通过构网型控制降低数据中心负荷风险并实现电网支撑功能

Yousef Abudyak、Mohsen Alizadeh 和 Wei Sun 电气与计算机工程系 中佛罗里达大学（UCF） 美国奥兰多
yousefhusamyousef.abudyak@ucf.edu、
mohsen.alizadeh@ucf.edu、sun@ucf.edu

摘要— 大语言模型和人工智能工作负载推动超大规模数据中心迅速发展，这给电力系统带来了新的挑战。在模型训练和检查点保存期间，这些设施会出现突发功率变化，导致电压偏差和频率扰动。此外，它们作为被动负荷运行，只消耗电力而不提供任何电网支撑。本文提出一种集成架构，将电池储能系统（BESS）部署于数据中心，并采用构网型逆变器提供有功电网支撑功能。通过 MATLAB/Simulink 进行的仿真结果表明，在动态负载下，该架构能够准确跟踪功率参考值；训练和保存期间，八台协调运行的电池储能系统单元可提供瞬时功率。当数据中心母线附近发生单相电压跌落时，电池储能系统提供了类似静止同步补偿器的无功功率支撑。电网断开时，系统实现了无缝孤岛运行，数据中心母线上的电压和频率保持稳定，且功率持续供应。

索引词— 数据中心、储能系统、构网型逆变器、基于逆变器的资源、电力系统韧性。

I. 引言NTRODUCTION

大容量电力系统（BPS）的发电侧和负荷侧都正在经历深刻变革，重塑着其运行特性和动态行为。在发电侧，可再生能源资源和基于逆变器的技术的快速部署，主要受全球脱碳目标以及零排放倡议相关经济激励措施的推动 [1]。相反，在负荷侧，大量高耗电设施不断涌现，其中尤以支持人工智能（AI）训练和大语言模型（LLM）运行的数据中心为甚，这带来了前所未有的需求动态 [2]。

近期有多份技术报告探讨了超大规模数据中心在大电力系统运行中的作用 [2-6]。北美电力可靠性公司（NERC）指出，数据中心及其他电力电子负荷是引发电压敏感事件的因素，并强调其爬坡速率快、难以预测且并网时间表短，这些特征正成为新兴的可靠性风险 [6]。西部电力协调委员会也呼应了这些发现，并警告说，数据中心驱动的负荷快速增长与此前的逆变器并网危机如出一辙，因此需要立即采取监管和技术措施 [2]。Elevate 和 Grid Lab 指南强调，应建立透明的并网流程、改进建模，并加强输电与配电规划人员之间的协调 [5]。相比之下，[3]的研究表明，数据中心实施可控需求响应可显著降低容量需求；而爱达荷国家实验室的清洁能源案例研究显示，与可变可再生能源相比，稳定核能发电仍是大型设施最可靠且最具成本效益的供电选择 [4]。总体而言，这些报告揭示了大型数据中心在电网规划和可靠性框架中得到妥善整合时，既会带来运行风险，也具有潜在的系统价值。

图1展示了一个50兆瓦数据中心设施实测的有功功率曲线，呈现出与AI工作负载周期相关的明显爬坡上升和爬坡下降转换。快速爬坡上升对应深度学习训练阶段的启动，此时数千个图形处理器（GPU）和加速器并行运行，用电需求大幅增加。随后，在检查点保存期间，计算暂停，GPU利用率急剧下降，功率随之爬坡下降。GridLab和北美电力可靠性公司近期提出并强调的这一关键问题，凸显了AI驱动的数据中心负荷具有非常规的突发型行为，可能激发电网

