

基于光储协同的变电站站用电源系统关键技术与发展综述

张晨明¹, 黄煜¹, 何大瑞², 胡松林^{1*}

¹ 南京邮电大学碳中和先进技术研究院 江苏南京

² 江苏省电力公司电力经济技术研究院 江苏南京

【摘要】随着“双碳”目标和分布式新能源大规模并网的推进, 基于光伏发电与储能协同的光储一体化微电网, 作为变电站的站用电源自治供电系统, 正逐步成为提升站用负荷供电可靠性与系统韧性的关键路径。该模式通过源—荷—储闭环耦合, 将本地光伏发电与储能系统有机结合, 既实现了功率“削峰填谷”, 又通过虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 控制与模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 策略保障频率和电压的动态稳定。智能化能量管理系统 (Energy Management System, EMS) 可根据光伏出力预测与负荷优先级, 实时优化储能充放电, 快速响应孤岛、并网及故障切换等多种运行场景。展望未来, 边缘智能控制、多类型混合储能及高性能电力电子变换技术的应用, 将进一步提升微电网的自主调节能力和经济性, 为新型电力系统的绿色、智能升级提供有力支撑。

【关键词】微电网; 光伏波动性; 储能系统; 智能调度

【收稿日期】2025 年 2 月 20 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250080

Key technologies and development overview of substation station power supply system based on photovoltaic-storage coordination

Chenming Zhang¹, Yu Huang¹, Darui He², Songlin Hu^{1*}

¹Institute of Advanced Technology for Carbon Neutrality, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

²State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic and Technical Research Institute, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】With the advancement of the “dual carbon” goals and the large-scale integration of distributed renewable energy, PV-storage integrated microgrids—serving as autonomous station power supply systems for substations—are gradually becoming a key approach to enhancing the reliability and resilience of station service power supply. This model achieves a closed-loop coupling of source, load, and storage by organically integrating local photovoltaic generation and energy storage systems, enabling both peak shaving and valley filling, as well as dynamic stability of frequency and voltage through Virtual Synchronous Generator (VSG) control and Model Predictive Control (MPC) strategies. An intelligent Energy Management System (EMS) leverages PV output forecasting and load prioritization to optimize real-time charging and discharging of storage, enabling rapid response to islanded, grid-connected, and fault conditions. Looking ahead, the application of edge-intelligent control, hybrid energy storage, and high-performance power electronic conversion technologies will further enhance the self-regulation and economic performance of station power supply systems, providing robust support for the green and intelligent upgrading of modern power systems.

【Keywords】Microgrid; Photovoltaic variability; Energy storage system; Intelligent scheduling

1 前言

在“双碳”战略全面推进背景下, 传统以化石

能源为主导的供电体系正逐步向清洁低碳、多元协同的新型电力系统转型^[1]。光伏发电作为最具代表

*通讯作者: 胡松林

性的可再生能源之一, 因其绿色、分布式、可扩展等特性, 被广泛部署于配用电系统各层级, 成为推动源网荷协同发展的关键支点^[2]。与此同时, 伴随能源终端用电负荷呈现出高密度、数字化、多时变等特征, 系统对本地供能的弹性、自适应能力及稳定性提出了更高要求^[3]。

变电站作为电网运行的重要节点, 其内部通信、测控、风机、空调等站用负荷对供电连续性和电能质量具有极高依赖。传统站用电源依赖市电与柴油机双回路备电方案, 但市电中断风险和柴油发电的维护复杂性与高碳排放问题日益突出, 难以满足现代电力系统对“高可靠、低碳化、可自治”的要求。因此, 构建以本地光伏为主、储能系统为辅的自产自销型微电网结构, 为变电站实现绿色供电与独立运行提供了全新路径^[4]。该模式下, 系统通过光伏就地发电、储能系统缓冲调节, 构成源—荷—储闭环耦合结构, 不依赖主网电力输入, 也不向外馈电, 具备典型的孤岛运行、自主调节与能量自平衡能力。

