21, rue d'Artois, F-75008 PARIS CIGRE美国国家委员会http://www.cigre.org
2025 未来电网研讨会

大型负荷互联最佳实践：北美数据中心视角

Rafi Zahedi、Amin Zamani、Rahul Anilkumar Quanta Technology有限责任公司

摘要

北美的大型负荷正在快速增长，主要由数据中心、加密货币挖矿、氢能生产设施和重型车辆充电站推动。每一类负荷都具有独特的电气特性，但随着人工智能部署推动容量以前所未有的速度增长，数据中心正受到特别关注。其规模、工作周期以及变流器主导型接口带来了输电并网方面的新挑战，尤其涉及扰动行为、稳态性能和运行可观测性。

本文回顾了北美大型负荷并网的最佳实践，将公用事业单位和系统运营商指南综合为一套连贯的技术要求。该方法结合了手册和指南分析、公用事业单位之间的比较，以及对欧洲发展方向的展望。综述重点介绍了电能质量、遥测、调试测试和保护协调方面的要求，同时指出穿越规范、负荷变化管理和扰动后恢复目标方面存在的不足。在此基础上，本文为开发商和公用事业单位提出了实用指导。

关键词

人工智能、数据中心、电网并网、大型负荷、互联要求

1. 引言

随着北美电网迅速转型，数据中心、加密货币挖矿、氢气生产和重型电动汽车充电等新兴大型负荷，正以前所未有的规模和速度申请并网，其规模往往超过当今最大的在运设施。与这些负荷类型相关的早期事件已凸显可靠性风险：2024年7月，东部互联系统发生一起230千伏故障，导致1,500兆瓦的数据中心负荷跳闸，短暂推高了频率和电压 [1]–[2], [3]。2023年末至2025年初期间，ERCOT和东部互联系统记录到25次加密货币挖矿负荷损失事件，每次损失为100–400兆瓦[2]。

人工智能（AI）、云服务和高性能计算是推动数据中心迅速扩张的主要因素。2024年，全球数据生成量超过149泽字节，这得益于人工智能赋能的应用、广泛的数字化以及联网设备的普及[4]。美国以占全球容量的40%居于领先地位；数据中心的电力需求从2014年的58太瓦时增至2023年的176太瓦时，美国能源部预计到2028 [5]将达到325–580太瓦时。在此期间，工作负载转向推理（从80%增至85%），并在地理分布上更加多元；预计到2028 [7]，边缘计算将承担一半的人工智能处理任务。

数据中心属于一种独特的大型电力负荷。与加密货币挖矿或传统工业过程不同，其需求由计算任务驱动，具有持续稳定的基础负荷，但人工智能训练和实时推理会导致负荷骤增 [6]。这种突发性负荷模式使数据中心在维持电能质量、确保电网稳定性及实现并网方面面临独特挑战。

并网申请量如今已超过传统流程的处理能力，给公用事业公司和独立系统运营商（ISO）带来了可靠性、研究和流程方面的挑战。从性能角度来看，如果未妥善规定穿越和重合闸要求，快速爬坡和阶跃变化可能引发大规模断开 [7]。若缺少充分滤波，电力电子接口可能造成谐波失真、相不平衡及更广泛的电能质量问题。这些压力凸显了在并网点（POI）制定统一技术要求的必要性。

本文对美国电力实体的大型负荷互联要求进行了比较分析，重点关注技术要求。通过提取公用事业单位和独立系统运营商指南中明确规定的数值限值，本研究揭示了当前实践中的共性与差异。本文提出的框架和可视化基准旨在支持政策制定，以及数据中心负荷并网的实际规划。

2. 美国大型负荷技术互联要求 S

大型负荷的运行问题有别于传统的电动机主导型负荷。为使讨论立足实践，本节汇总公用事业单位和独立系统运营商的要求，按专业领域编写入门概述，并辅以比较表格，列出其中最具约束性且以数值明确规定的义务。

图1将互联要求归纳为八大类：负荷管理、电能质量、电压穿越（VRT）、频率穿越（FRT）、扰动后恢复、保护要求、运行通信与控制及合规，以及研究与建模要求。表1汇总了 AEP、Dominion、ERCOT、Ameren（MISO）、PG&E、Southern Company 和 SPP 的指导意见，并采用以并网点为基础的框架，着重呈现明确的数值限值和恢复目标。这种结构便于直接比较，同时保留各机构自身的术语和适用范围。

