

柔性直流输电技术

——破解超大城市电网发展瓶颈 赋能能源高质量转型

工程实践 柔性直流行业导向与实操应用

依托清晰的国家顶层政策导向,国内各大超大城市紧扣新型电力系统建设要求,立足本地电网发展痛点,分层、分场景推进柔性直流技术示范应用,覆盖主干网架互联、中心城区扩容、配网柔性互济等多个场景,形成了适配超大城市群复杂电网场景的成熟实操体系,可与传统电网改造技术形成有效互补。

主干电网层级:城市群柔直背靠背异步互联工程实践。针对城市群主干网多直流馈入耦合、短路电流超标、粤港澳大湾区、长三角先后落地柔直背靠背异步互联工程,实现区域电网安全协同运行。粤港澳大湾区在广州、东莞布局大容量柔直背

靠背站点,实现珠三角东西电网异步互联。工程投运后,形成电网异步运行模式,有效压降短路电流、提升西电东送与跨区电力交换能力,有效缓解了区域多直流馈入的稳定隐患,夯实主干网架安全基础。长三角围绕上海、杭州都市圈建设多端柔直互联工程,依托异步隔离优势均衡城乡负荷差异,夏季高峰跨区支援能力达百万千瓦级,充分验证了柔直技术在超大城市主干网架复杂改造场景中的应用价值。

中心城区高压层级:户内紧凑型多端柔直工程实践。针对老城核心区土地紧缺、无建站空间、供电容量饱和、夏季负荷过载等难题,国内多个超大城市推广全户内紧凑型柔直换流站,适配高密度城区

电网扩容需求。工程紧邻现有变电站布局,在狭小市场地内实现大容量电力输送,单片区新增数十万千瓦供电能力,有效缓解核心区夏季重过载供电压力。

城市配网层级:低压柔直台区柔性互联工程实践。针对城中村、老旧高密度小区配网负荷不均、末端电压偏低、故障停电范围大、改造难度高的短板,超大城市规模化应用小型化低压柔直互联装置,实现配网末端智能化、柔性化升级。设备可实现多台区柔性联动,用电高峰自动跨区转供、均衡负荷,消除末端低电压问题;故障时毫秒级隔离故障区段,保障非故障区域不间断供电,实现电网自愈、用户用电零感知,大幅提升供电可靠性。

价值赋能 柔性直流助力城市电网高质量发展多维成效

柔性直流技术在超大城市电网的规模化应用,跳出传统电网改造模式,从安全、经济、绿色、空间四个维度有效补足传统电网改造短板,全方位赋能城市电网高质量发展。

筑牢安全防线,提升电网运行韧性。通过主干网异步隔离、主网容量扩容、配网自愈可控的多层级防护体系,有效化解短路电流超标、交直流耦合扰动、负荷过载等安全隐患,杜绝电网连锁故障与大面积停电风险,全方位保障城市核心负荷、关键产业的供电安全,显著提升超大城市电网极端工况下的抗风险能力与应急保供韧性。

降低运维成本,提升电网经济效益。柔性直流紧凑化布局节约大量土地征地与拆迁成本,无需批量更换高压开关设备应对短路电流超标问题,减少电网硬件改造投入;设备多功能集成替代了独立的调压、滤波装置,降低设备投资与运维成本;精准的潮流优化调控有效降低电网输电损耗,跨区电力互济优化资源配置,在超大城市核心复杂场景中可持续释放良好的长期经济收益。

助力“双碳”目标,赋能绿色能源转型。柔性直流高效的新能源消纳能力,可平抑分布式光伏、风电出力波动,提

升城市新能源就地消纳比例,减少弃风弃光现象;直流输电更低的线损率,有效降低电力传输环节碳排放;集约绿色的建设模式减少电力基建对城市生态的扰动,能够有效助力城市能源绿色低碳转型,契合国家“双碳”战略发展要求。

适配城市规划,实现城网融合发展。立体化、户内化的设备布局模式,节约城市稀缺土地资源,充分复用现有地下管网、电力廊道资源,减少道路开挖与城市改造扰动,让电力基础设施更好适配超大城市国土空间规划与城市更新节奏,实现电网建设与城市发展深度融合、协同共生。