然而, 该类微电网系统在面向实际工程部署时仍面临多重技术挑战。其一, 光伏发电受气象条件影响大, 出力呈现强不确定性和多时间尺度波动, 易引发系统频率扰动、电压波动和功率失衡, 尤其在主网脱离后系统惯性支撑缺失, 稳定运行压力显著上升。其二, 储能系统需在响应速度、容量配置和充放电策略上全面适配光伏波动特征与负荷侧需求, 构建覆盖“秒—分钟—小时”全时域的能量调节能力。其三, 微电网内部各负荷单元运行等级分明、负荷变动频繁, 如何通过分层协同控制与智能化 EMS 实现快速调度响应与多场景模式切换, 是提升系统运行韧性与经济性的关键。

当前, 已有诸多研究围绕光储微电网展开探索, 涵盖储能选型、调度策略、频压控制、经济评估等方面, 但针对以变电站为核心载体的独立微电网场景, 系统聚焦于波动影响、储能支撑机制与协同控制策略的综述性研究仍相对有限, 缺乏面向工程可实施性的系统框架与路径归纳。

因此, 本文立足于变电站站用负荷独立供电需求, 围绕高比例光伏接入下的微电网运行问题展开综述。

2 光伏波动性特征与微电网稳定性挑战

光伏发电作为典型的间歇性可再生能源, 其出

力功率高度依赖太阳辐射、环境温度及云层覆盖等气象因素, 具有天然的非平稳性与强随机性。相比传统可控能源, 光伏出力在时间和空间尺度上都表现出复杂的波动模式, 尤其在源网侧调节资源受限的孤岛型微电网中, 其波动性将直接影响系统稳定性与功率供需平衡。

2.1 多时间尺度波动特征

光伏发电输出功率具有显著的多时间尺度复合波动特性, 通常可分为超短期(小于 10 秒)、短周期(10 秒至 10 分钟)和中长期(日内及季节性)等不同类型。超短期波动主要由云影快速穿行、风速突变等气象因素引起, 表现为秒级功率抖动, 显著影响微电网的频率变化率, 需依赖毫秒级响应能力的储能系统进行即时平滑^[5]。短周期波动多源于云团遮挡和阴晴转换, 会导致 PV 阵列输出功率不稳定, 引发母线电压起伏与控制器频繁干扰。中长期波动则由日照路径、季节气候演化等因素主导, 对储能充放电策略与系统运行调度提出更高要求。特别是在无主网支撑的独立运行微网中, 这些不同时间尺度的波动未能经过主网“惯性缓冲”机制处理, 直接作用于站内供电侧, 造成频率、电压及电流的动态扰动, 对系统运行稳定性带来持续性冲击^[6]。

2.2 微电网运行稳定性的影响机制

在封闭型微电网结构中, 光伏出力的随机波动将对系统运行的多个维度构成显著影响, 主要表现在频率、电压、功率平衡和电能质量等方面。首先, 在频率稳定性方面, 由于光伏逆变器本质上为静态电源, 不具备旋转惯量, 其出力突升或突降时难以提供惯性缓冲, 从而引发系统频率的剧烈波动。特别是在负荷无法快速跟随变化的情形下, 频率过冲或下跌极易触发继电保护, 甚至导致关键负荷脱网。在无储能系统惯量模拟支撑的条件下, 频率偏移响应滞后、恢复缓慢, 系统稳定性大幅下降^[7]。

其次, 光伏系统通过逆变器接入微电网, 其输出电压受调制方式和并网点电压波动的共同影响, 极易在光照剧变时诱发母线电压扰动, 表现为过压、欠压或闪变现象。对于通信、空调、监控等对电压稳定性要求较高的站用负荷而言, 这类波动将显著降低其运行可靠性。此外, 光伏发电具有典型的“午高晨晚低”日变特性, 与用电负荷的实际变化趋势存在时间错配。在孤岛运行模式下, 若储能系统未

