

高比例储能接入的配电网调度系统运行方式适应性评估

马莹 孙文琍 李恒

国网宁东供电公司 宁夏 银川 750411

【摘要】：高比例储能接入为配电网运行模式带来了深刻变化，其调度系统的适应性成为关键问题。储能装置在削峰填谷、应急保障和新能源消纳方面具有突出优势，但同时也对调度策略、控制手段和运行安全提出更高要求。评估调度系统的适应性需要从运行灵活性、经济性与安全性等方面展开，重点关注储能与分布式电源的协调优化，以及信息化和智能化技术的支撑。高比例储能条件下的调度系统需要在数据处理、实时响应和运行机制上不断调整，以实现稳定高效的电力供应和可再生能源的深度利用。

【关键词】：储能技术；配电网调度；运行方式；适应性评估；新能源消纳

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.087

1 高比例储能接入对配电网运行特性的影响分析

1.1 储能多样化运行模式下的电压与频率波动问题

在高比例储能接入的配电网中，电压与频率的稳定性成为运行调度的核心关注点。储能设备在不同的运行模式下会呈现出差异化的特性，例如充电模式会在短时间内增加负荷，可能导致局部电压下降，而放电模式则会形成电压上升趋势。尤其在新能源出力不稳定的条件下，储能的快速切换易引起频率偏移。由于分布式储能单元具有分散性和不确定性，传统基于集中调节的控制手段难以完全覆盖所有扰动环节。为此，需要引入分布式控制算法以及虚拟同步机技术，以实现储能与电网的动态协调。研究显示，锂电池储能在高倍率运行时能够提供毫秒级的响应速度，但过度频繁的启停会缩短寿命，进一步加剧系统运行压力。在运行策略设计中，需要兼顾频率稳定与电压支撑的双重需求，同时综合考虑储能寿命管理与全局优化，以减轻系统波动带来的风险。

1.2 高比例储能对配电网潮流分布规律的改变

大量储能接入改变了配电网潮流的分布规律，使得潮流的方向与幅度更加复杂。储能在峰谷电价差作用下实现充放电切换，会在负荷高峰时段缓解主干线路的潮流压力，但在低谷时段充电操作又会增加潮流反送现象。与传统单向潮流相比，高比例储能下的潮流呈现多方向、多路径的特征，局部节点可能出现反向功率流，导致保护配置失效风险增加。潮流分布的不确定性还与新能源出力密切相关，当光伏或风电并网功率快速波动时，储能的充放电调节会引发节点电压的二次波动，加大了调度的复杂性。数值仿真结果表明，在储能接入率达到30%以上时，配电网的潮流波动频次和幅度明显增加，传统基于静态预测的调度模式难以应对。为适应这种新格局，需要发展基于大数据的潮流预测与动态调整策略，结合储能分布位置优化，降低潮流异常分布带来的运行风险。

1.3 运行特性变化对调度系统提出的适应性要求

高比例储能条件下，配电网运行特性呈现出高度动态化和不确定化的趋势，对调度系统的适应性提出更高要求。传统依赖固定时序和负荷预测的调度方式已无法满足实时性和灵活性的需求。储能的参与使得电网具备更多可调控资源，但也增加了运行状态的多样性，需要调度系统具备更强的数据处理与模型推演能力。调度系统必须能够在秒级或更短时间内响应电压和频率偏差，同时完成跨区域、跨节点的协调控制。运行特性变化要求调度系统在控制策略上更具弹性，例如在面对大规模新能源出力波动时，系统需要同时整合储能与需求侧资源，以形成柔性调控机制。实际运行经验表明，若调度系统无法快速识别储能状态与电网负荷之间的耦合关系，就可能导致过度调节或调节不足，从而影响系统安全。调度系统的升级重点在于建立智能化的适应性架构，使其能够在多变的运行条件下保持稳定与高效。

2 配电网调度系统在高比例储能条件下的功能重构需求

2.1 调度系统对实时监控与快速响应能力的提升要求

高比例储能接入使得电网运行环境瞬态特征更加突出，调度系统必须强化实时监控和快速响应的能力。储能设备在秒级甚至毫秒级的动作下，可能导致电压、频率及潮流的突变，如果监控延迟过大，将直接威胁电网稳定。现有的传统监控方式多依赖SCADA系统，其采样周期较长，无法满足高频次数据采集的需求。为提升适应性，需要引入广域测量系统(WAMS)和先进传感技术，实现对电压、电流、频率及功率的高精度、低延时监测。数据采集的实时化为快速响应提供了基础，而响应机制则依赖于分布式调控平台和自动化执行装置的协同运行。多地实际运行结果表明，引入高速通信网络与边缘计算后，调度系统能够在百毫秒级完成储能的控制指令下发，从而显著提升了系统的稳定性和调节精度。

