

KEMRI 전력경제 REVIEW



Vol.313

이전 Review 보기

2025년 3월호

▶ Issue Paper

- 부하모델링 기법의 종류 및 해외 최신 동향

▶ Research Activities

- 2024년 글로벌 에너지 분야 벤처 투자 및 기술 동향
- 미국의 전력수요 증가와 전력산업 당면 과제

【 Highlight 】

1. 부하모델 개요

■ 전력계통을 높은 정확도로 해석하기 위해서는 정교한 부하모델 필요

- (부하모델 개요) 계통을 구성하는 요소 중 부하에 대한 수학적 모델을 지칭하며, 계통 전압(V), 주파수(f) 변화에 따른 부하의 유효전력(P), 무효전력(Q) 변화를 함수로 표현
- (부하모델 현안) 디지털 부하, 인버터 기반의 분산전원 등 기존과 다른 부하가 등장하여 부하의 응답 특성이 복잡해졌으나, 과거 모델은 이를 반영하지 못함

2. 부하모델링 절차 및 방법론

■ (기초조사) 부하모델 선정, 계수 산정 등에 필요한 계통 및 부하 데이터 등을 수집

- (Bottom-Up 방식) 전기사용신청서 등 문헌자료 조사, 현장방문, 설문조사 등을 통해 실제 부하의 구성을 직접 파악하는 방식
- (Top-Down 방식) 계통의 전압, 주파수 변화에 따른 부하의 유효전력, 무효전력 변화 등을 측정하여 부하의 수학적 모델을 추정(회귀 유추)

■ (부하모델 선정) 계통해석 목적에 맞게 부하의 응답특성을 정확하고 효과적으로 표현하는 수학적 모델을 선정

- (ZIP) 일반적으로 정저항(Z), 정전류(I), 정전력(P) 부하의 수치적 조합으로 구현, 계통전압에 따른 부하의 응답특성이 다양한 집합 부하를 표현할 때 적합한 부하 모델로 여러 종류의 부하를 표현하는 것이 가능하여 활용 빈도가 높음
※ 그 외 지수함수, CLM 등 다양한 모델 존재(본문 참조)

■ (계수 산정) 선정된 부하모델의 계통 해석의 정확도 향상을 위해 계수 최적화 및 유효성 평가

- 실제 부하의 응답특성을 정확하게 모의하기 위해 실측값과 모의값을 비교분석, 최적화

3. 부하모델 관련 해외 동향 및 결론

■ 주요 현안

- 데이터센터, 재생에너지 등 비선형적 특성을 가진 전력 자원이 급증하면서 ZIP 모델 등 전통적인 부하모델의 한계 노출

■ 해외 동향

- 주요국들은 한층 정교한 전력 계통의 안정도 분석을 수행하기 위해 AI와 머신러닝을 활용해 동적이고 비선형적인 부하모델을 개발하고 있음
- 디지털 신기술을 통해 부하 모델링의 정확성과 유연성을 높이고, 경향성이 부족하고 예측이 쉽지 않은 새로운 부하의 해석 역량을 향상

■ 결 론

- 국내 계통 환경변화를 반영한 새로운 부하모델 개발 및 방법론 연구 필요

【 목 차 】



Issue Paper

■ 부하모델링 기법의 종류 및 해외 최신 동향

- 허 훈 차장, 윤용호 선임연구원

I . 부하모델 개요	1
II . 부하모델링 절차 및 방법론	3
III . 부하모델 관련 해외 동향	9
IV . 결 론	15



Research Activities

I . 2024년 글로벌 에너지 분야 벤처 투자 및 기술 동향	17
II . 미국의 전력수요 증가와 전력산업 당면 과제	21

Research Issue : 부하모델링 기법의 종류 및 해외 최신 동향

I. 부하모델 개요

1. 부하모델 현안

■ 전력계통을 높은 정확도로 해석하기 위해서는 정교한 부하모델 필요

- 전력계통의 전압, 주파수가 변하면 부하의 유효전력(P), 무효전력(Q)이 변하고 이는 다시 계통의 전압, 주파수에 영향을 미침 (부하의 응답특성)
- 상용 시뮬레이션 Tool*을 사용해 계통을 정확하게 해석하려면 계통 변화에 따른 부하의 응답특성을 정교하게 반영한 부하모델 개발 필요

* PC 기반의 계통 모의 소프트웨어인 PSS/E, DigSilent 등이 대표적임

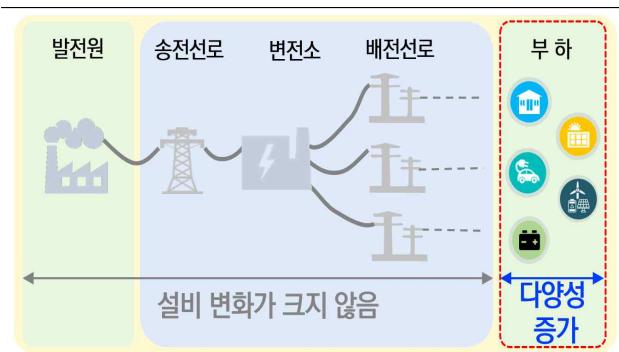
■ 국내에서 현재 사용중인 부하모델은 디지털 부하, 분산전원 확대 등 전력산업 환경 변화를 반영하지 않아 정확한 계통해석에 한계 노출

- 국내는 아직까지 2011년에 개발한 부하모델을 전력계통 해석에 사용 중
- 디지털 부하, 인버터 기반의 분산전원 등 기존과 다른 부하가 등장하여 부하의 응답 특성이 복잡해졌으나, 과거 모델은 이를 반영하지 못함

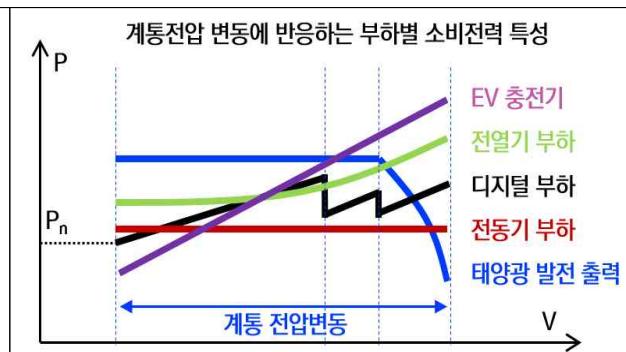
■ 해외 주요국에서 활용 중인 부하모델 및 방법론 등에 대한 벤치마킹 필요

- 디지털 부하, 분산전원 등 기존과는 다른 부하의 응답 특성을 반영해 안정적으로 계통을 해석하기 위해 해외에서 활용 중인 부하모델의 종류 및 특성 검토
- 효율적인 부하모델링 방법론, 관련 연구 동향 및 신기술 접목 사례 등을 조사하여 국내의 부하모델 개발에 참고

| 전력산업 환경변화 |



| 부하의 응답특성 |



2. 부하모델 개요

- (개념) 계통을 구성하는 요소 중 부하에 대한 수학적 모델을 지칭하며, 계통의 전압(V), 주파수(f) 변화에 따른 부하의 유효전력(P), 무효전력(Q) 변화를 함수로 표현

※ 주파수 영향은 미미하여, 전압만 고려하는 것이 일반적임

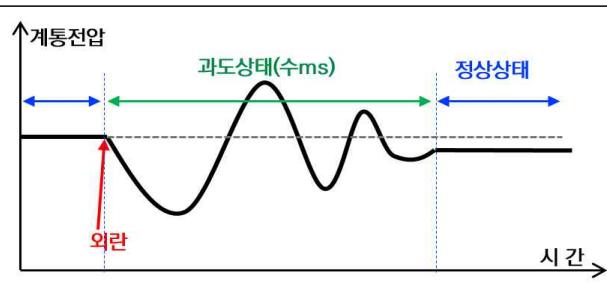
■ 예시 ■

* (예시) 일반적인 부하모델 : $P = P_1V^2 + P_2V + P_3$, $Q = Q_1V^2 + Q_2V + Q_3$
(P : 유효전력, Q : 무효전력, V : 전압, $P_1, P_2, P_3, Q_1, Q_2, Q_3$: 계수)

- (종류) 정상상태 해석에 적합한 정적 모델과 과도상태 해석에 적합한 동적 모델, 둘을 조합한 복합 모델로 구분 가능

- 정적 모델 : 시간과 관계없이 전압·주파수 등이 안정한 정상상태 해석에 적합한 부하 모델로, 부하의 유·무효전력을 계통 전압의 함수로 표현
- 동적 모델 : 발전기 탈락 등 계통 외란으로 시간에 따라 계통의 전압, 주파수 등이 요동치는 과도상태 해석에 적합한 부하모델로, 부하의 유·무효 전력을 계통 전압과 시간에 대한 함수로 표현
- 복합 모델 : 정적·동적 모델 조합으로 복잡한 부하 구성을 반영한 모델

■ 계통의 정상상태 및 과도상태 ■



- (외란) 계통고장, 급격한 부하상태 변화 등 정상상태의 계통에 가해지는 전기적 충격
- (과도상태) 급격한 전압의 변화 후 새로운 균형상태에 도달하기까지의 불안정한 상태
- (정상상태) 고장제거, 수급균형 등 안정화 상태

- (이슈) 에너지저장시스템(ESS), 마이크로그리드(MG) 등 기존과 다른 응답특성을 지닌 부하에 대한 모델링

- 다양성 : 과거에는 부하만 연계되었던 배전단에 소규모 태양광, 총·방전하는 ESS 등 발전 특성을 보유한 자원이 대거 등장
- 복잡성 : 반도체 기반의 디지털 부하, 인버터 설비 등 응답 특성이 비선형적인 부하가 증가하여 기존 부하모델의 정확도가 한계에 도달

II. 부하모델링 절차 및 방법론

※ 부하모델링은 ① 기초 조사, ② 부하모델 선정, ③ 계수 산정 순으로 진행

① 기초 조사

- 모델 선정 및 계수 산정에 필요한 계통 및 부하 데이터를 수집하는 단계로, Bottom-Up 방식과 Top-Down 방식으로 구분



② 모델 선정

- 계통·부하 데이터를 활용하여 전압·주파수 등 계통변화에 대한 부하의 응답특성을 나타내는 부하모델(1차함수, 지수함수 등) 선정



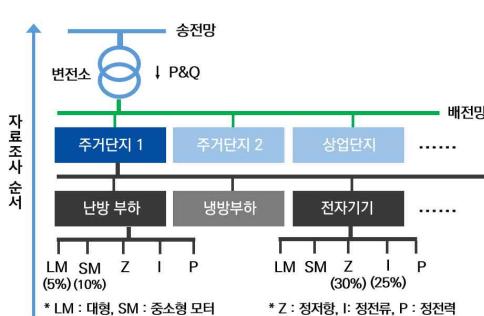
③ 계수 산정

- 부하모델이 선정되면 세부계수를 산정하고 유효성 평가를 시행
(예시) 부하모델 : $P = P_1V^2 + P_2V + P_3$, P : 전력, V : 전압, P_1, P_2, P_3 : 계수