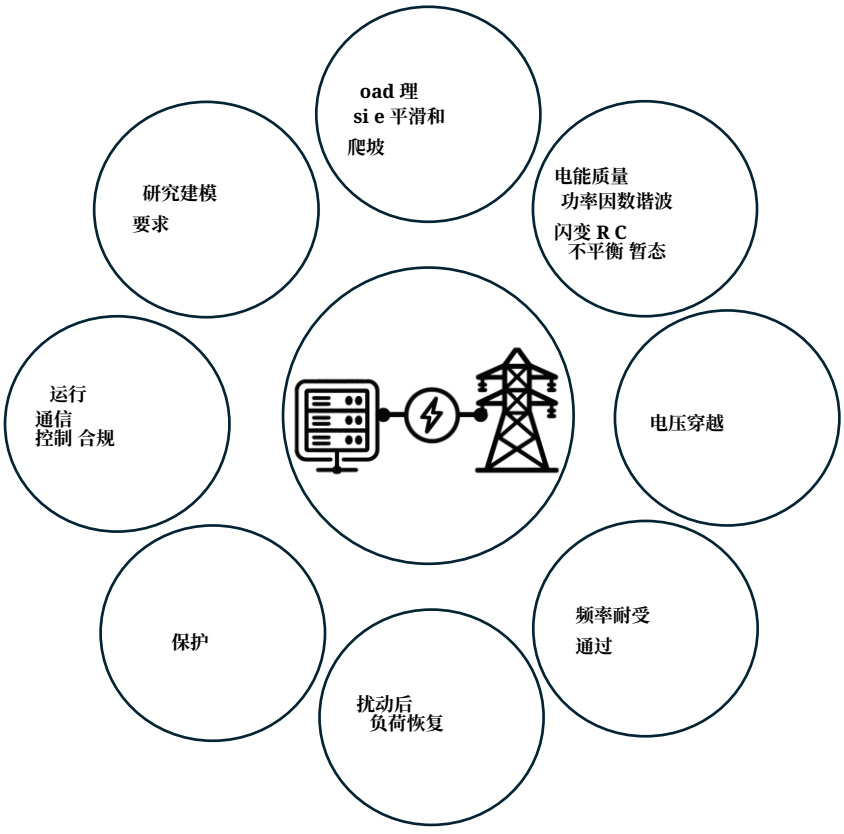

图 1. 技术　　本文研究的要求类别

2.1. 负荷管理（规模、平滑和爬坡）

如前所述，人工智能训练设施会导致需求快速波动，这凸显了明确规定并网点包络和分阶段恢复曲线的必要性。因此，互联要求应将阶跃限值和爬坡限值与分阶段重新并网相结合，并以高分辨率遥测和验证为支撑，使运行控制与大型负荷已记录的风险相匹配 [1]。此外，还需要采用平滑策略来抑制波动并稳定负荷曲线 [8]。

如图2所示，各实体对“大型负荷”的定义差异很大。Dominion 将采用电力电子接口的大型负荷阈值设为 ≥50 兆瓦；ERCOT 则将单一站点达到 ≥75 兆瓦的负荷归类为大型负荷，并在变电站设定 25 兆瓦的可视性阈值。这意味着，如果同一输电变电站下的多个设施合计超过 25 兆瓦，即使每个设施都低于 75 兆瓦，ERCOT 仍要求提高可观测性（例如，通过遥测、状态信息和协调）。Southern Company 将接入输电系统（>40 千伏）的大型负荷定义为 ≥50 兆瓦；SPP 则将 69 千伏电压下达到 >10 兆瓦或更高电压下达到 >50 兆瓦的负荷指定为高影响大型负荷。相比之下，AEP、Ameren（MISO）和 PG&E 均未设定固定的兆瓦阈值。

如表1所示，Southern Company 是唯一一家对正常运行期间的负荷爬坡实施每分钟 ≤ 20 兆瓦数值上限的公司。AEP 要求提交负荷爬坡计划；ERCOT 强制要求制定符合大型负荷并网研究限值的负荷投运计划；Dominion 规定了特定站点分阶段重新并网计划；SPP 则要求在扰动期间采用恒定电流（而非恒定功率）控制。其他实体更侧重于规划数据、控制中心协调和预测，而非规定明确的上限。

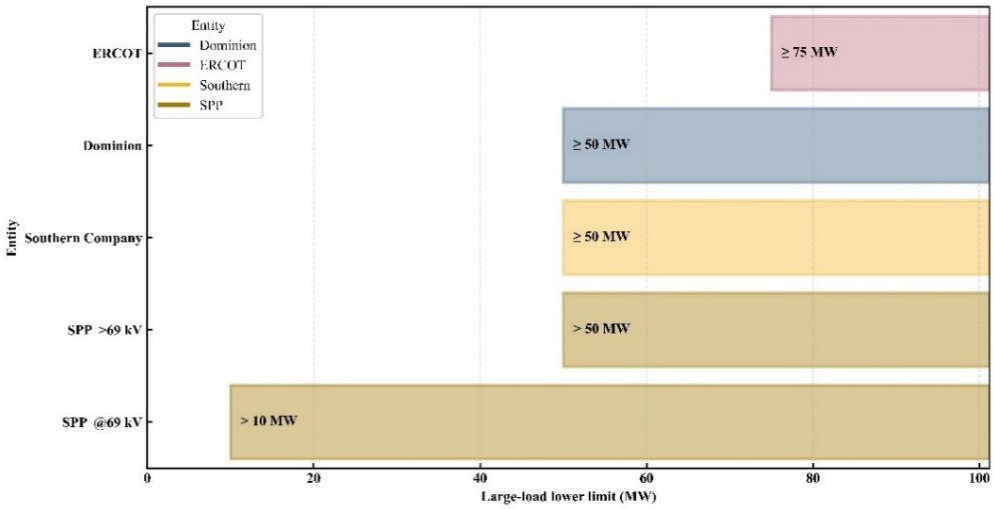

图2. arge oad e inition i erent 实体

2.2. 电能质量

互联要求通常会将并网点处明确的电能质量（PQ）限值与监测规定结合起来，以便在扰动影响其他客户或系统性能之前及时发现 [9]。表1显示，Dominion 要求并网点处的瞬时电压波动不超过 ≤3%，并要求进行永久计量，以记录带时间戳的高分辨率日志，供合规审计使用。Ameren 采用 IEEE 519 进行谐波治理，并采用 IEEE 1453 处理闪变和快速电压变化（RVC）。PG&E 执行规则2限值（总谐波畸变率（THD）为 ≤5%，不平衡度为 ~10%）；加利福尼亚独立系统运营商在并网点处执行功率因数限值；Southern Company 则要求提供截至第50次的谐波频谱、安装永久监测装置，并采取可强制执行的治理措施。AEP 指定了测量点，并要求依据 IEEE 1453 处理闪变/快速电压变化（RVC）。

