

户用分布式光伏并网引发低压台区三相不平衡治理措施探析

黄 冉

内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘 要:户用分布式光伏的大规模接入,在推动能源结构绿色转型的同时,也给低压配电网的运行管理带来了显著冲击,其中三相不平衡问题尤为突出。户用光伏普遍采用单相接入方式,加之光照条件的不确定性与用户用电行为的随机性,导致台区各相负荷分布严重不均,引发变压器损耗增加、电能质量恶化、设备寿命缩短等连锁问题。本文从三相不平衡的产生机理出发,系统分析了户用光伏并网加剧不平衡现象的内在逻辑,进而从优化并网管理、加装调节装置、推进台区改造、实施协同控制四个维度提出了综合性的治理措施框架。研究表明,解决户用光伏背景下的三相不平衡问题,需要采取“管理引导—设备调节—网架支撑—智能控制”相结合的系统性思路,方能实现供电安全性与光伏消纳能力的协同优化。

关键词:户用分布式光伏;低压台区;三相不平衡;电能质量;治理措施

引言

随着“双碳”战略的深入推进和整县屋顶分布式光伏开发试点工作的广泛开展,户用分布式光伏迎来了爆发式增长。截至2025年底,我国户用光伏累计装机容量已突破相当规模,且仍保持快速增长态势。户用光伏的普及对于优化能源结构、增加农民收入具有积极意义,然而其大规模并网也给低压配电网带来了前所未有的运行挑战。在诸多技术问题中,三相不平衡是出现频率最高、影响范围最广的一类。与集中式光伏电站不同,户用光伏系统绝大多数采用单相逆变器接入220V低压电网,且各户接入的相别往往未经科学规划。在晴朗天气下,光伏出力高峰与居民用电低谷叠加,大量单相功率涌入电网,导致台区三相电流幅值严重失衡。这种不平衡状态不仅增加了变压器和线路的损耗,还会引发中性点偏移、电压偏差超限、保护装置误动等一系列问题,严重威胁配电网的安全经济运行。针对上述问题,本文立足于低压台区的实际运行场景,深入剖析户用光伏并网引发三相不平衡的物理机制与关键诱因,在此基础上从多维度提出治理措施,以期对配电网运行管理和户用光伏有序发展提供参考。

1 三相不平衡的成因机理与危害分析

1.1 三相不平衡的基本概念与表征

三相不平衡是指三相电力系统中各相电压或电流的幅值不相等、相位差偏离 120° 的运行状态。在低压配电网中,通常以电流不平衡度作为主要评价指标,即最大相电流与最小相电流之差与最大相电流的比值。国家标准《电

能质量三相电压不平衡》(GB/T15543)对公共连接点的电压不平衡度作出了限值规定,但电流不平衡度尚无统一的强制性标准,实践中多以变压器额定电流的一定比例作为参考阈值。理解三相不平衡的成因,需要从低压台区的拓扑结构和运行特性出发。典型的400V低压台区采用三相四线制供电方式,变压器低压侧引出A、B、C三相,各单相用户随机接入某一相线,零线为三相电流的公共返回路径^[1]。在三相负荷完全对称的理想情况下,零线电流为零。然而实际运行中,各相所接带的用户数量和用电特性不可能完全一致,零线电流始终存在。户用光伏的大规模接入,使这一问题变得更为尖锐。

1.2 户用光伏加剧不平衡的物理机制

户用光伏对三相不平衡的强化效应可以从三个层面加以理解。其一,容量配置的相间不均。户用光伏系统的安装具有高度个体化特征,各户是否安装光伏、装机容量大小、朝向倾角条件等均不相同。由于光伏接入相别未经系统优化,可能出现某一相线接入的光伏容量远超其他两相的情况。当光照充足时,该相注入电网的功率显著高于其余两相,电流不平衡度急剧攀升。其二,出力时序的相间错位。即使在装机容量相近的情况下,各户光伏因屋顶朝向、周边遮挡等条件的差异,其出力曲线也不尽一致。这种不一致性在相间累积放大,使得某一时刻各相的总出力存在明显偏差,且偏差的方向和幅度随时间动态变化,给传统的固定补偿装置带来了适应困难。其三,潮流方向的双向改变。传统三相不平衡主要由负荷分布不均引起,潮流方向为单向(从电网流向用户)。而户用光伏接入后,

潮流可能呈现双向流动。当某相光伏出力超过该相负荷需求时,多余功率将通过变压器倒送至高电压侧,加剧了变压器各侧绕组的受力不均,使不平衡问题从配电线路延伸至变压器本体。

