

# 전력망 혼드는 AI 데이터 센터 : 변동성 리스크 대응 방안은?

## 블랙아웃 간신히 피한 글로벌 데이터 센터 중심지

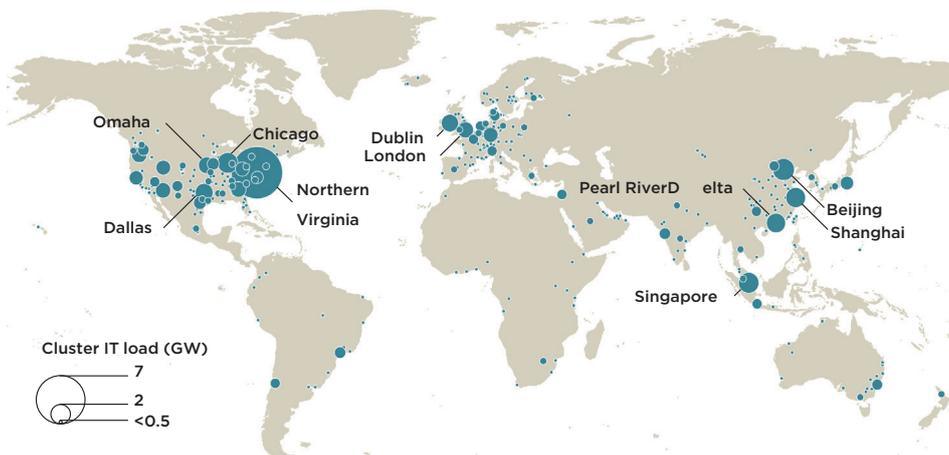
미국 수도 워싱턴 DC 인근 북부 버지니아 지역은 200개 이상의 데이터 센터들이 밀집해 '데이터 센터 앨리'(Data Center Alley)라는 별칭으로 불린다. 이곳은 전세계 인터넷 트래픽의 70%를 담당하며, 글로벌 데이터 센터 운영 용량의 약 15%가 집중된다. Amazon, Microsoft, Google 등 주요 빅테크 기업들의 핵심 클라우드 인프라가 이곳에서 작동하고 수억 명이 사용하는 이메일, 동영상 스트리밍, 소셜미디어 서비스가 이곳의 서버에서 처리된다. 명실상부 '글로벌 디지털 경제의 수도'라 불릴 만하다.

버지니아 데이터 센터 분포도



출처: Virginia Economic Development Partnership(2025)

글로벌 데이터 센터 용량 분포('24년)



출처: IEA(2025) "Energy and AI"

2024년 7월 10일 저녁, 이 디지털 경제의 심장부에 전례 없는 위기가 발생했다. 뇌우로 인한 송전선 고장으로 계통 전압이 순간적으로 요동치자 60여 개 AI 데이터 센터의 UPS\*가 작동하며 일제히 전력망에서 이탈한 것이다. 불과 몇 초 만에 버지니아 주 가정 약 100만 호 또는 보스턴 시 전체가 사용하는 전력과 맞먹는 규모인 1,500MW의 부하(load)가 증발한 것이다.

\* UPS(Un-interruptible Power Supply, 무정전 전원공급 장치): 정전이나 전압 변동 발생 시 즉시 자체 배터리 전원으로 전환해 설비에 안정적인 전력을 공급하는 장치. 민감한 서버를 보호하기 위해 미세한 전압, 주파수 변동에도 자동으로 전력망에서 분리됨

갑작스러운 수요 감소로 전력 공급이 수요를 크게 초과하면서 계통 주파수가 60.047Hz까지 급등(정상범위: 59.964~60.036Hz)하자, 계통운영자인 PJM과 전력회사인 Dominion Energy는 즉각 커패시터 뱅크\*를 차단하고 발전기 출력을 낮추는 등 긴급 조치를 취해야 했다. 만약 대응이 조금만 늦었다면 연쇄적 블랙아웃으로도 이어질 수 있었던 아찔한 순간이었다. 2025년 1월 발표된 사고 분석 보고서에서 북미전력신뢰도공사(NERC: North American Electric Reliability Corporation)는 “미국의 전력망은 AI 데이터 센터가 보여주는 갑작스러운 대규모 부하 변동성에 견디도록 설계되지 않았다”고 경고했다.

