

引用格式: 苏成, 简翔浩, 孔志达, 等. 基于IGCT器件的配电网柔性直流互联策略[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 183-190. SU Cheng, JIAN Xianghao, KONG Zhida, et al. Flexible interconnection strategy of distribution network based on IGCT [J]. Southern energy construction, 2024, 11(6): 183-190. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.19.

基于IGCT器件的配电网柔性直流互联策略

苏成[✉], 简翔浩, 孔志达, 伦振坚

(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] 为了更好地适应配电网发展, 文章提出一种适用于土地资源紧张、负荷密集且不均匀地区基于集成门级换流晶闸管(IGCT)器件的中压配网柔性直流背靠背互联方案, 并对该方案进行分析, 给出合理的接线、设备选型及布置方案。[方法] 比选了电气主接线、开关器件、换流器、直流变压器、桥臂电抗器等关键设备, 以及设备布置。[结果] 研究表明: 采用直流变压器方案有较好的适应性, 不含油, 无消防问题, 系统整体体积更小; 开关器件采用IGCT器件、换流器、直流变压器采用“全桥+半桥”拓扑, 桥臂电抗器采用干式铁心电抗, 设备布置采用集装箱式, 安装方便, 便于进行标准化设计。[结论] 所提供的方案在可行性、适应性、占地及成本均可满足实际要求, 可为实际工程应用提供指导。

关键词: 配电网; 柔性互联; 集成门级换流晶闸管; 直流变压器; 集装箱式布置

中图分类号: TM72; TM4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)06-0183-08

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.19

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Flexible Interconnection Strategy of Distribution Network Based on IGCT

SU Cheng[✉], JIAN Xianghao, KONG Zhida, LUN Zhenjian

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

Abstract: [Introduction] To better adapt to the development of distribution network, a flexible DC back-to-back interconnection solution based on integrated gate commutated thyristors (IGCT) devices for medium voltage distribution network is proposed for areas with tight land resources, dense and uneven loads. The solution is analyzed, and reasonable wiring, equipment selection and layout plans are provided. [Method] Key equipment, such as electrical main connections, switches, converters, DC transformers, bridge arm reactors, as well as their layout, were evaluated and compared. [Result] The results show that the DC transformer solution offers better adaptability, is oil-free, has no fire safety issues, and results in a smaller overall system volume. Semiconductor switches adopts IGCTs. The converter and the DC transformer adopt "full-bridge + half-bridge" topology. The bridge arm reactor adopts dry-type iron-core reactors. The equipment layout is containerized, making installation convenient and facilitating standardized design. [Conclusion] The proposed solution meets the practical requirements in terms of feasibility, adaptability, land use and cost, and can guide practical engineering applications.

Key words: distribution network; flexible interconnection; IGCT; DC transformer; containerized layout

2095-8676 © 2024 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/>).

0 引言

配电网作为电力资源从生产者到消费者的关键

环节和最终环节^[1], 是电力系统的重要组成部分, 保障着电网的供电质量和供电能力。为了限制系统的短路电流, 避免出现电磁环网, 同一个地区的中压配

收稿日期: 2023-08-29 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司重大科技专项“海上风电柔性直流送出一体化监控设计技术导则”(DG1-D03-2023); 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司科技项目“中低压柔性直流电网关键技术研究”(EV04421W)

