

电力系统无功优化与电压安全控制研究

何玉峰

华电郑州机械设计研究院有限公司，河南郑州，450018；

摘要：随着新型电力系统中高比例可再生能源接入、负荷波动加剧及电网结构日益复杂，电压稳定性与无功功率管理面临严峻挑战。本文聚焦于现代电力系统中无功优化与电压安全控制的协同机制，提出一种融合动态无功储备评估与多时间尺度协调控制的新框架。通过引入基于灵敏度分析与数据驱动相结合的电压薄弱点识别方法，构建以最小化网损、最大化电压裕度为目标的混合整数非线性规划模型，并嵌入实时滚动优化策略以提升系统鲁棒性。仿真结果表明，所提方法在 IEEE 39 节点系统和某省级实际电网中均能有效提升电压安全边界，降低运行成本，增强对新能源波动的适应能力。本研究为构建“源-网-荷-储”协同互动的智能电压控制系统提供了理论支撑与工程路径。

关键词：无功优化；电压安全；动态无功储备；多时间尺度控制

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.077

引言

近年来，风电、光伏等间歇性可再生能源大规模并网，显著改变了传统电力系统的潮流分布与动态特性，导致局部区域电压越限、无功支撑不足等问题频发。同时，负荷中心远离电源、输电走廊受限等因素进一步压缩了电压稳定裕度。传统的无功优化多基于静态或准静态模型，难以应对快速变化的运行工况；而电压控制策略往往孤立实施，缺乏与无功资源的协同调度。在此背景下，亟需构建兼顾经济性与安全性的新型无功-电压协同控制体系。本文立足于“安全优先、经济高效、响应敏捷”的原则，提出融合动态无功储备评估、电压薄弱点在线辨识与多时间尺度滚动优化的综合控制架构，旨在提升系统在复杂扰动下的电压韧性，为高比例新能源电网的安全稳定运行提供新思路。

1 无功优化与电压安全的耦合机理分析

在电力系统运行中，无功功率与节点电压幅值之间存在紧密的物理耦合关系。根据潮流方程，节点注入无功的变化直接影响该节点及其邻近区域的电压水平，尤其在长距离输电或重载线路末端，无功支撑不足极易引发电压跌落甚至崩溃。随着分布式电源大量接入配电网，其逆变器通常以单位功率因数运行，导致本地无功能力受限，削弱了系统对电压波动的调节能力。同时，超高压线路在轻载时产生的充电功率可能造成局部电压抬升，而在负荷突增或新能源出力骤降时又迅速转为无功缺额，加剧电压不稳定性。传统无功优化多以降低有功网损为奋斗目标，倾向于将无功资源集中配置于损耗敏

感区域，却可能忽视关键节点的电压安全裕度。为科学衡量电压稳定状态，可引入 L 指标、电压稳定裕度 (VSM) 等量化工具，这些指标能有效反映系统接近电压失稳边界的风脸程度。然而，单纯追求经济性目标易导致安全边界被压缩，在极端工况下难以维持电压可控。为此，有必要构建兼顾网损最小化与电压安全强化的多目标协同优化模型，通过合理权衡不同控制目标，实现系统运行效率与安全韧性的统一。该模型需在约束条件中嵌入动态电压稳定判据，确保优化结果不仅经济可行，而且具备足够的抗扰动能力。

2 动态无功储备评估与电压薄弱点识别新方法

2.1 传统静态灵敏度方法的局限性

在高比例风电与光伏接入背景下，电力系统运行点频繁迁移，电压响应特性呈现显著非线性和时变特征。传统电压薄弱点识别多依赖于某一稳态潮流下的雅可比矩阵计算灵敏度，其假设系统结构与运行状态恒定，难以反映新能源出力骤变、负荷快速波动等动态过程对节点电压的影响。此类方法通常基于离线方式生成评估结果，无法捕捉设备调节动作、网络拓扑切换或故障扰动引发的实时状态变化。当系统处于轻载或重载边缘工况时，静态灵敏度可能严重偏离真实响应关系，导致误判关键节点或遗漏潜在风险区域。尤其在配网与主网交互增强的新型电网中，局部无功支撑能力受逆变器控制策略制约，传统指标更显不足。这种滞后性与失真性限制了其在主动安全防御体系中的应用价值，迫切需要引入具备在线更新能力和数据驱动特性的新识别机制，以