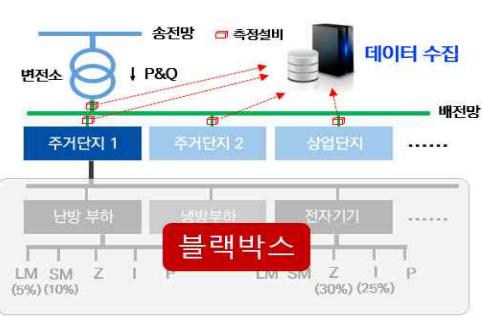
1. 기초 조사

- 부하모델 선정, 계수 산정 등에 필요한 계통 및 부하 데이터 등을 수집

| Bottom-Up |



| Top-Down |



※ 설문조사, 현장방문, 전기사용신청서 등 실제 부하 구성내역을 조사하여 모델링

※ 전압, 주파수 등 계통 변화에 따른 부하의 유·무효전력 변화량 분석, 회귀 유추

- (Bottom-Up 방식) 전기사용신청서 등 문현자료 조사, 현장방문, 설문조사 등을 통해 실제 부하의 구성을 직접 파악하는 방식

| 주요 특징 |

구 분	내 용
개 요	부하에 대한 직접조사 등을 통해 부하의 구성요소를 구분하고 부하별 구성 비중 등을 파악
특 징	동작 특성이 복잡하지 않은 부하 비중이 높은 주거용 단지의 부하모델 개발에 주로 활용되며, 디지털 부하 등 응답특성이 복잡한 부하의 모델링에는 적합하지 않음
장단점	<p>(장점) 부하에 대한 직접 조사를 통해 실제 부하 구성을 정확히 진단하고 정확도 높은 부하모델을 구현 가능</p> <p>(단점) 직접 조사에 높은 비용과 장시간이 소요되며, 부하의 구성 및 비중 변화 등을 실시간으로 파악하여 반영하기가 어려움</p>

- (Top-Down 방식) 계통의 전압, 주파수 변화에 따른 부하의 유효전력, 무효전력 변화 등을 측정하는 방식

| 주요 특징 |

구 분	내 용
개 요	DFR(Digital Fault Recorder, 고장기록계), PQM(Power Quality Meter, 전력품질 측정기) 등과 같은 측정 장비를 사용하여 모선, 부하 연결점의 전압, 주파수, 소비전력 등을 측정*
특 징	부하 구성의 다양성, 복잡성 등에 관계없이 부하의 집합적인 특성**만을 고려하여 부하모델 선정 및 계수 산정 가능
장단점	(장점) 모든 부하에 적용 가능하고, 실제 부하 구성을 알 필요가 없어 Bottom-Up 방식보다 간편하며, 충분한 데이터를 수집할 수 있다면 높은 정확도의 부하모델 개발 가능 (단점) 계통고장 데이터가 부족하여 부하의 동적특성 분석에 필요한 데이터를 충분히 확보하기 어려움

* 측정된 데이터에 가장 근접한 부하모델을 선정하고 계수는 회귀 유추하여 산정

** 전압, 주파수 등 계통 변화에 따른 전체 부하의 유효전력, 무효전력 변화 특성

2. 부하모델 선정

- 계통해석 목적에 맞게 부하의 응답특성을 정확하고 효과적으로 표현하는 수학적 모델을 선정

※ 모델이 복잡해질수록 모의 정확도는 증가하나 속도는 느려짐

- 정상상태 해석에 적합한 정적 모델과 과도상태 해석에 적합한 동적 모델, 둘을 조합하여 다양한 부하 구성을 표현하는 복합 모델이 있음
- 비선형적이고 복잡한 응답특성을 보여 기존 모델의 조합으로 표현하기 어려운 신규 부하(태양광, ESS, MG 등)가 증가함에 따라 머신러닝을 활용하여 복잡한 패턴을 추출해 모델링하는 기법(머신러닝 모델)이 증가하는 추세임

정적 모델

- (개념) 시간에 관계없이 계통 전압, 주파수 등이 안정한 정상 상태의 계통해석에 적합한 부하 모델로, 부하의 유·무효전력을 계통전압 등의 함수 형태로 표현

유효전력 (P)	무효전력 (Q)	비 고
$P = F_p(V)$	$Q = F_Q(V)$	F : 함수, V : 전압

■ (종류) 지수함수 모델(정전력, 정전류, 정저항 등)과 ZIP 모델, 포괄적 모델로 구분

① (지수함수 모델) 계통전압의 승수 형태의 함수로 부하의 유·무효전력을 표현하는 정적 모델 중 가장 단순한 형태의 부하모델로 정전력, 정전류, 정저항 모델이 대표적

- (정전력 모델) 계통전압 변동과는 무관하게 항상 일정한 전력을 소비하는 부하(컴퓨터, TV, 에어컨 등)를 표현하는 모델로 지수함수 모델에서 전압의 승수가 0인 형태로 표현

- (정전류 모델) 계통전압 변동에 관계없이 일정한 전류를 소비하는 부하(LED, 전기차 충전기 등)를 표현하는 모델로, 지수함수 모델에서 전압의 승수가 1인 형태로 표현*

* $P(\text{전력}) = V(\text{전압}) \times I(\text{전류})$ 이므로 전류가 일정하면 전압에 비례하여 전력을 소비

- (정저항 모델) 저항이 일정한 부하를 표현하는 모델로 전열기, 전기난로, 백열등 등이 이에 해당되며, 지수함수 모델에서 전압의 승수가 2인 형태로 표현됨*

* $P(\text{전력}) = V^2(\text{전압}) \div R(\text{저항})$ 이므로 저항이 일정하면 전압²에 비례하여 전력을 소비

유효전력 (P)	무효전력 (Q)	비 고
$P = a \cdot V^n$	$Q = b \cdot V^n$	<ul style="list-style-type: none"> · P, Q : 부하의 유효전력, 무효전력 · V : 계통 전압 · a, b : 계수

② (ZIP 모델) 정전력, 정전류, 정저항 부하의 조합으로 구성하는 부하모델

- 계통전압에 따른 부하의 응답특성이 다양한 집합 부하를 표현할 때 적합한 부하모델로, 여러 종류의 부하를 표현하는 것이 가능하여 활용 빈도가 높음

- 각각의 계수는 전체 부하에서 정전력 부하, 정전류 부하, 정저항 부하가 차지하는 비율을 의미 ($p_1 + p_2 + p_3 = 1$, $q_1 + q_2 + q_3 = 1$)

P (유효전력)	Q (무효전력)
$P = P_0 \left(p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right)$	$Q = Q_0 \left(q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right)$

③ (포괄적 모델) ZIP 모델(다항식 함수)과 2개 지수함수의 조합으로 구성하는 모델로, 반도체 제조설비 등 전력품질에 민감하여 일정 전압의 범위를 벗어나는 경우 자동 차단되는 대형 전력부하의 응답 특성을 나타내는데 유리*

* 전압이 기준 이하로 떨어지는 경우 지수함수의 계수를 0으로 변경하는 방식으로 모델링

P (유효전력) ※ 무효전력도 동일 구조	비 고
$P = P_n \left[P_{ZIP} + P_{EX_1} + P_{EX_2} \right]$	<ul style="list-style-type: none"> · 계통전압이 기준 이하로 떨어지면 지수항의 계수를 '0'으로 변경

동적 모델

- (개념) 발전기 탈락 등 계통 외란으로 시간에 따라 계통의 전압, 주파수 등이 요동치는 과정 상태 해석에 적합한 모델로, 부하의 유·무효전력을 계통의 전압과 주파수, 시간에 대한 함수로 표현하여, 동적특성을 보유한 부하(유도전동기 등)를 표현

유효전력(P)	무효전력(Q)	비 고
$P = F_p(U(t), f(t))$	$Q = F_Q(U(t), f(t))$	F : 함수, U : 전압, t : 시간

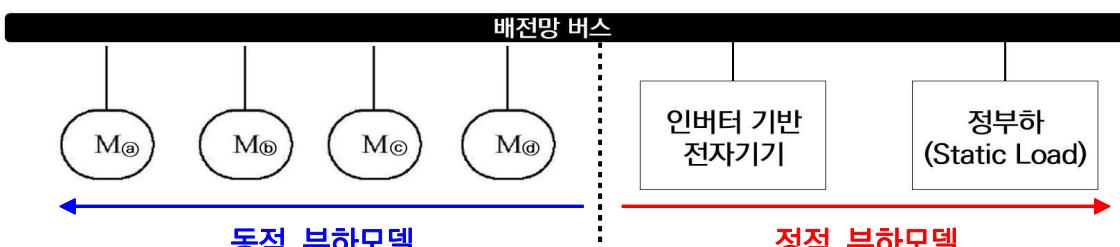
- (종류) 유도전동기(IM; Induction Motor)는 응답 특성이 비선형적이고 변수들이 상호 간섭하여, 정적 모델로는 해당 부하의 동적 특성을 나타내기 어려워 유도전동기는 별도의 동적 모델을 적용하여 계통 해석
 - (유도전동기 모델) 유도전동기의 동적 특성을 표현하기 위해 시간에 따른 전압, 전류의 변화뿐만 아니라 회전속도, 토크 등의 기계적 변화까지 고려하여 부하를 모델링
 - 유도전동기의 부하 비중이 높은 산업단지를 모델링할 때 주로 활용됨

복합 모델

- (개념) 정적 모델(조명, 전자기기 등)과 동적 모델(유도전동기)을 조합하여 다양한 응답특성을 지닌 부하를 보다 정확하게 표현 가능한 모델
- (종류) CLM(Composite Load Model), CLOD(Complex Load Model)로 구분

- (CLM) 유도전동기의 종류가 다양하고 비중이 높은 산업단지를 정밀하게 표현하여 동적 특성을 정확하게 해석하기 위해 개발한 모델
 - 유도전동기는 압축기, 대형 송풍기, 소형 펌프, 공조시스템 등 4가지 유형으로 구분하여, 부하의 동적 응답특성을 보다 정밀하게 해석 가능

■ CLM의 부하 구성도 ■



* (M_(A)) 압축기, 펌프 (M_(B)) 대형 송풍기 (M_(C)) 소형 펌프 (M_(D)) 공조 시스템

- 다양한 종류의 부하를 단일 모델에 반영할 수 있어 높은 정확도로 계통 해석이 가능하나,

필수로 입력해야 하는 계수의 종류가 많고, 모델이 복잡하여 계통 모의 시간이 오래 걸리는 것이 단점

② (CLOD) CLM 모델을 간소화하여 입력해야 하는 계수를 줄이고 계통 모의 속도를 대폭 개선한 모델(모델 간소화로 해석의 정밀도는 감소)