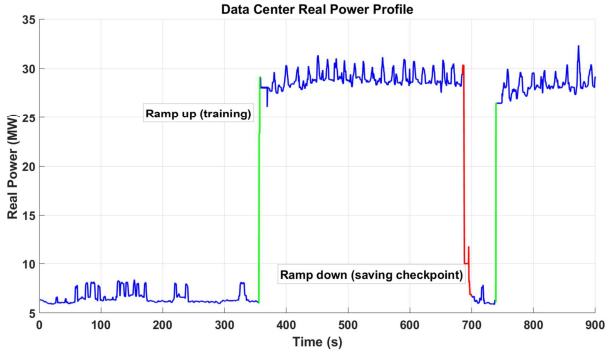


图 1. 数据中心设施的有功功率曲线，展示了稳态波动（蓝色）、训练期间的爬坡上升阶段（绿色），以及保存检查点时的爬坡下降阶段（红色）。

振荡，并在未得到妥善缓解时威胁系统稳定性 [5, 6]。这一实测负荷模式将作为仿真框架中的代表性输入，用于评估所提出的拓扑结构如何缓解快速爬坡效应并稳定系统响应。通过复现这些训练—检查点周期，本研究验证了该控制方案在真实AI驱动的负荷波动条件下的有效性。

根据现有数据 [7, 8], , 可再生能源装机容量（主要由基于逆变器的资源（IBR）构成）的扩张趋势与数据中心电力需求的增长趋势相当。图2展示了2018—2024年间的这一关系：美国可再生能源装机容量（包括额定功率超过1 MW的电池储能系统和风力发电机组）与所有类型设施的数据中心总电力需求均呈增长趋势。

基于逆变器的资源（IBR）与数据中心同步增长，凸显了在大电力系统中协调整合二者的必要性。数据中心不必独立运行，而是可以由采用先进构网型（GFM）控制架构的基于储能的IBR直接供电 [9]。这种协调配置使可再生能源能够动态满足快速增长且不断变化的数据中心需求，同时缓解这些设施分别接入电网所带来的运行和稳定性挑战。此外，通过这种整合，数据中心可以采用基于储能型IBR的可持续备用电源，取代传统柴油发电机 [10]。

除了提高现场可靠性外，同一配置还使 IBR 能够提供重要的电网支撑功能，包括无功功率支撑、电压和频率调节以及孤岛运行模式 [11]。此外，将相关 IBR 中的跟网型逆变器替换为构网型逆变器，可进一步增强系统在弱电网条件下维持电压和频率稳定性的能力 [12]。如此一来，每个数据中心都能从大电力系统的潜在负担转变为积极资产，从而提升整体系统稳定性和韧性。

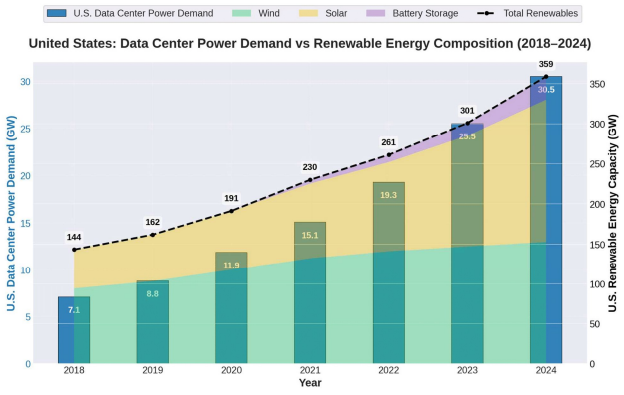


图2. 美国数据中心电力需求与可再生能源装机容量增长（2018–2024）。

本文其余部分安排如下。第二节讨论传统数据中心和所提出的数据中心的结构。第三节介绍采用基于储能的 IBR 实现电网支撑功能所采用的控制策略。最后，第四节给出仿真结果、讨论和主要观察结论，并在文末作总结。