\* 커패시터 뱅크(Capacitor Bank): 여러 개의 축전지(커패시터)를 묶어서 송전망의 낮아진 전압을 끌어올리는 장치. 이미 전력 공급 과잉으로 전압이 과도하게 높아진 상황에서는 오히려 이를 전력망에서 차단해 전압 상승 압력을 제거해야 함

### It's the volatility, stupid!

AI 데이터 센터가 '전력 먹는 하마'라는 것은 이제 널리 알려진 사실이다. ChatGPT에 한 번 질문하면 일반 구글 검색에 비해 10배의 전력을 쓴다는 이야기, 대형 AI 데이터 센터가 소도시 하나만큼의 전력을 사용하는 이야기는 이제 진부하게 느껴질 정도다. 하지만 북부 버지니아에서 벌어진 사건은 다른 차원의 문제를 제기한다. AI 데이터 센터가 전력망에 미치는 진짜 리스크는 단순히 '얼마나 많은' 전력을 소비하느냐가 아니다. 진짜 문제는 '어떻게' 소비하느냐, 즉 전력 사용량의 규모가 아니라 그 소비 패턴, 특히 극심한 변동성에 있다.

제철소나 화학공장과 같은 전통적인 산업부하도 엄청난 에너지를 사용하지만 전력 소비 패턴은 예측 가능하다. 설령 조업 확대로 전력 소비량이 증가하더라도 점진적이다. 게다가 보통 이런 대형 산업시설은 주요 설비의 증설 및 가동에 앞서 전력회사에 미리 통보하도록 규정되어 있어 예측과 관리가 용이하다.

일반 데이터 센터도 전력 소비 패턴이 매우 안정적이다. 웹 서비스, 이메일, 동영상 스트리밍 등 전통적인 클라우드 서비스는 24시간 내내 거의 일정한 수준의 전력을 소비한다. 물론 낮 시간대 사용자가 많아지면 약간 증가하고, 심야에는 약간 감소하는 변동이 있지만 전력 소비량의 변화는 완만하고 규칙적이다.

부하 유형별 전력 소비 특성 비교

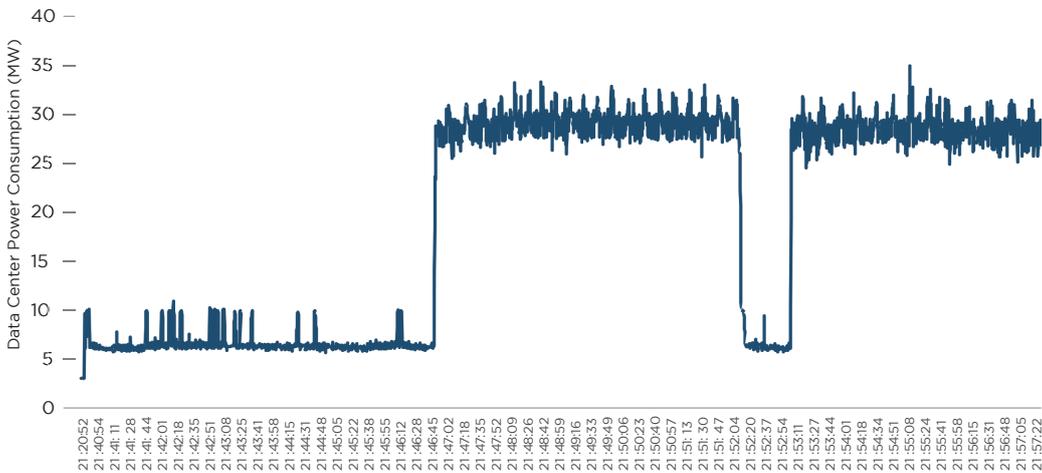
	전통적 산업부하 (제철소, 화학 등)	일반 데이터 센터 (클라우드 등)	AI 데이터 센터 (학습, 추론 연산용)
전력소비량	수십~수백 MW	50~100MW	100~500MW
부하변동 패턴	예측가능, 점진적 (분~시간 단위)	안정적, 거의 일정	극심한 변동성 (초~분 단위)
피크 증가율	평시 대비 1.5~2배	평시 대비 1.2배	평시 대비 5~10배
출력변동 속도	느림 (사전통보 의무)	거의 없음	매우 빠름 (사전통보 없음)
전력 밀도	낮음~중간	중간	매우 높음 (서버랙 1개당 600kW)
전력망 영향	예측, 관리 가능	최소	주파수, 전압 불안정 유발

출처: Xin Chen et al(2025) "Electricity Demand and Grid Impacts of AI Data Centers: Challenges and Prospects"

반면 AI 데이터 센터, 특히 LLM(대규모 언어 모델)이나 이미지 생성 모델 같은 생성형 AI를 학습시키는 데이터 센터는 완전히 다르다. 복잡한 AI 모델 학습 과정을 단순화해 간단히 설명하면, 수만 개, 때로는 수십만 개의 GPU(그래픽 처리 장치)가 동시에 병렬 연산을 수행하는 과정이라고 할 수 있다. 학습이 시작되면 모든 GPU들이 일제히 거의 동시에 최대 출력으로 작동하기 시작한다. 전력 소비가 순간적으로 급등하는 것이다. 그러다 학습이 종료되면 역시 거의 동시에 작동을 멈추며 전력 소비는 그 순간 폭락한다.