- 유도전동기를 2가지 유형(대형과 소형)으로 구분하고 사용 빈도가 높은 모형으로 계수를 미리 반영(사용자는 유도전동기 비율만 설정)
- CLM의 인버터 기반 전자기기, 정부하에서 정전력 부하로 표현이 가능한 설비는 상수로 처리하여 부하모델을 간소화

기타

- (개념) 동작 특성이 불규칙하고 복잡한 소규모 태양광, 풍력 등 분산전원과 ESS, MG와 같이 전력계통에 새롭게 연계되는 전력자원을 반영한 부하모델
- (종류) 디지털 기반의 다양한 부하모델 연구 中, 대표적으로 머신러닝 모델이 있음
 - 설비의 운영 데이터를 머신러닝을 통해 학습시켜 복잡한 비선형 특성을 나타내는 응답특성을 구현

■ (종합) 부하모델의 종류 ■

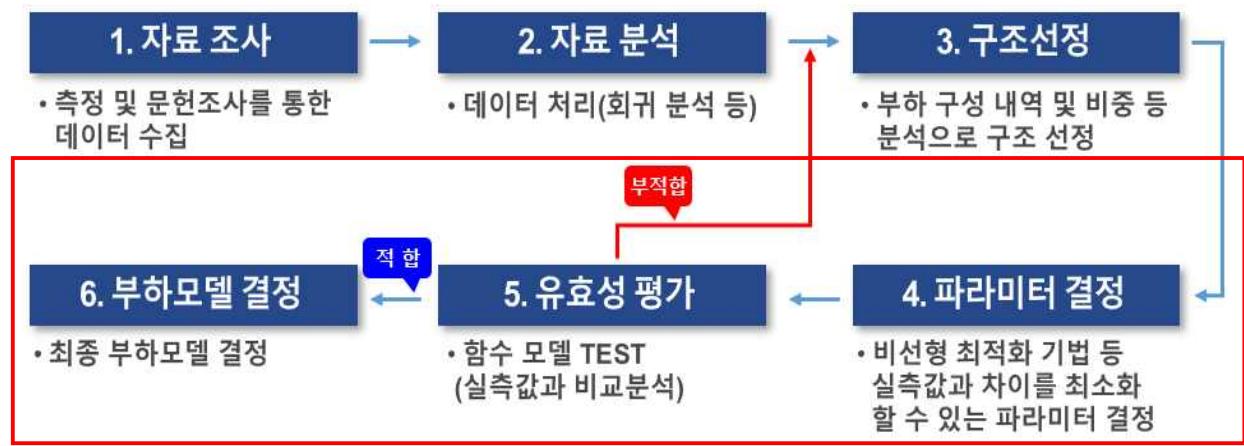
구 분	내 용		비고
정적 모델	지수 함수	<ul style="list-style-type: none"> · 계통전압의 승수 형태 함수로 부하의 유·무효전력을 표현 (예) $P = a \cdot V^n$, $Q = b \cdot V^n$ (P: 유효전력, Q: 무효전력, V: 전압) 	부 하 모 델 의 복 잡 도 증 가
	정전력	<ul style="list-style-type: none"> · 계통전압 변동과는 무관하게 일정한 전력을 소비하는 부하를 표현 (예) $P = a$, $Q = b$ (지수함수에서 n이 0인 경우) 	
	정전류	<ul style="list-style-type: none"> · 계통전압 변동에 관계없이 일정한 전류를 소비하는 부하를 표현* * $P(\text{전력}) = V(\text{전압}) \times I(\text{전류})$ 이므로 전류가 일정하면 전압에 비례하여 전력을 소비 (예) $P = a \cdot V$, $Q = b \cdot V$ (지수함수에서 n이 1인 경우) 	
	정저항	<ul style="list-style-type: none"> · 계통전압 변동에 관계없이 저항이 일정한 부하를 표현* * $P(\text{전력}) = V^2(\text{전압}) \div R(\text{저항})$ 이므로 저항이 일정하면 전압에 비례하여 전력을 소비 (예) $P = a \cdot V^2$, $Q = b \cdot V^2$ (지수함수에서 n이 2인 경우) 	
	ZIP	<ul style="list-style-type: none"> · 정전력, 정전류, 정저항의 조합으로 구성한 부하 모델 	
동적 모델	IM	<ul style="list-style-type: none"> · 유도 전동기의 비선형적 응답 특성을 모델링한 부하 모델 	
복합 모델	CLM	<ul style="list-style-type: none"> · ZIP 모델(정적)과 IM 모델(동적)의 조합으로 구성한 부하 모델 	
	CLOD	<ul style="list-style-type: none"> · CLM 모델을 간소화하여 모의속도를 개선한 부하 모델 	
기타	머신 러닝	<ul style="list-style-type: none"> · ESS, MG의 비선형적 응답특성을 머신러닝을 활용해 모델링 	

3. 계수 산정

■ 계통 해석의 정확도 향상을 위해 부하모델의 계수 최적화 필요

- 선정된 부하모델을 활용해서 실제 부하의 응답특성을 정확하게 모의하기 위해 실측값과 모의값을 비교분석(유효성 평가)하여 계수를 최적화

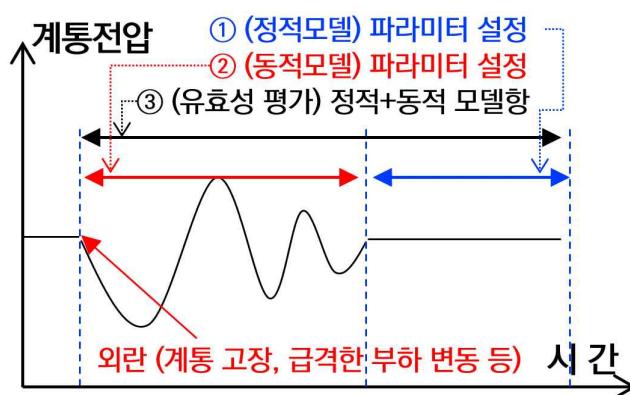
| 부하모델링 절차 - 계수 산정 |



- 부하모델의 정적 모델(ZIP 등) 항과 동적 모델(IM 등) 항의 계수가 결정되면 두 항을 조합한 부하모델에 대한 유효성 평가 시행

- 일반적으로 부하모델의 실측 값과 계산 값에 대한 교차검증 형식으로 이뤄지며, 주로 정적 모델, 동적 모델의 상호간섭으로 인해 발생 가능한 오차를 최소화하는 목적으로 수행

| 계수 설정 단계별 대상 구간 |



- ① 계통의 상태변화(장시간)에 따른 부하의 반응 특성(정적모델)
- ② 짧은 시간의 계통 상태 변화에 대한 부하의 동작 특성(동적모델)
- ③ 부하모델의 종합적인 반응 특성을 실측값과 비교 분석

- 실제 측정된 데이터(정특성&동특성)와 부하모델을 통한 계산값의 오차가 최소화되는 계수를 부하모델에 반영

III. 부하모델 관련 해외 동향

1. 주요 현안

- 데이터센터, 재생에너지 등 비선형적 특성을 가진 전력 자원이 급증하면서 ZIP 모델 등 전통적인 부하모델의 한계 노출
 - (정적 특성 반영의 한계) 데이터센터의 전력 수요는 워크로드(서버 부하)에 따라 급격히 변동되나, 태양광 발전은 날씨 조건에 따라 출력이 불규칙하게 바뀌므로 ZIP 모델로는 이러한 실시간 변화를 모델링하기 어려움
 - (비선형적 동작 특성 미반영) 데이터센터의 전력전자장치(예: 인버터, 정류기)나 재생 에너지원의 출력은 전압과 전류 간 관계가 비선형적이며, 고조파(harmonics)와 같은 추가적인 왜곡을 유발
 - (복잡한 상호작용 무시) ZIP 모델은 개별 부하의 특성만 고려하므로 부하와 부하, 혹은 부하와 발전 자원 간의 상호작용 반영이 어려우나, 현대 전력계통은 데이터 센터, 전기차, 재생에너지 등 다양한 자원이 상호 연결되어 복잡한 동적 관계를 형성
 - (데이터 의존성과 실시간 분석의 부재) ZIP 모델은 사전에 정의된 계수에 의존하며, 실시간 데이터나 계측값을 활용해 모델을 업데이트하는 메커니즘이 없는 반면에, 데이터센터나 재생에너지 부하는 실시간 모니터링 데이터(PMU(Phasor Measurement Unit), 스마트 미터 등)를 기반으로 한 동적 모델링이 필요

| 소 결 |

- 기존 ZIP 모델은 간단하고 직관적이지만, 데이터 센터나 태양광 같은 새로운 부하의 복잡한 동작 특성을 반영하기에는 한계가 있음
- 주요국들은 한층 정교한 전력 계통의 안정도 분석을 수행하기 위해 AI와 머신러닝을 활용해 동적이고 비선형적인 부하모델을 개발하고 있음
- 디지털 신기술을 통해 부하모델링의 정확성과 유연성을 높이고, 경향성이 부족하고 예측이 쉽지 않은 새로운 부하의 해석 역량을 향상

2. 부하모델 활용 동향

- 글로벌 전력 유틸리티, 계통운영자를 대상으로 부하모델에 대한 광범위한 조사를 실시(조사기관 : CIGRE)
 - 유럽, 아메리카, 아시아, 아프리카, 오세아니아 등 5개 대륙의 190개 전력 유틸리티, 계통 운영자를 대상으로 조사를 실시했으며, 97개 기관에서 응답
 - 정적, 동적 계통해석에 활용하는 부하모델의 종류, 부하모델과 계수 산출을 위한 접근법 등을 조사

