“태양광·배터리, 과부하 없이 더 유연하게”
GIST, 전력망 출력 조정 여력 계산 기술 개발
전압 이상·선로 과부하 발생률 6.7%→0%

- 전기전자컴퓨터공학과 김윤수 교수팀, 전력망 안전 점검·복구부터 운전 여유량 계산까지 연결한 프레임워크 개발… 제주 실제 배전선로 80개 모델서 선로당 평균 3.72초 만에 계산
- 분산에너지자원의 안정적 운영과 재생에너지 활용 확대 기대
- 국제학술지《IEEE Transactions on Smart Grid》게재

▲ (왼쪽부터) GIST 에너지융합대학원 조우영 석박사통합과정생, 전기전자컴퓨터공학과 김윤수 교수, 에너지융합대학원 노승길 박사

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 **전기전자컴퓨터공학과 김윤수 교수 연구팀**이 **태양광 발전·에너지저장장치**(ESS)* **등 분산에너지자원**(DER)****의 출력을 조정할 때 전력망의 안전을 보장하고, 각 장치가 추가로 조정할 수 있는 전력량을 실시간으로 계산·제공하는 기술을 개발**했다고 밝혔다.

이 기술은 **여러 발전·저장장치를 하나의 발전소처럼 묶어 운영하는 가상발전소**(VPP)**나 전력거래 과정**에서 각 장치의 출력 조정이 전력망에 미치는 영향을 함께 고려하는 일종의 **‘안전 가드레일’**이다.

*** 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS):** 전기를 배터리에 저장해 두었다가 필요할 때 다시 공급하는 장치이다.

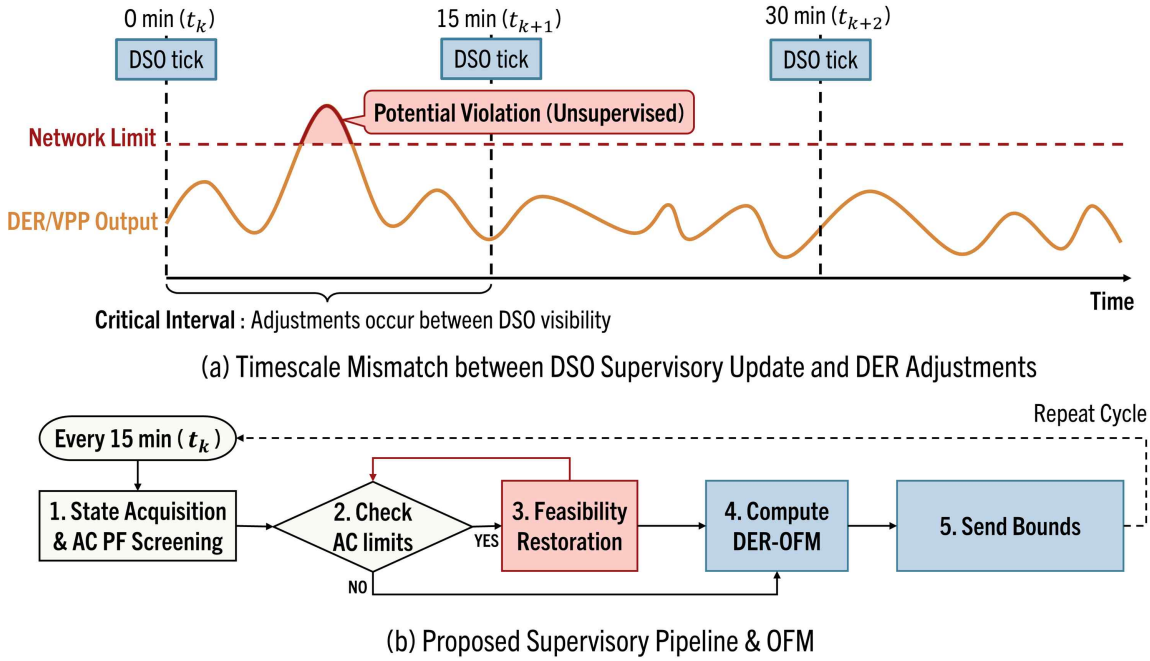
**** 분산에너지자원(Distributed Energy Resource, DER):** 에너지를 생산하거나 저장, 활용하는 소규모 에너지 자원을 의미한다.

문제는 각 장치가 자체 용량을 지키더라도 **여러 장치가 동시에 출력을 바꾸면 전력망의 전압이 지나치게 높거나 낮아지거나 특정 선로에 과부하가 걸릴 수 있다는 점**이다. 같은 양의 전력을 조정하더라도 장치가 연결된 위치와 주변 전력 흐름에 따라 전력망에 미치는 영향이 달라진다.