在这些机构中，只有 Dominion 和 Southern Company 明确要求在并网点处进行永久电能质量监测。Ameren 可能会安装监测装置，但不强制要求使用永久记录仪；PG&E 执行电能质量限值，但未指定监测设备；AEP 指定了测量点，但未要求安装永久电表。根据公开资料，ERCOT 和 SPP 均不要求进行负荷侧电能质量监测。

表 1. 大型负荷互联的负荷管理与电能质量比较分析概要 **ion**

实体	类别	
	负荷管理规模平滑与爬坡	**电能质量**
AEP [10]	• 定义：AEP 按具体项目分别处理。 • 客户提交负荷爬坡计划，其中描述步长幅值、节奏，重连/脱扣阈值和延迟；AEP 检查阶跃/斜坡是否符合闪变和快速电压变化（RVC）要求，规划限值，可能需要采取缓解措施。	• 电能质量（PQ）在 AEP 指定的测量点进行评估（通常为并网点（POI））。 • 闪变/快速电压变化（RVC）必须符合 IEEE 1453；谐波会审查对现代电子设备的要求。
ominion [11]	• 定义：≥50 兆瓦，但可指定为<50 兆瓦具体数值取决于特性或位置。 • 客户应提供场址特定数据（负荷类型和传输方式）以及分阶段重连计划。	• 并网点的瞬时电压波动 ≤ 3%。 • 并网点永久性电能质量有功无功计量，附带时间戳日志（有功功率，无功功率、功率因数、谐波（最高至第 50 次）、短期闪变严重度/长期闪变严重度、快速电压变化、不平衡度，暂态、频率），并保留 >90 天。
ERC T [12], [13], [14], [15]	• 定义：单一站点的 ≥75 兆瓦；可视性阈值 ≥25 兆瓦，位于公共变电站。 • 行为由调试计划规定，由输电服务提供商根据研究限值设定；未定义明确的阶跃/爬坡要求。	NA
I Ameren [16]	• 定义：不设固定的兆瓦门槛；相关程序适用于任何输电网连接终端用户。 • 申请内容包括兆瓦/兆乏/功率因数、最大需求、实际峰值（如适用）、10年预测以及独特的运行特性。	• 谐波必须符合 IEEE 519；Ameren 可能会安装并网点电表；若超出限值，客户必须采取缓解措施。 • 按 IEEE 1453 评估闪变/快速电压变化；例如，2.0% 的临界母线电压骤降处于临界水平，可能需要采取缓解措施。 • 功率因数超出 95% 滞后至 95% 超前的范围时，要求进行用户侧校正。持续电能质量不合规可能导致断开。
PG&E [17], [18], [19], [20], [21]	• 定义：未说明；未公布阶跃/爬坡上限。 • 所有连接/解列均与 PG&E 控制中心协调；如果研究发现有需要，可能会要求采取补救措施方案。	• 在并网点执行电气规则 2；电压总谐波畸变率 ≤ 5%，缓解措施由客户出资。 • 相位平衡：任意两相之间的差值在峰值负荷不应超过 ~10%。 • 加利福尼亚独立系统运营商的功率因数范围为滞后 97% 至超前 99%。
南部 Compan [22], [23]	• 定义：≥50 兆瓦，电压为 >40 千伏；SCT（Southern Company Transmission）可能根据设施特性或位置指定更小的基于特征或位置对设施进行划分。 • 最大有功功率爬坡速率为 ≤ 20 兆瓦/分钟在正常运行期间；相关设置会经过审查，并已证明；送电涌流和阶跃必须符合快速电压变化限值。	• 遵守SCT的电能质量政策；根据研究结果，可能会施加更严格的限值。 • 提供预期的第50次谐波频谱；SCT可能要求采取缓解措施，并可暂时降低或断开负荷。 • SCT安装永久性并网点PQ监测；功率因数必须保持在协调限值以内。
PP [24]	• 定义：在69千伏下为>10 兆瓦，或在更高电压。 • 对于电子负荷，在扰动期间以恒流模式运行，并避免采用恒功率模式；未定义稳态阶跃/爬坡。	NA

2.3. 电压穿越

电压穿越（VRT）是指设施在故障期间，面对特定电压幅值与持续时间组合时，依照以并网点为参考的包络线，并经标准化测试方法验证，仍保持并网点（POI）连接的能力与义务 [25]。对于数据中心而言，前端整流器和有限的直流母线能量会使恒功率运行在遭遇深度、短时电压骤降时容易触发跳闸，除非由不间断电源（UPS）系统或协调控制提供缓冲；因此，电力实体正转向明确规定负荷电压穿越要求 [26]。