부하모델 종류

■ 정상상태의 계통해석에는 정적 부하모델 중 정전력 모델을 주로 활용

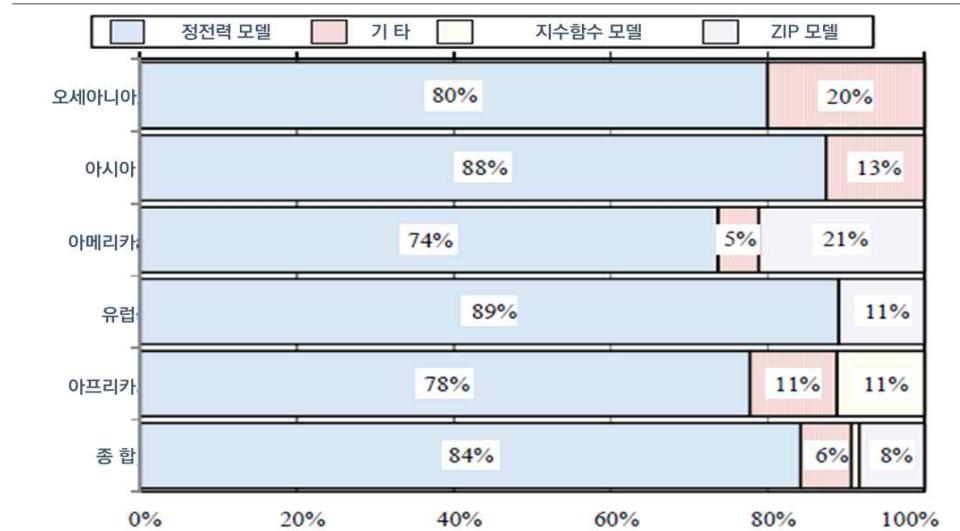
- 정상상태에서 배전계통은 변압기 텁조정, 전압조정기의 조작 등으로 모선의 전압이 정규 전압(1 p.u)에 근접한 것이 일반적이며,
- 이 경우 부하의 유효전력 및 무효전력이 일정 \Rightarrow 유틸리티 및 계통 운영자가 정전력 모델을 활용하는 사례가 84%로 압도적으로 높음

| 정상상태 계통해석에 활용되는 부하모델 비중 |

정전력	ZIP	정전류	정저항	지수함수
84%	8%	3%	3%	2%

- 그 외 부하 구성에 따라 정전류, 정저항 모델도 일부 활용되며 부하 구성이 복합적인 경우 정전류·정저항·정전력을 조합한 ZIP 모델을 활용

| 지역별 정상상태 계통해석에 활용되는 부하모델 비중 |



■ 과도상태 해석에는 다양한 모델이 활용되며, 지배적인 부하모델은 없음

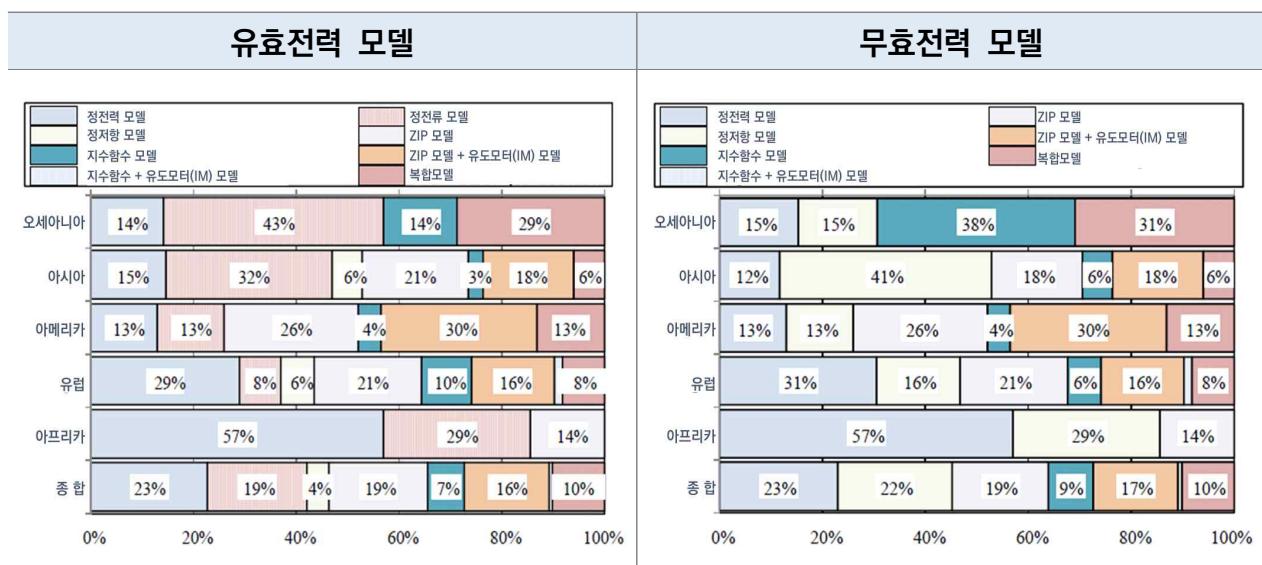
- 과도안정도, 전압안정도와 같은 과도상태 해석에 활용하는 부하모델은 유ти리티, 계통 운영자별로 상이하며, 유·무효전력에서도 차이가 존재
 - 유효전력 모델에서 정전력 모델과 정전류 모델이 약 42%를 점유하고 있으며, 무효 전력 모델의 경우 정전력 모델과 정저항 모델이 약 45%를 점유함

| 과도상태 계통해석에 활용되는 부하모델 비중 |

구 분	정적모델					동적모델	
	정전력	정전류	정저항	ZIP	지수함수	ZIP+IM	복합모델
유효전력	23%	19%	4%	19%	7%	16%	10%
무효전력	23%	0%	22%	19%	9%	17%	10%

- 과거에는 동적 특성을 가진 부하 비중이 낮고, 정확한 모델링과 반영의 한계로 인해 과도상태 해석에도 정적 모델을 사용하는 사례가 대부분이었으나, 새로운 부하의 증가로 과도상태 해석에는 동적 모델을 사용하는 사례(26~27%)가 점점 증가하는 추세임
 - 아메리카, 유럽, 오세아니아, 아시아를 중심으로 유도전동기를 포함한 모델, Composite 모델 등 동적 부하모델의 사용이 증가하고 있음

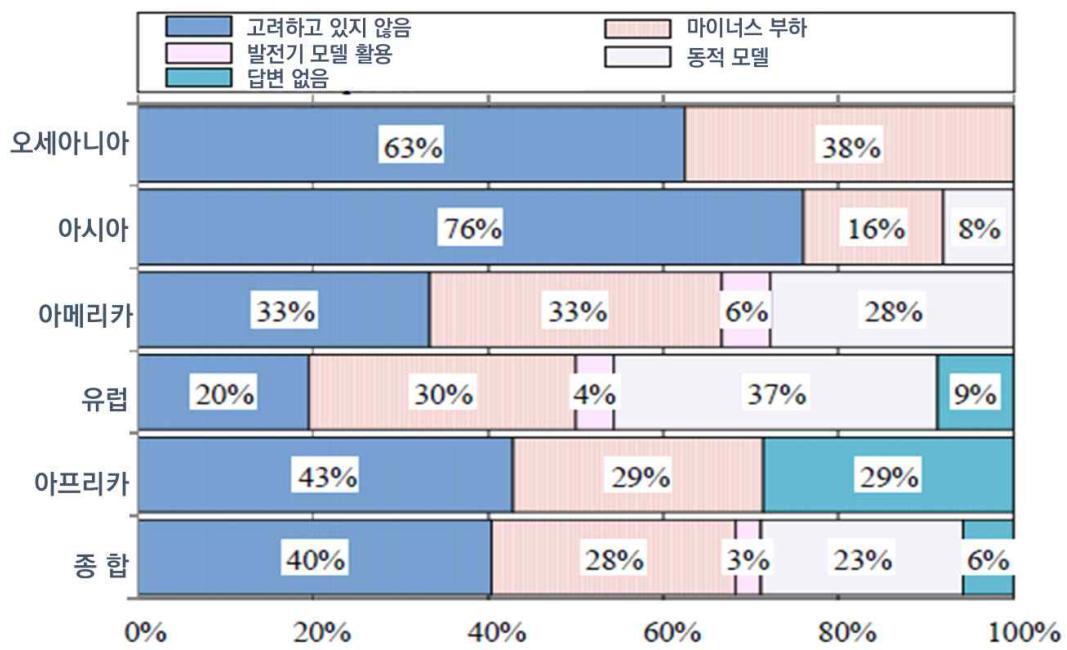
| 지역별 과도상태 계통해석에 활용되는 부하모델 비중 |



■ 분산전원의 응답특성을 계통해석에 반영하기 위해 동적 모델의 활용이 확대되는 추세

- 계통에서 분산전원의 비중이 아직 낮은 국가에서는 이를 무시하거나 마이너스 부하 등으로 처리
 - 계통운영자, 유ти리티의 약 40%는 대규모 계통 해석 시에 아직 분산전원에 대해 고려하지 않고 있으며, 약 28%는 단순 마이너스 부하로 모델링함
- 일부 계통운영자, 유티리티는 배전계통 내에 분산전원의 비중이 높은 경우 분산전원 모델을 기존의 부하모델과는 다르게 독립적인 요소로 모델링함
 - 각각의 분산전원을 발전기로 모델링하는 것은 모델의 복잡성, 모의 시간 등을 고려할 때 적지 않은 비용과 자원투입이 필요
 - 그러므로 소규모 분산전원을 집적하여 등가화한 발전기 모델로 표현하거나, 전체 부하 모델에 통합함으로써 효율성을 높일 수 있음
- 아메리카, 유럽 등을 중심으로 분산전원에 대한 동적 모델 적용을 고려하고 있음

■ 국가별 소규모 분산전원에 대한 모델링 방법론 ■



모델링 방법

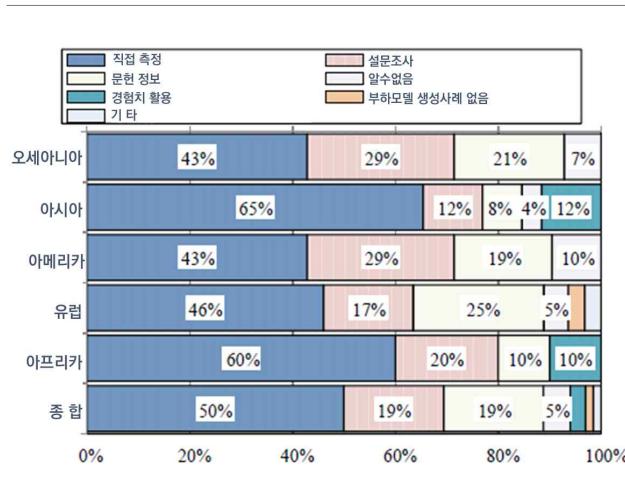
■ 부하모델 선정과 계수 산정에 필요한 계통 및 부하 데이터 수집 방법론으로 Top-Down 방식을 활용하는 사례 증가

- 과거에는 계통 모니터링 시스템을 통해 확보 가능한 데이터의 양이 충분하지 않고 질이 낮아 부하 구성을 직접 조사하여 모델링하는 Bottom-Up 방식이 일반적이었음
- 계통 모니터링 시스템의 가용성이 증가하면서 계통 및 부하 데이터의 측정, 수집, 분석 등이 용이해짐에 따라 Top-down 방식의 비중 확대
 - Top-Down 방식이 50% 이상을 점유하고 있으며, 특히 계통 모니터링 시스템 활용도가 높은 아메리카, 아시아 등지에서는 60% 이상을 보임