II. 传统与所提数据中心架构

本节讨论数据中心的传统架构和所提架构。虽然数据中心种类繁多，但鉴于超大规模设施电力需求巨大，且对大电力系统的影响日益增加，本文将重点讨论这类设施 [6]。

A. 传统数据中心架构

超大规模数据中心采用高度冗余的电气设计，以确保在发生任何单一故障或维护事件时仍能持续供电。设施通过 N + 1 台变压器接入高压电网，将电压降至中压（MV），并将电力分配至多个建筑；每个建筑又划分为机房和舱。每个舱都配有自己的变压器、柴油发电机以及双套不间断电源（UPS）系统，可在故障期间提供即时故障穿越供电，直至发电机启动并稳定运行 [13]。根据正常运行时间要求，数据中心通常采用 N+1 冗余或 2N冗余 [14]。N+1 设计为每组关键组件（如变压器和发电机）配置一套独立备用设备，而 2N设计则完整复制所有供电路径，以实现最高韧性。Tier III级设施支持并行维护，通常在供电和发电环节采用 N+1 冗余，在 UPS 和配电系统中采用 2N 冗余。这种配置消除了单点故障，确保持续运行，并符合 Tier III 可靠性标准 [15]。图 3 展示了一座包含两栋建筑的超大规模数据中心电气系统图（改编自微软建筑工地资料）。

B. 拟议的数据中心架构

如前所述，拟议的解决方案旨在为设施提供所需电力，而不完全依赖电网。不过，该设施仍与电网互联，以实现支持电网的功能，使其能够在需要快速频率响应或静止同步补偿器（STATCOM）型无功功率支撑的事件中提供帮助。该配置还增强了系统韧性，使设施能够在需要时参与恢复和黑启动事件；不过，这不在本文的讨论范围内 [16]。

本研究中基于电池储能系统（BESS）的构网型逆变器的接入标准，源自[15], 所提出的设计框架，该框架将燃气发动机系统应用于超大规模数据中心。选择这一参考设计，是因为其额定功率相近，且结构上与第二节.A所述的互联配置相似。图4展示了电池储能系统与数据中心设施的连接方式。

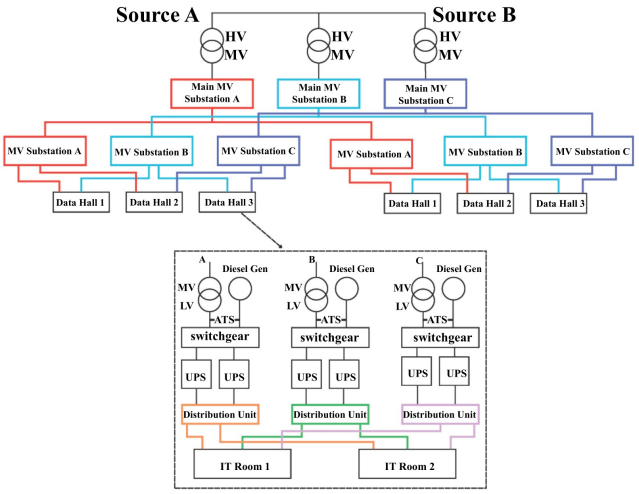


图3。 超大规模数据中心的电气系统图。

值得一提的是，此类设施采用的电池类型至关重要。例如，锂离子系统虽是当前的主流技术，却在大规模长时应用中面临重大挑战 [17]。其火灾风险、有限的储能时长，以及对供应受限严重且以中国为中心的供应链的依赖，促使人们转而关注长时储能替代方案。热储能和液流电池等新兴技术为数据中心集成提供了更安全、更可持续的选择[18]。

III. 电池储能系统—构网型控制架构与控制设计

基于电池储能系统的构网型逆变器采用分层控制架构，以在公共耦合点（PCC）实现电压构建、功率调节和与电网的无缝交互。如图 5所示，变流器通过L-C滤波器连接，该滤波器由逆变器侧电感 L_f、并联电容 C_f和等效电网侧电感L_g组成。基准阻抗为

$$Z_{Base} = \frac{V_{n,SB}^2}{S_{n,SB}}, \tag{1}$$

其中，$V_{n,SB}$ 和$S_{n,SB}$ 分别表示静止同步补偿器—电池储能系统的额定电压和视在功率。滤波器元件确定为[16]

$$L_f = \frac{0.15\, Z_{Base}}{2\pi f}, \qquad C_f = \frac{0.15}{2\pi f\, Z_{Base}} \tag{2}$$

