

构网型储能电站提升电力系统稳定性的关键技术与应用分析

王涛

身份证号: 140321198305172715

中国能源建设集团山西电力建设有限公司, 山西 太原 030000

摘要: 随着新能源在电力系统中占比的不断攀升, 其固有的波动性、间歇性及缺乏惯性等特性, 给电力系统的稳定性带来了严峻挑战。构网型储能电站凭借主动支撑电网的卓越能力, 成为解决这些问题的关键技术手段。本文深入剖析构网型储能电站提升电力系统稳定性的关键技术, 涵盖频率主动支撑、电压主动支撑、故障穿越等技术, 并对其在不同场景中的应用展开探讨, 旨在为推动构网型储能技术的广泛应用与电力系统的稳定运行提供理论依据与实践指导。

关键词: 构网型储能电站; 电力系统稳定性; 关键技术; 应用分析

Key Technologies and Application Analysis of Grid-forming Energy Storage Power Stations for Improving Power System Stability

Wang Tao

ID: 140321198305172715

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi 030000

Abstract: With the increasing proportion of renewable energy in the power system, its inherent characteristics such as volatility, intermittency, and lack of inertia pose serious challenges to the stability of the power system. Grid-forming energy storage power stations, with their excellent ability to actively support the power grid, have become key technical means to address these issues. This paper deeply analyzes the key technologies of grid-forming energy storage power stations to improve the stability of the power system, including frequency active support, voltage active support, and fault ride-through technologies. It also explores their applications in different scenarios, aiming to provide theoretical basis and practical guidance for promoting the widespread application of grid-forming energy storage technology and the stable operation of the power system.

Keywords: grid-forming energy storage power station; power system stability; key technology; application analysis

引言

在常规储能系统加装构网型装置并采用相关控制技术, 使其具备类似同步发电机的电压控制和频率调节能力, 进而形成构网型储能系统, 本质上还是通过构网型逆变器构建起支撑电网安全稳定运行的电压源, 以起到快速调频调压、增加短路容量支撑以及抑制宽频振荡等作用。目前, 国内已有多地提出强制或鼓励新能源项目配置构网型储能的要求。其电站具独立电压源特性, 可主动调节电网电压、频率, 故障时提供紧急功率支撑, 模拟同步发电机运行, 多方面提升电力系统稳定性, 研究其关键技术与应用意义重大。

一、构网型储能电站提升电力系统稳定性的关键技术

(一) 频率主动支撑技术

通过大量的仿真研究以及实际项目测试可知, 在频率阶跃/斜坡扰动下, 构网型储能展现出了出色的频率调节能力。它能够电网频率偏差精准控制在 $\pm 0.1\text{Hz}$ 以内, 并且响应速度极快, 快至 50ms , 这一性能指标显著优于传统下垂控制方式^[1]。例如,

在某实际新能源电站项目中, 引入构网型储能并采用虚拟同步机控制技术后, 在经历多次频率阶跃扰动时, 电网频率始终保持在极为稳定的范围内, 有效保障了电站内各类设备的正常运行, 避免了因频率波动过大而导致的设备故障或停机风险。这种快速且精准的频率调节能力, 对于维持电力系统的稳定运行至关重要, 能够有效减少因频率不稳定而引发的一系列问题, 如设备寿命缩短、电能质量下降等^[2]。

（二）电压主动支撑技术

构网型储能电站通过恒无功控制（Q-PreSet）和恒电压控制（U-Control）两种模式实现电压主动支撑。在恒无功控制模式下，储能变流器会强制执行预设的无功目标，以此精准调节局部电压。当电网中某区域电压出现偏差，储能电站依据预设的无功功率值，向该区域注入或吸收无功功率，进而调整电压。而恒电压控制模式基于自动电压调节（AVC）策略，与电网无功需求动态匹配^[9]。储能电站实时监测电网电压，根据电压变化自动调整无功输出，维持电网电压稳定。在实际应用里，这两种控制模式能根据电网具体情况灵活切换。在电压跌落30%的极端工况下，构网型储能可瞬间释放2~3倍额定无功功率，1秒内将电压恢复至90%标称值，有效防止电压崩溃，保障电力系统的电压稳定性。

为了更有效地应对电网电压的快速变化，构网型储能电站采用无功功率快速响应技术。该技术借助储能变流器的快速开关特性，能在极短时间内实现无功功率的快速调节。当电网发生故障或出现电压突变，储能电站可在几毫秒内快速调整无功输出，为电网提供强大的无功支撑。比如在电网发生短路故障，电压瞬间下降时，无功功率快速响应技术可使构网型储能电站在10ms内输出最大三倍额定电流大小的无功支撑电流，接近同步调相机的电压支撑能力，迅速稳定电网电压，减少故障对电力系统的影响范围和持续时间，提高电力系统的故障穿越能力和电压稳定性^[4]。