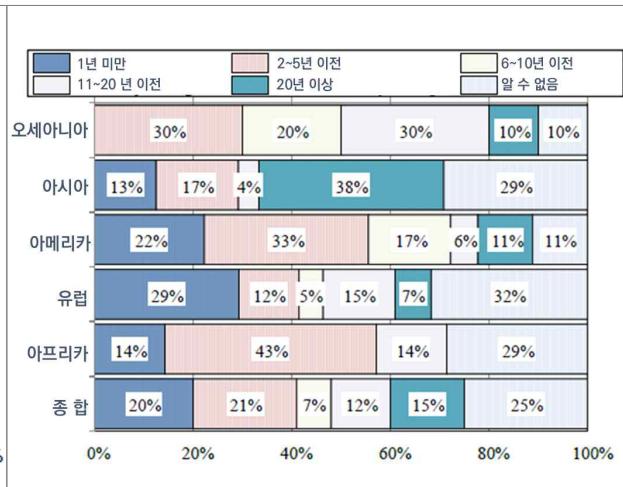
■ 부하모델의 계수를 산정한 이후 5년 이내에 갱신하는 사례가 증가

- 기존 부하와는 다른 특성을 지닌 신규 부하의 등장, 부하 구성의 변화 등을 반영하기 위해 부하모델의 계수 재산정(갱신)은 중요
- 계통해석의 정확도를 보장하기 위해서는 짧고 정기적인 갱신 주기가 중요함. 해외 유트리티, 계통운영 기관의 약 41%가 5년 이내에 갱신하였고, 1년 이내에 갱신한 기관도 약 22%에 달함
 - 데이터 수집 및 계수의 산정 과정에 비용, 시간 등이 적게 소요되는 Top-Down 방식 활용이 증가한 것이 부하모델 갱신 주기가 짧아진 원인 중 하나로 분석됨

| 부하모델의 계수 측정 방법론 |



| 부하모델의 계수 수정 시기 |



3. 주요국의 최신 동향

■ (🇺🇸 미국) 머신러닝 기반 동적 부하모델링

- (사례) 미국 전력연구소(EPRI)는 데이터센터와 전기차(EV) 충전소 같은 새로운 부하의 특성을 분석하기 위해 머신러닝 기반 모델을 개발 중이며, 과거 ZIP 모델이 정적인 부하 특성만 반영했던 한계를 극복하고자 실시간 계측 데이터(PMU)를 활용해 시간대별 부하의 변화를 예측
- (방법론) 딥러닝 알고리즘(예: LSTM, Long Short-Term Memory)을 사용해 부하의 시계열 데이터를 학습하고, 계통 고장 시 부하의 반응을 동적으로 모델링
- (주요특징) 데이터센터의 전력 수요가 갑작스럽게 증가하거나 태양광 발전량이 변동할 때 이를 실시간으로 반영하여 기존 ZIP 모델보다 높은 예측 정확도를 제공하며, 특히 대규모 데이터 처리가 가능해 복잡한 부하 패턴의 분석 및 모델화에 유리

■ (🇩🇪 독일) AI와 재생에너지 통합 부하모델링

- (사례) 독일의 프라운호퍼 연구소(Fraunhofer Institute)는 태양광 발전과 전기차 충전 부하를 포함한 ‘스마트 그리드’ 환경에서 AI 기반 부하모델을 개발하고, ZIP 모델을 확장한 하이브리드 모델에 머신러닝을 결합해 부하의 비선형 특성을 분석
- (방법론) 강화학습(Reinforcement Learning)을 사용해 부하와 발전 자원의 상호작용을 최적화
- (주요특징) 태양광 출력이 감소할 때 전기차 충전 부하를 조정하며 계통 안정성을 유지하는 모델을 설계, GAN(Generative Adversarial Networks)을 활용해 실제와 유사한 가상 부하 데이터를 생성, 모델 검증에 사용하여 재생에너지의 간헐성을 고려한 동적 모델링이 가능하며, 새로운 부하 유형에 대한 적응력이 우수

■ (🇯🇵 일본) IoT와 AI를 결합한 분산 부하모델링

- (사례) 도쿄전력(TEPCO)은 스마트미터와 IoT 센서를 통해 수집된 방대한 데이터를 기반으로 AI를 활용한 부하모델을 구축하여 주로 데이터센터와 태양광 패널이 포함된 도시 지역의 부하 특성을 분석
- (방법론) Random Forest와 같은 머신러닝 알고리즘을 사용해 부하의 주요 변수(온도, 시간대, 소비 패턴 등)를 학습하고, 이를 기반으로 부하 예측 모델을 생성
- (주요특징) 분산된 소규모 부하를 개별적으로 분석할 수 있어, 기존 ZIP 모델로는 반영하기 어려웠던 미세한 변화 반영이 가능

-  **중국) 빅데이터와 딥러닝 활용**

- **(사례)** 국가전망공사(State Grid Corporation of China)는 대규모 데이터센터와 전기차 충전 네트워크의 부하를 분석하기 위해 딥러닝 기반 모델을 도입하고, 기존 ZIP 모델의 정적 특성을 넘어 동적이고 비선형적인 부하 특성을 반영
- **(방법론)** CNN(Convolutional Neural Networks)을 활용해 부하 데이터의 공간적 패턴을 분석하고, 이를 계통 시뮬레이션 소프트웨어에 통합
- **(주요특징)** 도시별 전력 수요의 공간 분포를 예측해 계통 안정도를 평가하고, 대규모 데이터 처리에 적합하며, 복잡한 부하 환경에서도 높은 정확도를 유지할 수 있음

IV. 결 론

- **복잡해진 부하의 종류와 반응 특성으로 인해 기존 부하모델 정밀도의 한계가 노출됨에 따라 새로운 부하모델 개발 필요성 대두**

- 기존의 수치함수 부하모델은 재생에너지, 반도체 기반 디지털 설비의 반응 특성 모의가 쉽지 않으며 필수 데이터 확보에 고비용 유발

- **해외에서는 새로운 부하모델 개발을 위해 데이터 수집경로를 다변화하고, 데이터 분석 방법론 고도화를 통해 소프트웨어 기반의 부하모델을 도입하는 추세**

- 복잡해진 부하의 동작 특성을 PSS/E 등 해석 소프트웨어에서 제공하는 부하모델 패키지를 사용하여 모델링(CLM 등)하고 있음
- 태양광, 풍력원과 같이 날씨 등 다양한 변수에 의존하는 부하의 동작 특성을 해석하고 모의하기 위해 AI, 머신러닝 등 신기술 접목 시도
- 더불어, AMI 등 타 시스템 데이터를 활용한 비용 효율적인 부하모델 개발을 위해 데이터 상호운용성 및 가공 기술 연구를 활발히 수행 중

- **국내 계통 환경변화를 반영한 새로운 부하모델 개발 및 방법론 연구 필요**

- 국내에서는 AMI, ADMS 등 배전망 연계자원에 대한 정보 접근이 용이하여, 데이터의 상호운용성 확보 및 가공기술에 대한 연구를 통해 비용 효율적인 부하모델 개발이 가능
- 재생에너지의 모의 정확도 확보를 위해서는 날씨 등 전력 시스템 외적인 정보가 필요 하므로 외부 기관(기상청 등)과의 데이터 연계 등 부하모델 개발에 필수적인 정보의 효율적인 확보 방안 검토 필요

【참고문헌】

- ▶ 대한전기학회, "전력계통 부하모델링 기술 동향", 2023
- ▶ Arif, A., "Load Modeling and Simulation for Power System Analysis", 2020
- ▶ Chen, Y., "Data-Driven Load Modeling for Power System Planning", 2023
- ▶ Choi, J. H., "Dynamic Load Modeling for Smart Grid Applications", 2021
- ▶ Electric Power Research Institute (EPRI), "Load Modeling for Renewable Integration", 2019
- ▶ IEEE Power & Energy Society, "Standard Load Models for Power System Simulation", 2019
- ▶ Jung, H. S., "부하모델 기반 전력계통 시뮬레이션 최적화", 2021
- ▶ Kim, S. Y., "Real-Time Load Modeling Using Machine Learning Techniques", 2022
- ▶ Lee, D. H., "부하모델을 활용한 전력계통 안정성 분석", 2020
- ▶ Li, X., "Machine Learning-Based Load Models for Grid Simulation", 2022
- ▶ National Grid, "Advanced Load Modeling for Grid Resilience", 2023
- ▶ Park, C. H., "전력계통 시뮬레이션을 위한 동적 부하모델 연구", 2018
- ▶ Patel, R., "Dynamic Load Modeling for Power System Stability", 2020
- ▶ Schneider Electric, "Load Modeling Techniques for Modern Power Systems", 2021
- ▶ Song, K. B., "실시간 전력계통 시뮬레이션을 위한 부하모델", 2019
- ▶ U.S. Department of Energy, "Next-Generation Load Models for Grid Simulation", 2024
- ▶ Wang, L., "Simulation of Power Systems with Integrated Load Models", 2022
- ▶ Yoon, M. J., "부하모델을 이용한 전력계통 운영 전략", 2022
- ▶ Zhang, Q., "Load Modeling and Validation for Power System Studies", 2021

작성자 : 한전 경영연구원 허 훈 차장
윤용호 선임

Research Activities I : 2024년 글로벌 에너지 분야 벤처 투자 및 기술 동향

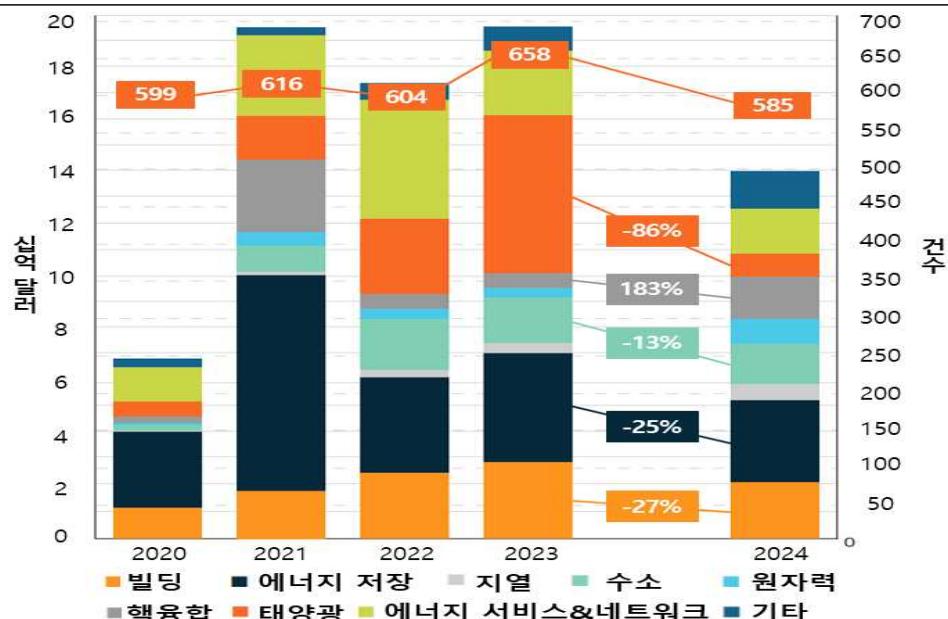
자료 Global Cleantech 100 (Cleantech Group*, 2025.1)