技术辩证 柔性直流技术局限性与适用边界

柔性直流并非适用于所有电网改造场景的通用方案,存在明确的技术短板与经济边界,在多数常规电网建设场景中,传统交流方案具备更优的实用性性价比。工程规划中需辩证对比两类技术优劣、精准匹配应用场景,统筹电网安全可靠性与投资经济性。

一是建设与运维成本较高,小规模场景经济性不足。柔性直流换流设备依托高端电力电子器件与精密控制系统,同等容量下建设造价、设备成本显著高于传统交流变电站。同时,设备结构复杂、运维门槛高,对运维技术、作业环境要求严苛,后期运维与折旧成本更高。对于城郊常规扩容、普通配网改造、小规模负荷补偿等基础工程,传统交流方案技术成熟、造价低廉、运维简便,投入产出比更优,盲目应用柔直技术易造成投资冗余与资源浪费。

二是稳态轻载工况能效受限,场景适配性存在短板。

柔直换流过程存在固定交直流转换损耗,且轻载运行工况下损耗率更高、能效偏低。对于负荷平稳、波动较小、无需频繁潮流调控的常规网架,传统交流输电无转换损耗、稳态运行能效更优。仅在负荷波动剧烈、需要双向功率调控、跨区异步互联的复杂场景,柔直的动态调控、电气隔离优势可抵消损耗劣势,体现综合应用价值,城郊稳态轻载片区更适配交流改造方案。

三是应用边界清晰,无法替代传统交流主流场景。柔直技术的核心价值是聚焦超大城市核心区独有难题,专门用于解决土地资源紧缺、短路电流超标、源荷错配、高比例新能源波动、极端工况保供韧性不足等传统交流难以破解的结构性瓶颈。对于网架简单、负荷均匀、短路电流可控、新能源渗透率低的普通城区与县域电网,传统交流扩容、网架优化等成熟方案工期更短、技术更稳、性价比更高。新型城市电网建设坚持差异

化布局,形成“核心瓶颈场景柔直补强、常规场景交流优化”的互补格局,并非全盘替代传统交流网架。

结语:超大城市电网高质量发展是新型电力系统建设的核心关键,面对负荷增长、空间受限、新能源接入、安全承压等多重时代考题,柔性直流技术作为重要的补强性技术,其研究应用能够有效助力破解超大城市电网面临的结构性、瓶颈性难题,夯实城市电网安全运行根基、激活能源资源配置效能,赋能绿色低碳转型,为经济社会高质量发展提供稳定、高效、绿色的电力保障。但同时需严守技术应用边界,立足技术优劣与场景适配性,联动传统交流成熟技术形成互补赋能的建设体系,因地制宜、精准施策开展电网升级改造。未来,依托柔直技术与传统电网技术的协同迭代、精准适配,将持续为城市经济社会高质量发展提供更稳定、更高效、更绿色、更智能的电力保障。

来源:广州供电局电力科学研究院

党的二十大明确提出加快规划建设新型能源体系、构建新型电力系统,《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》进一步确立“清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能”二十字建设方针,要求城市电网破解高密度负荷、高比例新能源、土地资源紧缺、短路电流超标、区域电力互济不足等多重结构性矛盾,为现代化都市高质量发展筑牢电力底座。以模块化多电平换流器为核心的柔性直流输电,凭借功率独立调控、无换相失败、潮流精准可控、占地紧凑等技术特性,在超大城市复杂电网场景中具备突出应用优势,成为破解超大城市电网发展痛点、落地新型电力系统政策要求的重要技术路径。

时代考题 超大城市电网快速发展面临共性难题

超大城市人口、产业高度集聚,用电负荷保持年均稳步增长,叠加分布式光伏、储能、电动汽车海量接入,传统交流网架先天短板持续放大,形成难以靠常规改造化解的系统性难题。

城区土地饱和,电网扩容成本居高不下。超大城市建成区开发趋于饱和,新建变电站、高压电缆走廊征地拆迁难度大、投入高。依靠传统交流扩容需持续新增主变与线路通道,施工周期长、对居民生活干扰明显,难以跟上城市负荷逐年增长节奏,与电网集约高效发展要求不符。