及时介入调节, 微电网将频繁出现“日中过剩、晨晚短缺”的功率失衡现象, 影响系统对负荷的连续支撑能力。

最后, 光伏逆变器运行过程常伴随高频谐波注入, 尤其在多个阵列并联运行时, 波形畸变效应显著增强, 可能对继保、测控等电气敏感设备产生干扰^[8]。此外, 由于微电网短路容量相对较小, 电压支撑能力有限, 在面对冲击负荷或大功率设备频繁启停时, 系统更易出现压降与稳态波动, 进一步加剧电能质量问题。因此, 在无主网支撑的封闭型微电网中, 光伏出力的不确定性与电力系统的低惯量、高耦合特性共同作用, 使得系统对波动扰动的承受能力明显降低, 对调节资源与控制策略提出了更高要求。

3 储能系统的关键作用与技术机制

针对光伏发电出力波动对封闭型微电网运行稳定性产生的严峻挑战, 储能系统因其快速动态响应能力、双向功率调节特性以及良好的适应性, 已成为提升微电网运行稳定性与可靠性的关键技术支撑。特别是在变电站自主运行的微电网环境中, 储能系统的技术性能直接决定了系统对光伏波动的适应能力, 以及对站内重要负荷的连续供电能力。

3.1 功率平滑与能量缓冲

储能系统的基本功能是对光伏发电的功率波动实施有效的平滑与缓冲。光伏出力瞬时波动可能直接破坏微电网的源荷功率平衡, 通过快速的能量吸收或释放, 储能系统能够有效抑制这种波动, 实现功率的“削峰填谷”。例如, 当光伏出力剧烈升高导致电压频率快速上升时, 储能迅速充电以缓解过剩能量; 而当光伏出力骤减引发功率不足时, 储能则迅速放电补偿缺口, 以维持电网频率和电压的稳定。

在实际工程设计过程中, 通常基于光伏历史出力与负荷需求的功率差值特性, 进行储能容量和功率的优化配置, 以确保在各种工况下实现最佳的能量调节与经济运行效果。

3.2 电压频率支撑与动态稳定增强

在微电网孤岛或弱网环境运行中, 储能系统对频率与电压稳定具有至关重要的支撑作用。利用VSG技术的储能逆变器, 通过在内部模拟传统同步发电机的惯性与阻尼特性, 能够主动提供虚拟惯量

支撑, 有效抑制由于光伏波动或负荷变化造成的频率电压扰动, 降低系统频率变化率与电压波动幅度。

同时, 结合频率下垂控制与无功功率分配机制, 储能系统能够实现有功和无功功率的自适应调节, 使多个储能单元之间协调运行, 进一步提高微电网的稳定性与鲁棒性。

3.3 无功支撑、谐波抑制与电能质量保障

储能系统通过先进的电力电子变换器与微电网连接, 不仅具备双向的有功功率调节能力, 还能灵活提供无功功率支撑和谐波抑制。在光伏或负荷变化引起母线电压波动时, 储能系统迅速响应, 通过吸收或发出无功功率, 实现电压的快速稳定。此外, 储能变流器还可利用有源滤波技术, 实时补偿微电网内的谐波电流, 降低谐波干扰, 确保敏感设备的稳定运行与电能质量的提高。

同时, 储能逆变器可结合有源滤波技术, 通过主动发出与电网谐波相反的补偿电流, 实现谐波的实时抑制^[9]。这种谐波治理能力对于保障变电站站内继电保护、通信设备和自动化系统等敏感负荷的安全稳定运行意义重大。此外, 储能系统还能通过负载功率精细管理、优先级负荷动态保障机制, 实现不同重要等级负荷的差异化供电策略, 从而在扰动情境下快速恢复重要负荷运行, 提升微电网整体韧性。

3.4 不同储能技术特性比较与混合储能系统应用

储能技术在微电网中的选型至关重要, 不同储能介质在能量密度、功率密度、响应速度、循环寿命等性能指标上存在明显差异。目前, 微电网储能系统应用最广泛的为锂离子电池, 其具备高能量密度、较好的循环寿命、成熟的管理技术等优势, 广泛应用于长时段能量调节与日负荷稳定保障场景。

而超级电容因其具有极高的功率密度和毫秒级快速响应能力, 特别适合对短时频率和电压扰动进行瞬时调节。近年来兴起的混合储能技术将锂离子电池与超级电容等不同特性储能单元有机结合, 实现了稳态运行与瞬态响应的协同优化^[10]。具体实施方式为: 锂电池负责平滑中长期功率波动、保障日内储能平衡; 超级电容负责快速响应秒级动态扰动, 提供高瞬态功率支撑。混合储能架构可有效提升微电网对高频、剧烈波动的综合应对能力, 已成为微

