

面向高比例分布式光伏消纳的台区柔性互联技术研究

陈宋伟 曹咏芳

天地电研(北京)科技有限公司武汉分公司 湖北 武汉 430000

【摘要】随着整县屋顶分布式光伏规模化推进,传统配电网“单向辐射、开环运行”难以适应高比例光伏接入带来的电压越限、功率倒送、三相不平衡等问题。本文提出台区柔性互联技术,通过背靠背或三端柔性直流装置实现台区间功率互济。结合某沿海省份工程实践,分析中压馈线组与低压台区组两种方案。结果表明,该技术可有效消除功率倒送、均衡负载、降低不平衡度,提升光伏消纳能力,是新型配电网建设的重要方向。

【关键词】分布式光伏;台区柔性互联;功率互济;配电网;消纳

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.001

“双碳”目标下,分布式光伏爆发式增长。截至2025年底,全国分布式光伏累计装机超过集中式,整县屋顶光伏推进导致大量光伏接入中低压配电网。传统“单向辐射、开环运行”模式出现电压双向越限、功率倒送、三相不平衡等问题。传统增容改造、无功补偿投资大、周期长,无法解决源荷时空不匹配。柔性直流技术通过柔性互联装置实现功率灵活转供,将“刚性”配电网变为“柔性”。本文基于某沿海省份工程实践,分析技术原理、方案及效果。

1 台区柔性互联技术原理

台区柔性互联是指利用电压源换流器(VSC)等电力电子装置,将两个或多个台区(或馈线)的交流母线通过直流侧连接起来,形成交直流混合配电网。其核心功能包括:

(1) 功率互济:当某台区光伏大发、负荷较小导致功率倒送时,通过柔直装置将多余功率转送至相邻轻载或重负荷台区,实现功率的时空平移。(2) 动态增容:传统开环运行的馈线之间通过柔直装置实现闭环功率交换,突破单一馈线的输送能力限制,提升整体供电能力。(3) 电压支撑:柔直装置具备独立无功调节能力,可向交流母线提供动态无功补偿,改善电压越限问题。(4) 故障转供与离网运行:当上级电网故障时,柔直装置可快速切换控制模式,实现重要负荷的持续供电,甚至支撑台区组微电网离网自治运行。

根据接入电压等级和应用场景,台区柔性互联可分为中压馈线组柔直互联(10kV~20kV)和低压台区组柔直互联(380V)。前者适用于工业园区、商业区等多馈线间的功率均衡;后者适用于居民台区、农村台区等分布式光伏密集接入区域。

2 典型工程实践

某沿海省份作为国家首批新型电力系统省级示范区,针对

高比例分布式光伏消纳难题,在中压和低压两个电压等级开展了柔性互联示范工程,取得了显著成效。

2.1 中压馈线组柔直互联工程

某市工业园区内分布大量石材加工企业,企业厂房屋顶普遍建设分布式光伏,采用“自发自用、余量上网”模式。园区由两座110kV变电站的两条10kV馈线供电,其中一条馈线(记为馈线A)接入的光伏容量大,工作日白天光伏大发期间,馈线A出现功率倒送,最大倒送功率约1.1MW;而另一条馈线(馈线B)所带负荷较重,需从上级电网受电。两条馈线负载率不均衡,光伏就地消纳困难。

为解决上述问题,在两条馈线的联络点建设了一套3MW背靠背柔性互联系统,包含两台柔性互联变流器、隔离变压器及控制系统。柔直系统实时监测两条馈线的功率和电压,当检测到馈线A功率倒送时,自动将多余功率转送至馈线B,同时可调节无功出力以维持电压合格。

工程投运后的典型日运行数据表明:柔直系统启用后,馈线A的功率倒送现象完全消除,两条馈线负载率趋于均衡,日转供电量在9.7~16.1MWh之间。经统计,馈线A全年存在光伏电力盈余的天数由投运前的298天下降至约90天,降幅达70%,光伏就地消纳能力大幅提升。

2.2 低压台区组柔直互联工程

某沿海村镇实施整村屋顶光伏建设,全村两千余户居民屋顶安装光伏,预计总容量达3MW。由于居民光伏多为单相接入,导致台区三相不平衡严重,部分台区在光伏大发时段电压越限、功率倒送,而相邻台区仍存在负荷需求。