电网通常采用“闭环设计、开环运行”^[2]的方式,正常运行时断开配电线路间的联络开关,当其中一个回路电源检修或故障时,闭合联络开关进行转供电。

随着社会发展,配电网在不断更新和完善,同时也面临着一系列问题:社会经济的不均衡发展导致的负荷增长不一致,各馈线负荷分流不均;“新基建”发展驱动下的数据中心园区大规模建设,配电网结构不断变化,负荷特性逐渐多样化^[3-4];开环运行影响了中压配电网供电可靠性。统计表明,80%以上的用户停电是由配电网侧引起。即使经配电自动化改造的开环配电网,在倒闸操作时仍会短时停电;随着中国“碳达峰、碳中和”目标的提出,构建以新能源为主体的新型电力系统是中国实现双碳目标的关键途径^[5],大量分布式电源、储能等接入配电网,以及高新产业的发展,用户对于供电可靠性和供电质量的要求也日益提高^[6-7],配电网呈现运行方式多样、潮流转供形式复杂等特点,传统配电网及其运行方式已无法适应建设新型电力系统的要求。配电网不同电源间的合环互联会显著增加系统的短路电流,同时,由于不同变电站馈线出口处电位差及回路阻抗差的影响,系统中可能出现很大的环流,严重影响电网的安全稳定运行。基于此,有着众多技术优势的柔性直流输电技术^[8]在配电网的应用也越来越受到关注。

柔性互联是柔性直流输电技术在配电网中的应用之一,也称为柔性软开关(Soft Open Point, SOP)^[9-10],有端口间功率连续调节能力,正常运行时可进行有功无功调节、潮流方向控制和电压调节,事故情况下可进行故障隔离及供电恢复^[11],可提高对分布式能源的消纳能力,提升供电可靠性和运行稳定性。目前国内已建的具有代表性的中压柔性直流配网工程包括杭州江东新城智能柔性直流配电网示范工程^[12]、贵州中压五端柔性直流配电工程^[13]、珠海唐家湾三端柔性直流配电网项目^[14]、北京延庆多端柔性闭环中压配电网示范工程^[15]等,以上项目基本情况如表 1 所示。

同时,现有工程中,柔直系统所使用较多的开关器件是工艺成熟的 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极晶体管)。与此同时,IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor, 集成门极换流晶闸管)器件是一种电流控制型器件,有着通流能力

表 1 典型中压柔性直流配网工程

Tab. 1 Typical flexible interconnected distribution network

项目名称	端数	直流电压	功率器件	MMC 拓扑	是否配联接变压器	是否配直流断路器
杭州江东新城项目	3	±10 kV	IGBT	半桥	否	是
贵州项目	5	±10 kV	IGBT	半桥	是	是
珠海唐家湾项目	3	±10 kV	IGBT+IGCT	半桥/半桥+钳位模块	是	是
北京延庆项目	3	±10 kV	IGBT	半桥+全桥	否	否

强、阻断电压高、开关损耗低、可靠性高及成本较低等优点^[16],也越来越多的受到关注并应用于实际工程中。

文章介绍一种适用于土地资源紧张、负荷密集且不均匀地区基于 IGBT 器件的中压配网柔性直流背靠背互联方案,重点对比分析系统接线、关键设备选型以及站区整体布置,为后续工程提供参考。

1 柔性直流互联拓扑

1.1 电气主接线

柔性直流系统的接线型式主要有以下 3 种:不对称单极接线、对称单极接线(也称伪双极接线)和对称双极接线(也称真双极接线),如图 1 所示,图中联接变仅为示意。

不对称单极接线型式直流侧仅有 1 条极线,通过大地或金属回线构成直流回路,极线对地电压

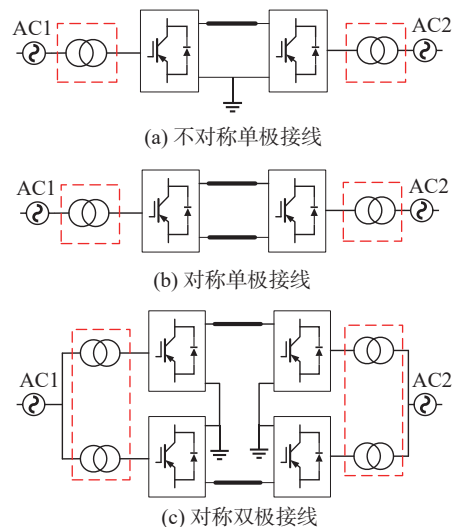


图 1 柔直系统的 3 种接线型式

Fig. 1 Three configurations of flexible DC system

为直流极间电压。这种接线方式结构简单, 造价较低, 但可靠性较差。此外, 对于采用大地回线的单极不对称接线, 直流系统正常工作时, 大地会流过直流电流, 需设计专用接地极, 入地电流还会在周围设备上产生直流偏置, 影响设备运行。这种接线方式多用于容量较小的低压直流配电系统。