（三）故障穿越技术

当电网发生短路或过流等故障时，构网型储能电站在跟网切换（GFL模式）与虚拟阻抗控制这两种策略间灵活切换。在跟网切换模式下，一旦故障电流超限时，储能变流器会迅速切换至电流源模式，以此避免设备损坏。虚拟阻抗控制则通过等效串联阻抗来限制短路电流，维持电压源特性^[9]。在20%电压跌落场景中，该策略能将故障穿越时间缩短至100ms，过流风险降低70%。凭借这种灵活的切换机制，构网型储能电站在电网故障时，不仅能保持自身稳定运行，还能为电网提供必要支撑，助力电网快速恢复正常运行状态，提升电力系统的整体稳定性和可靠性。

快速自恢复控制技术是构网型储能电站在故障后实现稳定性恢复的关键所在。当电网故障消除后，储能电站需要快速调整自身状态，重回正常运行模式，并再度为电网提供稳定支撑。快速自恢复控制技术可使储能电站在极短时间内完成状态切换和参数调整。它实时监测电网状态并快速分析，自动判断故障是否消除，确认故障消除后，迅速启动储能变流器的恢复程序，对输出功率、电压和频率等参数进行调整，使其契合电网需求。在一些实际项目中，运用快速自恢复控制技术的构网型储能电站，能在电网故障消除后的数秒内恢复正常运行，为电力系统的快速稳定恢复提供了坚实保障^[6]。

二、构网型储能电站在电力系统中的应用场景分析

（一）新能源电站场景

在新能源电站范畴，构网型储能所发挥的“稳定器”效用极为关键。以风电场和光伏电站作为典型实例，风能和太阳能自身

具备的间歇性与波动性特质，致使其发电功率呈现出显著的不稳定态势，这无疑给电网接入工作增添了诸多难题。构网型储能凭借其特有的功能，能够对输出功率波动予以有效平滑处理，进而切实平抑风力发电与光伏发电的间歇性和波动性问题。当风力强度出现骤然变化，或是光照强度因天气等因素而产生波动，导致发电功率随之起伏时，构网型储能能够迅速做出反应。在发电功率过剩阶段，及时将多余电能存储起来；而在发电功率不足之际，则适时释放此前存储的电能。如此一来，新能源电站输出至电网的功率得以更为平稳，有力推动了可再生能源并网比例的提升^[7]。

同时，构网型储能在无功支持方面同样表现出色，能够显著改善电网的功率因数状况。在电力传输过程中，合适的功率因数对于降低线路损耗、提升电力传输效率至关重要。构网型储能通过向电网注入或吸收无功功率，使得电网的功率因数维持在合理区间，进一步增强了电网的稳定性。

（二）电网侧场景

在电网侧，构网型储能具有多重重要应用。一方面，它可以提供调频、调压、调峰等多种电网辅助服务，成为电网频率和电压稳定的有力支撑。在电网负荷发生变化时，构网型储能能够快速响应，通过调节自身的充放电状态，参与电网的频率和电压调节，维持电网的稳定运行^[9]。例如，在用电高峰时段，电网负荷增加，频率和电压可能下降，构网型储能可迅速放电，补充电网的功率缺额，提升频率和电压；在用电低谷时段，电网负荷减少，频率和电压可能上升，构网型储能则进行充电，吸收多余的电能，稳定频率和电压。另一方面，在特高压线路受端、负荷中心电源空心化区域等场景，构网型储能可以增强系统的灵活调节和可靠运行能力。这些区域面临着电力供应紧张、电网稳定性差等问题，构网型储能的接入能有效缓解这些问题，提高电网的供电可靠性和稳定性。

（三）微电网与分布式能源系统场景

在微电网和分布式能源系统中，构网型储能占据不可替代的核心地位，作为核心控制单元，为系统提供可靠备用电源保障。这类系统受恶劣天气、自然灾害及设备故障等因素影响，存在与主电网解列风险。如偏远海岛海底电缆易因恶劣天气受损，山区输电线路可能因自然灾害中断。此时，构网型储能能瞬间切换至独立运行模式，承担起为医院、通信基站等关键负荷持续供电的重任，保障居民基本生活用电，确保供电稳定性与连续性^[9]。

同时，构网型储能在能源优化配置与高效利用方面发挥关键作用。它实时监测系统内能源的产生与消耗情况，依数据分析合理安排充放电时机与容量。能源过剩时存储电能，本地能源供应不足且处于消耗高峰时释放电能，实现精细化能源管理。这显著提升系统自给自足能力，降低对外部能源的依赖程度，增强系统可靠性，有力推动微电网与分布式能源系统的稳定、可持续发展。

三、构网型储能电站的容量配置与优化

（一）电网功率支撑需求分析

随着新能源在电力系统中占比的不断增加，电力系统的惯性

显著下降,导致频率调节难度加大,对构网型储能的需求日益迫切。电网的功率支撑需求主要体现在以下几个关键方面:首先是频率支撑,新能源发电的波动性以及电网负荷的随机变化,使得电网频率时刻面临波动风险,构网型储能需要具备快速响应能力,在频率出现偏差时及时调整功率输出,维持频率稳定^[10]。其次是电压支撑,尤其是在电网发生故障或负荷突变时,能够迅速提供无功功率,稳定电压水平,避免因电压不稳定导致设备损坏或系统故障。再者是惯性支撑,模拟传统发电机的惯性特性,减缓电网频率的快速变化,增强电力系统的稳定性。