1.3 不平衡运行的主要危害

三相不平衡对低压台区的危害是多方面的,可归纳为以下几个方面。在设备层面,不平衡电流在变压器绕组中产生额外的负序和零序分量,导致铜损和铁损同时增加,变压器温升加快,绝缘老化加速,使用寿命缩短。对于配电线路而言,不平衡状态下零线需承载较大的不平衡电流,不仅增加了线损,还存在零线过载烧毁的安全隐患。在电能质量层面,三相不平衡引起的中性点电位偏移,使得各相电压偏离额定值。光伏接入过密的相别可能出现电压抬升超标,而接带负荷过重的相则面临电压跌落问题。电压质量恶化反过来会影响光伏逆变器的正常运行,可能引发频繁脱网或降额运行,降低光伏发电效率。在保护与控制层面,不平衡状态可能干扰台区智能终端的测量精度,影响故障检测和定位的准确性,甚至导致剩余电流保护装置误动作^[2]。此外,严重的不平衡还会增加换相开关、无功补偿等设备的动作频率,加速其机械磨损。

2 户用光伏并网三相不平衡的治理框架

三相不平衡问题并非户用光伏所独有,但光伏接入的特殊性使得传统治理手段难以完全奏效。因此,需要构建一个适应高比例户用光伏场景的综合性治理框架,其基本逻辑可概括为“源头引导、过程调节、末端支撑、全局优化”四个层次。源头引导指在光伏并网规划与建设阶段,通过合理的相别分配和容量配置,从源头上减少不平衡产生的概率。过程调节指在台区运行过程中,利用自动换相开关、静止无功补偿器等设备实时调节各相电流分布。末端支撑指通过适度改造台区网架结构,提升其对不平衡电流的承载和调节能力。全局优化则借助数字化技术和智能控制策略,实现各治理手段的协同配合和动态优化。四个层次之间具有递进和互补关系。源头引导是成本最低的预防性措施,但受制于用户意愿和建设时序等因素难以完全落实;过程调节是灵活高效的主动性手段,但设备投资和维护成本较高;末端支撑是增强系统韧性的基础性保障,但改造周期长、一次性投入大;全局优化则发挥“大脑”作用,协调各类资源实现整体最优。四者缺一不可,需要根据台区具体条件进行组合配置。

3 治理措施的具体路径

3.1 优化并网管理:从无序接入到有序规划

解决三相不平衡问题,首先应从源头抓起,优化户用光伏的并网管理模式。当前户用光伏并网多采取“来者不拒、就近接入”的方式,供电企业对光伏接入相别的干预能力有限,这是造成相间容量严重不均的直接原因。有序规划的思路是:供电企业在受理户用光伏并网申请时,应根据台区现有各相负荷分布和已接入光伏容量,统筹确定新装用户的推荐接入相别。对于三相四线制台区,可引导用户优先接入负荷较重或已接光伏容量较小的相线,以实现各相功率的动态平衡。这项工作需要依托台区数字化台账和实时运行数据,建立科学的接入决策模型。同时,应完善户用光伏并网的技术标准,明确单相光伏接入容量上限和相别配置要求。对于单个台区内光伏渗透率较高的情形,可引导新增用户采用三相逆变器或分布式安装方式,避免单相功率过度集中^[3]。对于已建成但存在严重不平衡问题的台区,可通过有序调整部分用户的接入相别来加以改善,尽管这涉及现场改接工作,但从长远来看具有积极意义。

3.2 加装自动调节装置:动态平衡的关键手段

当源头引导措施不足以将不平衡度控制在容许范围内时,需要借助自动调节装置实施动态治理。目前应用较为成熟的设备主要有两类:自动换相开关和静止无功补偿装置。自动换相开关的工作原理是,在用户侧或分支线处设置智能换相装置,当监测到某一相电流严重偏高时,通过电力电子开关将部分负荷或光伏系统切换至电流较低的相线,从而实现三相电流的再平衡。换相操作需严格控制在过零点执行,以避免对设备造成冲击。这种装置的优点是响应速度快、调节效果直接,适用于负荷和光伏出力变化频繁的台区。其局限性在于换相次数有限,频繁动作会影响装置寿命,且对冲击性负荷的适应能力有待提升。静止无功补偿装置(SVG)和静止同步补偿器(STATCOM)则通过向电网注入补偿电流来抵消不平衡分量。与传统的电容器投切方式相比,电力电子型补偿装置具有连续可调、响应毫秒级的优势,不仅能补偿无功功率,还能在一定程度上改善三相不平衡。将SVG安装于台区变压器低压侧,可根据实时监测数据动态调整各相补偿量,有效抑制不平衡电流和中性点偏移。两类装置各有适用场景:换相开关适合分支线路层面的分散式调节,投资较低;SVG适合台区集中式调节,补偿精度高但成本相对较高。实践中可根据台区负荷特性和不平衡严重程度选择单一方案或两者组合。