2.2 多源协调下的优化调度与能量管理机制研究

储能与分布式新能源、大电网调峰资源以及需求侧响应构成多元化的协调体系,调度系统在这种格局下需要具备优化调度与能量管理能力。储能的灵活性使其既可以作为负荷削峰工具,也可以在电力短缺时提供备用电源,而分布式新能源则具有波动性和间歇性,两者之间的匹配与协同是能量管理的关键。通过建立统一的优化调度平台,可以实现储能的多时段、多场景运行策略设计,避免无序调度带来的资源浪费。近年来,基于模型预测控制(MPC)的优化方法逐渐应用于电力系统,能够结合未来负荷与新能源预测,动态调整储能的运行模式。在实际操作中,多源协调不仅要关注经济效益,还需考虑系统约束条件与设备寿命,使得调度目标在稳定性、经济性与可持续性之间取得平衡。

2.3 智能化与信息化技术对调度系统功能重构的支撑作用

在高比例储能环境下,智能化与信息化技术成为调度系统功能重构的核心支撑。大数据技术能够对储能运行数据、负荷变化信息及新能源出力进行多维度分析,从而提升预测精度与决策可靠性。人工智能算法则在复杂场景下展现出快速建模和自适应优化的优势,能够辅助调度系统实现自主学习与自我调整。云计算与边缘计算的结合,使得大规模分布式储能的数据处理与控制任务可以在多层级完成,既保证了实时性,又提升了系统的扩展性。区块链等新兴信息技术的引入,还为多方储能资源的互联互通提供了可信机制,确保能量交换的透明性与安全性。通过这些技术手段的融合,调度系统不仅能够满足运行控制需求,还能够适应未来电力市场与智能电网的发展趋势。

3 高比例储能条件下调度系统运行安全与经济性平衡分析

3.1 运行安全隐患识别与风险防控策略的提出

高比例储能接入为配电网提供了灵活的调控手段,但也带来了新的运行安全隐患。储能装置在高频次充放电过程中可能出现过热、过充或过放等问题,若调度策略不当,容易造成设备失效甚至引发连锁事故。大量分布式储能并网后,电网的保护配置与故障隔离机制受到挑战,尤其在出现反向潮流时,传统保护策略可能失效。为降低风险,需要建立完善的运行监测与预警机制,对储能的电压、电流和温度进行实时监控,并通过数据挖掘技术识别潜在故障信号。近年来,基于状态估计和概率风险评估的方法逐渐应用于储能系统运行安全研究,能够在运行状态发生异常前提供预判,从而指导调度中心采取防控措施。通过强化风险识别与预防,能够有效提升高比例储能接入下的系统安全水平。

3.2 经济运行模式与储能效益最大化的实现途径

储能的接入在提升新能源消纳和缓解电网运行压力的同时,也带来了经济效益实现的关键问题。在高比例储能条件下,如果运行模式缺乏科学设计,可能会导致运行成本增加与实际效益下降的矛盾。频繁的充放电操作不仅会影响储能装置的健康状态,还会缩短其使用寿命,从而增加后续维护与更换的压力。为了实现经济性的提升,需要建立多时段与多层次相结合的优化运行模型,并合理衔接电价机制和需求侧响应,使储能在不同场景中都能发挥作用。通过优化运行策略,储能不仅能够承担削峰填谷的任务,还能在辅助服务和备用电源提供中展现价值。合理的调度机制应在确保电网稳定性的同时,充分发挥市场化手段的调节功能,从而提升储能资源的利用效率,推动其长期应用与投资的可行性。

3.3 安全性与经济性矛盾下的协调机制探索

在高比例储能环境下,安全性与经济性之间常常存在矛盾。过于强调经济性会导致储能高频次运行,从而加剧设备老化和运行风险,而过度注重安全性又可能使储能资源闲置,降低整体利用率。协调机制的建立需要在多维度进行权衡。可以通过多目标优化算法,在运行调度中同时考虑经济效益和安全约束,实现权衡下的最优解。基于大数据的全寿命周期管理方法,能够在运行策略中融入储能健康度评估,以延长使用寿命并降低维护成本。柔性电价机制和储能补偿机制的引入,也为经济与安全的平衡提供了外部保障。实践经验表明,建立分层次、分优先级的协调调度机制,能够在不同运行场景下兼顾系统稳定与经济回报,为调度系统适应性提升提供路径。

4 调度系统适应性评估的指标体系与评价方法研究

4.1 调度系统适应性评价指标的构建与维度设计

在高比例储能接入的背景下,评估调度系统的适应性需要构建科学的指标体系。单一维度的评价无法反映复杂运行环境下的真实表现,因此需要多维度指标的综合设计。技术维度主要包括调度系统的实时响应速度、负荷预测精度和故障处理能力;经济维度则涵盖运行成本控制、储能利用效率以及电价机制适应能力;安全维度涉及电压稳定性、频率波动抑制能力以及储能设备健康度。社会与环境维度也不容忽视,如碳减排贡献和清洁能源消纳水平。通过多维度指标的整合,可以对调度系统在不同运行场景下的表现进行全面评价,为优化运行方式提供参考依据。