匹配现代电网对电压态势感知的时效性与准确性要求。

2.2 融合灵敏度与数据驱动的混合识别策略

为提升电压薄弱点辨识的实时性与鲁棒性,本文构建一种融合物理模型与运行数据的混合识别策略。该策略以潮流方程导出的电压-无功灵敏度为基础,利用PMU与SCADA系统提供的毫秒级或秒级量测数据,对灵敏度系数进行在线修正。通过最小二乘拟合或滑动窗口回归,建立节点电压变化与无功注入扰动之间的实际映射关系,有效补偿因模型简化或参数偏差带来的误差。历史运行数据用于训练灵敏度修正因子的统计分布,使其在新能源出力剧烈波动时段仍保持较高精度。该方法保留了物理模型的可解释性,同时引入数据驱动的自适应能力,避免纯黑箱模型在极端工况下的外推失效问题。在多种典型运行方式下测试表明,修正后的灵敏度能更准确反映当前运行点的真实电压响应特性,为后续薄弱点排序提供可靠输入,显著优于固定灵敏度或纯数据驱动方法。

2.3 动态无功储备率指标构建

为量化各节点应对电压扰动的本地支撑能力,提出“动态无功储备率”新指标。该指标综合考虑SVC、STATCOM、同步调相机及有载调压变压器等动态无功资源的当前可用容量、最大调节速率及设备热稳定极限,并结合其在未来5-15分钟内的可持续运行能力进行加权评估。不同于传统仅关注静态容量裕度的做法,该指标引入时间衰减因子,对即将达到动作次数上限或温度限值的设备赋予较低权重,体现其短期支撑潜力的衰减趋势。对于逆变器类电源,依据其当前有功出力水平和功率因数约束,动态计算其可调无功区间并纳入储备评估。该指标以标幺值形式输出,便于全网横向比较,数值越低表示该节点在扰动下越易失稳。通过实时更新,该指标可作为电压安全状态的直观度量,直接服务于风险预警与控制决策。

2.4 滚动预警机制与工程验证效果

为实现电压风险的前移防控,设计基于滑动时间窗的滚动预警机制。窗口长度根据新能源超短期预测误差的标准差及负荷日周期特性动态设定,通常在10-30分钟范围内调整。每完成一个窗口周期,系统重新计算全网各节点的动态无功储备率与修正后电压灵敏度,并生成薄弱点排序列表。当某节点连续两个窗口内储备率低于阈值(如0.35 p.u.)且灵敏度持续上升,则自动标记为高风险区域,触发日前或日内层的预控措施。在某区域电网实测场景中,该机制成功在电压跌落事件发生

前平均12分钟发出预警,识别准确率达89.5%,较传统单一灵敏度法提升约18%。测试涵盖迎峰度夏、新能源大发及N-1故障等多种工况,验证了方法的泛化能力与工程适用性,为多时间尺度协同控制提供了高可信度的决策依据。

3 多时间尺度无功-电压协同优化模型构建

3.1 日前计划层(小时级)优化无功设备投切计划

日前计划层面向未来24小时运行周期,以新能源功率预测、负荷曲线及检修计划为输入,统筹安排离散型无功设备的投切策略。该层重点处理电容器组、电抗器及有载调压变压器分接头等动作次数受限的装置,通过建立混合整数非线性规划模型,在满足N-1安全准则和电压限值前提下,优化其启停时序与档位配置。目标函数综合考虑全天网损积分值、设备操作成本及电压越限风险积分,采用场景分析法处理新能源预测不确定性,生成鲁棒性较强的基准调度方案。为降低计算复杂度,引入Benders分解将主问题与子问题解耦,主问题决策离散变量,子问题验证连续潮流可行性并反馈割平面。所得方案不仅为后续滚动层提供初始可行点,还预留足够调节裕度以应对预测偏差。该层强调经济性与设备寿命保护,避免频繁操作导致的机械磨损,同时确保基础电压轮廓处于安全带内。

3.2 日内滚动层(15分钟级)调整连续型无功源出力

日内滚动层基于超短期新能源与负荷预测,以15分钟为步长进行滚动优化,动态调整SVC、STATCOM、同步调相机及光伏逆变器等连续可调无功源的出力设定值。该层采用确定性优化模型,状态变量包括节点电压幅值、支路无功潮流及设备出力限值,约束条件嵌入日前层确定的离散设备状态。目标函数聚焦于当前时段网损最小化、节点电压与参考值偏差最小化以及调节动作平滑性,通过加权系数量化多目标优先级,并随系统运行状态自适应调整。求解算法融合改进粒子群优化与原对偶内点法:前者用于全局搜索优质解域,后者在局部精细收敛,兼顾求解效率与精度。滚动机制通过不断纳入最新量测数据修正预测误差,实现闭环反馈控制。该层有效弥合日前计划与实时波动之间的间隙,在保障电压质量的同时抑制不必要的频繁调节,提升无功资源利用效率。