3.3 推进台区网架改造:夯实物理承载基础

管理措施和自动调节装置解决的是“软”的问题,而台区网架结构是决定不平衡治理能力的物理底座。对于

老化严重、供电半径过大、线径偏小的老旧台区,即便加装调节装置,其效果也会受到网架承载能力的制约。网架改造的重点方向包括:一是适度增大配电变压器容量,预留足够的光伏消纳裕度,避免变压器长期运行于高负载率状态,为不平衡电流提供足够的裕量空间。二是缩短供电半径并合理分割台区供电范围,通过新增配变布点将过大台区拆分为若干小台区,降低线路阻抗的不对称影响^[4]。三是加大零线截面或将零线与相线采用等截面设计,增强零线对不平衡电流的承载能力,降低中性点电位偏移程度。值得强调的是,在推进台区改造时应当统筹考虑未来光伏渗透率的增长趋势,避免改造后短期内再次出现瓶颈。可以结合区域屋顶资源评估和光伏发展预测,适度超前确定改造标准,实现"一次改造、长期受益"。

3.4 实施协同智能控制:从单点治理到系统优化

上述三类措施各有侧重,但要实现最佳治理效果,还需通过智能控制系统将它们有机整合,形成"监测—研判—决策—执行—反馈"的闭环。协同控制的核心是台区智能融合终端。该终端采集台区各节点的电压、电流、功率数据,通过边缘计算进行三相不平衡度的实时评估,并据此协调各类调节资源的动作指令。例如,当终端判断不平衡度超过阈值时,优先调用SVG进行快速补偿;若补偿容量不足或效果不佳,再向各分支线的换相开关发出切换指令;同时将运行状态信息上传至配电主站,为主站层面的全局优化提供数据支撑。智能控制的更高层级是"光—储—荷—控"协同。在配置了储能设备的台区,储能系统可根据三相不平衡状况进行差异化的充放电控制——在光伏出力高峰时,将部分盈余功率存入蓄电池;在不平衡严重时,通过储能逆变器的三相独立控制功能对薄弱相进行支撑。这种协同模式将不平衡治理从"被动响应"提升为"主动调节",在改善电能质量的同时也提升了光伏消纳能力。此

外,基于历史运行数据的机器学习算法可预测次日各时段的光伏出力和负荷分布,为换相策略和储能充放电计划的制定提供前瞻性参考。从"事后补偿"走向"事前预调",是智能控制的发展方向,也是实现高比例光伏台区精细化管理的重要技术路径。

4 结语

户用分布式光伏虽为能源转型必然趋势,但其大规模无序接入导致低压配电网三相不平衡问题凸显。解决这一结构性矛盾需系统结合规划引导、设备调节、网架改造及智能控制。当前,随着新型电力系统建设推进及配电自动化水平提升,治理技术日益丰富且成本下降。供电企业应将不平衡治理纳入台区日常运维,建立常态化监测评估机制,针对不同类型台区制定差异化方案。同时,行业主管部门和标准化机构宜加快完善户用光伏并网技术规范,在规划、设计、施工、验收等环节明确平衡要求,从制度层面提供保障。展望未来,随着柔性配电技术和电力电子装备成熟,低压台区将从"刚性"向"柔性"演进,三相不平衡问题有望在更广时空范围内优化解决。但技术与设备的进步不能完全替代管理上的精细化,坚持以人为本、数据驱动、持续改进,始终是提升配电网运行质量的根本之道。

参考文献

- [1]刘建华,王思远,陈伟.高渗透率分布式光伏对配电网电能质量的影响研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(12):178-186.
- [2]赵志强,孙海峰,李娜.考虑光伏出力的低压台区三相不平衡治理技术综述[J].电网技术,2024,48(3):1122-1132.
- [3]陈宇轩,张凯.基于自动换相开关的台区三相不平衡动态补偿策略[J].电力自动化设备,2023,43(8):89-96.
- [4]王浩,刘洋,周明.户用光伏接入对低压配电网线损及电压质量的影响分析[J].可再生能源,2024,42(5):678-685.