* Cleantech Group : 혁신을 기반으로 하는 지속가능한 성장을 위해 기업에 리서치, 컨설팅 등을 제공하며, 매년 청정 기술 관련 100개 혁신기업을 선정하고, 투자 및 기술 트렌드 분석

1 에너지 분야의 벤처 투자 현황

- 전 세계적인 금리 인상과 지정학적 불확실성 증가로 인해 2024년 에너지 분야의 벤처 투자 건수와 금액 모두 전년 대비 감소하는 경향을 보임
 - 원자력, 핵융합, 지열 발전 등에 대한 투자는 전년 대비 증가했으나, 태양광, 수소, 에너지 저장, 에너지 서비스 등 다수 분야에서 투자가 감소
 - 벤처 투자자의 출구(exit) 전략인 IPO와 M&A는 각각 2019년, 2006년 이후 최저 수준 기록
- 미국은 대선 이후 청정기술에 대한 지원이 불확실해져 투자 분위기가 위축된 반면, 유럽은 금리인하에 따른 투자 확대 가능성 존재
 - (미국) 트럼프 대통령 당선 후 ‘인플레이션감축법(IRA)’에 따른 청정기술에 대한 보조금 및 세액공제 등의 지원이 축소·폐지될지도 모른다는 우려 증대
 - (유럽) 유럽중앙은행(ECB)이 2024년에 3차례 금리인하를 단행한 후 추가 인하를 시사하면서 벤처 투자를 위한 자금조달 환경이 개선될 것으로 기대

■ 글로벌 에너지 분야 벤처 투자('20-'24년) ■



2 분야별 투자 및 기술 현황과 주요 이슈

□ [원자력·핵융합] 인공지능(AI) 보급 확대에 따른 데이터센터 건설 증가로 전력수요 급증이 예상됨에 따라 대규모 전력공급을 위한 발전 분야의 투자 확대

- 인공지능에 대한 수요가 늘어나면서 데이터센터의 전력 소비량은 현재 전 세계 총 전력 소비량의 1~2% 수준에서 2030년에는 3~4% 수준으로 증가할 전망(IEA)
- 구글, 마이크로소프트, 아마존 등 글로벌 IT기업들은 원자력 및 소형모듈원자로(SMR) 개발 기업들과 협력하여 기술개발 촉진과 투자 신뢰성 제고에 기여
 - (구글) SMR 개발사인 Kairos Power와 전력 구매 계약을 체결
 - (마이크로소프트) Constellation Energy와 협력하여 미국 펜실베이니아주의 Three Mile Island 시설의 원전 재가동을 통한 전력 구매 추진
 - (아마존) X-Energy와 5억 달러 규모의 지분 투자 계약을 체결하고 SMR 건설 추진
- 핵융합 분야는 SMR과 달리 아직 개발 초기 단계에 머무르고 있으나, 2024년 핵융합로 기술에 대한 투자 규모는 전년 대비 급증하였으며 2020년 이후 가장 큼
 - Pacific Fusion은 9억 달러, Xcimer Energy는 1억 달러, Marvel Fusion은 7천만 달러, Type One Energy는 8.3천만 달러를 각각 조달
 - 중국은 핵융합 발전 상용화를 위해 고온 초전도 토카막(tokamak)^{*} 기술개발에 집중

* 토카막(tokamak) : 핵융합 발전 과정에서 플라즈마를 가두기 위해 자기장을 이용하는 도넛 모양 장치

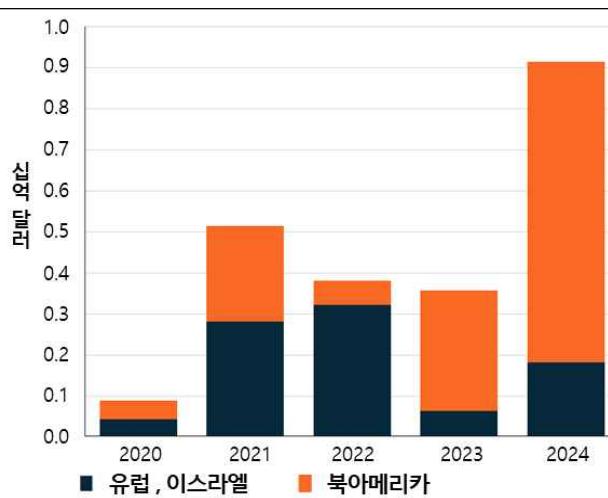
□ [냉각 기술] 인공지능에 필요한 고성능 컴퓨팅 기술이 적용된 장비의 발열 문제 해결이 중요해짐에 따라 데이터센터의 냉각 기술에 대한 투자 확대

- 하드웨어는 고성능 컴퓨팅과 고급 그래픽 처리 장치(GPU)의 결합을 위해 서버 스택^{*}의 밀도를 높이는 방향으로 진화 중이며, 장비의 작동 시 발생하는 열을 낮추면서 에너지와 물 사용을 줄이는 새로운 냉각 기술을 요구함
 - * 서버 스택(server stacks) : 시스템을 구성하는 서버와 관련 리소스의 모음
- Crusoe Energy는 텍사스에 직접 칩 냉각^{*} 기술을 사용한 AI 데이터센터를 건설할 계획
 - * 직접 칩 냉각(direct-to-chip cooling) : 칩에 직접 냉각 블록을 부착하고 냉각수를 순환시켜 열을 관리하도록 설계된 냉각 방식
- 미국·싱가포르 다국적 제조기업인 Flex는 데이터센터 내 IT 및 전력 설비의 열 관리 능력 제고를 위해 2024년 11월 직접 칩 냉각 기술을 보유한 JetCool^{*}을 인수
- Accelsius^{*}는 2.4천만 달러, Submer^{**}는 5.5백만 달러 규모의 투자금을 각각 조달
 - * Accelsius는 액체를 이용해 열을 식히는 기술인 액체 냉각(liquid cooling) 기술 보유
 - ** Submer는 전자 장비를 비전도성 액체에 담가 냉각하는 방식인 액침 냉각(immersion cooling) 기술 보유

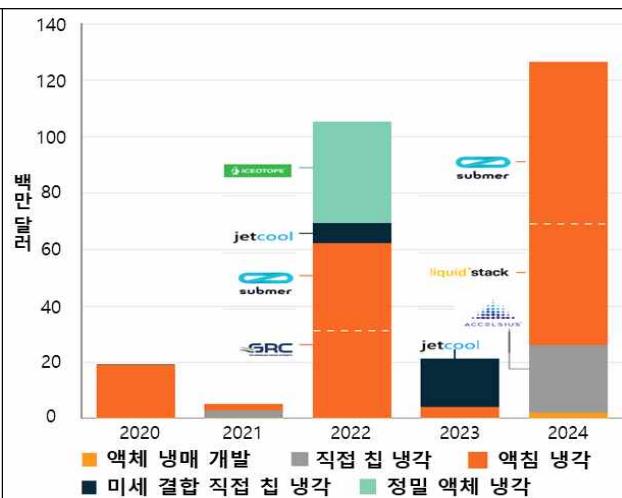
* Accelsius는 액체를 이용해 열을 식히는 기술인 액체 냉각(liquid cooling) 기술 보유

** Submer는 전자 장비를 비전도성 액체에 담가 냉각하는 방식인 액침 냉각(immersion cooling) 기술 보유

■ 지역별 첨단·소형 원자로 벤처 투자('20-'24)



■ 냉각 기술 관련 벤처 투자('20-'24)



- [수소 기술] 미국 청정수소 정책의 불확실성과 청정수소의 경제성 문제 등으로 인해 장기구매계약*이 어려워짐에 따라 투자가 감소하는 경향을 보임

* 장기구매계약(offtake agreement) : 장기간에 걸쳐 정해진 가격으로 생산물을 구매하기로 하는 계약

- (미국) 청정수소 생산을 확대하기 위해 마련한 ‘45V 세액 공제’*의 기준을 충족하기 어려워지면서, 미국의 청정수소 관련 프로젝트가 취소 또는 연기되며 투자가 위축

* 45V 세액 공제 : IRA에 포함된 청정수소 생산 세액 공제 규정으로 수소 생산업체가 청정수소 1kg당 최대 3달러 세액 공제를 받을 수 있으며, 공제액은 CO₂ 배출량에 따라 차등 적용

- 규정에는 2028년부터 청정수소 생산이 매시간 무탄소 전원과 매칭되어야 한다는 ‘추가성(additionality) 원칙’이 포함되는데, 수소 생산자들은 이를 달성하기 어렵다며 우려를 제기*

* 이에 2024년 추가성 원칙 등 45V 세액 공제 규정 수정에 대한 논의가 시작되었으며, 2025년 수정안이 확정되었는데, 추가성 원칙을 2030년부터 적용하는 것으로 변경

- (유럽) 청정수소 관련 기업인 John Cockerill과 Sunfire가 성장 자본(Growth Equity)* 라운드에서 각각 2.5억 달러와 2.3억 달러를 조달하는 등 투자가 확대

* 성장 자본(Growth Equity) : 스타트업이 어느 정도 성숙한 단계에 이르러 조달하는 자본

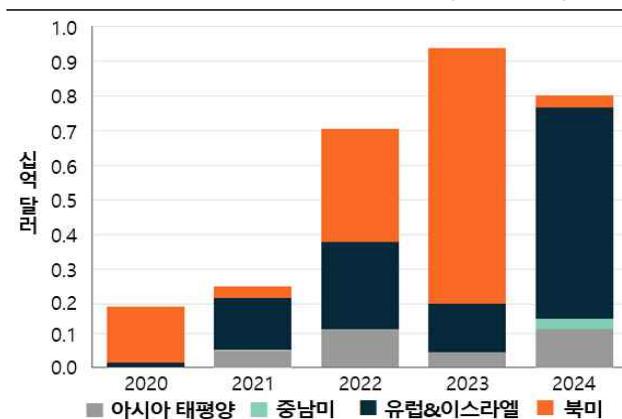
- 프로젝트 자금조달을 위해서는 앞으로 생산할 수소에 대한 구매자를 확보하고 장기구매 계약을 체결해야 하나, 수소 전기분해의 비용 문제로 인한 청정수소의 경제성 부족이 투자 활성화에 걸림돌로 작용

- 대규모 청정수소 프로젝트의 자금조달과 장기구매계약이 어려워짐에 따라 앞으로는 특정 지역에서의 사용을 목적으로 하는 소규모 지역화 프로젝트로 변화할 것으로 예상됨