如表2所示，SPP已发布时间-电压曲线（0.90–1.10 pu范围内连续运行，短时容差低至 ~0.50 pu，持续 ~0.15 s），其暂态过电压耐受能力与 IEEE 2800 保持一致。Dominion 则更强调重合闸耐受能力，要求设备在多次重合闸过程中保持穿越（每次持续 ~50–70 ms），欠压启动值约为 85%。ERCOT 提出的大负荷电压穿越要求规定，设备须在 0.90–1.10 pu 范围内连续运行；超出该范围时，则根据 ITIC 曲线、全球经验和现有 IBR 要求分阶段穿越（见第 3 节）。

2.4. 频率穿越

频率穿越要求设施在规定的频率偏差与持续时间组合下保持并网，通常以频率—时间曲线表示，并划分为“必须运行”和“必须跳闸”区域 [27]。对于变流器主导型数据中心，同时跳闸或切换至不间断电源可能会瞬间切除数百兆瓦负荷，因此需要制定明确的频率穿越要求，且不能仅依赖全系统低频减载方案 [26]。大多数发电机并网规范已要求设备在 59.4–60.6 赫兹附近连续运行；新兴做法则是采用类似的并网点参考窗口，并与低频减载协调。在数据中心应用中，频率穿越还应包括分阶段恢复和高分辨率遥测，以核验合规情况 [27]。

如表2所示，SPP公布了详细的频率特性曲线（58.8–61.2 赫兹范围内可持续运行，延长至299秒；超过61.8/<57.0 赫兹时允许跳闸）。相比之下，其他大多数实体将负荷行为纳入低频减载框架：AEP与区域低频减载保持一致；Dominion要求参与低频减载并配置必要的继电器；Ameren规定了分级低频减载区块（59.3/59.0/58.7 赫兹）；PG&E按加利福尼亚独立系统运营商的指示实施欠频继电保护；Southern则要求核实用户设置，但未公布数值区间。

表2。概要 爬坡率和频率穿越要求的比较分析 要求的大型负荷并网

实体	类别	
	RT	**FRT**
AEP [10]	• 未发布负荷的并网点时间—电压包络；电压性能通过电能质量限值和研究期间的定值审查进行管理。	• 与区域低频减载（低频减载）协调；未规定单独的数值频率-时间包络。
ominion [11], [28]	• 在多次自动重合闸（50-70 毫秒）期间保持连接；建议欠压启动值 ≤85%并配合较短的计时器，以避免误动作切换。	• 参与全系统低频减载，并配备适当的继电器和通信设备。
ERC T [12], [13], [14], [15]	• ERCOT遵循ITIC曲线和IEEE 1668标准，针对欠电压，以及针对过电压的 NOGRR245。 • 该提案适用于未来。	• 具体的负荷频率设定“有待制定”；任何获采纳的设定都应设为最大可行能力。
I Ameren [16]	• 无负荷耐受曲线；欠电压减载并非标准要求，可根据具体情况作为临时措施实施。	• 低频减载级次约为 59.3、59.0 和 58.7 赫兹（每级 ~10%）。 • 新接入最初可能获准不配置低频减载，但 Ameren 可在后续改造时要求配置低频减载。
PG&E [17], [18], [19], [20], [21]	• 没有负荷时间-电压曲线；情况出乎意料解列报告中注明原因及事件文件；设置应与 PG&E 协调。	• 没有明确的负荷频率窗口；低频在适用情况下采用继电保护，并配备遥测；PG&E 在紧急情况下接受独立系统运营商的指挥。
南部 Compan [22], [23]	• 提交 SCT 的电压穿越设置按照指示或标准进行审查和调整；通过测试/监测验证设置。	• 提交频率穿越设置，供SCT审查并按指示或标准要求进行调整；设置应通过测试/监控进行验证。
PP [24]	• 遵循ITIC曲线以及IEEE 1668-2017、IEEE 2800-2022标准（SPP采用了第7条），以及NERC标准PRC-029-1。	• 耐受示例：58.8–61.2 赫兹范围内连续运行；扩展在该范围之外可容忍299秒；允许在 ~61.8 赫兹以上或~57.0 赫兹以下跳闸。

2.5. 扰动后负荷恢复

本文所称的扰动后负荷恢复，是指在发生故障或电能质量事件后，将数据中心负荷重新接入电网所需满足的要求。这项要求对于维护电网完整性至关重要，因为在扰动期间，大部分数据中心负荷可能会暂时切换至备用电源。

表3显示，ERCOT是唯一规定数值目标的实体：在$V_{POI} \geq 0.9pu$之后1秒内恢复≥90%的扰动前负荷。AEP和Dominion要求制定客户专属恢复计划（包括阈值、延迟、块大小和爬坡率），但没有统一限值。Ameren通过开关操作和无功支撑协调恢复。PG&E要求重新并网前获得控制中心批准，并采取防止无人值守远程恢复的保护措施。Southern Company执行经批准的程序和经验证的爬坡限值，并具备削减能力；SPP则要求恢复符合其电压穿越/频率穿越边界和运行指南。