电容器C_f 提供无功功率支撑并滤除谐波，而 L_f 限制高频电流分量并改善与电网的耦合。

测量电压和电流 (v_{abc}, i_{abc}) 被转换到 dq参考坐标系，并经级联电压和电流控制环处理。电压PI控制器 ($k_{pv} + k_{iv}/s$) 生成参考电流 (i_d^*, i_q^*)，电流控制器 ($k_{pi} + k_{ii}/s$) 则跟踪这些参考电流，以

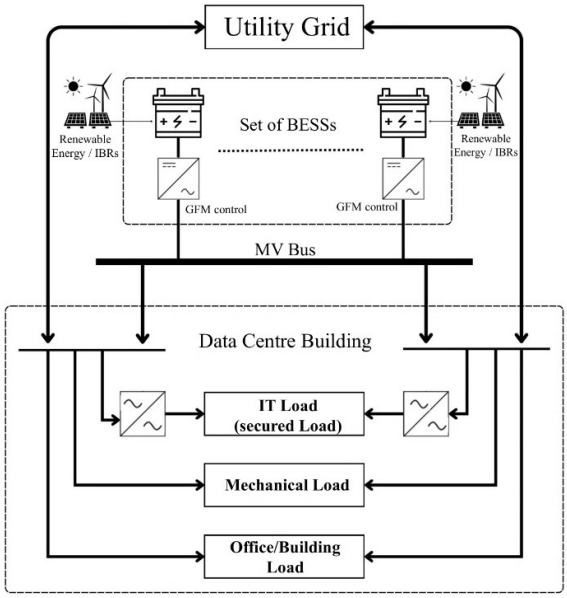


图4。 所提出的基于构网型的数据中心电力架构简化示意图，展示了公用电网与采用构网型控制的电池储能系统之间的双向交互。

为PWM级生成电压参考值 (v_{rd}^*, v_{rq}^*)。前馈补偿 F 和交叉耦合项 $(\pm\omega L_f, \pm\omega C_f)$ 可增强动态响应并降低输出阻抗。设置 $V_{cq}^* = 0$ 可使控制通道解耦，从而由 i_d 控制有功功率，由 i_q 控制无功功率 [19]。

外层功率控制层计算瞬时有功功率和无功功率，计算公式如下：

$$\begin{aligned} P_{meas} &= v_{d,meas} i_{d,meas} + v_{q,meas} i_{q,meas} \\ &\approx v_{d,meas} i_{d,meas}, \\ Q_{meas} &= -v_{d,meas} i_{q,meas} + v_{q,meas} i_{d,meas} \\ &\approx -v_{d,meas} i_{q,meas} \end{aligned} \tag{3}$$

测量量经过截止频率为 ω_p 和 ω_q的低通滤波器滤波。随后，将滤波后的数值应用于由 K_p （频率—功率）和 K_q （电压—无功功率）定义的下垂关系

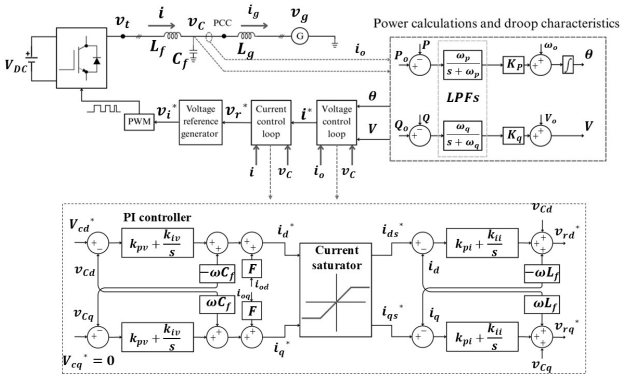


图5。 构网型逆变器的总体控制架构，采用电压-电流双环和下垂特性。

系数，用于生成参考角函数 θ 和电压幅值 V。

这种分层配置可实现频率和电压的自主调节、并网与孤岛模式之间的无缝切换，以及快速惯量支撑和无功功率支撑。通过整定 PI控制器并合理选择物理滤波器元件和电池储能系统的额定容量，变流器还可提供高级电网支撑功能，例如类似STATCOM的无功补偿、参与电网恢复，甚至具备黑启动能力。因此，电池储能系统–构网型结构不仅能稳定电压和频率，还能增强电网整体韧性，以应对大型数据中心负荷动态且不可预测的行为。