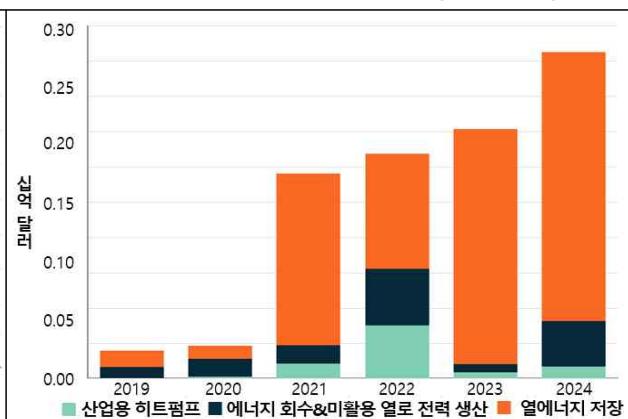
- Nitrofix와 Swan-H는 수요 지역에서 청정수소를 통해 암모니아를 생산할 수 있는 기술을 개발함으로써 운송 비용을 절감한 분산형 수소 생산 사례를 제시

- [산업 전기화] 전 세계 탄소 배출량의 24~30%를 차지하는 산업 부문에서 배출량 감축을 위한 국가 정책과 기업의 자체 넷제로 목표에 따라 전기화에 대한 투자 증가
- 유럽 연합은 2027년부터 소규모 제조시설과 열병합발전(CHP)이 포함된 배출권 거래 시스템(EU ETS2)을 시행할 예정이며, 이에 제조시설의 탄소비용 증가 및 전기화 촉진 예상
 - 폐열을 활용하는 기술은 열 생산을 위한 에너지 사용을 줄이고, 계통으로부터의 전력 공급 필요성을 감소시켜 유럽과 같이 전기요금이 비싼 지역에서 비용 절감에 기여 가능
 - QPinch, Skyven Technologies 등은 산업의 열 배출 중 대부분을 차지하는 저온 열을 활용한 산업용 히트 펌프를 개발하여 200%를 초과하는 효율을 달성
 - Kraftblock은 제철 과정에서 발생하는 폐기물(slag)에 열을 저장한 후 필요시 폐열을 활용해 발전도 가능한 열 에너지 저장 기술을 개발

■ 지역별 그린 수소* 벤처 투자('20-'24)



■ 산업용 전기화의 벤처 투자('19-'24)



* 그린 수소는 청정수소의 종류 중 하나로 신재생에너지를 활용하여 생산한 수소를 의미

- [기타] 리튬-이온 배터리의 대안으로 철-공기(iron-air) 배터리와 중력을 이용한 에너지저장장치(ESS) 기술이 주목받고 있으며, 지열 발전 기술도 빠르게 성장 중

- (ESS) Form Energy는 미국 웨스트버지니아주에서 철-공기 장주기 배터리 제조 공장을 운영 중이며, Energy Vault는 중국 루동에서 25MW/100MWh의 중력 에너지저장 시설을 가동
- (지열) Fervo Energy는 2023년 미국 네바다주에서 인공 저류층 생성 기술*을 활용한 지열 발전 사업을 성공적으로 완료하고 구글 데이터센터에 전력을 공급

* 인공 저류층 생성 기술(Enhanced Geothermal System) : 특정 온도에 도달할 때까지 땅속 깊이 시추공을 굴착하고, 물을 강한 수압으로 주입해 암석을 파쇄하여 인공 저류층을 생성하는 기술

- 2024년 2월에는 2026년부터 유타주에서 지열 발전 운영을 목표로 2.44억 달러의 성장 자본을 확보

작성자 : 한전 경영연구원 이성재 선임연구원

Research Activities Ⅱ : 미국의 전력수요 증가와 전력산업 당면 과제

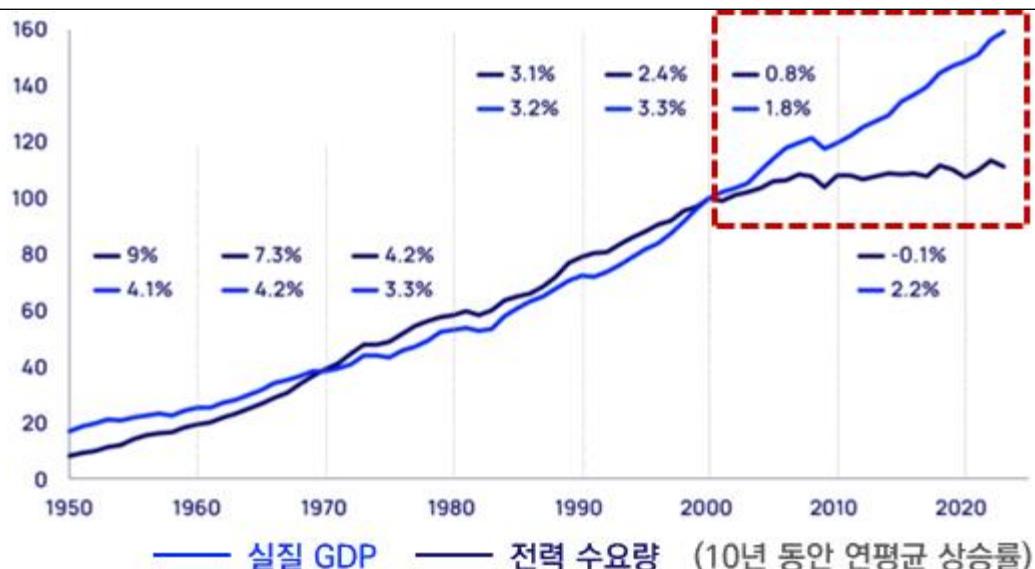
자료 Gridlock: the demand dilemma facing the US power industry
(Wood Mackenzie, 2024.10)

1 미국 전력수요 동향

□ 지난 20여 년간 미국의 전력수요량과 GDP는 탈동조화(Decoupling)* 양상을 보임

- * 전력수요량과 경제성장의 상관관계 약화로 둘의 증감 추세가 더 이상 일치하지 않는 현상
- 2010년대에 GDP는 연평균 2.2% 성장했지만, 경제구조가 제조업 중심에서 서비스업 중심으로 변화하면서 전력수요량은 오히려 소폭(-0.1%) 감소함

■ 미국 전력수요량 증가율과 실질 GDP 증가 지수(2000년=100) ■



□ 미래에는 ①데이터센터 증가, ②제조업 부활, ③경제의 전기화에 따른 전력수요의 폭발적 증가로 규제당국과 유틸리티는 새로운 도전에 직면할 것으로 예상됨

- (규제당국) 전력 부문의 새로운 설비 구축 계획에는 평균 5~10년이 소요되나, 이제야 전력수요 증가에 대비한 계획 수립을 시작했으며, 오늘날 대부분의 주에서 공공서비스 위원회(PUC)*는 전력수요 급증 환경에서의 규제 경험이 부족함

* Public Utilities Commission : 각 주(州)의 공공 유틸리티 규제 기관

- (유틸리티) 전력망 연결에 대한 우선순위 결정, 전력 도매가격 상승 가능성 증대 등 새로운 문제들이 쟁점으로 등장할 것으로 예상됨

2 미국 전력수요 증가 잠재 요인

1. 데이터센터 증가

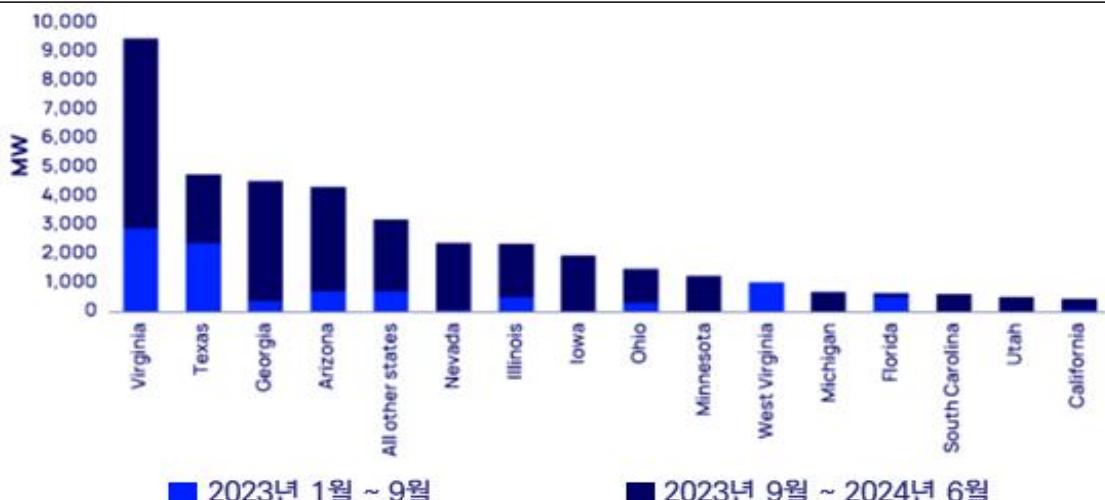
- 데이터센터는 2023년 미국 전력 소비량의 4~5%를 차지(시간당 평균 수요는 20~25GW)
 - 구글 검색 대비 10배의 전력을 소모하는 ChatGPT와 같은 대규모 언어 모델(LLM)의 등장으로 향후 전력수요는 더 증가할 것으로 예상됨
- 전문가들은 데이터센터의 전력수요가 2030년까지 연간 10~20% 증가할 것으로 전망하고 있으나, 현재 공개된 데이터센터 프로젝트를 기반으로 추정해보면 데이터센터의 전력수요 증가 추세가 이러한 전망치를 넘어설 것으로 예상됨
 - 요청·예정 中 프로젝트의 용량은 약 93GW로 2023년 데이터센터 총용량의 4배에 해당
 - 2023년 초 데이터센터 1기의 평균 용량은 150MW였으나 이후 300MW로 증가

| 유ти리티의 요청 접수 및 계통 연결 예정 데이터센터 프로젝트 동향 |

유티리티	내용
Oncor	총 59GW 규모의 데이터센터들이 전력 시스템에 연결 요청
Excel Energy	6.7GW 규모의 데이터센터 계획·건설 중
AEP	'30년까지 15GW의 신규 수요(대부분 데이터센터)가 전력 시스템에 연결 희망
PG&E	'29년까지 총 3.5GW의 데이터센터에 전력 공급 예정
PP&L	3GW 이상의 데이터센터 용량을 추가하는 계약 체결
Dominion Energy	총 6GW 이상 규모의 데이터센터들로부터 발전 및 망 접속 요청 접수

