

# 基于动态无功补偿的配电网电压稳定性提升策略研究

杨国祥

宝武集团马钢轨交材料科技股份有限公司 安徽 马鞍山 243000

**摘要:** 本文聚焦基于动态无功补偿的配电网电压稳定性提升策略,阐述了动态无功补偿与配电网电压稳定的理论基础,并调研了企业内部配电网电压稳定现状,指出传统调压手段难以满足需求,且动态无功补偿存在选址定容不合理等问题。因此,提出选址定容优化、分层协同控制及多场景动态调压等策略。

**关键词:** 配电网; 电压稳定性; 动态无功补偿; 提升策略

引言: 在企业能源转型进程中,配电网电压稳定性至关重要。内部新能源大规模接入、负荷动态变化以及电网结构特性等因素,使企业配电网电压波动频繁,传统调压手段难以满足需求,动态无功补偿虽被广泛应用,但存在选址定容不合理、控制策略适配性差等问题。在此背景下,深入研究基于动态无功补偿的配电网电压稳定性提升策略,具有重要的现实意义与紧迫性。

## 1 动态无功补偿与配电网电压稳定的理论基础

### 1.1 配电网电压稳定的核心概念

企业配电网电压稳定,指其在负荷变化、内部新能源出力波动、线路故障等扰动下,维持各节点电压在额定电压 $\pm 7\%$ (我国国标要求)内,并快速恢复稳定运行的能力。按扰动后电压响应时间,可分为三类:暂态电压稳定聚焦0.1-2s内电压恢复,应对短路故障等剧烈扰动引发的电压骤降;动态电压稳定关注2-30s内电压调节,针对新能源出力波动、负荷渐变等情况;静态电压稳定侧重长期稳态下的电压支撑,保障持续高负荷或新能源持续出力时的电压水平。评价电压稳定的核心指标有节点电压偏差率、电压波动系数、电压跌落深度与持续时间、电压稳定裕度,为策略设计提供判断依据。

### 1.2 动态无功补偿技术原理

当前主流动态无功补偿技术包括静止无功发生器(SVG)、静止无功补偿器(SVC)与可控并联电抗器(CSR),三者基于不同技术原理实现无功功率的动态调节。SVG以电压源换流器(VSC)为核心,通过调节换流器输出电压与系统电压的相位差和幅值,实时发出或吸收容性、感性无功功率,响应时间可控制在5ms以内,能快速跟踪无功需求变化;SVC由晶闸管控制电抗器(TCR)与固定电容器(FC)组成,借助调节晶闸管导通角改变感性无功输出量,同时通过FC提供基础容性无功补偿,响应时间约30-50ms,适用于中等规模无功调节场景;CSR则通过改变电抗器励磁绕组电流调整感性无功输

出,具备大容量补偿能力,响应时间100-200ms,主要用于企业35kV及以上高压配电网的感性无功平衡<sup>[1]</sup>。三种技术通过精准控制无功功率交换,直接影响企业配电网节点电压水平,是提升电压稳定性的核心技术手段。

### 1.3 配电网电压波动的影响因素

企业配电网电压波动受内部新能源接入、负荷变化、电网结构三类因素共同影响,且作用机理各异。内部新能源接入上,企业自备光伏出力间歇性强,午间出力骤增会使注入功率大幅上升,并网点及下游节点电压升至额定电压1.1倍;晚间或阴天出力骤降、波动,电压又会快速跌落,若逆变器无功控制模式不匹配,还会引发电压振荡。负荷变化方面,电弧炉、集中充电设备等冲击性负荷功率波动幅度大,可达额定值50%-100%,会造成电压短时跌至额定电压80%;生产高峰时空调、加热设备等负荷季节性集中,线路压降增大,末端节点电压整体偏低。电网结构上,企业配电网多为辐射型接线,线路阻抗大,末端节点电压对负荷与新能源出力变化敏感,电压偏差可达 $\pm 10\%$ ,线路短路故障切除后电压恢复还易超调,加剧波动。

## 2 配电网电压稳定现状与动态无功补偿应用问题

### 2.1 企业配电网电压稳定现状调研

针对企业10kV、35kV不同电压等级的配电网开展现状调研,采用现场实测、运行数据统计与企业运维人员访谈相结合的方法获取一手信息。现场实测以1s/次的采样频率采集各节点电压、电流、功率数据,运行数据统计分析近1年企业配电网电压合格率与波动频次,企业运维人员访谈聚焦实际调压难点。调研结果显示,企业新能源富集区域的配电网日均电压波动次数达8-12次,是传统企业配电网的2-4倍;企业内部线路跨度较大的配电网,末端节点电压偏差率普遍达 $\pm 9\%$ ,超出国家标准 $\pm 7\%$ 的要求;极端生产工况下,设备集中启动导致线路跳闸时,30%以上的企业配电网会出现电压跌落持续时间

