

分布式光伏接入对配电网电能质量的影响及优化策略研究

王鸿洋

(江苏深瑞汇阳能源科技有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要 分布式光伏大量接入配电网后, 电压偏差、电压波动、谐波畸变以及三相不平衡问题突出。本文结合现场运行数据, 分析了光伏出力与电网结构不匹配、逆变器控制策略不足等内在因素, 提出逆变器无功电压控制、无功补偿与储能协同配置、并网管理与配电网改造等优化措施。结果表明, 技术手段与管理机制协同作用, 能够有效改善电能质量, 为配电网安全稳定运行提供参考。

关键词 分布式光伏; 配电网; 电能质量; 电压偏差; 谐波

中图分类号: TM727.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.006

0 引言

分布式光伏发电符合环保、节能要求, 具备就地消纳、线损低的优势, 在场景适配性上优于远距离输电的传统集中式发电模式, 因此在全球范围内得到快速发展。国外(德国、澳大利亚等)已形成较为成熟的高渗透率分布式光伏并网管理体系, 当前研究重点聚焦分布式逆变器快速电压支撑与用户侧储能的协同调控; 国内近年来分布式光伏装机容量激增, 但存量中低压配电网多按单向用电潮流规划设计, 高比例分布式光伏接入后, 反向潮流引发的末端电压越限、谐波畸变、电压波动等电能质量问题日益突出。现有多数研究多集中于 SVG 单独补偿、调压装置改造等单一技术措施, 尚未形成覆盖设备参数优化、配电网运行调控、并网准入管理的全链条系统优化策略。基于此, 本文结合配电网实际运行特征, 分析各类电能质量问题的影响机理并提出工程可落地的实用优化策略。

1 分布式光伏接入对配电网电能质量的影响

1.1 电压偏差与电压越限问题

分布式光伏沿馈线多点接入后, 配网由单向辐射网络变为含多处功率注入的有源网络, 并网点及上游节点的电压不再沿潮流单调下降, 而在光伏出力大于本地负荷时出现反向功率驱动的附加压升。线路压升幅值取决于反向功率大小与线路等效阻抗的乘积, 架空线单位阻抗多在 $0.2 \Omega/\text{km} \sim 0.4 \Omega/\text{km}$ 量级、且 R/X 比普遍偏高, 馈线较长、导线截面偏小的农网或城郊

台区更容易在大发时段把末端电压顶到临界区。按《电能质量 供电电压偏差》(GB/T 12325-2008)的控制要求, 20 kV 及以下三相供电电压偏差限值为 $\pm 7\%$, 对应 10 kV 侧不宜越过 10.7 kV, 220 V 用户侧上限为 235 V; 但实际运行中, 午间光伏出力峰值时末端低压母线常抬升至 242 V $\sim$ 248 V 区间, 越过 +7% 限值却未必立刻触发逆变器过压脱网阈值^[1]。

1.2 电压波动与闪变

分布式光伏的出力特性与光照强度呈强耦合关系。在多云天气下, 云层的快速移动会导致光伏阵列接收的辐照度发生秒级剧烈变动, 进而引起输出功率的陡升陡降。这种功率的随机波动注入配电网后, 由于线路和变压器均存在等效阻抗, 流经阻抗的功率变化会直接转化为节点电压的波动, 其波动幅度与线路阻抗及功率变化率成正比。在实际运行中, 当同一并网点光伏出力在 1 分钟内变化率达到装机容量的 20% 左右时, 对应的公共连接点电压波动幅度通常维持在 2% $\sim$ 4% 区间。虽然单次波动未超出《电能质量 供电电压偏差》(GB/T 12325-2008)的电压偏差限值, 但其频率极高。

1.3 谐波畸变与三相不平衡

分布式光伏经逆变器并网, 脉宽调制换流过程必然向电网回注谐波电流, 其频谱特征集中在开关频率及其边带, 低次成分则以 3、5、7 次为主。单台设备出厂虽能满足《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549—93)对谐波电流的限值要求, 但同一台区多台逆变器并

作者简介: 王鸿洋(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 分布式光伏并网技术。

列运行时,各支路谐波电流在公共连接点叠加,若相位接近便产生算术累加而非均方根随机抵消,结果是午间大发时段台区总谐波畸变率较无光时段抬升约 0.8%~1.5%,极端工况逼近 5% 的电压 THD 限值,表现为变压器与线路附加损耗增大、并联补偿电容器运行温升异常。三相不平衡问题更为典型。低压户用光伏大量采用单相(220 V)并网,而自然负荷侧三相分配本就不匀,光伏容量又按屋顶可用面积零散落点,很难做到 A/B/C 三相严格对等,导致并网点三相电流幅值与相位差持续偏离对称运行状态^[2]。