더욱이 **전력망의 상태를 한 번 점검한 뒤 다음 점검까지의 시간**에도 **개별 장치의 출력이 달라질 수 있어,** 장치별 용량만 확인하는 방식으로는 전력망의 안전을 충분

히 판단하기 어렵다.

연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 **전력망의 현재 전압과 전력 흐름을 점검**하고, 운전 한계를 벗어난 경우 일부 분산에너지자원의 출력을 조정해 **안전한 상태를 확보**한 뒤, **'운전 유연성 여유량**(OFM)**'을 계산·검증하는 프레임워크를 개발**했다. **전력망 상태를 15분 단위로 모니터링하고, 운전 여유량을 계산·검증하는 과정을 하나로 연결**한 것이 특징이다.



▲ **분산에너지자원 자율 운전을 위한 실시간 배전망 관제 개념도.** (위) 15분 관제 주기 사이에 분산자원의 급격한 출력 변화로 발생할 수 있는 전력망 한계 위반 문제를 방지하기 위해, (아래) 배전망 상태를 점검·복구한 뒤 안전한 추가 운전 여유(DER-OFM)를 산출해 전달하는 실시간 관제 과정이다.

'운전 유연성 여유량'은 **전력망의 전압과 선로 부하가 허용 범위를 벗어나지 않는 안전한 상태를 유지**하면서, **여러 발전·저장장치가 함께 출력을 얼마나 더 조정할 수 있는지를 나타내는 값**이다. 이때 전력망 곳곳의 전압이 지나치게 높거나 낮아지지 않아야 하고, 특정 선로에 과부하가 걸리지 않아야 한다.

예를 들어 ESS에 전기를 저장할 공간이 남아 있더라도, 연결된 선로에 여유가 없다면 충전 전력을 높이기 어려울 수 있다. 따라서 각 장치의 남은 용량뿐 아니라 **연결된 선로의 상태와 주변 장치의 출력 변화까지 함께 고려**해야 한다.

연구팀이 개발한 프레임워크는 **먼저 전력망의 전압과 전력 흐름을 확인하고, 운전 한계를 벗어난 경우 일부 분산에너지자원의 출력을 조정해 안전한 상태로 복구**한다. 전력망이 안전한 상태인지 확인한 뒤 운전 여유량 계산을 진행한다.

이어 **여러 장치의 출력 조정량을 함께 계산**하고, **해당 조정량만큼 동시에 출력을**

바꿨을 때도 전압과 선로의 운전 한계를 지키는지 반복적으로 검증한다. 이렇게 검증된 결과는 각 장치의 운전 판단에 활용할 수 있도록 제공한다.

연구진은 **실제 태양광 발전 및 예측 데이터를 활용**해 **33개 지점으로 구성된 표준 배전망 모델**에서 **모의실험**을 진행했다. 개발한 프레임워크가 전력망의 안전을 유지하면서 ESS의 활용도 유지할 수 있는지 확인한 것이다.