2.6. 系统保护

表3总结了相关实践：AEP要求提供完整的保护数据并进行清除验证；Dominion规定高压侧采用三角形接法的联络变压器，并可能在出现有害相互作用时减少供电；ERCOT要求设置可远程操作的断路器，并在

互联研究中纳入系统振荡分析；Ameren规定采用冗余方案并提供断路器失灵保护覆盖；PG&E要求采用通信辅助方案、定期测试，并禁止设置≥100 千伏抽头；Southern Company则增加了仪用变压器精度、断路器额定值，以及纳入负荷减载方案的可能性。SPP未提供详细的负荷侧保护规则。几乎所有实体都要求在送电前由公用事业单位审查并批准保护系统。

表格 3. 大型负荷互联的扰动后负荷恢复与保护要求摘要 **on**

实体	类别	
	扰动后负荷恢复	**保护**
AEP [10]	• 客户提供分阶段重联和爬坡计划（阈值、延迟、块大小、爬坡）；AEP 协调以避免二次跌落和恢复电压骤升。	• 客户提供完整的保护数据；AEP 确认开断任务、清除时间，以及变压器/高压-侧/低压侧设备充足性。
ominion [11], [28]	• 客户指定重连方法和爬坡过程；数值恢复水平/时间未作规定。	• 联络变压器高压侧通常采用三角形接法；配置需要进行审查。 • 如果相互作用有害，可能需要降载/断开变电站间转移需要获得批准。
ERC T [12], [13], [14], [15]	• 拟议目标（B区域）：恢复至≥90%的扰动前用电量，并在1秒内完成恢复 $V_{POI} \geq 0.9$标幺值；若断开（C区域），恢复将在多个大型负荷之间分阶段进行。	• 每个并网点均配有可远程操作的断开设备，可切断故障电流并隔离负荷；研究范围包括稳态、稳定性、短路以及次同步振荡（SSO）注意事项。
I Ameren [16]	• 无数值最低水平/最长时间要求；恢复应与 Ameren 协调采用开关操作、无功调节和操作员指令。	• 至少需要采用环形母线；大型枢纽可采用直母线或一又二分之一断路器接线。 • 客户侧开断设备的断路器失灵保护；并网点处应设有可见隔离；采用冗余方案以检测两侧的故障。
PG&E [17], [18], [19], [20], [21]	• 发生任何分离后，操作员应通知控制中心，并在重新连接前取得许可；无人值守远程恢复要求确认线路已由经 PG&E 批准的电源送电。	• 采用公用事业级、经 PG&E 批准的继电器，并与PG&E线路保护；在并网点设置可见的负荷开断设备；故障中断设备应安装在并网点附近。 • 可能需要采用通信辅助线路方案和远方跳闸通道；送电前及每六年进行一次继电器/断路器测试。送电前及每六年进行一次。 • 不允许在 ≥100 千伏线路上新建分接线；在变电站接入。
南部 Compan [22], [23]	• 没有全公用事业范围的数值最低水平/最长时间；恢复遵循经批准的运行规程和经验证的爬坡限值；削减检查容量和爬坡率性能是否达到“全面就绪”之前。	• 采用协调整定的公用事业级继电器；继电保护——精度电流互感器；SCT 决定联络断路器额定值，并且可能需要高速保护通信。 • 高压侧变压器通常采用三角形接法；现场发电设备联锁，以防止并联运行除非获得许可。 • 负荷可能会纳入负荷减载方案。
PP [24]	• 无数值最低水平／最长时间要求；预期在电压／频率（V/F）范围内保持并网划定边界，并依据运行指南协调恢复。	NA

2.7. 控制与通信要求

对于大型负荷，公用事业公司正逐步采用变电站级通信与控制，以确保运行所需的快速、确定性信号传输，并提供可供合规审计的数据。如表4所示，对可观测性的要求日益提高：Dominion规定必须在并网点安装永久性电能质量表，并保存≥90天的日志；ERCOT要求提供≤10秒遥测、连续状态报告和冗余ICCP；Ameren要求通过Harris 5000或同等设备持续传输MW/MVAr/V/I遥测；PG&E规定通信服务须全天候运行，并要求运行人员通知、蜂窝网络/以太网电能计量表，以及在需要时配置专用保护通信；Southern Company要求使用公司自有的远程终端单元，并对测点进行验证，还可能部署相量测量单元（PMU）和/或高级数字故障录波器（DFR）；AEP要求遥测可靠，但未指定协议。

2.8. 研究建模要求

数据中心负荷表现为恒功率负荷，电压下降时会汲取更多电流，电压上升时则会汲取更少电流。这种行为会产生负增量阻抗，可能放大扰动，并在发生较大暂态时损害稳定性。因此，规划人员已开始

在正序研究的基础上补充开展电磁暂态（EMT）分析，尤其是在当地短路强度较低时 [29]。

表4显示，所有实体都要求开展稳态和短路研究，并根据需要增加电磁暂态分析。AEP接受PSS/E，并可能要求提供PSCAD/EMTDC模型；Dominion要求使用PSS/E以及规划状态/竣工状态数据，也可能要求提供PSCAD模型；ERCOT通过并网研究确定范围并进行模型注册；Ameren根据研究协议增加短路、稳定性、开关操作或电磁暂态研究；PG&E列出了ASPEN、PSLF、PSCAD和RTDS（500千伏）研究；Southern Company要求提供规划状态/竣工状态/移交状态数据集，并进行基于仿真的验证；SPP则强调通过建模、调试测试和运行监测开展动态负荷模型验证。