2 电能质量问题的形成机理与影响因素

2.1 光伏出力特性与电网结构不匹配

配电网的建设逻辑一直是“按负荷选截面、按辐射流向定保护”——功率从变电站母线下行,电压沿馈线自然跌落,调压仅需依靠主变有载分接头(OLTC)的阶梯式干预即可满足需求。这套逻辑隐含了一个前提:潮流始终是单向的,且负荷变化具有可预期、可平滑预测的特性。然而,光伏接入后,这一前提在一天中的部分时段被彻底打破。

光伏出力跟辐照走,中午峰值往往落在 10:00—14:00,偏偏这段时间对多数配网来说是轻载窗口;春秋季节晴天尤甚,光伏大发而居民负荷被空调/采暖季节性压下去,形成典型的“源荷倒挂”,并非过剩的精力本身可怕,可怕的是过剩的电力必须在本地电网中找到消纳途径,于是沿最短阻抗路径反向灌回上级母线。问题在于辐射状网架对双向潮流先天缺工具:线路上既无中间电压支撑点,分接头调节又是有级、慢速、全局联动的——主变档位动一次管整条母线所

有馈线,却压不住某条长馈线末端被光伏顶起来的那个局部高点。

2.2 逆变器控制策略的局限性

当前广泛使用的组串式逆变器在电能质量主动支撑方面存在明显短板。大部分逆变器出厂默认采用恒功率因数控制模式,功率因数通常整定在 0.98~1.0 之间,控制目标聚焦最大化有功输出,未将电压调节纳入主控环节。当并网点电压上升至 1.05 倍额定电压以上时,常规逆变器缺乏电压下垂(Q(U))或有功功率降额(P(U))等主动响应机制,无法在毫秒级时间内自动吸收感性无功或削减有功出力。此外,逆变器之间的协调控制也是现实难题。同一台区或同一条馈线上往往安装多个品牌、多种规格的逆变器,各设备遵循不同的通信协议,缺乏统一的规约转换和时钟同步机制,无法形成协同响应。当电压波动发生时,各逆变器依照各自的保护逻辑独立动作,有的提前进入限功率状态,有的延迟发出无功,有的甚至因孤岛保护触发而脱网^[3]。

本文技术创新点:(1)提出“逆变器—储能—SVG”多设备云边协同控制架构,解决传统单设备调节的滞后性问题;(2)设计基于 Modbus/MQTT 协议的自适应通信机制,实现异构逆变器毫秒级协同;(3)构建“承载力评估—分级并网—动态改造”的全流程管理体系,填补现有规范空白。

3 分布式光伏接入电能质量优化策略

技术方案说明:本章提出基于“云—边—端”协同的控制架构(见图 1)。系统由配电云主站、配电台区(DTU)、光伏并网断路器、逆变器、UPQC 监测设备

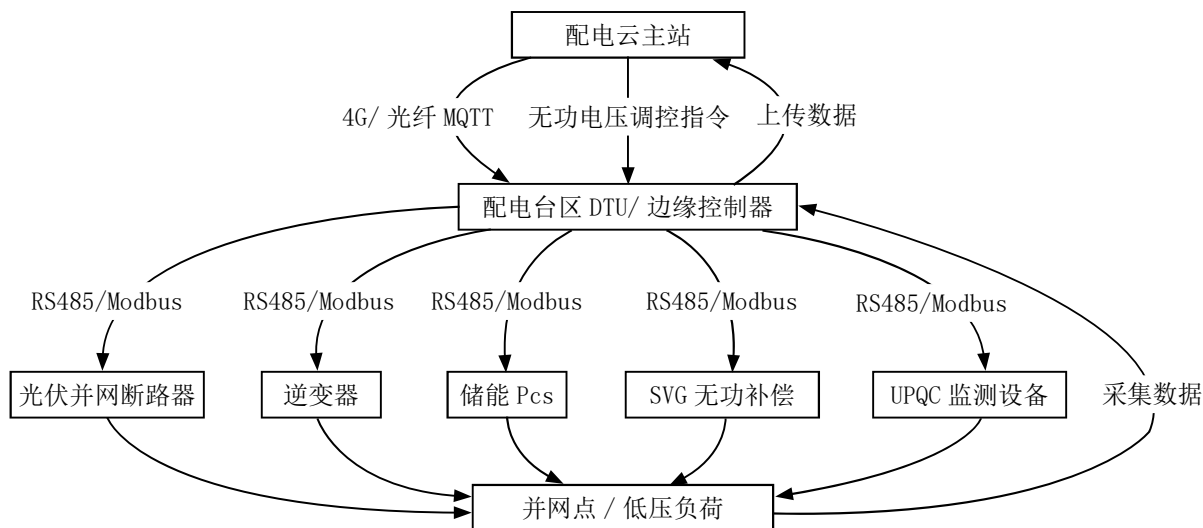


图 1 逆变器无功电压协同控制系统架构图

及储能设备构成,通过RS485总线采集数据,经由4G/光纤上传至云端,实现毫秒级无功电压调控。

3.1 逆变器无功电压控制与参数优化

在不增加额外设备投入的前提下,优化逆变器的控制策略是成本最低且见效较快的技术路径。现代光伏逆变器具备30%~44%额定容量的无功调节能力,可实现有功无功解耦控制。将控制模式由恒功率因数调整为电压下垂或恒电压控制,可使逆变器在电压升高时自动吸收感性无功。电压下垂采用Q(U)特性曲线,超阈值后无功随电压偏差线性增加,下垂系数整定为2%~5%,响应时间控制在100毫秒以内。

