

城市电网柔性分区互联方案研究

徐良德¹, 郭金川^{2,✉}, 郭挺¹, 陈雅皓²

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东广州 510000;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东广州 510663)

摘要: [目的] 柔性直流技术由于其灵活性、快速的控制能力, 可应用在异步电网互联、可再生能源并网、城市电网供电等。文章提出城市电网柔性分区互联紧凑型方案以实现城市电网分区间的互联、互济, 提高电网安全稳定水平。[方法] 根据电网现状, 考虑到城区新建输电通道的实施难度以及建设工期难以控制等因素, 利用已有的交流互联通道进行布点, 将交流弱互联改为柔性强互联, 互联端数及规模结合系统需求、原有线路的输送能力、增容改造的可行性等综合确定。由于城市用地紧张, 选用紧凑型设备, 采用户内紧凑布置。[结果] 采用柔性直流背靠背实现城市电网分区间互联、互济, 可显著降低系统短路电流水平, 提高电网互济能力和安全稳定水平; 采用户内紧凑布置, 可节省约40%的空间, 满足缓解城市土地资源稀缺的需求。[结论] 提出的柔性分区互联紧凑型设计方案对柔性直流技术在城市互联的应用中起到很好的指导作用, 具有较高的参考价值。

关键词: 柔性直流; 分区; 互联; 互济; 紧凑设计

中图分类号: TM7; TM732

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0009-08

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Flexible Interconnection of Urban Power Grid

XU Liangde¹, GUO Jinchuan^{2,✉}, GUO Ting¹, CHEN Yahao²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China;

2. China Energy Engineering Group Guang Dong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Due to its flexibility and rapid control ability, voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) technology can be used in asynchronous grid interconnection, renewable energy grid-connection, and urban grid power supply. In this paper, the flexible and compact interconnection scheme of urban power grid is proposed to realize the interconnection and improve safety and stability of the urban power grid. [Method] According to the current situation of the power grid, and considering the difficulty of implementing new transmission lines in urban areas and the difficulty of controlling the construction period, the site selection and interconnection scheme were carried out from the perspective of exploiting potential of existing substations and transmission lines. The interconnection scale was determined comprehensively by combining the system requirements, the transmission capacity of the original lines, and the feasibility of capacity increase transformation. Due to the shortage of urban land, compact equipment and indoor compact layout was recommended. [Result] The flexible and compact back-to-back converter station is adopted to realize the interconnection, significantly reduce the short-circuit current level of the system and improve the security and stability of the urban power grid. The compact design which can save about 40% of the space is adopted to meet the need to alleviate the scarcity of urban land resources. [Conclusion] The compact and flexible interconnection proposed plays a good role in guiding the application of VSC-HVDC technology in urban power grid interconnection and has high reference value.

Key words: VSC-HVDC; partition; interconnection; mutual support; compact design

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-08-09 修回日期: 2023-03-06

基金项目: 广州供电局规划项目“广州 220 kV 电网柔直互联技术应用研究”(030100QQ00210005)

0 引言

随着电网规模的扩大和负荷的增长,电网分区运行是必然趋势^[1-3]。但随着电网规模的扩大,即使在考虑分区运行的情况下,依然存在部分站点短路容量接近限值,导致区域间联络弱,正常以及事故运行方式下区域间电力互济能力弱。如果采用增强主网架的方式,投资大,且在城市地区,实施难度大。

柔性直流技术,由于其灵活性、快速的控制能力,适合应用于可再生能源并网、异步电网互联、城市电网供电、孤岛供电、直流配网、多端直流电网等领域^[4-6]。柔性直流技术在区域间电网互联已有工程应用案例,如广东电网直流背靠背工程(AC 500 kV, DC ± 300 kV / 2 × 1 500 MW)、渝鄂联网背靠背工程(AC 500 kV, DC ± 420 kV / 2 × 1 250 MW),旨在解决交直流相互影响、大面积停电风险等问题^[7-9]。柔性直流在城市电网的应用还未有工程案例,但已有一些理论研究,如柔性直流技术在城市电网应用以提升电网供电能力^[1,10-11],应用具有一定的可行性^[12-14];贡献短路电流能力与其容量、控制方式、运行方式、短路点电气距离等因素有关^[15-17]。但研究并未给出城市电网的柔性互联选点以及互联设计方案。