该工程选取三个相邻的低压台区,建设一套集中式三端柔性互联系统,单端功率630kW。三个台区的交流母线通过背靠背变流器连接至公共直流母线,直流侧同时接入集中式储能

系统（630kW/709kWh）、车棚光伏（20kW）和充电桩（3×60kW）。通过能量管理系统实现台区之间的功率协调控制。

投运后的效果如下：原先光伏倒送最严重的台区，最大负载率由80.8%降至59.5%；三个台区在负荷均衡策略启用后，负载率之差控制在5%以内；台区三相不平衡度下降超过30%。此外，储能系统实现了削峰填谷，并可在上级电网故障时支撑台区组离网运行，供电可靠性显著提升。

2.3 两种技术方案对比分析

中压馈线组柔直互联与低压台区组柔直互联两种方案在接入电压等级、典型容量、适用场景和核心效果上存在明显差异，需根据实际工程条件合理选用。

从接入电压等级来看，中压方案适用于10kV馈线层面，低压方案适用于380V台区层面。从典型容量看，中压方案单套装置功率通常在3MW至10MW之间，适合处理较大规模的功率转移需求；低压方案单端功率一般为数百千瓦，更适合居民台区或小范围商业区的灵活调控。

在适用场景方面，中压馈线组柔直互联主要面向工业园区、开发区等多馈线供电区域，解决馈线间负载不均衡和功率倒送问题；低压台区组柔直互联则主要针对村镇居民台区群、整村光伏区域，重点解决台区三相不平衡、电压越限和局部倒送问题。

在核心效果上，两种方案均能有效消除功率倒送、均衡负载，但各有侧重。中压方案的优势在于大容量功率转供和动态增容，可显著提升断面输送能力；低压方案的优势在于可同时治理三相不平衡，并借助直流侧储能实现台区组离网自治运行，供电可靠性提升更为明显。两种方案并非相互替代，在实际工程中可根据网架结构和分布式光伏分布特点，选择单方案应用或高低压协同部署。

3 关键技术分析与展望

3.1 关键技术要点

柔直装置拓扑选择：两端口场景宜采用背靠背VSC，多

端口场景宜采用共直流母线式多端换流器，以降低设备成本和控制复杂度。

协调控制策略：主从控制适用于容量差异较大的场景；下垂控制适用于多端对等互济；基于一致性算法的分布式控制可提高系统可靠性。

与储能协同：在直流侧配置储能可进一步平滑光伏波动，实现峰谷套利，并支撑离网运行，是台区柔性互联的重要补充。

3.2 推广价值

台区柔性互联技术相比传统电网增容改造，具有投资小、见效快、占地少、控制灵活等优势。单套柔直装置的投资约为传统线路改造的30%~50%，建设周期由数月缩短至数周。该技术适用于城区、工业园区、农村山区等多场景，已具备规模化推广条件。

3.3 未来发展方向

（1）交直流混合配电网：在柔性互联基础上，逐步将直流负荷（如充电桩、数据中心）直接接入直流侧，减少交直流变换损耗。（2）蜂巢状配电网：借鉴某省提出的“元胞”微电网群概念，通过多端柔直互联形成蜂巢状拓扑，实现更广域的功率互济和故障自愈。（3）数智化融合：结合数字孪生、云边协同技术，实现台区柔性互联系统的全景感知、智能决策和远程运维。

4 结语

高比例分布式光伏接入对配电网的承载能力和灵活性提出了更高要求。台区柔性互联技术通过电力电子装置实现不同台区/馈线之间的功率互济与灵活调控，是解决光伏消纳难题的有效手段。某沿海省份的中压馈线组和低压台区组工程实践表明，该技术可显著消除功率倒送、均衡负载、改善电能质量，并具备投资省、周期短、可复制性强等优势。随着柔性直流设备成本的进一步下降和交直流配电网技术的成熟，台区柔性互联有望成为新型配电网建设的标准配置，为高比例分布式能源消纳提供坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 国网福建省电力有限公司电力科学研究院.新型电力系统省级示范区建设技术路径[M].北京:中国电力出版社,2022.
- [2] 国网浙江省电力有限公司.新型电力系统省级示范区研究与实践[M].北京:中国电力出版社,2023.
- [3] 董旭柱,等.新型配电网形态演化与关键技术[J].电力系统自动化,2021,45(12):1-10.
- [4] 吴在军,等.柔性直流配电技术及其应用[J].电力系统自动化,2019,43(23):2-12.
- [5] 李鹏,等.面向高比例分布式光伏消纳的配电网柔性互联技术综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(15):167-178.