对称单极接线型式中直流侧为对称的两条极线, 极线对地电压仅为直流极间电压的一半, 降低了直流设备的工作电压; 同时联接变阀侧交流设备工作在对称条件下, 不承受直流偏置电压, 降低了对设备绝缘的要求。

对称双极接线方式由两个不对称单极接线系统组成, 正常工作时, 正、负极线对称运行, 金属回线或大地回线仅流过不平衡电流, 数值通常只有数安培。当一极因故障或检修退出运行, 另一极仍可正常工作, 系统可继续输送一半的额定容量。对称双极接线方的极线对地电压同样为直流极间电压的一半, 但正、负极需要配置两套独立的换流系统, 设备和建设成本较高, 多用于大容量远距离输电场景。

3 种接线方式的比较如表 2 所示。考虑到项目建设在土地资源紧张区域, 且配网柔直互联系统对于传输容量的需求较小, 通常为 10 MVA 级别, 同时从降低项目投资的角度, 推荐采用对称单极接线。

表 2 3 种柔直系统接线方式的比较

Tab. 2 Comparison of three typical configurations of flexible interconnected system

接线型式	建设成本及占地	输送容量	控制保护方案	可靠性
不对称单极	低	小	简单	低
对称单极	较低	较小	简单	较低
对称双极	高	大	复杂	高

1.2 配置联接变压器的电气接线

配置联接变压器的方案为: 两侧交流系统经联接变压器连接 MMC(Multiple Modular Converter, 模块化多电平换流器)换流器, 经 MMC 换流器变换到直流后互联, 其接线方式如图 1(b)所示。正常运行时, 一侧换流器工作在定直流电压模式, 稳定直流极线电压, 另一侧换流器工作在定电流或定功率状态, 控制柔直互联系统输送的功率。

中压配电系统一般采取非有效接地方式, 联接

变压器网侧采用 Δ 接线, 联接变压器阀侧采用 Y 型接线, 中性点采取大电阻接地形式为柔直系统提供可靠的零电位参考。Y/ Δ 接线变压器零序等值网络如图 2 所示^[17]。图中 X_{I1} 、 X_{II1} 为变压器各绕组的正序电抗, X_{00} 为变压器的零序励磁电抗。

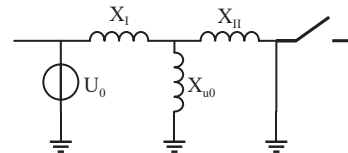


图 2 Y/ Δ 接线变压器等值网络图

Fig. 2 Equivalent circuit of transformer with Y/ Δ connection

可以看出, 联接变压器的这一接线形式切断了联接变网侧至阀侧系统的零序通路, 可以有效阻断三相电压不平衡、 $3k(k=1,2,3\cdots)$ 次谐波及零序分量在交、直流系统间乃至互联的两侧交流系统之间的传递, 提升柔直互联供电的电能质量。由于联接变压器的隔离, 一侧交流馈线的三相电压不平衡不会影响直流电压和电流的平衡, 从而不会经柔直互联系统传递到另一侧交流馈线中。在一侧交流馈线发生不对称故障的暂态过程中, 联接变压器也可以阻断不对称故障的传播。

10 MVA 容量级别的联接变压器多采用油浸式变压器, 其设备体积大, 占地面积多, 设备含油量较大, 消防问题突出, 在土地资源紧张地区使用并不占优势。也有工程采用 12 MVA 的干式联接变压器, 但其体积和重量较一般的变压器大, 且工作时振动和噪声较大, 在负荷密集区域使用会对周围居民产生影响, 需采取抑制措施。

1.3 配置直流变压器的电气接线

直流变压器(DC Transformer, DCT)是一种电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET), 通常由电力电子电路和高压变压器组成的, 具有类似于传统工频变压器电压等级变换和电气隔离功能^[18]。配置直流变压器的电气接线如图 3 所示。