文章基于广州电网来讨论柔性直流技术在解决城市电网问题中的作用及解决方案,实现城市电网分区间的柔性互联、互济。

1 城市电网面临的问题

由于我国能源与负荷分布不均衡,城市电网一般面临着如下问题:

1) 本地电源支撑不足,源荷分布不协调。

本地电源不足、源荷分布不协调的问题一直是城市电网发展需应对的问题之一。本地电源的支撑不足将加重城市电网对外区电力送入的依赖,一方面外区送入电力受政策、价格及季节影响较大;另一方面,随着城市化进程的加深,建设外区电力送入所需的电力通道的难度日益加大。随着电网供电负荷的持续增大,电网电力供需平衡问题日益凸显,电源的问题将是城市电网持续高效发展的首要问题。

2) 电网局部区域供电能力不足,存在运行风险。

本地电源缺乏,新增电源点代价高;电网建设难度大,主干网供电电源不足,导致局部地区一直存在供电能力跟不上需求快速增长的问题。同时,考虑

环保的要求,很多城市的供电中心城区的主力火电逐步退役,这将导致局部电网供电能力不足,尤其是在迎丰度夏期间,电网关键断面和设备的重过载问题会比较突出。

3) 缺乏足够的电压支撑和灵活的无功电压调节手段,暂态电压稳定问题突出。

对于供电城市负荷中心,由于负荷集中、区内电源匮乏,缺乏足够的电压支撑和灵活的无功电压调节手段,暂态电压稳定问题突出。

4) 220 kV 电网短路电流过高或超标,影响电网运行方式。

对于大型、特大型城市,一般处于区域电网的中心位置,导致其 220 kV 电网短路电流会较大;若存在电厂集中接入 220 kV 片网,220 kV 侧短路电流水平进一步抬升。为降低短路电流水平,220 kV 侧母线分列运行,降低了电网运行的灵活性和可靠性。

5) 城市电网建设难度大,投资日益增高。

城市化的发展使土地资源越来越紧缺,变电站和线路选址选线难度大;由于居民的敏感性,电网项目环评阻力大;电网建设征地、拆迁难度大,征地拆迁补偿等工作协调难度大、费用高昂,电网建设投资代价高。这些导致大型、特大型城市电网项目建设难度大、工期长。

2 城市电网柔性分区互联必要性分析

为解决城市电网面临的这些问题,改变原有分区间交流弱互联的局面,增强分区间的互济,提高可靠性及灵活性,采用柔性分区互联可带来如下好处:

1) 使互联分区电网两侧负荷合理分配,优化主变负载率和电网运行裕度。

由于交流网络在一定程度上潮流不可控,互联的电网间可能存在着一侧主变负载率过高,重载运行,一侧主变负载率过低,轻载运行且供电裕度大的情况。考虑利用现有互联线路建设柔性直流背靠背实现两侧电网柔性互联,可充分利用一侧电网的供电能力,减轻另一侧的供电压力,通过柔性直流控制潮流,均匀分配两侧负荷,优化两侧主变负载率,提高电网运行裕度。

2) 限制短路电流水平,使分区互联运行可行。

大型、特大型城市负荷密度高,500 kV 变电站密集,电网联系紧密,导致部分站点 220 kV 母线短路电流水平较高,需采用母线分列运行或断开联络

线等降低短路电流水平,影响了电网运行的灵活性和可靠性。不同于交流互联,柔性互联不增加交流电网电气联系,提供的短路电流水平较低,可维持分区互联,提高电网运行灵活性和可靠性。

3)故障方式下不同供电片区紧急电力支援,提高供电的可靠性。

在故障情况下,存在部分站点过载,但受限于 220 kV 母线单相短路电流水平,难以通过采取与其他供电区域合环运行的措施进行电力支援,必要时需采取转供或者切负荷措施。此时可考虑应用柔性直流背靠背,利用柔性直流的快速控制特性,实现故障方式下不同供电片区紧急电力支援,提高运行的灵活性和供电的可靠性。

4)互联片区互为黑启动电源,提高电网故障后恢复能力。

对于负荷中心缺乏黑启动电源的电网,柔性直流背靠背可兼做黑启动电源。当一端交流系统发生严重故障时,可以借助柔性直流的电压、频率控制,通过柔性互联利用另一端交流系统建立故障端的电压、频率,向故障端交流系统供电^[18-20]。由于柔性直流系统的有功、无功解耦控制,启动过程中,可控制有功功率、无功功率降低黑启动初期的功率冲击,避免频率失稳和交流过压风险,提高电网抵御严重故障的能力和故障后快速恢复能力。