表4。 大型负荷并网的通信、控制、合规和研究要求概述 **n**

实体	类别	
	运行通信控制 合规	**研究建模要求**
AEP [10]	• 实时协调和合规需要可靠的运行遥测；未规定具体的通信协议。	• 稳态、短路以及（视需要开展的）稳定性研究；输入包括阶跃变化频率、谐波频谱、无功设备和多年预测。 • PSS/E 中接受正序模型；电磁暂态在需要时可能要求使用 PSCAD 进行研究。
ominion [11], [28]	• 永久并网点电能质量电表；时间同步、高分辨率记录，保留 ≥ 90 天。 • 受低频减载约束的设施必须维持用于协调行动的通信。	• 在 PSS/E 中提供 CMLD/EV 或用户自定义模型并提供计划中/竣工后的数据；可能会要求提供 PSCAD 数据用于交互/稳定性研究。
ERC T [12], [13], [14], [15]	• 以 ≤10 秒扫描周期向 ERCOT 提供运行遥测爬坡率需结合状态检测；持续需要断路器/开关状态。 • 采用完全冗余的 ICCP 链路，并具备自动故障转移功能。	• 大型负荷必须通过稳态、稳定性和短路研究（以及输电服务提供商/独立系统运营商认为必要）。 • 在同一地点的额外负荷不会被纳入 ERCOT 的规划/运行模型，直至当前请求所涉及的研究完成并签署协议。 • 所提供的材料未规定必须使用特定软件。
I Ameren [16]	• 连续遥测（兆瓦、兆乏、电流，电压），使用 Harris 5000协议或经协商确定的等效协议；提供全天候联系人；每年进行电表测试；客户负责维护电信线路。	• Ameren 首先开展潮流研究；随后增加短期根据需要进行线路、稳定性、开关操作或电磁暂态分析研究协议，并符合 NERC TPL-001；不强制要求使用特定的商业工具。
PG&E [17], [18], [19], [20], [21]	与控制中心进行 • 24 小时通信；电话服务为必需；计量电表使用蜂窝网络调制解调器；条件允许时，使用静态 IP 地址的以太网。 • 用于保护的专用通信，例如远方跳闸，具体要求由 PG&E 规定。	• 必须提交建模提交文件；PG&E 指定使用 ASPEN、PSLF、PSCAD 模型（500 千伏还需 RTDS 模型）。 • 送电前测试和 PG&E 见证均为必须执行，并明确规定容差和报告提交提前期。
南部 Compan [22], [23]	• 来自 SCT 所有的互联远程终端单元的数据链路，通常通过光纤进行串行传输；实时遥测各点均须在送电前完成交换和测试；SCT 可部署电能质量表、PMU 和先进的数字故障记录装置。	• 在“计划阶段／竣工阶段／最终状态”提供场址特定数据；SCT 会在首次送电前以及整个性能验证期内通过仿真进行验证。 • 附录列出了建模输入（负荷构成、功率因数、电压暂降/暂升和重连阈值、频率跳闸、爬坡率、谐波频谱、负荷曲线）。 • 未指定特定的商业工具；可能会要求进行电磁暂态分析可能会提出此类请求。
PP [24]	• 通过建模、调试测试实现合规，以及运行监测；该文件并未规定特定的通信协议。	• 研究、调试测试和监测强调动态负荷模型验证和故障穿越演示；不强制使用特定的商业工具。

3. 欧洲经验与愿景

在欧洲，大型负荷连接所适用的约束性框架是《需求连接网络规范》，该规范统一了需求设施和配电系统的连接规则 [30]。该规范还明确规定了并网点的电压穿越要求。对于欧洲大陆而言，这意味着由输电运营商规定的连续运行范围为0.90–1.05标幺值，以及持续20–60分钟的1.05–1.10标幺值区间。

图 3 对比了 RTE（法国）、Energinet（丹麦）和 EirGrid（爱尔兰）采用的低电压穿越曲线，以及两个美国实体 SPP 和 ERCOT 的数值型电压穿越曲线 [31] 。在

系统层面，欧洲研究表明，既有枢纽的拥塞可能导致新接入延迟长达 13 年。为减少排队，建议采取战略选址、分阶段接入或非保证接入，以及更灵活的接入协议等措施，这些措施可将接入周期缩短至约一年。分析还强调，需要针对数据中心灵活性开展试点，并提高透明度，例如提供容量地图和公开排队数据，以更好地协调选址与投资 [32]。