对于电压调节死区的设置,通常取额定电压的 $\pm 1\%$ 至 $\pm 2\%$,以避免逆变器在电压小幅波动时频繁动作。此外,对于晚间或阴天等光伏不出力的时段,逆变器理论上仍可运行在静止无功发生器模式,从电网吸收少量有功维持自身损耗后,利用剩余容量输出连续可调的感性或容性无功,动态响应时间可控制在50毫秒左右。

3.2 无功补偿装置与储能系统协同配置

对于光伏渗透率较高且逆变器调压能力不足以解决问题的台区,需要加装动态无功补偿装置或分布式储能系统。静止无功发生器(SVG)采用全控型电力电子器件,响应时间可控制在10毫秒至20毫秒之间,输出电流连续可调且不受系统电压跌落的影响。与机械投切电容器相比,SVG不存在分级调节和投切涌流问题,稳态调节精度可达1%以内。从经济性角度考虑,可优先选择在光伏接入密集的配电变压器低压侧配置集中式SVG,补偿容量可按台区光伏总装机的20%至30%进行估算。对于光伏总装机300千瓦的台区,SVG基础容量宜选取60千乏~90千乏,常规取75千乏;若预留20%裕度以应对光伏进一步增容,则最终额定容量宜按90千乏~100千乏选取。

储能系统解决电压问题有自身优势。储能变流器(PCS)具备四象限运行能力,无功输出范围大致在额定功率的 $\pm 40\%$ ~ $\pm 60\%$ 之间。更关键的是,储能能把光伏超出负荷需求的那部分有功吸收掉,从源头上消除反向潮流带来的电压抬升。在电压主动支撑策略上,储能系统通常采用下垂控制与恒压控制结合的办法,当并网点电压超过设定值后,储能按额定功率的20%~50%快速充电,响应延迟一般能控制在100毫秒以内^[4]。

3.3 光伏并网管理与配电网适应性改造

技术措施需要与管理措施相结合才能形成完整解决方案。在光伏并网管理方面,应建立分级分类的并

网准入机制。对于接入10 kV及以上电压等级的光伏电站,应要求其配置电能质量在线监测装置,采样率不低于每周波256点,并具备远程调度能力,接收主站指令响应时间不大于5秒。对于380 V及以下接入的分布式光伏,应在并网协议中明确逆变器功能要求:无功可调范围不小于额定容量30%,电压下垂控制死区不大于 ± 3 V,低电压穿越能力满足《光伏发电站接入电力系统技术规定》(GB/T 19964-2024)规定。同时,供电企业应建立电能质量跟踪评估机制,每季度至少检测一次,检测点设在配变低压侧及光伏并网点,当电压偏差超过7%或谐波总畸变率超过4%时,限15个工作日内整改。配电网适应性改造是解决电能质量问题的长远之策。对于光伏资源丰富且消纳能力不足的区域,应对辐射状线路进行分段联络改造,每2个~3个分段设一台联络开关,形成环网结构,联络线路载流量不低于分段线路额定电流的1.3倍^[5]。

4 结束语

分布式光伏带来的电能质量问题,本质上是源荷错位与配电网结构刚性共同作用的结果,加上逆变器主动支撑弱、多设备协调缺失,放大了扰动。本文提出的逆变器无功控制、SVG与储能协同、分级并网管理与配网改造等措施,从设备、系统和管理层面形成了闭环。未来,随着光伏渗透率持续提升,配电网面临的挑战将更加复杂。逆变器技术会向虚拟同步机方向迭代,台区储能和柔性互联装置成本下降后将得到更广泛应用,基于云边协同的在线预警系统也将逐步完善,推动配电网从被动适应走向主动调节。

参考文献:

- [1] 许超.分布式电源接入对配电网电能质量的影响[J].灯与照明,2026,50(02):184-186.
- [2] 马龙,周敏.分布式光伏系统接入对配电网电能质量的影响分析[J].科技创新与生产力,2025,46(06):104-107.
- [3] 王刚.分布式光伏接入对配电网电能质量的影响[J].光源与照明,2025(03):163-165.
- [4] 夏禹尧.分布式光伏电源对配电网的电能质量的影响[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(二).2024.
- [5] 李晔.分布式光伏发电接入对配电网电能质量的影响分析[J].大众用电,2024,39(03):35-36.