IV. 仿真结果与分析

通过开展多种仿真场景，评估并验证所提出集成方案的有效性。本节将讨论这些场景的结果和观察所得。

A. 数据中心有功功率支撑

仿真采用图2所示的负荷曲线，并将其直接连接至电网中压母线。在同一母线上还接入了8个构网型电池储能单元，每个单元的额定功率为5 MW。这些逆变器总容量为40 MW，设计为均分负荷。图6展示了接入这些构网型单元前后电压和频率的变化情况。

如图所示，当数据中心未配备现场电池储能系统、直接由电网供电时，电压会显著下降，且变化趋势与负荷曲线相反。换言之，数据中心电力需求较高时，会增加电流汲取量，从而导致系统中的电压降增大。这类电压偏差可能需要采取纠正措施，例如进行有载分接开关操作，以将电压恢复至可接受水平。然而，当电池储能系统直接在现场为负荷供电时，就无需从电网汲取电流。在这种配置下，数据中心既能满足自身需求，也能为电网提供额外支持。具体而言，在有富余电力时，它可以向电网输送多余电力，或

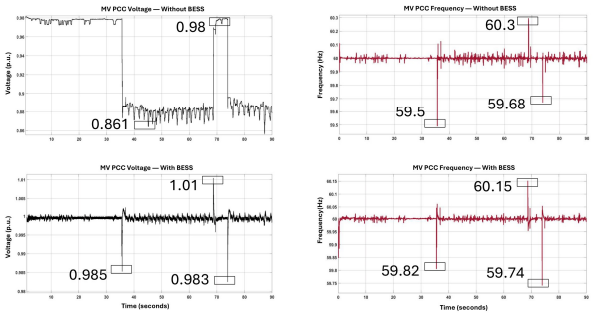


图 6. 数据中心母线的中压公共耦合点电压和频率响应。比较未集成和集成电池储能系

帮助缓解频率下降事件，从而成为主动支撑电网的资源，而非被动负荷和潜在的扰动源。 在这一场景中，构网型控制表现出快速、精准的动态响应，能够在毫秒内有效跟踪数据中心下达的功率参考值，如图 7 所示。所提出的方法已在 Simulink 环境中得到验证；但测量噪声和毫秒级通信延迟等实际因素可能影响暂态性能，仍需进一步研究。每台逆变器均以 5 MW 为基准运行，这种快速响应显著改善了系统频率特性。如图 6 所示，采用构网型电池储能系统后，频率偏差得到缓解：此前，负荷增加期间频率曾降至 59.5 Hz，负荷减少期间则升至 60.3 Hz；采用该系统后，相应频率分别为 59.8 Hz 和 60.15 Hz。

B. 数据中心提供的无功功率支撑与其依赖专用静止同步补偿器来

支撑电网，这些设施还可通过提供 MVAr 级无功功率，在故障条件下发挥作用。为验证这一能力，在距数据中心约两英里的母线上施加了单相接地故障。如图 8 所示，故障于第 13 秒发生，并于第 18 秒切除。故障发生后，附近母线电压随之骤降，构网型电池储能系统根据预设的电压下垂设置，立即注入约 5 MVAr 的无功功率。这一即时响应有效缓解了电压跌落，使电压恢复至可接受的非紧急范围（0.9–1.1 p.u.）。此外，数据中心的 6 MW 负载持续运行，未受中断，仅出现轻微的暂态尖峰；若在仿真模型中纳入不间断电源系统，这些尖峰还会进一步得到抑制。