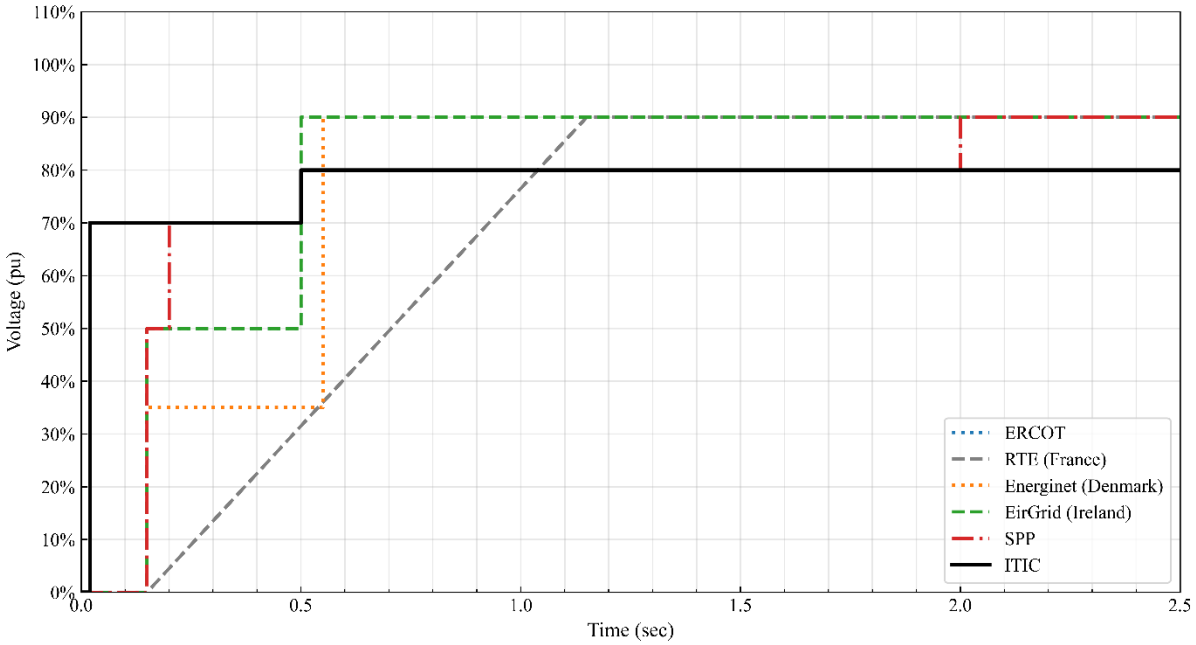

图 3. 美国和欧洲实体的爬坡率曲线 [13], [24]。

4. 结论

本综述比较了美国各公用事业公司和独立系统运营商针对大型负荷的互联要求，重点关注数据中心。研究考察了八个技术类别：负荷管理、电能质量、电压穿越、频率穿越、扰动后恢复、保护、控制与通信，以及建模要求。分析表明，这些领域的发展并不均衡。保护要求相对成熟，大多数实体都趋向采用公用事业级继电器、选择性切除、建模工作流程，以及可审计的并网点隔离。电能质量方面的预期也基本一致，均参考 IEEE 519 和 IEEE 1453，并日益强调永久性电能质量计量。

相比之下，穿越、负荷恢复和负荷建模仍在发展中。只有 SPP 和 ERCOT 发布了明确的基于并网点的电压穿越范围，而其他大多数实体仍依赖定性指导。负荷频率穿越仍主要与低频减载相关，数值化的保持连接时间窗口应用有限。扰动后恢复主要依靠程序性要求，ERCOT 则提出了定量目标。同样，“大型负荷”的定义和爬坡限制在各实体之间差异很大。

总体而言，趋势表明，穿越曲线、恢复目标和可视性要求将趋于更加标准化，类似于欧洲实践。发布协调统一的电压/频率穿越范围、按类别划分的恢复基准、标准化的遥测要求以及明确的建模要求，将加快标准趋同并减轻研究负担。协调统一框架和比较分析（表1–表4）为公用事业公司、监管机构和开发商提供了实用参考，帮助他们可靠、高效地并入数据中心等大型且快速增长的负荷。