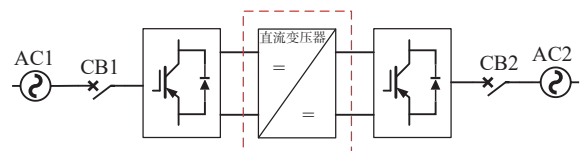


图 3 配置直流变压器的电气接线

Fig. 3 Configuration of flexible interconnected system with DCT

DCT 基于电力电子技术,将变压器原方的直流量变换为高频量,再经高频变压器和电力电子器件变换成需要的直流量后输出,高频变压器主要起隔离和变压作用。由于变压器的铁心体积与其工作频率成反比,因此高频变压器整体体积较工频变压器小得多,转换效率也更高^[19]。两种常用的 DCT 拓扑为 DAB 电路拓扑和 LC 谐振性电路拓扑。

采用直流变压器方案,可减小柔直系统的重量和体积,同时可实现互联两侧交流系统的电气隔离。并且与传统的联接变压器相比,直流变压器灵活性更高,具有调节电能质量的能力和多端口运行功能,方便分布式能源和储能设施直接以直流型式接入。两端换流器均可以构造出中压直流母线段供远期扩展接口。

根据以上分析,直流变压器主要以电力电子器件组成,隔离变压器采用高频变压器,为干式结构,不含油,消防问题相比于含油变压器小,整体体积小,是土地资源紧张地区是一个较好的解决方案。

2 关键设备选型

2.1 开关器件选型

柔直系统中的开关器件需采用全控型开关器件,常用的有 IGBT、IGCT 和 IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor,注入增强门极晶体管)。3 种开关器件的图片如图 4 所示。

IGBT 在中高压领域应用广泛,工艺成熟,但其导通压降和损耗较高,阻断电压有一定的限制。IEGT 是一种改进型的 IGBT,具有导通压降低、工作

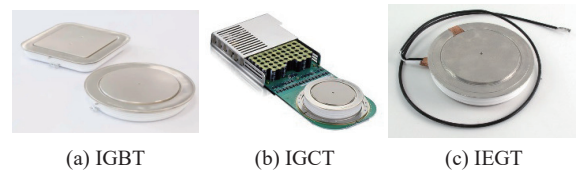


图 4 3 种半导体开关器件实物图

Fig. 4 Three kinds of semiconductor switches

频率高、易于串联使用等优点,但成熟度不够高,在中高压领域应用很少。IGCT 具有通流能力强、导通和关断损耗低、阻断电压高等特点^[20],近年来已有较多的工程应用^[21]。这 3 种器件的主要优缺点如下表 3 所示^[22]。

2.2 柔直换流器

换流器是柔直互联系统的重要组成部分,完成 AC/DC 和 DC/AC 变换,其主要组成部分为全控型功率开关器件和直流电容。为了节省成本,在高压输电领域,柔直换流器多采用半桥拓扑结构。由于半桥结构不具备直流故障自清除能力,通常需要配置直流断路器或者跳开交流测断路器以隔离故障。截至目前,直流断路器的造价仍然较高。“全桥+半桥”混合拓扑的柔直换流器有故障自清除能力^[23],当直流系统发生故障时,可快速闭锁柔直换流器以隔离故障。在中压领域,由于电压等级较低,子模块的数量较少,采用全桥+半桥拓扑的换流器相比于半桥拓扑换流器+直流断路器方案可降低成本,推荐采用“全桥+半桥”拓扑的换流器。