3 城市电网柔性分区互联紧凑设计方案研究

城市电网柔性分区互联示意如图 1 所示。考虑到城市的城区新建输电通道的实施难度以及建设工期难以控制,可考虑从现有互联变电站、输电线路挖

潜的角度进行选点,利用已有的交流互联通道进行布点,将交流弱互联改造为柔性强互联。根据系统需求,结合线路实施条件如原有线路的输送能力、增容改造的可行性等确定互联的端数及规模。

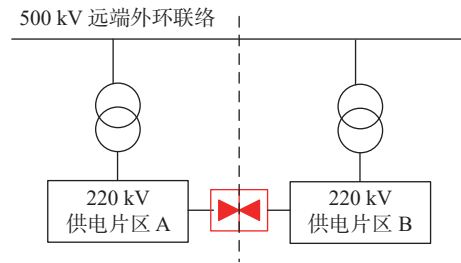


图 1 220 kV 供电分区柔性互联示意图

Fig. 1 Flexible interconnection diagram of 220 kV power supply zone

以广州电网为例,根据广州电网的现状,北郊—楚庭供电片区、木棉—海珠供电片区在一定程度上存在互联需求。下文以北郊—楚庭片区来分析互联方案。

基于北郊—楚庭互联需求,考虑充分利用现有交流通道建设柔性互联工程。目前北郊—楚庭现有的 220 kV 珠江南北交流通道共 3 个,但伍仙门—罗涌通道的 220 kV 伍仙门变电站为线变组接线,非双母线接线,不具备改造的条件,不予考虑。可考虑利用现有花地—罗涌通道或者泮塘—罗涌通道实时互联方案,实现北郊—楚庭柔性互联。

3.1 互联规模研究

在不同的应用场景下,北郊—楚庭柔性互联输送容量需求如表 1 所示。考虑天广直流双极故障以及白云气电敏感性分析下的各类故障,通过柔性互联由楚庭供电片区向北郊供电片区送电 200 ~ 600 MW 以满足不同运行需要。

表 1 不同应用场景下柔性互联输送容量要求

Tab. 1 Flexible interconnected transmission capacity requirements in different application scenarios

应用场景	控制目标	互联输送容量要求
天广直流双极闭锁,北郊3台主变负载率约106%	北郊3台主变不过载	楚庭向北郊送电300 MW
白云气电停机备用,北郊—嘉禾双回线路N-1负载率102%	N-1不过载	楚庭向北郊送电200 MW
白云气电停机备用,北郊—嘉禾双回线路同塔N-2,北郊—石井双回线路负载率113%	北郊—石井双回线路不过载	楚庭向北郊送电350 MW
白云气电停机备用,石井—环西同塔N-2,北郊—浔峰一回线路负载率135%	北郊—浔峰一回线路不过载	楚庭向北郊送电300 MW
白云气电停机备用,天广直流双极闭锁,北郊3台主变负载率约122%	北郊3台主变不过载	楚庭向北郊送电600 MW

对于互联线路,若考虑对原有输电通道进行旧线增容改造,更换原线路导线为碳纤维复合芯软铝

绞线 2×JLRX1/JFB-360/40,输送容量约 640 MVA;若采用电缆对原有输电通道迁改入地,当电缆截面为

2500 mm²时, 输送容量约 730 MVA。结合系统实际需求以及匹配线路输送能力, 北郊—楚庭供电片区的互联规模可按 600 MW 考虑, 交流侧接入 220 kV 电压等级。

3.2 短路电流影响分析

采用不同互联方式, 各种方式下各站点短路电流计算结果如表 2 所示。采用柔性互联方案时, 短路电流水平明显低于采用交流互联方案, 各站点的母线短路电流水平均满足安全稳定运行要求。

表 2 不同互联方式短路电流计算结果

Tab. 2 Short-circuit current calculation results of different interconnection modes