参考文献

[1] 《新兴大型负荷的特征与风险》，2025年。访问日期：2025年8月18日。[在线]。链接：https://www.nerc.com/comm/RSTCReviewItems/3_Doc_White%20Paper%20Characteristics%20and %20Risks%20of%20Emerging%20Large%20Loads.pdf [2] 《北美电力可靠性公司应对大型负荷并网可靠性影响的活动与计划》。访问日期：2025年8月18日。[在线]。链接：https://www.ferc.gov/news-events/news/presentation-nerc-seeks- address-[3] R. Zahedi、R. Sheinberg、S. N. Gowda、K. SedghiSigarchi 和 R. Gadh，《考虑不确定性的大型电动汽车充电站优化规模框架》，《世界电动汽车期刊》2025年，第16卷，第318页，第16卷，第6期，第318页，2025年6月，doi: 10.3390/WEVJ16060318。[4] N. Lin、M. Arzumanyan、E. Arzumanyan、D. Foreman 和 N. Schuba，《德克萨斯州数据中心增长：能源、基础设施与政策路径》。[5] 《美国能源部发布评估数据中心电力需求增长的新报告| 美国能源部》。访问日期：2025年8月18日。[在线]。链接：https://www.energy.gov/articles/doe-releases-new-report-evaluating-increase-electricity-demand-data-centers[6] A. Cowie-Haskell，《大型计算负荷增长：文献综述及对负荷特征及其对加利福尼亚独立系统运营商排放、成本和脱碳影响的一阶评估》，4月 25， 。访问日期：8月。2025 18, 2025 [ ] 10161 在线。链接：https://hdl.handle.net/ / [7] 32282 《大型负荷互联的实用指南与注意事项 - GridLab》。访问日期：2025年8月18日。[在线]。链接：https://gridlab.org/portfolio-item/practical-guidance-and- considerations-for-large-load-interconnections/ [8] M. Wang 等，《基于不同需求侧资源统一状态模型的负荷曲线平滑策略》，《现代电力系统与清洁能源期刊》，第6卷，第3期，第540–554页，2018年5月，doi: 10.1007/S40565-017-0358-0/FIGURES/18。[9] 《电能质量监测推荐实践》，2019，20，2025 9 26访问日期：8月。[在线]。链接：http://www.ieee.org/web/aboutus/whatis/policies/p - .html。[10]《连接至AEP输电系统的新设施或现有设施变更的要求》，2024年12月。访问日期：2025年8月18日。[在线]。链接：https://aeptransmission.com/dist/docs/power-ready- grid/AEP_互联_要求_Rev4.pdf [11] K. Vance，《Dominion Energy Virginia的数据中心性能》，2025年。[12] 《大型负荷并网状态更新》，2025年8月。[13] P. Gravois，《ERCOT大型电子负荷电压穿越性能要求（提案）》，2025年7月。访问日期：2025年8月18日。[在线]。链接：https://www.ercot.com/files/docs/2025/07/11/ERCOT-LEL-Ride-Through-Criteria_LLWG-final.pptx [14] 《1234NPRR-01：25兆瓦或以上负荷的大型负荷互联要求及建模标准 052824》，访问日期：2025年8月18日。[在线]。链接：https://www.ercot.com/files/docs/2024/05/28/1234NPRR- 01%20Interconnection%20Requirements%20for%20Large%20Loads%20and%20Modeling%20Stand ards%20for%20Loads%2025%20MW%20or%20Greater%20052824.docx[15] 《115PGRR-01：与NPRR1234相关的25兆瓦或以上负荷的大型负荷互联要求及建模标准 052824》。访问日期：2025年8月18日。[在线]。链接：https://www.ercot.com/files/docs/2024/05/28/115PGRR- 01%20Related%20to%20NPRR1234,%20Interconnection%20Requirements%20for%20Large%20Lo ads%20 200528 24 20 20 20 20 2025 20 20 20 and% Modeling% Standards% for% Loads% % MW% or% Greater% .docx[16] 《客户负荷连接至Ameren输电系统的终端用户连接程序要求》，2023年。[17] 《PG&E输电互联手册——L1-T节：仅输电实体和仅负荷实体的结算计量要求》，2024年。

[18] “PG&E 输电互联手册——L2 节：负荷实体和输电实体的保护与控制要求”，2024年。[19] “PG&E 输电互联手册——L3 节：仅负荷实体和仅输电实体的变电站设计”，2024年。[20] “PG&E 输电互联手册——L4 节：仅负荷实体和仅输电实体的运行规程与要求”，2023年。[21] “PG&E 输电互联手册——L5 节：仅负荷实体和仅输电实体的送电前测试规程”，2022年。[22] “输电连接大型负荷的接入流程。”[23] “输电连接大型负荷的技术要求。”[在线]。网址：http://www.oatioasis.com/SOCO/SOCOdocs/Southern-OATT_current.pdf [24] D. Baker 和 M. Sedighizadeh，“高影响大型负荷穿越要求”。访问日期：2025年8月18日。[在线]。网址：https://www.spp.org/Documents/74272 2 0 20 20 20 20 20 /High% Impact% Large% Load%Ride% Through% Requirements.docx [25] W. Houk，“采用 IEEE 1668标准应对电压骤降”，2023年，访问日期：2025年8月20日。[在线]。网址：https://library.powermonitors.com/riding-through-voltage-sags-ieee- 1668 [26] J. Conto、Y. Cheng、J. Rose 和 J. Schmall，“德克萨斯州负荷助力电网稳定：大型电力电子负荷的电压穿越”，*IEEE*《电力与能源杂志》，第23卷，第5期，第56–67页，2025年9月，doi：10.1109/MPE.2025.3564963。[27] M. A. Zamani、N. Wrathall 和 R. Beresh，“加拿大司法辖区最新电压和频率穿越要求综述”，*2014*年电力与能源会议论文集，*EPEC 2014*，第116–121页，2014年2月，doi：10.1109/EPEC.2014.10。[28] “大型负荷互联_FIR Rev 24”，2025年8月。[29] F. Chang、X. Cui、M. Wang 和 W. Su，“具有多个恒功率负荷的直流电网中基于势函数的大信号稳定性分析”，*IEEE*《电力与能源开放获取期刊》，第9卷，第16–28页，2022年，doi：10.1109/OAJPE.2021.3132860。[30] “需求连接网络规范”，2016年8月。[31] “如何将需求设施连接至输电网的说明指南”，2025年1月。访问日期：2025年8月21日。[在线]。网址：https://en.energinet.dk/media/oh0oexqp/explanatory-guide-on-how-to-connect-a-demand-facility-to-the-electricity-transmission-grid-january-2025.pdf [32] “数据中心电网：雄心勃勃的电网规划可赢得欧洲的人工智能竞赛。”访问日期：2025年8月20日。[在线]。网址：https://ember-energy.org/app/uploads/2025/06/Grids-for-data-centres-in- Europe.pdf