* 출처 : 원문 재작성

| '23년 16개 주의 데이터센터 용량 비교(MW) |



2. 제조업의 부활

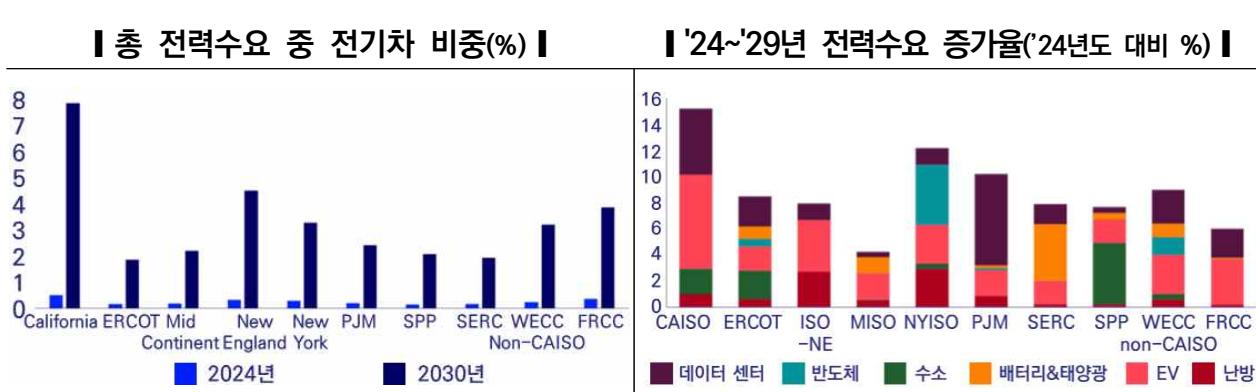
- 보호주의와 자국 제조업 부활 정책으로 2023년 미국 내 제조시설 건설에 대한 지출 규모가 지난 10년간 평균에 비해 3배 증가
 - 보호주의 정책으로 인해 강철, 알루미늄, 전기차, 반도체 등의 수입 상품 가격이 상승
 - 美 정부는 ‘반도체 지원법(CHIPS Act)’과 ‘인플레이션 감축법(IRA)’에 의거해 반도체, 배터리, 태양광 및 풍력 제조업체가 가격 경쟁력을 확보할 수 있도록 보조금을 지급
- 제조업 중에서도 에너지 집약도가 높은 배터리, 태양광, 반도체 부문의 성장에 따라 향후 수년간 전력수요가 15GW가량 증가할 것으로 예상됨
 - 특히 대규모 투자 시 구매자와 공급업체를 동반한 생태계를 조성하여 추가적인 성장도 가능

■ 미국 내 배터리, 태양광, 반도체 부문 동향 및 전망 ■

부문	동향 및 전망
배터리	‘20~’30년 사이 제조 규모가 20배 증가하여 650GWh에 이를 전망
태양광	연간 웨이퍼 44GW, 셀 75GW를 생산할 수 있는 시설이 제안됨 (이 중 실제 건설은 각각 25%, 7% 정도로 예상)
반도체	3,000~5,000MW의 추가적인 전력수요 증가를 유발하는 9개의 프로젝트 진행 중

3. 경제의 전기화

- 주(州)의 촉진 정책에 따른 전기차와 난방의 전기화가 2030년까지 전력수요 성장을 견인
 - (전기차) 2030년 캘리포니아 전력수요의 8%, 북동부 전력수요의 3~4%를 차지할 전망
 - (난방) 미국 북동부 지역을 중심으로 전기화가 활발히 이루어지는 중
- 녹색수소 생산을 위한 7,000MW의 전력수요가 2030년까지 추가될 전망



⇒ 모든 요인 종합 시 미국의 전력수요는 2029년까지 지역별로 4~15% 증가 전망

③ 전력시장 당면 과제

□ 용량 인증(Capacity accreditation)* 기준 변경으로 인한 용량 시장 공급량 감소

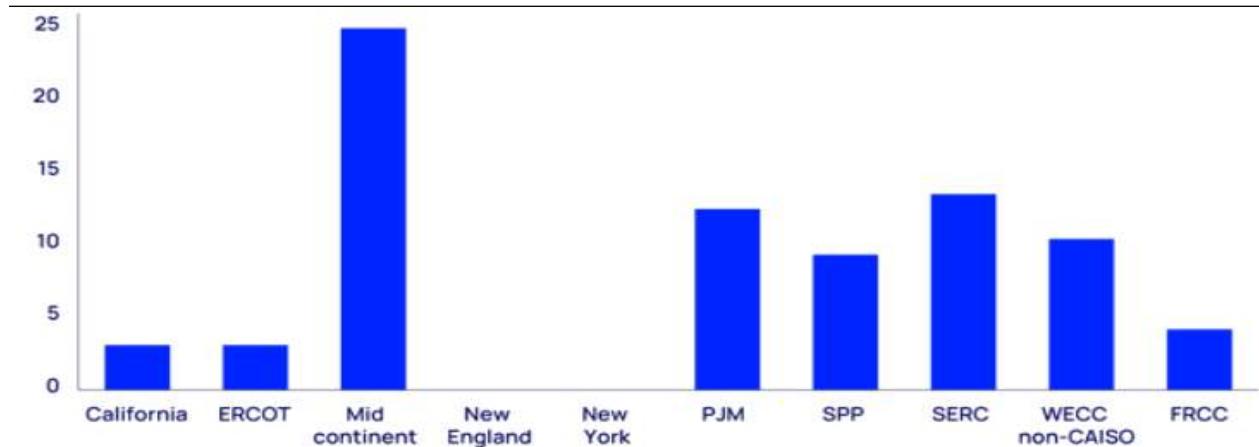
* 용량 인증: 전체 전력 계통의 신뢰도에 대한 개별 발전 자원별 기여도를 측정하는 방법

- 미국 내 대부분의 계통운영자는 간헐성 자원인 재생에너지의 보급 확대, 기상이변 발생 빈도 증가에 따라 각 발전 자원의 계통 신뢰도에 대한 기여 수준을 보다 정확히 반영하기 위해 기준이 강화된 새로운 용량 인증 방식 도입 중
- 새로운 용량 인증 방식 적용 시 발전기별 인증 용량이 축소되면서 용량 시장에서 공급량이 감소하여 용량 가격 상승에 영향을 미치기도 함
- PJM의 최근 용량 시장 경매 가격이 이전에 비해 10배 상승했는데, 가스 복합사이클 발전소 용량의 기여도를 90%에서 79%로 변경한 것이 가격 상승 원인의 하나로 지목됨

□ 송전망 확충 부진, 석탄발전소 폐쇄에 따른 발전 설비용량 감소, 전력 설비에 필요한 부품 조달 지연 등으로 인해 전력 공급에 제약 발생

- 송전망 승인 및 건설, 계통 연결 등 송전망 확충에 필요한 절차가 지연되고 있는데, 현재와 같은 추세라면 전력수요가 연간 2% 증가하는 수준까지만 감당 가능
- 한편, 유틸리티 규모 재생에너지 발전설비가 2030년까지 연간 29~40GW씩 증가할 것으로 예상됨에 따라, 이를 수용할 송전망 건설이 시급한 상황
- 향후 전력수요가 증가할 것으로 예상되나, 석탄발전소 폐쇄를 계획대로 진행하는 경우 전력 공급능력이 감소하여 수요-공급 간 불균형 발생 우려
- PJM과 SERC 관할 지역에서는 향후 수년간 전력수요가 약 10%가량 늘어날 것으로 예상되나, 계획에 따르면 증가한 수요의 약 10%에 해당하는 규모의 석탄발전소가 폐쇄될 예정
- 변압기와 차단기의 공급부족으로 유틸리티가 이들 부품의 조달에 어려움을 겪는 중

■ 최대 전력수요 대비 폐쇄 예정인 석탄발전소의 용량 비중(%) ■



4 미국 전력시장의 미래와 예상 이슈

□ 전력 가격 상승이 예상됨에 따라 화력·원자력 발전에 대한 재평가가 진행 중

- 지난 15년간 미국의 전력수요는 거의 증가하지 않았던 반면에, 재생에너지를 중심으로 공급은 꾸준히 증가하여 전력 가격의 상승을 억제해 왔음
- 그러나 향후 전력수요의 증가로 인한 전력 가격 상승을 억제하기 위해 석탄발전소의 폐쇄를 연기하거나, 이미 폐쇄된 원자력발전소를 재가동하는 사례가 늘어날 전망

□ 데이터센터 등 대규모 부하의 증가는 태양광 및 풍력 개발 사업자에게 기회를 제공할 전망

- 수소·원자력·지열 발전소는 앞으로 10년 이내에는 전력수급 안정화에 큰 도움이 되지는 못할 것으로 예상되며, 여전히 태양광과 풍력이 주로 활용될 것으로 예상됨
- 특히 대규모 부하 고객은 일반적인 고객에 비해 가격에 덜 민감하며, 태양광 및 풍력 발전 전기에 대해 기꺼이 프리미엄을 지급할 의사도 있다는 것을 보여줌

□ 대규모 부하의 계통 연계 프로세스 정립 필요

- 과거에는 대형 발전소의 계통 연계 우선순위 결정이 중요했다면, 앞으로는 데이터센터, 반도체 공장 등 대규모 부하의 계통 연계 기준과 절차 마련의 중요성이 커지고 있음
 - 유틸리티 주주와 고객의 이익 보호, 계통 연결을 희망하는 대규모 부하에 대한 투명하고 비차별적인 프로세스 제공, 전력시장 참여자에 대한 투명한 정보 제공이 목적

□ 새로운 혁신(신규 요금체계, 전력망 강화 기술) 및 BTM(Behind-The-Meter) 발전*의 확대

- * 소비자가 전력망으로부터 전기를 공급받는 대신 자신의 부지에서 전력을 생산·사용하는 방식
- 유틸리티는 데이터센터와 제조업체 같은 대규모 부하를 위한 요금제 및 기술을 도입 중
 - Nevada Power는 대규모 부하 고객이 프리미엄을 지불하는 대가로 기존 고객에 영향을 주지 않으면서도 청정 에너지원으로부터 전력을 공급받을 수 있도록 하는 Clean Transition Tariff 제도를 운용 중
 - AES의 유틸리티 자회사와 Dominion Power는 대규모 전력망 강화 기술을 도입
- 데이터센터가 직접 발전소를 건설하거나, 또는 기존 발전소 부지에 데이터센터를 건설한 후 전력망을 거치지 않고 발전소로부터 직접 전기를 공급받는 방식 등장
 - 한편, 유틸리티와 계통운영자는 이와 같은 방식이 송전 요금 회피, 전력 계통에 대한 악영향 등을 초래할 수도 있다면서 우려를 나타내고 있음

작성자 : 한전 경영연구원 이정환 선임연구원

KEMRI 전력경제 Review 2025년 3월호 (Vol.313)

발행일 2025. 4. 11.

발행인 원장 강민석

편집인 경영연구원 편집위원회
편집장 책임연구원 원동규(☎국선 : 02-3456-5490 / 사선 : 021-5490)
편집위원 선임연구원 김범규(☎국선 : 02-3456-5491 / 사선 : 021-5491)

홈페이지 www.kepco.co.kr/KEMRI

문의처 경영연구원 연구기획팀(☎국선 : 02-3456-5490~1 / 사선 : 021-5490~1)

※ 한국전력 경영연구원의 사전 동의 없이 본 보고서의 내용을 무단 전재하거나 제 3자에게 배포하는 것을 금합니다.