母线	kA			
	交流互联		柔性互联	
	单相	三相	单相	三相
罗涌220 kV母线	49.33	52.61	31.39	28.64
花地220 kV母线	33.58	43.25	27.39	31.97
泮塘220 kV母线	47.62	54.44	30.61	32.75
北郊500 kV母线	50.17	52.74	48.53	48.96
北郊220 kV母线	61.80	56.18	49.43	39.87
楚庭500 kV母线	53.63	52.36	51.85	49.32
楚庭220 kV母线	56.43	63.40	42.85	45.38

3.3 柔性互联电气主接线

对于柔性互联背靠背, 由于背靠背单元间没有架空线路或电缆, 不存在由于线路故障导致整个单元切除的方式, 可采用对称单极接线方式。

当不需要换流器提供动态无功支撑, 两端换流器无需作为 STATCOM 单独运行时, 直流侧正、负极母线上仅配置检修用接地开关, 如图 2 所示。

当需要换流器向系统提供动态无功支撑, 两端换流器需单独作为 STATCOM 运行时, 直流侧正、负极母线上需配置隔离开关, 如图 3 所示。

方案 2 比方案 1 增加了 4 组隔离开关和相应的测量装置、避雷器等, 投资略增加, 但可实现单侧停运, 另一侧仍能以 STATCOM 运行, 极大提高电网分区的动态特性。考虑灵活性, 优先采用方案 2。

3.4 紧凑型设备选型

1) 换流阀

全控型功率器件主要有绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 和注入加强

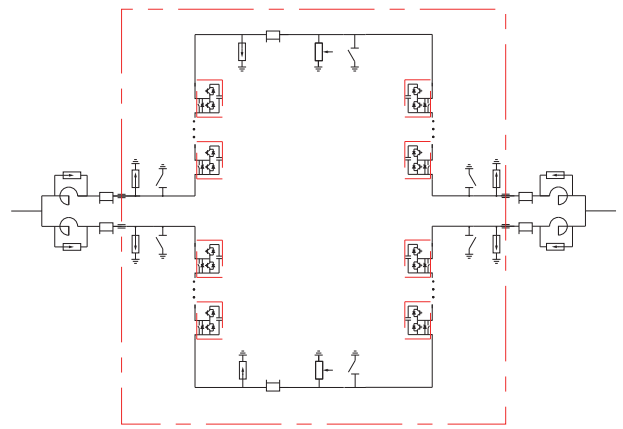


图 2 直流极线接线方案 1

Fig. 2 Dc pole connection scheme 1

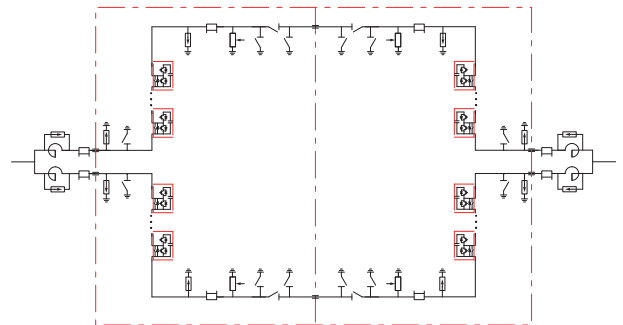


图 3 直流极线接线方案 2

Fig. 3 Dc pole connection scheme 2

门极晶体管 (Injection Enhanced Gate Transistor, IEGT)、集成门极换向晶闸管 (Integrated Gate Commutated Thyristors, IGCT)。3 种类型的器件在工程中均有应用。由于柔性互联规模为 600 MW, 交流侧接入电压等级为 220 kV, 考虑交、直流侧电压的匹配, 主要考虑额定电流为 1.5 kA、2.0 kA、3.0 kA 的器件。换流阀初步参数如表 3 所示。

方案 1 直流电压等级低、设备绝缘水平低、设备尺寸小、占地小、投资低; 方案 3 的桥臂尺寸偏大, 约为方案 1 的 1.7~2.4 倍, 不同厂家的方案略有差异。考虑占地及投资, 优先采用电压等级较低的方案 1。

2) 联接变压器

为了隔离交、直流侧的相互影响, 避免零序分量对电网的影响, 联接变压器多采用 Yn/Y 或 Yn/Δ 接法, 同时阀侧带分接头控制。

联接变压器主要有单相变压器和三相变压器两种结构型式。对于 600 MW 的柔性互联系统, 当采

表3 换流阀初步参数

Tab. 3 Preliminary parameters of the converter

方案	额定电流/kA	直流电压/kV	阀交流侧电压(rms)/kV	直流电流/kA	阀塔尺寸(长×宽×高)	桥臂阀塔数
1	3.0	±110	115	2.727	~ 7.8 m×5 m×7.5 m	1
2	2.0	±160	166	1.875	~ 8.8 m×5 m×9.5 m	1
3	1.5	±210	220	1.429	~ 8.4 m×4.4 m×7.5 m	2