网架联系紧密,短路电流超标威胁电网安全。城市电网220千伏、110千伏站点分布密集,交流电网电气联系紧密,母线短路电流持续走高,多数开关设备接近额定开断极限。为控制短路电流,电网只能采取母线分列、断开联络线的运行方式,削弱片区互济能力,降低故障状态下供电可靠性。

源荷时空错配,区域电力互济

能力不足。城市商圈、交通枢纽夏季负荷峰值过载,城郊片区、老旧小区长期轻载,新能源汽车集中充电进一步拉大昼夜用电差。交流电网潮流无法自主调控,片区间难以实现实时的功率互济,只能依靠新增设备被动扩容,电网资产整体利用率偏低。

新能源高比例接入,系统稳定调控难度攀升。城市分布式光伏、用户侧储能、沿海海上风电持续规模化接入,电力电子化特征愈发明显。新能源出力具有随机性、波动性,易引发电压越限、系统宽频振荡,传统交流电网调压、稳控手段单一,难以完成大规模新能源就地消纳的政策目标。

关键负荷保供韧性不足,应急供电能力薄弱。医院、数据中心、轨道交通等一级负荷对不间断供电要求严苛。传统交流电网单点故障易引发连锁停电,黑启动支撑能力不足;极端暴雨、台风等灾害期间,配网难以独立孤岛运行,难以守住城市生命线负荷保供底线。

技术破局 柔性直流赋能城市电网升级核心优势

针对超大城市电网发展面临的一系列难题,柔性直流输电技术凭借全控型电力电子器件与模块化多电平换流技术,有效弥补了传统交流输电、常规直流输电在复杂城市电网场景下的技术短板,在调控能力、安全性能、空间适配、稳定支撑等方面具备差异化、场景化核心优势,可精准适配超大城市电网复杂工况下的高质量发展需求,是破解城市电网发展瓶颈的重要技术手段。

设备集约紧凑布局,适配城市稀缺空间资源。柔性直流换流装置采用模块化集成设计,结构紧凑、集成度高,可实现全户内、立体化上楼布置,无需大面积户外场地。同等输电容量下,柔直换流站占地面积仅为传统交流变电站的1/3至1/2,土地利用效率大幅提升。同时,直流电缆输电容量更大、损耗更低,可充分复用城市现有地下管廊资源,相较于传统交流扩容方案,更适配超大城市核心区土地稀缺、建设空间受限的发展现状,实现电力设施与城市空间的融合共生。

网架异步隔离运行,根治短路电流超标难题。柔性直流背靠背互联技术可实现不同区域交流电网的异步电气隔离,依托此项技术构建城市电网柔直分区互联系统,把电网划分为若干独立片区,两侧电网无直接电气耦合,能够从根源上阻断短路电流跨区传递,同时隔离片区故障、防止故障扩散引发大面积停电,显著提升电网安全稳定运

行水平。相较于传统拆分网架、更换高压设备的改造方式,该技术可在保障电网互济能力的前提下有效降低全网短路电流水平,解决超大城市密网架带来的短路电流超标问题。同时,异步互联模式可保障片区间双向功率自由输送,兼顾电网安全运行与电力资源互济调配,破解长期困扰城市电网的“安全与供电”两难问题。

功率解耦精准调控,适配动态负荷波动场景。柔性直流技术可实现有功、无功功率双向、独立、连续精准调节,调控响应速度达到毫秒级,调控性能优于传统电网调控设备。在城市用电高峰、新能源大发、负荷骤变等复杂工况下,可快速平抑电压波动、平衡区域潮流分布,解决中心城区低电压、外围片区过电压、新能源出力波动扰动等常态化问题,显著提升复杂工况下电网动态调控精度与响应效率。

具备孤岛黑启动能力,筑牢城市供电安全韧性。传统交流电网依赖同步发电机组建立系统电压,故障恢复、全域重启周期长、难度大。柔性直流换流器具备构网运行能力,可在电网失压后快速启动,依托本地新能源、储能资源构建独立孤岛电网,优先保障医疗、交通、政务、数据中心等核心重要负荷供电,实现电网黑启动快速自愈。在台风、暴雨、极端冰冻等自然灾害工况下,可大幅缩短停电恢复时间,有效提升超大城市电网防灾减灾、应急保供的能力。