超1s的情况, 远超企业配电网 $\leq 0.5s$ 的允许值, 电压失稳风险显著高于常规工况, 传统调压手段已难以满足当前企业配电网电压稳定需求。

## 2.2 动态无功补偿应用现存问题

### 2.2.1 选址定容不合理

当前企业动态无功补偿装置选址多依赖企业运维人员经验, 未结合企业配电网潮流分布与电压敏感节点位置进行科学分析, 导致装置作用范围局限, 无法覆盖电压波动最显著的区域。例如将SVG部署在企业负荷密度低的节点, 对末端高负荷节点的电压支撑作用微弱。定容方面, 未充分考虑企业内部新能源出力与负荷的动态变化, 容量配置偏差问题突出: 容量过大时, 设备长期处于低负荷运行状态, 造成投资成本浪费与设备闲置; 容量过小时, 无法满足极端工况(如企业内部新能源最大出力、负荷峰值)下的无功需求, 电压波动问题仍未得到解决, 部分企业配电网因容量不足, 电压波动幅度仅降低25%, 未达预期效果<sup>[2]</sup>。

### 2.2.2 控制策略适配性差

企业动态无功补偿控制策略存在目标单一与协同不足两大问题。目标单一表现为仅以“电压维持在额定值”为唯一控制目标, 未统筹考虑无功功率传输损耗与企业新能源消纳需求, 例如为维持电压稳定过度补偿无功, 导致企业线路损耗增加0.8-1.5个百分点, 反而降低企业配电网运行效率。协同不足则体现在企业内部多台补偿装置独立运行, 缺乏统一调度, SVG与SVC同时投入时易出现“过度补偿”, 使电压超调至额定电压1.07倍; 不同区域补偿装置响应不同步, 还可能引发企业配电网电压振荡, 某企业配电网曾因区域间补偿装置协同缺失, 出现持续1.8s的电压振荡, 影响企业用电设备安全。

### 2.2.3 极端工况应对能力弱

企业动态无功补偿装置在极端工况下的调压策略存在明显短板。企业线路故障场景中, 故障切除后装置未及时调整补偿量, 仍维持故障前的补偿状态, 导致电压恢复缓慢, 部分企业配电网电压恢复至正常范围需4.5s以上, 延长了电压异常持续时间。企业内部新能源脱网场景下, 高比例光伏突然脱网会造成企业配电网无功功率缺口骤增, 而补偿装置响应滞后, 无法快速填补缺口, 曾出现某企业新能源富集配电网因15MW光伏脱网, 补偿装置延迟90ms响应, 导致电压跌落至额定电压78%的情况。另外, 极端天气下装置自身运行稳定性不足, 低温冰冻会影响SVG换流器性能, 降低补偿精度, 进一步削弱调压效果。

## 3 基于动态无功补偿的配电网电压稳定性提升策略

### 3.1 动态无功补偿装置的选址定容优化策略

选址优化聚焦于企业自身配电网电压敏感节点识别与多目标模型求解。通过潮流计算, 明确企业配电网各节点电压对无功功率的灵敏度, 将灵敏度最高的企业内分布式电源并网点、负荷集中节点确定为优先选址点, 保障装置对电压波动的调节效果。构建“电压偏差最小化、线损率降低最大化、投资成本最小化”的多目标选址模型, 采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解, 得出兼顾技术与经济效益的最优选址方案。定容优化基于无功需求动态预测, 借助长短期记忆网络(LSTM)构建企业内部分布式电源出力预测模型(预测精度 $\geq 90\%$ ), 整合企业负荷预测数据, 计算不同时段无功功率缺口。考虑企业内部分布式电源最大出力、负荷峰值等极端工况, 预留15%-20%容量冗余, 确保全场景需求覆盖。

### 3.2 动态无功补偿的分层协同控制策略

构建主网层、区域层、设备层三级分层控制架构, 实现企业全网无功协同调节。主网层负责企业35kV及以上配电网全局无功平衡, 企业调度中心依据全网潮流数据下发无功补偿总指令; 区域层针对企业10kV配电网分区, 协调区域内多台补偿装置补偿量分配, 如1台SVG与2台SVC的负荷分担; 设备层控制单台装置实时调整无功输出, 响应时间控制在10ms内。协同控制通过优先级划分、动态指令分配与多设备联动实现: 企业内部分布式电源并网点装置优先响应出力波动, 负荷节点装置优先应对负荷冲击; 基于实时潮流数据, 采用模型预测控制(MPC)每500ms更新一次补偿指令, 避免响应冲突; 动态无功补偿装置应对 $< 1s$ 的短时电压波动, 有载调压变压器(OLTC)处理 $> 10s$ 的长期电压偏差, 形成“短时+长期”协同调压机制。

### 3.3 多场景下的动态调压子策略

针对不同运行场景设计差异化调压子策略, 确保与企业适配。企业内部分布式电源高渗透率场景中, 采用“跟踪预测+实时调节”模式, 光伏出力上升时, SVG吸收容性无功抑制电压升高; 出力下降时, SVG发出感性无功支撑电压, 同时基于出力预测提前10-30s调整补偿量, 减少电压波动幅度。冲击性负荷场景下, 企业大型电机启动高峰来临前, SVC提前投入15%-25%的容性无功储备; 负荷冲击发生时, SVG在5ms内增加感性无功输出, 将电压跌落深度控制在额定电压92%以上。某企业大型电机启动区域应用该策略后, 电压跌落持续时间从0.7s缩短至0.15s。极端工况中, 线路故障切除后, 补偿装置立即投入90%-100%额定容量, 快速将电压提升至额定值85%以上, 随后逐步调整至正常范围; 检测到企业内部分布式电

源脱网时,SVG在8-10ms内切换至“最大感性无功输出”模式,联动其他装置填补无功缺口,同时采用低温预热技术保障装置在冰冻天气下的运行精度<sup>[3]</sup>。

#### 4 策略实施保障与经济效益分析

##### 4.1 策略实施保障措施

为确保动态无功补偿电压稳定提升策略有效落地,需从技术、管理、人员三方面构建保障体系。技术保障层面,建立企业配电网实时监测与数据共享平台,整合10kV、35kV节点电压、电流、功率及企业内分布式电源出力数据,采用边缘计算技术实现数据实时处理与策略指令快速下发,同时定期对SVG、SVC等装置进行硬件检测与软件升级,保障设备运行稳定性,例如每季度开展换流器性能测试、每年更新控制算法程序。制定企业动态无功补偿装置运维管理规范,明确选址定容优化、分层协同控制的操作流程与责任分工,建立“日常巡检-故障预警-应急处置”的全周期管理机制,针对极端天气提前制定装置保护预案,开展企业电网运维人员专项培训,内容涵盖多目标优化算法原理、分层协同控制操作及极端工况应急处理,通过模拟仿真与现场实操结合的培训方式,提升人员策略执行能力,确保运维人员能熟练应对装置异常与电压波动问题。

##### 4.2 策略实施经济效益分析

以某企业35kV配电网(含15MW光伏、18MW综合负荷)应用本策略为例,从直接与间接经济效益两方面开展分析。直接经济效益体现在线损降低与设备损耗减少:策略实施后线损率从6%降至3.8%,该企业配电网年均供电量约8000万kWh,每年可减少线损电量176万kWh,按工业电价0.65元/kWh计算,年节约电费114.4万元;同时,精准的动态无功补偿减少电压波动对变压器、线路等设备的冲击,延长设备使用寿命约2-4年,降低设备更换与维修成本,年均减少运维费用约35万元。间接经济效益体

现在企业用电保障与企业内分布式电源消纳提升:策略实施后电压合格率从95.8%提升至99.5%,避免因电压不稳导致的企业生产设备停机、损坏,减少企业经济损失,以该企业5家生产车间为例,每年可避免因电压问题导致的生产中断损失约150万元;企业内分布式电源消纳率从85%提升至95%,每年多消纳光伏电量120万kWh,减少弃光损失约78万元,同时降低化石能源发电依赖,助力企业节能减排目标实现,具有显著的环境与社会效益<sup>[4]</sup>。综合测算,该企业配电网应用本策略后年均经济效益超377.4万元,投资回收期约3.5-4.5年,经济效益与社会效益显著。

#### 结束语

本文围绕基于动态无功补偿的企业所属配电网电压稳定性提升展开研究,针对现存问题提出系列策略并分析其保障措施与经济效益。实践表明,所提策略能有效提升企业配电网电压稳定性,降低线损,提高企业内分布式电源消纳率,带来显著经济与社会效益。未来,随着企业内分布式电源持续发展,企业配电网电压稳定面临新挑战,需进一步优化策略,加强技术创新,推动企业配电网向更加智能、稳定、高效的方向发展,以更好地适应企业能源转型需求。

#### 参考文献

- [1]李江,巩彦江,叶宝柱,等.配电网低电压产生原因与综合治理研究[J].电力设备管理,2021,(08):31-32.
- [2]熊伟鹏.高比例分布式电源接入配电网静态电压稳定性分析[J].江西电力,2024,48(04):11-15.
- [3]张米,牟龙华,刘汉宇.直流区域配电网电压稳定性分析[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(07):1-9+35.
- [4]王志强,刘晓峰,李慧敏.含分布式电源的配电网电压稳定性分析方法综述[J].电力系统自动化,2021,45(12):178-189.