用单相变压器时,数量考虑为7台,其中1台为备用相。当采用三相变压器时,数量为3台,其中1台为备用。

用于城市柔性背靠背互联的联接变压器,由于城市土地资源有限、布置条件受限,需考虑紧凑型设备,可采用三相变压器,以减少占地面积;计及备用变费用后,综合节省设备费用约25%。

另外,考虑到城市内邻避效应、噪声的控制等,同时结合换流阀的水冷却系统,联接变可考虑采用水冷却方式。

3)桥臂电抗器

桥臂电抗器主要有油浸式铁芯电抗器和干式空心电抗器两种型式,对比分析如表4所示。

表4 两种型式电抗器性能对比分析

Tab. 4 Comparative analysis of the performance of two types of arm reactors

性能	油浸式铁芯电抗器	干式空心电抗器
绝缘	需同时考虑主、纵绝缘	只需考虑纵绝缘
噪声	冷却方式为风扇和油泵强迫冷却,辅助设备多,噪声较大	无辅助设备,噪声较低
电感值	电感值较大,一般为上百mH,且会存在磁饱和问题	可以做到较小电感值,且工作线性度好
漏磁	漏磁很小,基本可以忽略不计	漏磁较大
重量	因为含铁芯和绝缘油,重量较大	不含铁芯和绝缘油,重量较小
维护工作量	含油,存在漏油和其他附件维护问题,维护工作量较大	无油,维护工作量较小
抗震	低位布置,抗震性能好	高位布置,抗震性能略差
抗污秽能力	抗污秽能力强	绝缘材料对重污秽环境适应能力略差

考虑线性度、维护便捷性,目前工程中桥臂电抗器采用干式空心型式居多,但当电抗器布置在户内时,由于漏磁的存在,需要考虑其对周边金属构件的影响。

在采用油浸式电抗器时,为节省占地,当生产、制造满足要求的前提下,可考虑三相一体电抗器。

3.5 紧凑型布置方案

由于城市地区用地紧张,考虑邻避效应及换流站与周边相协调,推荐采用户内紧凑布置。

户内紧凑型布置时,应根据工艺要求合理分区,使工艺流程顺畅,不应造成功能混杂、工艺迂回。同时布置应优化,节能节地。

每个分区在有机联系的同时,应尽量独立,减少各分区间的影响。背靠背柔性互联站按功能可分为

两端交流区域、阀厅、直流场区域等,各功能分区间的联系如图4所示。

采用多层布置时,各层应考虑如下因素:

1) 由于变压器为含油设备,且较重,所以变压器考虑设置在一层。

2) 由于桥臂电抗器存在振动,为避免设备的振动对建筑结构的影响,桥臂电抗器宜布置在一层。

3) 考虑布置的匹配性,阀厅和直流场相应布置在二层。

4) 根据层高的差异,功能房间就近设置在相关区域。

对于辅助设施可根据工艺要求就近布置。若外冷却系统采用水冷方式,则辅助设施如外冷却塔、水池等就近设置在配电装置楼周边;若外冷却系统采用风冷方式,则可设置在配电装置楼屋顶。