开关器件选择时,需考虑电容电压波动及器件开通和关断时产生的电压尖峰,工程实际中选择开关器件时,其额定电压一般为工作电压的 1.5~2 倍。

表 3 3 种半导体开关比较

Tab. 3 Comparison of three typical semiconductor switches

项目	IGBT	IGCT	IEGT
电压/电流	通流能力和耐压等级较高,可达 4.5 kV/5 kA	通流能力强,耐压等级高,可达 6.5 kV/4 kA	通流能力和耐压等级较高,可达 4.5 kV/3 kA
触发回路	简单,触发功率较低	较复杂,触发功率较高	简单,触发功率较低
开关频率	较高	较低	较高
损耗	开通、关断及导通损耗较高	开通和导通损耗较低,关断损耗较高	高
耐受浪涌电流能力	较低	较高	较低
制造成本	较高	较低	较高
可靠性	较高	高 ^[20]	较高
工程应用情况	工艺成熟,在各领域应用广泛,在柔性直流输电领域应用经验丰富	工艺较成熟,在中低压领域应用广泛,目前在高压领域应用较少	工艺成熟度不够高,应用较少

珠海唐家湾柔直配网项目直流电压为 ± 10 kV, IGBT 器件额定电压选择为 1 700 V, 单桥臂子模块数量为 28 个, 其中 3 个冗余模块^[21]。为了使柔直互联系统更加紧凑, 可使用阻断电压更高的 IGCT 器件, 减少子模块数量。同样, 直流电压为 ± 10 kV, IGCT 器件标称电压可选 4 500 V, 子模块额定工作电压 2 500 V, 每桥臂子模块数量为 8 个, 另设 2 个冗余模块。相比于 IGBT 器件, 子模块数量大大减少, 相应的换流阀的体积和重量也大大减少, 整体的造价也降低。结合前文的分析, IGCT 有着较多的优点和应用前景, 开关器件推荐采用 IGCT。

2.3 直流变压器

直流变压器一般分为隔离型直流变压器和非隔离型直流变压器两种。为了对柔直互联两侧进行电气隔离, 推荐采用隔离型直流变压器。

隔离型直流变压器又可分为移相型和谐振型两种^[24]。移相型又以 DAB (Dual Active Bridge, 双有源桥) 为主, 基本结构如下图 5 所示。LC 谐振型电路拓扑如图 6 所示。

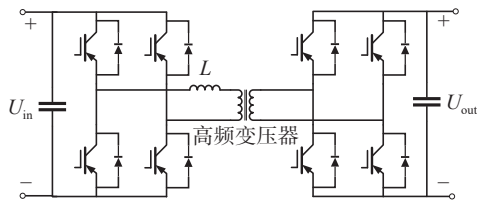


图 5 DAB 电路拓扑

Fig. 5 The topology of DAB

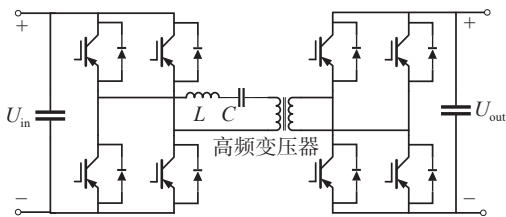


图 6 LC 谐振性电路拓扑

Fig. 6 The topology of LC resonant circuit

移相型电路拓扑是通过原副边 H 桥电路的移相, 实现类似梯形波的电流波形, 其特点是导通损耗小, 可实现双向功率流动, 控制较简单, 电压范围和容量较大。谐振型电路拓扑利用内部谐振电感和谐振电容形成类似于正弦波的谐振, 其特点是开关损耗小, 控制较复杂, 且只能实现功率单相流动, 输送的容量

也较小。根据其特点, 推荐柔性直流互联系统 DCT 采用移相型 DAB 拓扑。

直流变压器采用基于 DAB 中频功率模块的模块化设计, 可有效阻断交、直流系统中的零序分量。直流变压器的存在使得原有的单一直流母线分离成两段独立的直流母线。同上文所述, 直流变压器仍采用“全桥+半桥”混合拓扑, 具备故障自清除能力。通过闭锁直流变压器, 一侧直流母线故障情况下另一侧直流母线可以继续正常工作, 非故障侧柔直换流器仍可继续为系统提供无功支撑。