아래 그림은 AI 데이터 센터의 전력 소비 패턴을 예시적으로 보여준다. 약 30분(21:20~21:57)이라는 짧은 시간 동안 부하가 무려 5MW에서 30MW로 6배의 변동이 반복적으로 발생한다. 이러한 급등락이 일어나는 과정도 불과 수 초 안에 이뤄진다. 만약 이런 소비 패턴을 가진 AI 데이터 센터 수십 개가 클러스터 형태로 지리적으로 집중된다면, 해당 지역을 담당하는 계통운영자에게 이 보다 더 큰 악몽은 없을 것이다.

AI 데이터 센터 전력 소비 패턴 예시



출처: Elevate Energy Consulting(2025) "Practical Guidance and Considerations for Large Load Interconnections"

문제의 본질은 전력 인프라와 AI 인프라 간의 속도 불일치다. AI는 빛의 속도로 작동한다. 코딩 명령 하나로 가볍게 수만 개의 GPU를 동시에 켜고 끌 수 있으며, 물리적 관성이 전혀 없다. 반면 전력망은 거대하고 무거운 기계 시스템이다. 전력을 생산하는 수백 톤에 달하는 육중한 터빈은 회전 관성으로 인해 빠르게 반응할 수 없다. 대형 석탄 발전이나 원자력 발전은 출력 조절에 적어도 수 시간이 걸리며, 가장 빠른 가스 발전조차 수 분이 소요된다. 단 몇 초 만에 부하를 5~6배로 바꿔버리는 AI 데이터 센터가 지금의 속도로 계속해서 확장된다면, 전력 시스템은 이를 물리적으로 따라가지 못할 가능성이 크다.

**변동성 위에 변동성: 공급과 수요의 이중 리스크**

상황을 더욱 어렵게 만드는 것은 최근 전력 공급 측에서도 변동성이 커졌다는 사실이다. 지난 20년 간 에너지 전환 정책이 추진되면서 태양광과 풍력 같은 재생에너지 발전 비중은 크게 늘어났다. 재생에너지는 탄소 배출이 없다는 장점이 있지만, 본질적으로 '간헐적'(intermittent)이라 변화하는 수요에 맞게 탄력적으로 공급을 조절하기 어렵다는 치명적 단점을 가진다. 태양광은 밤에는 발전하지 못하고, 낮에도 구름이 끼면 출력이 급감한다. 풍력은 바람이 불지 않으면 멈춘다. 더 심각한 것은 이런 변화가 예측하기 어렵다는 점이다. 구름의 움직임이나 바람의 세기를 분 단위로 나 초 단위로 정확히 예측하는 것은 여전히 어렵다.

이와 같이 전력 공급 측에서는 재생에너지 확대에 날씨와 시간대에 따라 덕커브\*가 형성되는 등 전력 생산량을 예측하고 조절하기가 더욱 어려워진 가운데, 수요 측에서도 AI 데이터 센터라는 변덕스러운 새로운 골치덩어리가 추가로 등장하면서, 오늘날 전력망은 그야말로 '변동성 위에 또 다른 변동성'(volatility on top of volatility)이 쌓이는 형국에 놓였다. 매 순간 수요와 공급을 정확히 일치시켜야만 하는 계통운영자는 수요와 공급 양쪽 모두에서 증대된 불확실성과 통제 불가능성, 그리고 극한의 변동성을 동시에 관리해야만 하는 이중 리스크에 직면하게 된 것이다.

\* 덕커브(Duck Curve): 한낮에는 태양광 발전량이 많지만 해질녘 태양광 발전량이 급감함과 동시에 가정용 전력수요는 증가하면서 공급과 수요의 급격한 불일치가 발생하는 현상. 시간대별 전력 수요 그래프가 오리(duck) 모양과 비슷해 붙여진 이름

### 변동성을 길들이는 해법들

이러한 문제를 극복하고자 현재 여러 기술적, 제도적 해법들이 나오고 있다. 가장 대표적인 방법은 AI 데이터 센터의 부하 변동 자체를 제한하는 것이다. 당장 실행할 필요가 없는 AI 학습의 경우 전력 부담이 낮은 시간대로 이동시키는 '워크로드 스케줄링'(workload scheduling)을 의무화하는 방안이 검토 중이다. 더욱 적극적인 방식은 '전력 상한 설정'(power capping)이다. GPU가 소비할 수 있는 최대 전력을 아예 코딩으로 사전 제한하는 것이다. MIT의 최근 연구결과에 따르면 개별 GPU의 최대 전력 사용량을 60~80%로 제한했을 때, 전체 전력 소비가 12~15%가 감소하는 반면 훈련 완료 시간은 약 3% 증가하는 정도에 그친 것으로 나타났다. 속도를 약간만 희생하면 전력망에 주는 부담을 줄일 수 있다는 의미다.