3.3 实时校正层(秒级)触发紧急控制

实时校正层依托广域测量系统,在秒级时间尺度响

应突发扰动或预测严重偏离，执行紧急电压支撑措施。当在线监测模块检测到关键节点电压快速跌落或动态无功储备率低于临界阈值时，立即激活预设控制规则库，优先调用响应速度最快的 STATCOM 或调相机注入无功，必要时切除部分无功负荷或启动低压减载。该层采用简化的线性潮流模型与启发式策略，确保决策延迟小于 200 毫秒。特别引入“电压安全约束松弛机制”：在极端故障下，允许非关键节点电压短时越限（如 0.85 - 0.90 p.u. 持续不超过 10 秒），但通过动态安全域边界判定确保系统整体不失稳，避免保守控制引发连锁反应。所有动作记录同步上传至上层，用于事后评估与模型参数更新。该层构成电压安全的最后一道防线，强调快速性与可靠性，是多时间尺度协同体系中不可或缺的应急响应单元。

4 仿真验证与工程实用性分析

为全面评估所提多时间尺度无功 - 电压协同优化框架的性能，分别在标准测试系统与实际省级电网中开展仿真验证。在 IEEE 39 节点系统中构建典型高风电渗透运行场景，设定某风电场群出力在 5 秒内骤降 30%，模拟极端波动工况。传统基于静态最优潮流 (OPF) 的无功调度策略因缺乏对动态无功资源的协调与安全裕度预留，导致多个负荷母线电压跌至 0.90 p.u. 以下，共出现 8 个越限节点，系统网损达 42.3 MW。相比之下，本文方法通过日前 - 日内 - 实时三层协同机制，提前调配 STATCOM 与调相机容量，在扰动发生后迅速注入无功支撑，将越限节点数降至 3 个，降幅达 62%；同时优化潮流分布，使网损降低至 40.3 MW，降幅为 4.7%。电压恢复时间缩短近 40%，验证了其在提升暂态电压韧性方面的有效性。进一步依托我国某东部省份 220 kV 及以上主干电网 2024 年夏季高峰日实测数据，构建包含 12 座风电场、9 座集中式光伏电站及 17 套动态无功补偿装置的数字孪生模型。结果表明，所提薄弱点识别与滚动优化机制可在电压异常实际发生前平均 12 分钟发出有效预警，预警准确率达 89.5%；动态无功储备的实际调度利用率由基准方案的 58% 提升至 81%，增幅达 23%，显著增强了系统对新能源随机波动的适应能力。针对工程部署中不可忽视的现实挑战，如广域通信链路

存在 200 - 800 毫秒延迟、PMU 量测受噪声干扰导致土 0.5% - 1.2% 幅值偏差等问题，开展了鲁棒性测试。当通信延迟超过 600 毫秒时，实时层控制指令可能滞后，造成电压最低点下探加深约 0.02 p.u.；量测误差累积则可能误判薄弱节点位置。为此，设计双通道冗余通信架构，主备通道自动切换，并在状态估计环节引入抗差加权最小二乘算法抑制异常数据影响。在优化模型中嵌入基于 Wasserstein 距离的分布鲁棒约束，使决策方案在典型不确定性集合内保持可行。上述措施使系统在恶劣通信与量测条件下仍能维持电压安全，控制性能退化控制在 5% 以内。整体而言，该框架不仅在理论指标上优势显著，且充分融合了现有调度自动化系统架构、设备物理限制与运维规程，具备良好的工程可实施性与推广前景，为构建高比例可再生能源电力系统的主动电压安全防御体系提供了可靠技术支持。

5 结束语

本文针对高比例可再生能源接入背景下电力系统电压安全面临的挑战，创新性地提出了融合动态无功储备评估与多时间尺度协同控制的无功优化新范式。通过理论建模、算法设计与仿真验证，证明该方法不仅能有效提升电压稳定裕度，还能兼顾经济运行与控制敏捷性。未来研究将聚焦于人工智能驱动的无功决策自主化、跨区域无功资源协同共享机制，以及与一次调频、惯量响应等控制功能的深度耦合。本成果为构建具有强韧性和自适应能力的新型电力系统电压安全防御体系提供了可行路径，具有重要的学术价值与工程推广意义。

参考文献

- [1] 王彬, 孙宏斌, 林银鸿, 等. 一种考虑暂态电压安全约束的电力系统无功优化方法:CN202211212270. X[P]. CN115663834A [2025-12-16].
- [2] 高春阳. 基于 GA-PSO 算法的电力系统无功优化研究 [D]. 陕西理工大学, 2023.
- [3] 樊玮, 秦颖婕, 刘宇, 等. 一种电力系统无功补偿优化方法及装置. CN202211094332. 1 [2025-12-16].
- [4] 边括, 孔凡林, 班晔辉. 电力系统中线损动态监测与优化调整研究 [J]. 2024.