电网储能配置的重要趋势之一。

4 光储系统的协同控制与运行策略

光伏-储能系统的高效协同控制与调度策略是提升变电站微电网运行稳定性、可靠性与经济性的关键。由于变电站微电网以本地光伏发电为主导、储能系统作为重要调节资源,两者间的协调与控制性能直接决定系统对站用多类负荷(通信设备、自动化系统、空调、风机、照明等)的供电连续性与质量保障能力。因此,建立精准、高效的光储协同控制与运行调度体系具有重大工程价值和理论意义。

4.1 分层协同控制体系结构

为实现对站内多类型负荷的精细快速响应,光储微电网通常采用分层协同控制结构,包括实时控制层、能量管理层和感知决策层。实时控制层负责实现毫秒至秒级的快速动态响应,光伏侧通常实施最大功率点跟踪控制;储能侧则利用电压频率下垂或 VSG 控制策略,实现频率电压的实时动态支撑。能量管理层以 EMS 为核心,统筹监测储能状态(State of Charge, SOC)与负荷需求,实施储能系统的优化充放电调度。感知决策层依托综合监测和大数据分析平台,实时感知负荷需求与运行状态变化,智能调整系统运行模式和参数,实现系统运行的高效自适应管理。

该分层控制结构清晰地实现了控制逻辑解耦,显著提高了系统对负荷多样性、需求动态性和故障恢复能力的响应效率,为站内关键负荷持续安全供电提供了有效保障。

4.2 短期预测驱动的能量调度机制

考虑到光伏发电出力波动和负荷需求的不确定性,采用以 MPC 为代表的预测控制策略,可显著提升系统对短期波动的适应能力。具体而言, MPC 以短期(10 分钟至数小时)的光伏出力与负荷需求预测为输入,采用滚动优化方式实时计算储能系统最优充放电路径,从而实现对储能状态的精准控制与功率的高效分配。

在实际运行场景中,例如中午光照充足、负荷较低的时段,系统将主动充电储存过剩电能;而晚间负荷高峰期,则根据负荷优先级与储能状态合理放电,优先保障关键负荷的稳定运行。为实现这一目标, EMS 将通信设备、自动化终端、核心监控系统划分为最高优先级,次级负荷则进行灵活的功率柔性管理,

确保整体系统的运行经济性与供电连续性。

4.3 多运行状态下的自适应调控机制

为有效应对实际运行中可能出现的并网、孤岛、再并网和故障恢复等不同状态,微电网需要具备实时的状态识别和灵活的策略切换能力。系统可通过建立负荷变化速率、储能 SOC 阈值、频率电压偏差幅度等关键指标,迅速识别当前运行状态并实时调整控制策略。

例如,系统进入孤岛运行模式时,储能逆变器快速切换到恒压恒频控制模式,以维持系统频率与电压稳定;光伏侧则采取功率最大化跟踪模式。同时,一旦监测到可能出现的功率短缺或储能电量不足,系统立即启动优先级负荷管理策略,迅速隔离或降低次级负荷的功率供应,确保通信设备与自动化监控等关键负荷的供电安全,显著提高系统的韧性与故障恢复能力。

4.4 基于智能算法的协同调度优化

随着变电站微电网内部结构复杂性与运行数据量逐渐增大,传统规则式调度策略已难以满足实时性与最优性的要求。近年来,强化学习、遗传算法、粒子群优化等人工智能优化方法逐步应用于微电网调度控制系统中。这些智能算法无需依赖严格的物理模型,通过历史运行数据的深度挖掘、自适应策略迭代,可动态实现系统状态最优调度。

具体而言,系统可建立多目标优化模型(如“负荷供电连续性最优”、“储能寿命损耗最小化”、“光伏利用率最大化”),并以负荷等级划分、SOC 实时监测、电压频率约束等为运行约束,通过智能算法实时调整储能充放电控制策略,提升微电网对光伏波动与负荷变化的实时响应能力与整体运行效率^[1]。这种数据驱动的智能调度方式不仅提高了系统运行的经济性,也显著增强了微电网在高度不确定运行环境中的抗扰动能力。