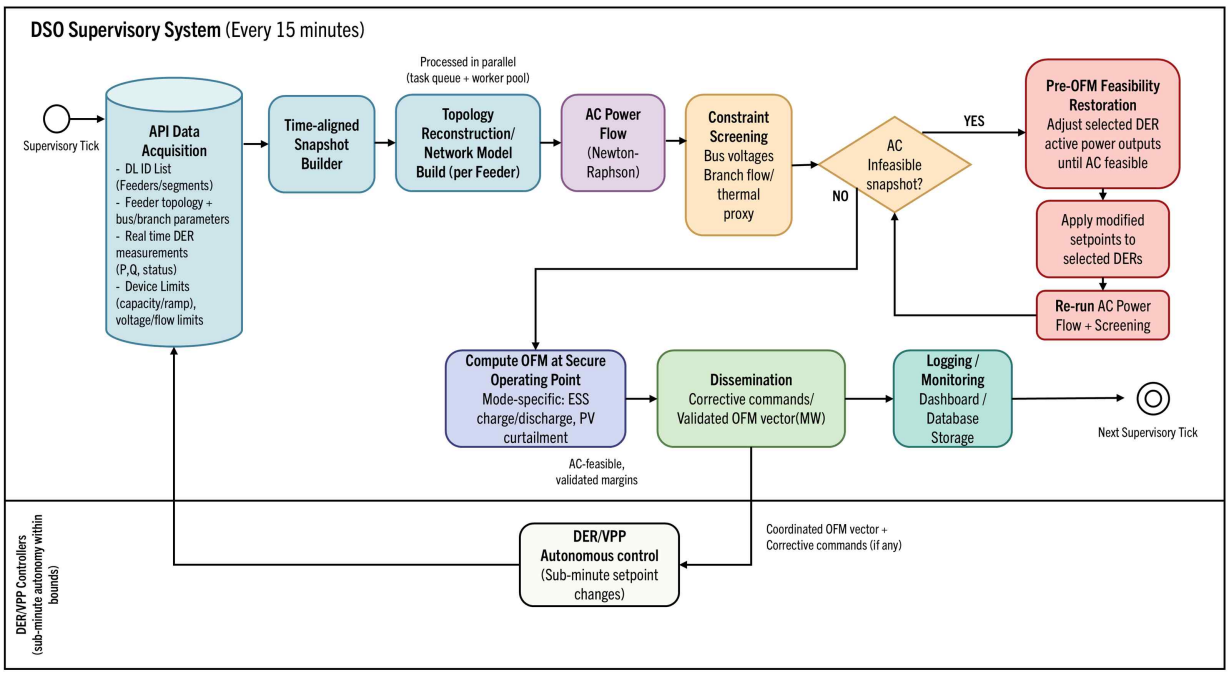
그 결과, **개별 ESS의 기기 조건만 고려했을 때 6.7%였던 전력망 운전 한계 위반율이 개발 기술을 적용한 경우 0%로 감소**했다.

반면 **전체 ESS의 충·방전 처리량은 거의 그대로 유지**됐다. 전력망에 부담을 주는 위치의 장치 대신 상대적으로 여유가 있는 위치의 장치에 출력 조정량을 배분함으로써, 전력망의 안전성을 확보하면서도 ESS의 활용 수준을 유지할 수 있음을 확인했다.

연구팀은 **실제 배전선로 규모**에서도 관제 주기 안에 계산을 마칠 수 있는지 확인하기 위해, **제주도의 배전선로 데이터를 활용한 추가 모의실험을 진행**했다.

제주도의 실제 배전선로 구조를 반영한 **80개 선로 모델에서 운전 유연성 여유량을 선로당 평균 3.72초만에 계산**했다. 이를 통해 15분 관제 주기 안에서 여러 배전선로의 운전 여유를 산정할 수 있는 계산 성능을 확인했다.

김윤수 교수는 "이번 연구는 **배전망 운영자가 개별 분산자원의 자율적인 운전을 최대한 보장**하면서도 전력망의 물리적 한계를 침범하지 않도록 **실시간 안전 가드레일을 제공하는 핵심 기술**"이라며, "현재 한국전력의 **실제 배전계통 시스템**(DSO-MD)**에 적용되고 있는 만큼,** 향후 **재생에너지 수용성을 높이고 한국형 배전계통 운영체계와 지역 전력시장을 안착시키는 데 크게 기여**할 것"이라고 말했다.



▲ 배전계통 운영자(DSO) 기반의 실시간 운전 유연성 여유량(DER-OFM) 산정 및 전달 아키텍처. 15분마다 배전선로 데이터를 수집해 전력망 제약 위반 여부를 점검·해소한 뒤, 교류(AC) 조류 해석으로 검증된 안전한 추가 출력 조정 범위(OFM)를 산출해 개별 분산자원 및 통합발전소(VPP) 제어기에 전달하는 전체 시스템 구조도이다.

GIST 전기전자컴퓨터공학과 김윤수 교수가 지도하고 에너지융합대학원 조우영 석박사통합과정생과 노승길 박사가 수행한 이번 연구는 한국에너지기술평가원의 지원을 받았다.

연구 결과는 **전력·스마트그리드 분야 국제학술지 《IEEE Transactions on Smart Grid》에 2026년 10월 26일 온라인으로 게재**됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과의 **기술사업화 및 산업적 활용에 관심 있는 기업·기관의 문의를 창업혁신진흥원 기술사업화센터**(hgmoon@gist.ac.kr)**를 통해 받고 있다**고 밝혔다.

논문 정보

○ **논문명, 저자 정보**

- 저널명 : IEEE Transactions on Smart Grid
  (IF: 10.1, JCR 상위 약 5.2%)
- 논문명 : Real-Time Computation of Operating Flexibility Margins for Distributed Energy Resources in Distribution Networks
- 저자 정보 : 조우영(제1저자, GIST), 노승길(제2저자, GIST), 박중성(제3저자, 한국전력공사 전력연구원), 김윤수(교신저자, GIST)