요하다. 특히 기존 댐 활용형 사업은 환경훼손 최소화 와 사회적 갈등 저감 측면에서 장점이 있는 만큼, 정책적으로 우선 검토할 수 있는 방향성 마련이 필요하다.

또한, 지역상생 방안과 연계한 사업 추진으로 지역경제 활성화, 관광 자원화, 지역 인프라 개선 등 사업의 효과를 높일 수 있어 주민들에게 기존 댐 활용형 사업의 수용성을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

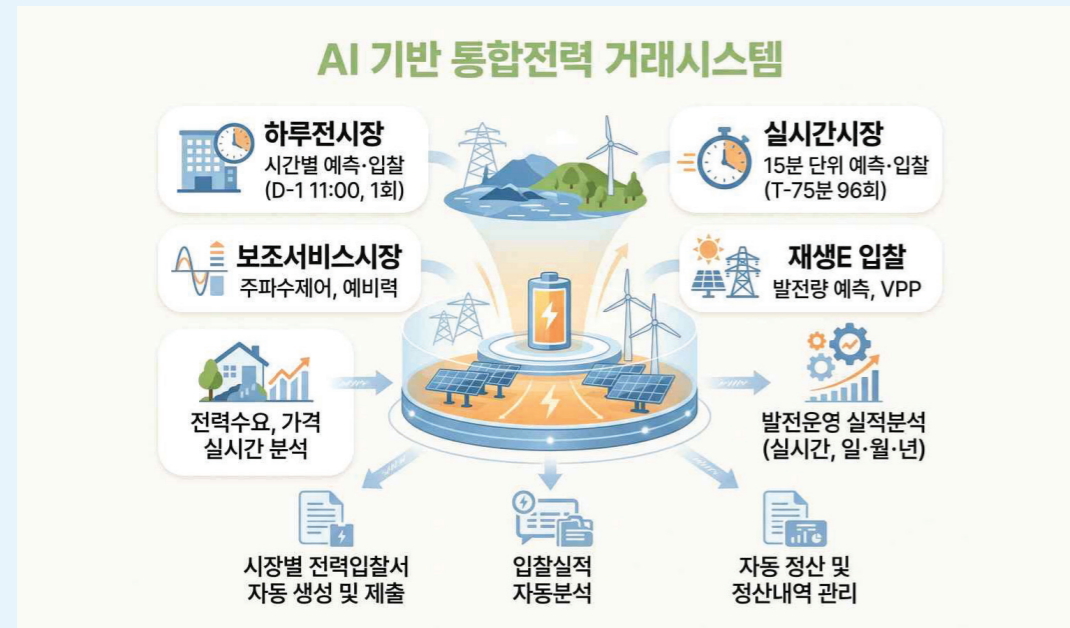
5.4 기술 고도화 및 운영 최적화

향후 재생에너지 확대에 대응하기 위해서는 양수발전의 신속한 출력제어 및 계통 대응 능력 향상이 중요하다. 가변속 양수발전기술, 디지털 기반 운영시스템, AI 기반 계통예측 기술 등과 연계한 운영 고도화가 필요하며, 기존 수자원 운영체계와 K-water 유역별 통

합발전소(VPP) 구축 기술도 중요해질 전망이다.

특히 펌프의 회전 속도를 조절해 태양광의 불규칙한 잉여 전력을 유연하게 흡수할 수 있는 ‘가변속 양수발전 기술’의 적용이 필요하고, AI 분석 모형을 활용하여 실시간 전력 수요, 가격 예측, 재생에너지 원별 발전량 예측 기술과 연계한 양수발전 기술 고도화를 마련해야 한다.

앞으로는 단순한 발전소 건설이라는 좁은 시각에서 벗어나, 국가 수자원 인프라와 전력 인프라를 융합 차원의 새로운 패러다임 전환이 필요하다. 정부의 과감한 규제 혁신과 유관 기관 간의 긴밀한 협력을 바탕으로 기존 댐 활용형 양수발전이 탄소중립 시대를 지탱하는 든든한 국가 핵심 인프라로 자리매김하기를 기대한다.



[그림 7] K-water type AI 기반 통합전력 거래시스템

6. 맺음말

탄소중립 시대의 전력계통은 단순히 발전설비를 늘리는 것만으로는 버틸 수 없다. 넘치는 재생에너지를 저장하고 부족할 때 즉시 꺼내 쓰는 ‘유연성 자원’의 확보는 이제 선택이 아닌 국가 에너지 안보 차원의 생존 문제다. 그중에서도 양수발전은 지난 수십 년간 신뢰성이 검증된, 가장 현실적이고 강력한 무기다.

다만, 과거처럼 산을 허물고 마을을 수몰시키는 방식의 토목 공사는 더 이상 국민적 공감대를 얻기 어렵다. 이러한 시대적 요구 속에서 ‘기존 댐 활용형 양수발전’은 환경 훼손 최소화, 사회적 갈등 예방, 경제성 확보라는 세 마리 토끼를 동시에 잡을 수 있는 혁신적인 대안이다.

참고문헌

- 한국전력공사, 『한전 전력통계속보』, 2025.
- 산업통상자원부, 『제11차 전력수급기본계획』.
- 한국전력거래소, 『전력시장 운영현황』.
- 한국전력거래소, 『2025년 해외 전력산업 동향』.
- 한국수력원자력, 『양수발전 운영자료』.
- 한국에너지공단, 『재생에너지 보급통계』.
- 국제수력협회(IHA), 『International Journal on Hydropower & Dams』.