综上所述,建立多层协同、预测驱动、自适应调控与智能优化的光储系统控制与运行机制,是确保变电站微电网在孤岛或封闭运行模式下实现长期稳定可靠运行的重要路径。随着技术的深入发展,该控制体系将为变电站微电网的广泛应用与深入部署提供强大的技术支撑。

5 未来技术趋势与挑战展望

面向以变电站为核心载体的光储微电网未来发

展,随着新能源渗透率的不断提升以及对能源自给、运行韧性要求的提高,系统架构与控制策略将朝着更高智能化、更强适应性和更广泛适用性的方向加速发展^[12]。同时,随之而来的多重挑战也要求相关技术进一步升级与迭代,以实现安全、稳定、高效的自主运行目标。

5.1 边缘智能与自主优化控制的深度融合

随着变电站微电网规模的扩大与结构复杂化,传统的集中式控制架构将难以满足系统对快速响应和实时决策的要求。未来微电网控制将逐渐向边缘计算与自主智能方向发展,形成基于现场设备的分布式决策网络。具体体现在储能逆变器、光伏控制器等现场装置中集成边缘智能单元,通过实时感知、智能分析与自主决策,降低对远程通信的依赖,提升系统故障恢复能力和快速响应性能。

强化学习、多智能体协同控制等人工智能算法将广泛应用于边缘智能节点,具备自学习与策略迭代功能,可根据系统运行历史数据与实时状态变化,自适应优化控制策略。未来微电网控制系统将能够实时调整控制参数,主动应对突发负荷波动、光伏出力剧变或设备故障事件,显著提升系统运行韧性与经济效益。然而,这也对现场设备算力、算法高效性与数据安全性提出更高要求,如何高效地实现智能算法的轻量化和可靠部署仍是关键挑战之一。

5.2 储能系统融合发展与变换装置多功能集成

为满足微电网对多时间尺度、多场景运行的复杂需求,未来储能系统将呈现多类型储能技术融合化的发展趋势。通过将锂离子电池、超级电容器、液流电池、钠离子电池等不同储能介质集成优化,实现短期功率支撑、中期能量搬移和长期能量储备的协同优化。这种多元化储能融合结构可以同时兼顾系统对快速响应、高功率输出及大容量储能的不同需求,有效提高系统运行的经济性与可靠性。

与此同时,高性能电力电子器件与多功能变换装置的技术升级将显著增强微电网的供电性能。宽禁带功率半导体器件(如碳化硅、氮化镓)的推广使用,将提升变换效率、减小能量损耗并提高功率密度。新型逆变器将逐步集成多功能控制模块,包括虚拟惯量支撑、有源谐波抑制、无功功率快速动态调节等^[13],进一步提升微电网的电能质量与运行稳定性。同时,交直流混联拓扑、双向高频功率变换等

技术的成熟将有效优化系统结构,提高系统对复杂负荷组合与功率流路径的灵活控制能力^[14]。

然而,多储能融合下的系统协调控制复杂性显著增加,多功能变换器集成下的可靠性管理亦需深入探索。如何建立高效且可靠的协调控制策略,并降低设备故障率与运行维护成本,是未来亟需解决的重要问题^[15]。

5.3 多源能量协同管理与自适应能量调度技术演进

未来光储微电网 EMS 将从传统单一控制功能逐渐演化为支持多源协同、自适应优化与智能决策的能量调度平台。EMS 将实时感知光伏发电、储能状态、负荷需求、系统健康度等多维数据,并在此基础上,动态地优化调度策略,实现微电网的经济运行与安全稳定的协调统一。

未来 EMS 平台将具备模型自更新与策略自优化能力,融合预测控制、大数据分析、机器学习、模糊决策等先进算法,实现多目标的优化运行。系统将能够实时评估储能单元的健康状态、精确预测光伏出力与负荷趋势,自主规划储能充放电曲线,自动匹配最佳的负荷调度策略,以最大限度提高微电网运行经济性与资源利用效率。