C. 数据中心脱离电网后如前所述，这些设施可以利用

构网型单元能够在电网断开时实现类似柴油发电机的响应，但动态响应速度显著更快，如图 9 所示。

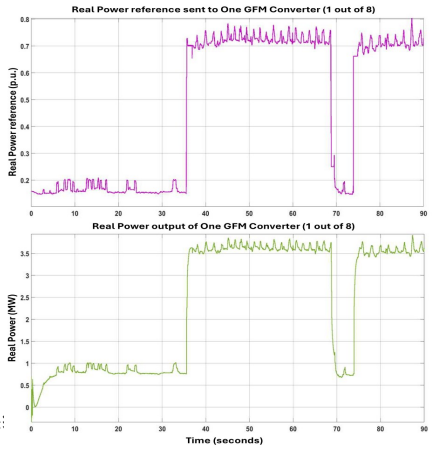


图 7. 数据中心与电池储能系统连接时的有功功率参考值及相应的有功功率输出。

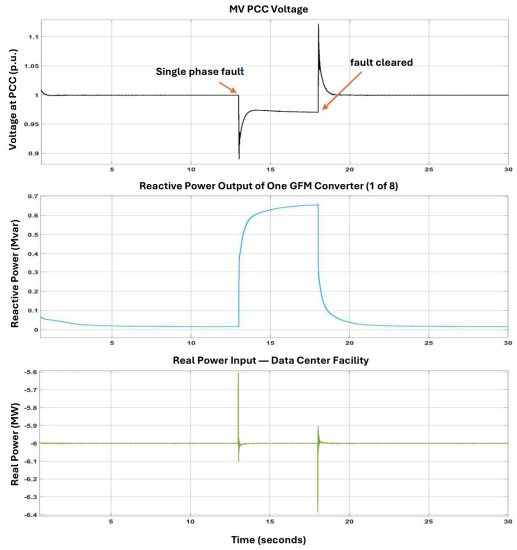


图 8. 故障条件下数据中心设施的中压公共耦合点电压、无功功率输出和有功功率输入。

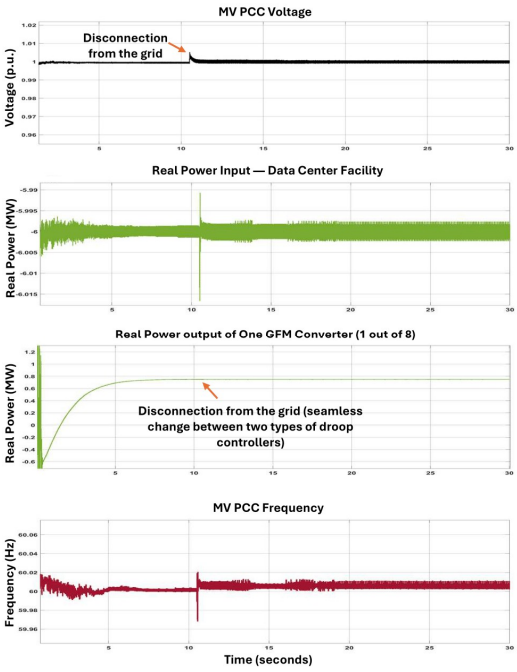


图 9. 孤岛运行前后的中压公共耦合点电压、有功功率输出、数据中心设施的有功功率输入和频率响应。

结果表明，系统可从并网运行无缝切换至独立运行，且电压或频率均未违反限值。此外，在第 10.5 秒发生断开后，数据中心的有功功率需求得到了满足，仅在断开时刻出现了持续数微秒的轻微尖峰。

结论

本研究表明，在数据中心内部集成基于储能的控制，可有效将其从被动负荷转变为主动的电网支撑资源。仿真结果证实，所提架构能够缓解由人工智能驱动的需求变化引起的电压和频率偏差，并在训练和检查点周期期间提供快速的有功功率响应。在故障条件下，系统提供了兆乏级无功支撑，将电压维持在可接受的 0.9–1.1 p.u. 范围内；而在电网断开期间，系统实现了无缝孤岛运行，且未发生供电中断。总体而言，所提集成方案提升了系统可靠性，实现了快速动态响应，并增强了电网韧性。未来的工作将致力于与现有保护系统进行协调，研究其扩展至多个数据中心设施的可行性，并在更广泛的网络条件下进行验证。