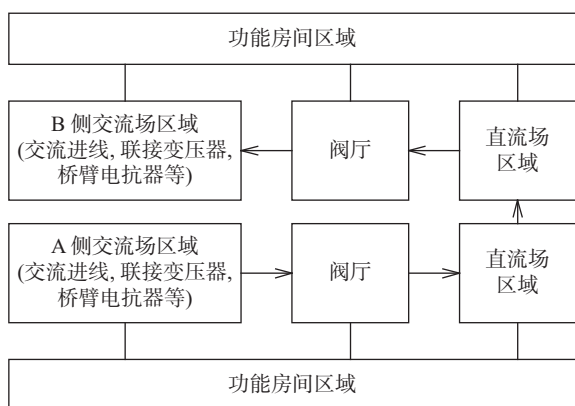


图 4 各功能分区间的工艺流程

Fig. 4 Connection between functional zones

每端各层布置及断面如图 5、图 6 所示。

当采用紧凑布置时可节省约 40% 的空间, 适用于城市用地紧张的需求。

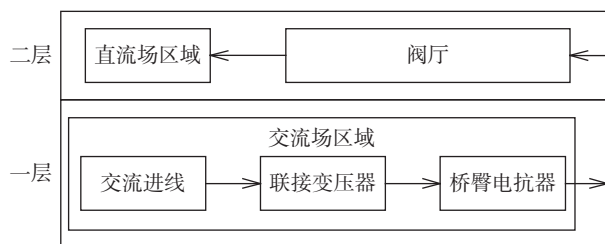


图 5 每端各层布置工艺流程图

Fig. 5 Each layer layout at each terminal

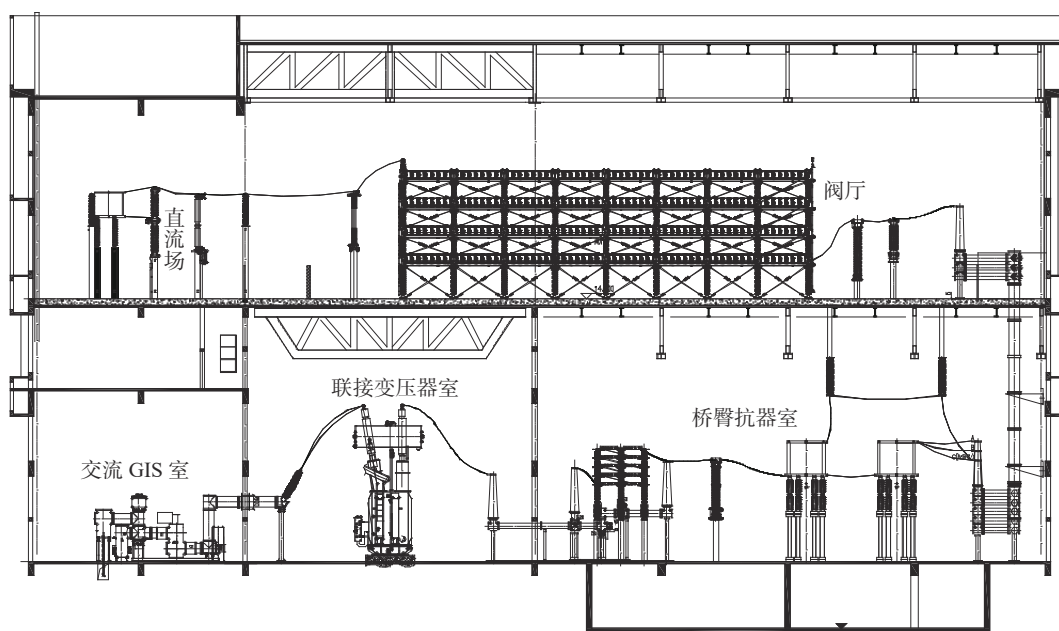


图 6 每端紧凑型布置断面

Fig. 6 Compact section at each terminal

4 结论

柔性直流技术由于其灵活性、快速的控制能力, 可解决在“双碳”目标背景下城市电网所面临的一些问题, 解决城市电网片区间供能不均衡、加强片区间的互济及抵御严重故障的能力、限制互联短路电流等。

根据城市电网现状, 并考虑城区新建输电通道的实施难度以及建设工期难以控制等因素, 利用已有的交流互联通道进行布点, 将交流弱互联改为柔性强互联, 互联端数及规模结合系统需求、原有线路的输送能力、增容改造的可行性等综合确定。由于

城市地区用地紧张, 统筹邻避效应及换流站与周边相协调, 选用紧凑型设备, 采用户内紧凑布置, 可节省约 40% 的空间。以广州电网为例, 采用柔性分区互联方案可显著降低系统短路电流水平、提高电网互济能力和安全稳定水平。

文章提出的柔性分区紧凑型互联方案对柔性直流技术在城市电网互联的应用中起到很好的指导作用, 具有较高的参考价值。

参考文献:

- [1] 窦飞, 汪惟源, 杨林, 等. 基于多端柔性直流的电网供电能力提

- 升研究 [J]. *电力与能源*, 2017, 38(1): 12-15. DOI: [10.11973/dlyny201701003](https://doi.org/10.11973/dlyny201701003).
- DOU F, WANG W Y, YANG L, et al. Study of power grid supply capability advance based on multi-terminal HVDC [J]. *Power & energy*, 2017, 38(1): 12-15. DOI: [10.11973/dlyny201701003](https://doi.org/10.11973/dlyny201701003).
- [2] 覃琴,施浩波,周勤勇,等. 兼顾系统强度和直流支撑的500 kV 电网分区方法 [J]. *电网技术*, 2018, 42(12): 4138-4144. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0372](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0372).
- QIN Q, SHI H B, ZHOU Q Y, et al. Partitioning method for 500 kV power network considering AC system strength and supporting ability to HVDC [J]. *Power system technology*, 2018, 42(12): 4138-4144. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0372](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0372).
- [3] 刘玉田,谭冰雪. 大电网恢复适应性分区方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(2): 49-54. DOI: [10.7667/j.issn.1674-3415.2013.02.008](https://doi.org/10.7667/j.issn.1674-3415.2013.02.008).
- LIU Y T, TAN B X. Adaptive partition method for large power system restoration [J]. *Power system protection and control*, 2013, 41(2): 49-54. DOI: [10.7667/j.issn.1674-3415.2013.02.008](https://doi.org/10.7667/j.issn.1674-3415.2013.02.008).
- [4] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- TANG G F. Voltage source converter based HVDC power transmission technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [5] 徐政,肖晃庆,张哲任,等. 柔性直流输电系统(2版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- XU Z, XIAO H Q, ZHANG Z R, et al. Voltage source converter based HVDC power transmission system (2nd ed.) [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [6] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等. 柔性直流输电发展现状及应用前景 [J]. *南方电网技术*, 2022, 16(3): 1-7. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2022.03.001](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2022.03.001).
- ZOU C Y, WEI R H, FENG J J, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC [J]. *Southern power system technology*, 2022, 16(3): 1-7. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2022.03.001](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2022.03.001).
- [7] 潘尔生,乐波,梅念,等. ± 420 kV中国渝鄂直流背靠背联网工程系统设计 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(5): 175-183. DOI: [10.7500/AEPS20200518007](https://doi.org/10.7500/AEPS20200518007).
- PAN E S, YUE B, MEI N, et al. System design of ± 420 kV Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(5): 175-183. DOI: [10.7500/AEPS20200518007](https://doi.org/10.7500/AEPS20200518007).
- [8] 杨燕,金楚,程鑫,等. 基于大湾区外环的柔性直流互联方案 [J]. *南方电网技术*, 2021, 15(3): 15-21. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.03.003](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.03.003).
- YANG Y, JIN C, CHENG X, et al. Flexible DC interconnection scheme based on the outer ring of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Southern power system technology*, 2021, 15(3): 15-21. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.03.003](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.03.003).
- [9] 林勇,陈允鹏,王志勇,等. 广东电网目标网架方案论证与建
- 议 [J]. *南方电网技术*, 2020, 14(3): 42-48. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.03.007](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.03.007).
- LIN Y, CHEN Y P, WANG Z Y, et al. Demonstration and suggestion on network scheme of Guangdong power system [J]. *Southern power system technology*, 2020, 14(3): 42-48. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.03.007](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.03.007).
- [10] 汪洋,葛景,王蒙,等. 应用柔性直流输电技术提升大电网交流断面输电能力探讨 [J]. *电工技术*, 2020(7): 63-65, 68. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2020.07.019](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2020.07.019).
- WANG Y, GE J, WANG M, et al. Discussion on application of VSC-HVDC to enhance transmission capacity of weak AC section of large power grid [J]. *Electric engineering*, 2020(7): 63-65, 68. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2020.07.019](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2020.07.019).
- [11] 唐晓骏,韩民晓,霍启迪,等. 匹配不同场景需求的柔性直流应用型式选择 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(16): 183-191. DOI: [10.7500/AEPS20181018008](https://doi.org/10.7500/AEPS20181018008).
- TANG X J, HAN M X, HUO Q D, et al. Selection of VSC-HVDC application type matching requirements of different scenarios [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(16): 183-191. DOI: [10.7500/AEPS20181018008](https://doi.org/10.7500/AEPS20181018008).
- [12] 闫景信. 轻型直流输电在城市电网中的应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2008. DOI: [10.7666/d.y1342807](https://doi.org/10.7666/d.y1342807).
- YAN J X. Study on the application of HVDC light in city power system [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2008. DOI: [10.7666/d.y1342807](https://doi.org/10.7666/d.y1342807).
- [13] 张林山,杨晴,崔玉峰,等. 柔性直流输电在城市电网中的应用 [J]. *云南电力技术*, 2010, 38(4): 31-34. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7345.2010.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7345.2010.04.010).
- ZHANG L S, YANG Q, CUI Y F, et al. Application of VSC-HVDC in urban power grid [J]. *Yunnan electric power*, 2010, 38(4): 31-34. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7345.2010.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7345.2010.04.010).
- [14] 李春叶,李胜. 柔性直流输电在城市电网中应用的仿真研究 [J]. *电气技术*, 2011(1): 1-4,9. DOI: [10.3969/j.issn.1673-3800.2011.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3800.2011.01.002).
- LI C Y, LI S. Simulation study of application of VSC-HVDC in urban area grid [J]. *Electrical engineering*, 2011(1): 1-4,9. DOI: [10.3969/j.issn.1673-3800.2011.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3800.2011.01.002).
- [15] 郭明星,霍启迪,赵鹏飞,等. 柔性直流贡献短路电流影响因素及工程算法误差分析 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(7): 143-150. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000644](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000644).
- GUO M X, HUO Q D, ZHAO P F, et al. Influencing factors of VSC-HVDC contribution short-circuit current and error analysis of engineering calculation method [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(7): 143-150. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000644](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000644).
- [16] 唐溢,李保宏,曾蕊,等. 柔性直流对交流系统短路电流影响因素分析 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(1): 40-47. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2022.01.006](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2022.01.006).
- TANG Y, LI B H, ZENG R, et al. Influence of VSC-HVDC on short-circuit current of AC system [J]. *Electric power engineering technology*, 2022, 41(1): 40-47. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2022.01.006](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2022.01.006).

- [17] 朱琳,寇龙泽,范征,等. 柔性直流并入城市电网后对换流站近区短路电流的影响研究 [J]. *全球能源互联网*, 2023, 6(2): 139-148. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2023.02.005](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2023.02.005).
ZHU L, KOU L Z, FAN Z, et al. Study on the influence of VSC-HVDC into urban power grid on short-circuit current of the adjacent area of converter station [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2023, 6(2): 139-148. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2023.02.005](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2023.02.005).
- [18] 李探,赵成勇,王朝亮,等. 用于电网黑启动的MMC-HVDC系统换流站启动策略 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(9): 117-122. DOI: [10.7500/AEPS201209099](https://doi.org/10.7500/AEPS201209099).
LI T, ZHAO C Y, WANG C L, et al. Startup schemes for converter station of MMC-HVDC system applied in grid black start [J]. *Automation of electric power systems*, 2013, 37(9): 117-122. DOI: [10.7500/AEPS201209099](https://doi.org/10.7500/AEPS201209099).
- [19] 赵睿,卢斯煜,王曦,等. 云南电网和主网利用直流输电系统黑启动的策略研究 [J]. *四川电力技术*, 2016, 39(5): 26-31,48. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6954.2016.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6954.2016.05.006).
ZHAO R, LU S Y, WANG X, et al. Research on black-start schemes using HVDC system in Yunnan power grid and main southern power grid [J]. *Sichuan electric power technology*, 2016, 39(5): 26-31,48. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6954.2016.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6954.2016.05.006).
- [20] 周东游,郝正航,唐文博,等. 适用于无源网络的模块化多电平柔性直流启动控制研究 [J]. *节能技术*, 2021, 39(3): 232-236.

DOI: [10.3969/j.issn.1002-6339.2021.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6339.2021.03.008).

ZHOU D Y, HAO Z H, TANG W B, et al. Suitable for modular multilevel flexible voltage source converter based on high voltage direct current start control study for passive network [J]. *Energy conservation technology*, 2021, 39(3): 232-236. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6339.2021.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6339.2021.03.008).

作者简介:



徐良德

徐良德(第一作者)

1989-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事电网规划工作(e-mail)xld1130@126.com。



郭金川

郭金川(通信作者)

1984-, 女, 正高级工程师, 硕士, 主要从事直流输电咨询设计工作(e-mail)guojinchuan@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)