대용량 온사이트 배터리 에너지 저장시스템(BESS: Battery Energy Storage System)도 유력한 대안으로 떠오르고 있다. BESS를 AI 데이터 센터 내부에 설치하면, GPU의 전력 부하가 급증할 때 배터리가 즉시 방전되면서 즉각적인 수요를 충족시키면서 전력망에서는 훨씬 점진적인 방식으로 전력을 끌어온다. 반대로 부하가 급감하면 배터리가 충전되면서 잉여 전력을 흡수한다. BESS가 데이터 센터와 전력망 사이에서 일종의 충격 흡수장치 역할을 하면서 AI 데이터 센터가 전력망에 미칠 교란 효과를 최소화하는 것이다. 최근에는 배터리 대신 슈퍼커패시터(super capacitor)도 주목을 받고 있다. 배터리는 에너지 밀도는 높지만 충방전 속도가 느리다(보통 초~분 단위). 반면 슈퍼커패시터는 초 단위로 변동하는 AI 데이터 센터의 부하 패턴에 맞춰 기동이 가능하다.

AI 데이터 센터를 공공 전력망과 격리시켜 전력망에 미칠 부정적 충격을 아예 없애려는 시도도 나오고 있다. 데이터 센터 바로 인근에 발전소를 건설하고 직접 연결해 전력을 자체 생산하고 자체 소비하는 이른바 '코로케이션'(co-location) 전략이다. 예를 들어 Google은 Intersect Power와 파트너십을 맺고 자사 데이터 센터 옆에 태양광, 풍력, 배터리 저장 시설을 함께 건설하는 프로젝트를 추진 중이다. 이는 AI 데이터 센터가 필요로 하는 전력 특성(용량, 신뢰성, 변동성 대응)에 부합한 발전 시스템을 맞춤형으로 설계할 수 있다는 장점이 있다. 더 대담한 사례도 있다. 최근 주식 시장에 상장된 Fermi America는 텍사스 아마릴로에 11GW의 초대규모의 데이터 센터와 원자력 발전을 하나의 패키지로 개발하는 융복합 비즈니스 모델을 내세우며 시장의 뜨거운 관심을 받고 있다.

### 한국 전력망의 혁신 과제: AI 발전의 제약 조건에서 가능 조건으로

우리나라도 AI 3대 강국을 지향하며 AI 데이터 센터 건설이 중요한 정책 의제로 떠올랐다. 하지만 여전히 전력원(원자력 vs 재생에너지) 논쟁에 치중되어 AI 데이터 센터의 대규모 확산에 대응하기 위한 전력망 혁신 방안에 대해서는 아직 논의가 충분히 이뤄지지 못하고 있다.

지금까지 한국은 한전 중심의 전력 시스템 거버넌스로 비교적 안정적으로 전력망을 관리해왔다. 하지만 공기업 중심 구조는 AI 시대가 요구하는 신속한 혁신과 유연한 대응을 어렵게 만드는 장애요인이 될 수 있다. 특히, 한국의 규제체제 하에서는 데이터 센터 운영, 발전 사업, 송배전 사업, 전력판매 사업의 영역이 엄격히 구분되어 있다. 하지만 AI 데이터 센터의 대규모 확산을 제대로 수용하기 위해서는 융복합 비즈니스 모델의 활성화가 절실하다.

데이터 센터 사업자가 자체 발전소나 BESS를 운영하고 동시에 전력 도매시장이나 소매시장에 전기를 거래할 수 있는 비즈니스 모델이 규제 샌드박스 등과 같은 제도적 틀 속에서 허용될 필요가 있다. 또한 정부 당국과 한전, 데이터 센터 및 AI 업계, 전력 업계, 그리고 지자체와 시민사회계가 참여하는 보다 폭넓은 이해관계자 협의체를 구성할 필요가 있다. 이를 통해 AI 데이터 센터의 입지에서부터 전력망 영향 평가, 새로운 요금 구조 설계, 지역사회 수용성 확보, 비용과 수익 분담 구조 등을 종합적으로 논의할 수 있는 거버넌스를 구축해야 한다. 전력 기자재 분야에 경쟁력을 가진 우리 기업들도 BESS와 데이터 센터 운영 최적화 솔루션 분야에서 새로운 기회를 모색할 수 있다.

20세기에 형성된 전력망은 이제 21세기 AI 디지털 시대를 뒷받침할 인프라로 새롭게 거듭날 준비를 해야 한다. 전력망을 얼마나 잘 재설계하느냐가 AI 시대로의 전환을 결정하는 병목이 될 수 있다. 전력망이 AI 발전의 제약 조건이 아닌 가능 조건이 될 수 있도록 지혜를 모아야 할 때다. **FKI**