同时,随着微电网应用场景的拓展,系统边界将逐步扩展至多微网互联或区域能源网络集群,实现更大范围内的能量协调和优化配置。由此带来的跨网数据共享、能源协调机制与安全控制问题也将逐渐显现,如何保障数据安全与互联运行稳定性,将成为下一阶段的重要研究挑战。

6 结语

在能源结构转型与“双碳”目标加速推进的背景下,光伏发电与储能技术协同构建的变电站自主微电网,已成为提升电网运行韧性、保障关键负荷可靠供电的重要技术路径。本文综述了微电网中光伏出力的多时间尺度波动特征及其对电网稳定性的影响,深入分析了储能系统在功率平滑、频率电压支撑及电能质量保障方面的关键作用,首次将 VSG-MPC-EMS 协同控制机制明确应用于变电站站用微电网场景的综述研究中,提出了以分层协同控制、预测驱动调度、自适应运行策略与智能优化调度为核心的光储协同技术框架,凸显了储能系统和智能调度策略在提升微电网自主运行性能上的显著优势。

研究表明,在封闭型微电网运行模式下,光伏波动对系统频率、电压和功率平衡产生的影响尤为突出。储能系统作为核心动态调节资源,结合VSG控制、MPC及智能算法优化的EMS,可有效缓解波动扰动,增强系统对不确定性的适应能力,显著提升系统运行稳定性与经济性。

面向未来,微电网系统的技术发展将聚焦于边缘智能控制、多储能融合与高性能功率变换技术以及多源协同自适应能量管理平台的构建。但储能安全与寿命管理、智能算法高效部署、多微网协调机制及政策标准化等问题仍需进一步深入研究与突破。

以光伏发电与储能系统协同运行的变电站微电网,对于推动电力系统低碳化转型、提高终端能源自主性具有重要的理论与工程意义。未来需持续围绕技术研发与实践应用深化研究,推动微电网技术更广泛地部署与应用。

参考文献

- [1] 张立杰,李晓华,高比例可再生能源接入下的电力系统规划研究[J]. 管理科学学报,2023,36(2):87-100.
- [2] 王小东,高艳. 将可再生能源纳入中国电力系统:技术入门[J]. 中国电力建筑,2023,37(4):14-22.
- [3] 王明,赵红艳. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电力系统技术, 2023,47(5):1741-1750.
- [4] 孙强,王倩. 需求侧光储一体化微电网的应用研究[J]. 现代电力系统与清洁能源,2021,37(9):29-36.
- [5] 刘卫,陈晓,杨志强. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智能电网与数字化,2022,4(6):52-59.
- [6] 肖强,陈雷. 电力系统直面新能源高比例并网挑战[J]. 电网技术,2020,44(11):105-112.
- [7] 李军,何琳. 孤岛直流微电网的光储协调控制策略[J]. 电力系统自动化设备,2021,41(12):44-50.
- [8] 周钰,张浩,陈锐,等. 直流微电网控制保护策略研究[J]. 南方能源建设,2020,7(4):61-66.
- [9] 林聪,李湘峰,郭芳. 直流微电网的故障电流控制器研究[J]. 南方能源建设,2023,10(5):50-56.
- [10] 张宇,王洪希,王璞. 交直流混合微电网互联变流器微分平坦控制 [J]. 中国电力,2022,55(7):102-109,120.
- [11] 李建,孙燕. 光储微网系统多目标协调控制策略[J]. 电工技术与应用,2021,40(19):4010-4018.
- [12] 贺克斌. 大规模提高可再生能源比例需要全球协作应对三大挑战[J]. 世界能源,2023,46(12):8-15.
- [13] 赵鹏,刘晓光. 基于平坦理论的直流微电网双向 DC-DC 变换器改进滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(8):72-80.
- [14] 周明志,李文静. 交直流混合微电网互联变换器功率流动的柔性控制策略[J]. 电气自动化学报,2021,37(3):115-123.
- [15] 张勇,李超. 构建新型电力系统对电网的挑战与成本研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):23-31.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS