

风电并网系统无功功率优化配置与电压稳定控制

张旭刚

大唐四川发电有限公司新能源分公司 四川 成都 610000

【摘要】：大规模风电并网后，风速随机性与风机无功特性易引发系统电压波动，威胁电网安全稳定运行。本文以双馈风电机组为核心，分析其无功输出特性、风电并网节点电压稳定影响因素及无功功率作用机制，构建多场景无功需求计算、多目标函数及约束条件与混合求解方法的无功优化配置模型，提出系统层-区域层-场站层三级分层分区控制架构，结合风电场侧与电网侧无功协调控制策略实现电压调控。基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建仿真模型，多工况验证得出，所提优化配置与控制策略可有效降低网损、抑制电压波动、提升电压稳定裕度，为大规模风电并网电压稳定控制提供理论与工程参考。

【关键词】：双馈风电机组；风电并网；电压稳定；无功优化；协同控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.055

引言

风电产业快速发展，大规模风电集群并网已成新能源发展主流，风电出力随机性、波动性及双馈风电机组特殊拓扑结构，导致系统无功功率分布失衡，引发电压波动、暂态失稳等问题，制约风电消纳与电网安全运行。优化无功配置、完善控制策略，提升风电并网系统电压稳定性，是电力系统领域研究热点。本文针对该问题，从双馈风机无功特性出发，构建无功优化配置模型，设计分层协同电压稳定控制策略，结合仿真验证其有效性，为大规模风电并网电压控制难题提供技术支撑，助力新能源电力系统高质量发展。

1 风电并网系统电压稳定与无功功率特性分析

1.1 双馈风电机组无功输出特性

双馈风电机组定子直接并网，转子经背靠背变流器励磁，可实现有功与无功功率独立解耦控制，无功输出能力由转子侧变流器容量、定子运行电压及当前有功出力共同决定^[1]。定子磁场定向矢量控制框架下，调节转子 d/q 轴电流，能灵活实现感性及容性无功双向调节，可发出无功支撑并网点电压，也可吸收无功抑制轻载工况过电压现象。变流器容量约束下，机组无功调节范围呈现明显有功-无功耦合特性，低有功出力时段无功调节裕度较大，高有功满发时段调节能力显著受限。功率前馈控制策略加持下，电网电压波动时无功响应速度大幅提升，动态无功支撑性能更适配风电并网系统快速调压需求。甘肃酒泉千万千瓦级风电基地实际运行中，1.5MW 双馈机组额定有功出力下无功调节范围约为-0.3MVar~0.3MVar，有功降至30%额定值时调节范围可扩展至-0.45MVar~0.45MVar，具备良好的就地无功支撑潜力。

1.2 风电并网节点电压稳定影响因素

风速大幅波动导致风电场有功出力快速变化，直接引发并网点无功需求剧烈波动，网架薄弱、线路阻抗比较高的送出系统中，电压对无功变化敏感度显著提升，易出现电压越限。风机大规模集群并网，集电线路分布电容充电功率与机组无功

调节行为叠加，进一步加剧电压波动幅度。电网故障期间，双馈机组易出现暂态过流，短时限制无功支撑输出，加剧电压跌落深度与恢复难度。负荷峰谷波动、无功补偿装置配置不足、调压设备响应时序不匹配等，持续压缩电压稳定运行边界。河北张北风电基地实测数据显示，风速 10 分钟内由 6m/s 升至 12m/s 时，35kV 汇集母线电压波动幅度达额定值的 7%，远超常规稳定运行允许范围，直观体现风电波动对节点电压稳定的显著影响。

1.3 无功功率对电压稳定的作用机制

无功功率通过潮流传输与电压灵敏度关系直接作用于风电并网系统电压稳定，感性无功注入提升节点电压幅值，容性无功抑制电压升高，作用强度与线路电抗呈正相关。稳态运行场景下，双馈机组提供的连续可调无功可平抑风速波动带来的小幅电压偏差，维持并网点电压在合格区间^[2]。故障暂态场景中，机组快速释放动态无功抑制电压深度跌落，延缓电压崩溃风险，配合静态无功补偿装置形成完整电压支撑体系。无功功率持续缺额引发节点电压逐级下降，甚至诱发电压失稳；无功过剩则导致系统过电压，威胁设备绝缘与安全运行。合理的无功功率分布与动态调节，可有效提升系统电压稳定裕度，降低功角失稳可能性，形成双馈机组动态快速支撑、无功补偿装置稳态后备支撑的协同调压机制。

2 风电并网系统无功功率优化配置模型

2.1 多场景无功需求计算

多场景无功需求计算以风电出力特性、电网运行方式及负荷波动规律为基础，划分额定风速高出力、低风速轻载、故障暂态、夜间低谷四类典型运行场景，量化不同工况下系统无功缺口与冗余。基于双馈风机有功-无功运行域曲线，核算自身无功调节能力，计入集电线路无功损耗、变压器励磁无功及电压偏差约束，确定各场景所需外部无功补偿容量。采用场景概率法对各典型场景加权，得到全周期无功需求期望值，兼顾稳态调压与暂态支撑需求。江苏如东海上风电场实际测算表明，

高风速满发场景下风机无功出力接近上限,需SVG补充约15%的无功容量;低风速轻载场景下风机无功裕度充足,仅需少量容性补偿抑制过电压;故障场景需预留不低于30%的无功储备,满足低电压穿越期间的无功支撑要求。

2.2 无功优化配置目标函数构建

无功优化配置采用多目标协同优化思路,构建以系统运行经济性与电压稳定性为核心的综合目标函数。核心包含四项子目标:系统总有功网损最小化、并网节点电压偏差最小化、无功补偿装置全生命周期投资与运行成本最小化、双馈风机无功调节裕度最大化^[3]。熵权法确定各子目标权重,将多目标优化问题转化为单目标优化问题,实现降损、稳压、经济、可靠的多重平衡。目标函数纳入功率前馈控制下的机组动态响应成本,弥补传统模型忽略动态调节特性的缺陷,引入电压稳定裕度指标,确保优化结果满足经济性的同时,具备足够安全稳定冗余(见图1)。

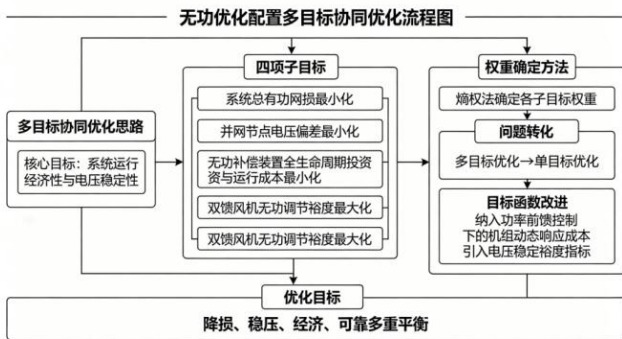


图1 无功优化配置目标函数构建

2.3 约束条件与求解方法

无功优化配置模型约束条件覆盖电气运行与设备物理双重限制,包括双馈风机无功出力上下限约束、无功补偿装置容量与投切次数约束、并网节点电压允许偏差约束、线路潮流安全限额约束、电网拓扑与运行方式约束等。求解方法采用内点法与改进粒子群算法相结合的混合算法,改进粒子群算法引入自适应权重与贪心策略,提升全局寻优精度与收敛速度,避免传统算法易陷入局部最优的问题。迭代过程中同步进行潮流计算,实时校验约束满足情况,最终输出最优补偿容量、最佳安装位置及风机无功出力分配方案。该方法适配风电出力随机波动特性,可快速响应多场景无功需求变化,满足中长期规划与实时运行优化要求,在IEEE14节点系统与实际风电并网系统中均验证了较高求解精度与计算效率。

3 基于无功优化的电压稳定控制策略

3.1 分层分区电压稳定控制架构

电压稳定控制采用系统层、区域层、场站层三级分层分区协同架构,结合风电并网系统拓扑特点与运行需求实现电压控制。系统层承担全局控制核心职能,统筹全网无功资源,制定

电压计划并做出全局优化决策,结合全网运行状态分配各区域无功调节任务,保障全网电压稳定。以风电汇集送出区域为控制单元的区域层,协调区域内风电集群与电网运行,实现分区无功就地平衡,降低跨区域无功传输的网损与电压波动,提升控制效率。场站层直接对接风电场与无功补偿装置,执行毫秒级就地调压指令,快速响应电压波动完成实时调节。各层级通过高速通信交互数据,保障指令传递及时准确,依托模型预测控制滚动优化,根据实时运行数据动态调整控制策略,系统层响应为秒级,区域层为分钟级,场站层为毫秒级,构成分级响应、分区平衡、协同闭环的控制体系。新疆哈密风电基地应用该架构后,区域电压调节响应速度提升60%,电压越限时长减少80%,提升大规模风电并网条件下的电压可控性,解决大规模风电并网带来的电压控制难题。

3.2 风电场侧无功电压协调控制

风电场侧以双馈风机为核心,联合SVG、电容器组构成就地无功电压协调控制系统,发挥各类设备优势实现无功电压协同调控。控制策略优先利用双馈风机自身连续可调无功,基于定子磁场定向与功率前馈控制优化转子变频器调节性能,加快无功响应速度,平抑风速波动引发的电压小幅波动,降低外部补偿设备投入。风机调节能力不足、无法满足电压稳定需求时,快速投入SVG动态补充,凭借其响应快、精度高的特点弥补风机调节短板,电容器组承担基础稳态无功补偿,降低动态设备运行损耗,提升系统运行经济性。系统实时计算并网点电压-无功灵敏度,依据数据合理分配风机与补偿装置出力,避免单台设备调节过载,延长设备使用寿命,严格遵守有功-无功耦合约束,调节无功时保障风机发电效率与运行安全,不影响风电出力。该控制策略整体响应时间小于50ms,内蒙古锡林郭勒风电基地实际运行中,并网点电压偏差可稳定控制在±2%以内,调压效果显著,为风电场就地电压稳定提供可靠保障。

3.3 电网侧无功补偿装置协同控制

电网侧整合SVC、SVG、同步调相机、有载调压变压器分接头等设备,构建多时间尺度无功补偿协同控制体系,针对不同电压扰动场景实现无功调节^[4]。按电压稳定控制优先级分配调节任务,明确各类设备职责分工:SVG、SVC等快速动态装置平抑暂态电压波动,响应时间达毫秒级,可快速应对电网故障、风速骤变引发的电压突变;同步调相机提供大容量无功储备,支撑故障后电压快速恢复,提升系统暂态电压稳定性;有载调压分接头承担稳态电压粗调,动作间隔为分钟级,适配负荷缓慢变化、风电出力平稳场景下的电压调节需求。系统建立装置响应时序模型,明确各类设备动作顺序,故障期间快速装置优先动作,快速抑制电压跌落,稳态运行时优化投切组合降低网损,提升运行经济性,与风电场侧控制策略联动,实现场站侧与电网侧协同配合,避免两侧调节反向冲突,确保电压调节一致性。青海海南州风电送出系统应用该协同控制后,故障

后电压恢复时间缩短至 0.3s 以内，电压稳定裕度提升 25%，解决大规模风电并网带来的电压波动与暂态失稳问题（见图 2）。

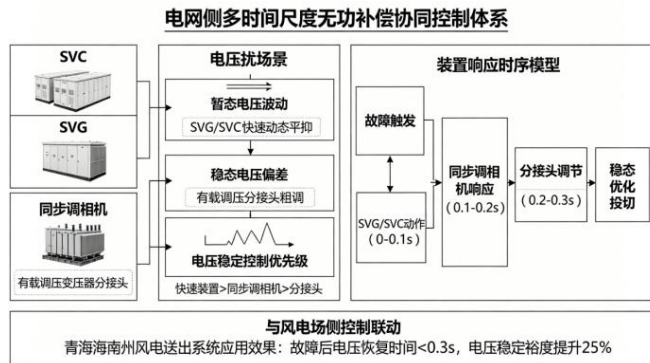


图 2 电网侧无功补偿装置协同控制

4 风电并网系统仿真验证与分析

4.1 仿真模型与参数设置

仿真验证基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建与实际工程一致的风电并网系统模型，该平台拥有强大电磁暂态仿真能力，可模拟风电并网系统运行特性，保障仿真结果可靠实用^[5]。风电机组采用论文提出的三相可控电流源等效模型，包含风速模型、风轮机模块、桨距角控制模块、变流器功率前馈控制模块，还原双馈风电机组运行机制与控制特性；电网模型涵盖 35kV 集电线路、110kV 升压站、主变压器及 SVG、电容器组等无功补偿装置，覆盖风电并网核心环节，模拟实际电网拓扑结构与运行状态。仿真设置额定运行、连续风速波动、三相电压暂降 50%、负荷突变四种典型工况，覆盖风电并网常见运行场景与扰动情况，仿真步长 50 μs，总时长 10s，可完整捕捉系统动态响应过程。模型参数以河北张北 300MW 风电场并网系统为实际案例，机组、线路、变压器等参数与现场完全一致，保障仿真结果的工程真实性与可比性，为后续优化配置与控制策略验证提供可靠模型支撑。

参考文献:

- [1] 陈杰.双馈风电机组控制参数辨识及场站等值方法研究[D].西安理工大学,2025.
- [2] 李军.双馈风电机组自适应频率响应控制优化研究[D].东北电力大学,2025.
- [3] 姚景昆,张盼盼.双馈风电机组并网次同步振荡抑制方法[J].河南工学院学报,2025,33(03):6-13+80.
- [4] 周致言.双馈风电机组故障穿越特性与阻抗特性耦合影响研究[D].华北电力大学,2025.
- [5] 张书瑞.构网型双馈风电机组稳定性分析与控制研究[D].华北电力大学,2025.

4.2 无功优化配置效果仿真

无功优化配置效果仿真结果显示，多目标优化后系统总有功网损降低 12.3%，并网点电压偏差控制在 ±1.5% 以内，符合 GB/T 19963-2021 风电并网技术标准。双馈风机无功调节裕度利用率达 85%，无功补偿装置总配置容量减少 18%，降低工程投资与占地成本。高风速场景下，电压稳定裕度提升 22%；低风速场景下，轻载过电压问题彻底解决；三相电压暂降场景中，系统无功储备充足，电压跌落深度减小 35%。相较于传统固定补偿方案，优化后并网点电压波动幅度降低 60% 以上，充分验证无功优化配置模型在提升电压稳定性、降低运行成本上的有效性。

4.3 电压稳定控制策略验证

电压稳定控制策略在多工况下完成仿真验证。额定工况下，分层分区控制使系统电压稳定维持在 0.98~1.02p.u.，全网无功潮流分布均衡；连续风速波动工况中，风电场侧协调控制快速调节风机无功，电压波动幅度控制在 ±1% 以内；50% 深度三相电压暂降、持续 0.5s 工况下，电网侧与场站侧协同动作，故障清除后电压 0.2s 内恢复至额定值 90% 以上，双馈机组实现低电压穿越且无脱网现象。仿真结果证实，所提控制策略可快速平抑风电波动引发的电压扰动，提升暂态电压恢复能力，增强风电并网系统电压稳定水平。

5 结语

本文围绕风电并网系统电压稳定与无功功率优化展开系统研究，明确双馈风电机组无功输出特性及电压稳定影响机制，构建兼顾经济性与稳定性的无功优化配置模型，提出分层分区协同电压稳定控制策略，通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证研究成果有效性。研究证实，合理无功优化配置与协同控制可降低系统网损、抑制电压波动、提升暂态电压恢复能力。未来可结合新能源高比例并网场景，优化多设备协同控制时序，提升模型求解效率，为更复杂工况下风电并网系统电压稳定控制提供更完善解决方案。