References

[1] C. Breyer 等，“关于100%可再生能源系统研究的历史与未来”，IEEE Access，第10卷，第78176–78218页，2022年。[2]《西部互联系统大型负荷并网风险评估》，西部电力协调委员会，美国犹他州盐湖城，2024年。[3] C. Cox、A. Schwartz 和 D. Stenclik，《将数据中心灵活性纳入资源充足性规划：NV Energy案例研究》，GridLab 和 Telos Energy，美国华盛顿特区，2025年。[4] G. J. Soto 等，《以清洁能源为数据中心供电：核能与可再生能源可靠性的技术经济案例研究》，爱达荷国家实验室，美国爱达荷州爱达荷福尔斯，2024年。[5] R. Quint、K. Thomas、J. Zhao、A. Isaacs 和 C. Baker，《大型负荷并网的实用指南与注意事项》，Elevate Energy Consulting，美国华盛顿特区，2025年。[6]《新兴大型负荷的特征与风险》，北美电力可靠性公司，美国佐治亚州亚特兰大，2025年7月。[7]《2024年电力年报》，美国能源部，美国华盛顿特区，2024年。[8] A. Young，“到2030年数据中心能源需求将增至三倍”，Avison Young，美国伊利诺伊州芝加哥，2024年11月13日。[9] Y. Abudyak、M. H. Rezaei、I. Batarseh、H. S. Rizi 和 A. Q. Huang，“构网型控制：利用安德罗诺夫–霍普夫振荡器动态与无滤波器下垂特性”，载于《第50届IEEE工业电子学会年会论文集》（IECON），2024年，第1–6页。[10] V. Kambhampati、A. van den Dobbelsteen 和 J. Schild，“超越柴油发电机：探索数据中心的可再生能源备用方案”，《物理学杂志：会议系列》，第2929卷，第1期，文章编号012008，2024年。[11] A. Alassi、Z. Feng、K. Ahmed、M. Syed、A. Egea-Alvarez 和 C. Foote，“用于黑启动应用的构网型虚拟同步机控制及实验性功率硬件在环验证”，《国际电力与能源系统电气杂志》，第151卷，文章编号109119，2023年。[12] Y. Li、Y. Gu 和 T. C. Green，“重新审视构网型与跟网型逆变器：对偶理论”，《IEEE电力系统汇刊》，第37卷，第6期，第4541–4554页，2022年11月。[13] D. Patel、J. E. Ontiveros 和 D. Nishball，“数据中心结构：电气基础设施”，SemiAnalysis Newsletter，2024年10月14日。[14] W. Youssef、A. Rajewski、M. Megdiche 和 J. Kerttula，《将天然气发动机发电机应用于超大规模数据中心》，法国吕埃-马迈松，2020年。[15]《数据中心等级如何分类，为什么重要？》，Prasa Infocom，2021年6月29日。[16] J. K. Schwarzkopf 和 M. Walti，《电池储能系统与STATCOM的黑启动服务控制》，2024年。[17] J. Conzen、S. Lakshmipathy、A. Kapahi、S. Kraft 和 M. DiDomizio，“锂离子电池储能系统（BESS）的危害”，《过程工业损失预防杂志》，第81卷，文章编号104932，2023年。[18] Z. Skidmore，“下一步是什么？如何最好地利用数据中心领域的电池？”，Data Centre Dynamics，2023年9月3日。[19] Y. Abudyak、M. H. Rezaei、A. A. B. Abdelnabi、H. S. Rizi、I. Batarseh 和 A. Q. Huang，“构网型逆变器综述：控制、稳定性，以及结合人工智能和数字孪生的下一阶段”，《IEEE开放获取电力电子学杂志》，第7卷，第351–387页，2026年。