4.2 量化评估方法与仿真验证的应用探讨

在适应性评价过程中,量化方法是关键环节。常用的方法包括层次分析法(AHP)、模糊综合评价和灰色关联分析等,

这些方法能够处理多指标、多层次的复杂问题,并形成相对客观的评价结果。为了提升结果的可靠性,还需结合仿真验证平台进行验证。基于电力系统仿真软件,可以构建典型配电网模型,设置不同储能接入比例、运行工况和调度策略,模拟运行特性变化,并将结果与评价指标对比。通过这种方式,不仅能够直观反映调度系统的适应性水平,还能在实验环境下探索不同运行策略的优劣。近年来,基于数字孪生的仿真方法逐渐兴起,为适应性评估提供了更加精确和动态的验证手段。

4.3 典型运行场景下适应性评估的综合分析

适应性评估需要结合典型运行场景进行综合分析,以验证调度系统在多样化条件下的表现。在新能源大规模并网场景中,调度系统需要面对功率波动剧烈和预测误差较大的挑战,评估重点在于系统对频率稳定和电压支撑的响应能力。在负荷高峰场景下,储能的削峰填谷功能成为核心,评价指标应突出运行经济性与设备寿命的协调。在故障或极端事件场景中,调度系统需要展现出快速恢复与灵活调配能力,以确保电网的韧性。通过多场景的综合对比,可以识别出调度系统的优势与薄弱环节,为后续优化与改进提供依据。实践表明,基于场景的综合分析方法能够有效提升评价的针对性和实用性。

5 面向未来的高比例储能配电网调度优化运行策略研究

5.1 分层分区调度模式在高比例储能条件下的实践探索

储能在配电网中的比重不断提升,传统的集中式调度方式已难以满足复杂多变的运行需求,分层分区调度模式逐渐成为新的发展方向。在该模式下,配电网被划分为若干子区域,每个区域的储能与分布式电源由局部调度单元进行协调,而上层调度系统则负责跨区域的整体优化与调配。这种架构不仅能够缩短调度响应时间,还能有效减轻主控中心的计算压力,从而提升运行灵活性与适应性。在实际运行中,分层分区模式展现出较好的调控效果,能够降低电压偏差并缓解潮流波动。随着储能接入规模的不断扩大,该模式在更多配电网场景中具有广阔的应用前景,并将成为提升系统可靠性与运行效率的重要途径。

参考文献:

- [1] 刘建华,陈国良.储能系统在配电网中的运行特性研究[J].电力系统自动化,2021,45(12):85-92.
- [2] 周立新,韩晓光.高比例储能接入下的配电网调度优化方法探讨[J].电网技术,2022,46(8):103-110.
- [3] 王凯文,张玉芳.分布式储能参与电力调度的适应性评估研究[J].电力建设,2020,41(6):47-55.
- [4] 郑海峰,赵志远.新型电力系统中储能与新能源协调运行机制研究[J].中国电机工程学报,2023,43(4):1123-1134.
- [5] 刘志强,孙浩然.面向未来的智能配电网调度系统架构与发展方向[J].电力科学与工程,2021,37(9):76-83.

径。

5.2 新型电力市场机制对储能资源调度的引导作用

储能的经济价值能否充分发挥,取决于市场机制的设计与运行。新型电力市场机制为储能调度提供了方向性引导。在容量市场中,储能能够作为独立电源参与备用服务交易;在辅助服务市场中,储能通过提供调频、调压服务获取收益;在现货市场中,储能通过峰谷套利实现价值转化。合理的市场规则不仅提升了储能的收益水平,还推动了调度系统将经济性纳入运行目标。随着市场机制的完善,调度系统在运行策略上将更加注重市场信号的响应,从而实现储能资源的高效配置。相关案例表明,在建立灵活电价和储能补偿机制的地区,储能利用率和运行收益均显著提升。

5.3 自主学习型智能调度系统的前沿发展方向

未来高比例储能条件下的配电网调度系统需要具备自主学习与自我优化能力。传统的基于规则的调度方式已无法应对复杂多变的运行环境,自主学习型智能调度成为发展趋势。通过引入人工智能算法,系统能够在不断积累运行数据的过程中形成经验库,并在面对新型运行场景时快速调整策略。强化学习算法在多目标优化和动态环境决策中表现出较强优势,能够实现对复杂问题的高效求解。结合数字孪生技术,自主学习型调度系统可在虚拟环境中进行运行策略的模拟与优化,从而减少实际运行中的风险。随着计算能力的提升与通信技术的发展,这类系统将在未来配电网调度中发挥核心作用。

6 结语

本文围绕高比例储能接入的配电网调度系统运行方式展开分析,从运行特性变化到调度系统功能重构,再到安全与经济性平衡及适应性评估,逐步探讨了系统面临的挑战与应对路径。研究表明,储能在提升电网灵活性与新能源消纳方面具有重要作用,但同时也对调度系统提出了更高要求。通过建立科学的指标体系、完善的评估方法以及面向未来的优化策略,能够有效提升配电网的运行适应性,为新型电力系统的构建提供重要支撑。