(二) 构网型储能容量配置考虑因素

配置构网型储能容量时,要综合权衡多方面因素。从电力系统稳定性出发,频率调节上,新能源高占比导致系统惯量不足,需依系统惯量缺失程度及频率调节目标确定容量,在新能源发电波动大的区域,大容量储能可快速调节有功功率稳定频率。电压调节方面,依据不同节点电压波动范围和无功补偿需求配置,保障电压稳定。储能自身特性也很关键,充放电效率影响实际可用能量,高效储能技术容量需求相对小;循环寿命决定使用周期与更换频率,长循环寿命的可适当增大初始配置容量。经济成本是重要考量,投资成本包括设备采购、安装等,过高成本会限制容量配置;运行维护成本涵盖检修保养等费用,维护成本高的系统要权衡长期经济性。此外,电网运行场景多变,不同季节、时段的负荷特性差异,要求储能容量能适应峰谷变化;结合电网未来规划,预估新能源接入和负荷增长对稳定性需求的变化,预留容量裕度,确保满足未来电网稳定运行需求。

(三) 基于功率支撑需求的最优容量配置方案

近年来,学术界针对构网型储能容量配置问题提出多种优化方法。基于功率支撑需求的最优容量配置方案,兼顾储能系统技

术性能、经济性与系统稳定性。其通过构建多目标优化模型实现:先建立电网功率支撑需求模型,依据电网负荷与可再生能源出力波动,借助历史数据统计及未来预测,精准剖析电网在不同运行状态下对频率、电压、惯性支撑的具体需求,构建功率支撑需求曲线。接着设计容量配置优化模型,以数学模型阐述储能容量配置与电网支撑需求关系,纳入储能容量、配置位置、响应速度等变量,结合电网频率、功率、电压需求制定策略。最后运用遗传算法、粒子群优化算法等求解,在满足电网需求的同时,最小化储能建设与运行成本,达成技术性能、经济性和系统稳定性的最优平衡。

四、结束语

随着新能源在电力系统中占比提升,其波动性、间歇性和缺乏惯性特性给电力系统稳定性带来巨大挑战。构网型储能电站凭借频率主动支撑、电压主动支撑和故障穿越等关键技术,成为提升电力系统稳定性的重要手段。频率主动支撑方面,虚拟同步机控制技术模拟同步发电机转子运动方程,提供“虚拟惯性”和一次调频能力,快速将电网频率偏差控制在极小范围;电压主动支撑技术通过双模式无功调节,极端工况下瞬间释放大无功功率恢复电压;故障穿越技术中的跟网切换与虚拟阻抗策略,在电网故障时保护设备、缩短穿越时间、降低过流风险。在应用场景上,构网型储能在新能源电站、电网侧以及微电网与分布式能源系统等均发挥重要作用,可平抑发电波动、提供辅助服务、保障备用电源供应等,且基于功率支撑需求的最优容量配置方案能实现储能系统高效利用。

参考文献

- [1] 黄馨漫,任凯,黄贵东,等.构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(32):4-6.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202432002.
- [2] 马笑寒.考虑构网型储能电站无功调节能力的新能源基地无功协调优化[D].华北电力大学(北京),2024.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2024.000896.
- [3] 贾丹,苏文斌.新型电力系统中的储能技术综述[J].电子技术,2024,53(09):348-350.
- [4] 常庆苏.户用单相逆变器的构网型控制方法研究[D].西安理工大学,2024.DOI:10.27398/d.cnki.gxalu.2024.001754.
- [5] 杨天鑫,黄云辉,何珍玉,等.基于多时间尺度调节的构网型储能电站定容选址优化配置[J].电力系统自动化,2024,48(23):54-64.
- [6] 郭一甫.光储型构网变换系统的储能配置[D].山西大学,2024.DOI:10.27284/d.cnki.gsxiu.2024.000805.
- [7] 王翀,姚宏洋,陆海洋,等.构网型中压直流直挂储能研究[J].电力电子技术,2023,57(12):72-75.
- [8] 吴家杰,陈新,张东辉,等.构网型储能变换器在新能源接入场景下并网稳定性分析及提升策略[J].中国电机工程学报,2024,44(23):9341-9354.DOI:10.13334/j.0258-8013.pc-see.231337.
- [9] 李建林,丁子洋,游洪灏,等.构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J].高压电器,2023,59(07):1-11.DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2023.07.001.
- [10] 王聪,葛景,汪莹,等.构网型储能提升系统电压稳定作用研究[J].电工技术,2023,(12):183-185+189.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2023.12.051.