同前文, 推荐开关器件采用 IGCT, 器件选型及桥臂子模块数量与柔直换流器相同。

2.4 桥臂电抗器

桥臂电抗器位于换流器上下两个桥臂上, 其主要作用为: (1)起着联接电抗的作用; (2)抑制桥臂环流; (3)限制故障电流上升率。增大桥臂电抗器阻值也可减缓故障电流的增长速度, 限制故障电流的峰值。但是放电回路中桥臂电抗器的等效值仅为原来值的 1/3, 因此其限制效果有限, 一般可增加直流限流电抗器的阻值来实现保护配合。实际工程应用时还需要考虑电抗器本身的体积、价格等因素, 过大的电抗阻值可能给系统稳定性带来一定影响。

常用的电抗器有铁芯和空心两种。与空心电抗器相比, 铁芯电抗器体积小, 但重量重, 且存在铁芯饱和的可能。空心电抗器漏磁较大, 对钢筋混凝土建筑物以及控制保护设备均有一定的影响。预制舱内空间有限, 桥臂电抗器推荐采用体积更小的铁芯电抗器。

3 换流站布置

配网项目一般规模较小, 常采用开关房内布置或者户外箱式布置。对于柔直互联项目, 柔直换流器、直流变压器等均是模块化设计, 电抗器采用干式电抗器, 均便于采用集装箱式布置。而采用集装箱式布置占地面积小, 布置灵活, 可采用工厂组装、现场整体吊装就位的方式, 现场施工周期短, 被越来越多的工程所采用。

根据功能分区, 对于双端柔直互联项目, 一般可分为 4 个集装箱(舱室), 分别为#1 MMC 舱、DCT 舱、#2MMC 舱及二次设备舱, MMC 舱布置有交流进线

设备、交流启动柜、柔直换流器及部分直流设备, DCT 舱布置有直流启动柜及 DCT, 二次设备室布置有控制保护设备及站用电屏柜。舱体的尺寸可根据实际需要进行标准化设计, 各舱室也可根据用地情况灵活布置, 各舱室之间采用电缆沟连通, 用于敷设连接电缆。对于 MMC 舱和 DCT 舱, 可在舱壁开门, 用于设备检修维护, 不考虑舱内的维护通道, 减小舱体大小。各舱之间的距离满足设备检修用叉车通行即可, 满足转运距离, 一般情况下 3 m 即可满足要求。常见的布置如图 7 和图 8 所示。

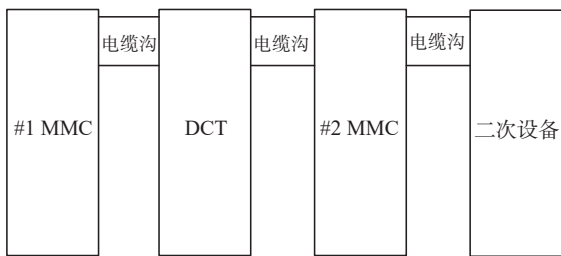


图 7 单列平行布置方案

Fig. 7 Single-row parallel arrangement for the containers

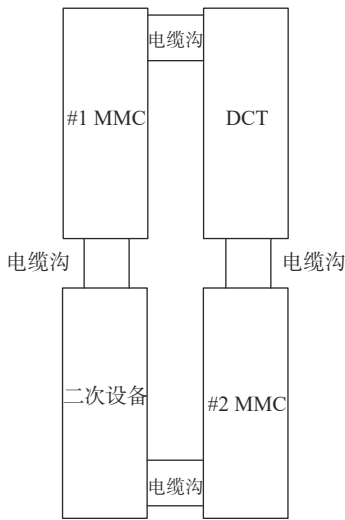


图 8 两列平行布置方案

Fig. 8 Double-row parallel arrangement for the containers

实际工程中也可根据场地情况将舱体一字型布置。在用地特别紧张的地区, 也可采用多层布置的型式, 若冷却设备、空调等辅助设施不布置在舱顶, 设备舱可直接叠装; 若辅助设施布置在舱顶, 增加钢构架即可, 具体可根据工程需要进行。一种冷却设备、空调外机等布置在设备舱顶的两层布置方案如图 9 所示。

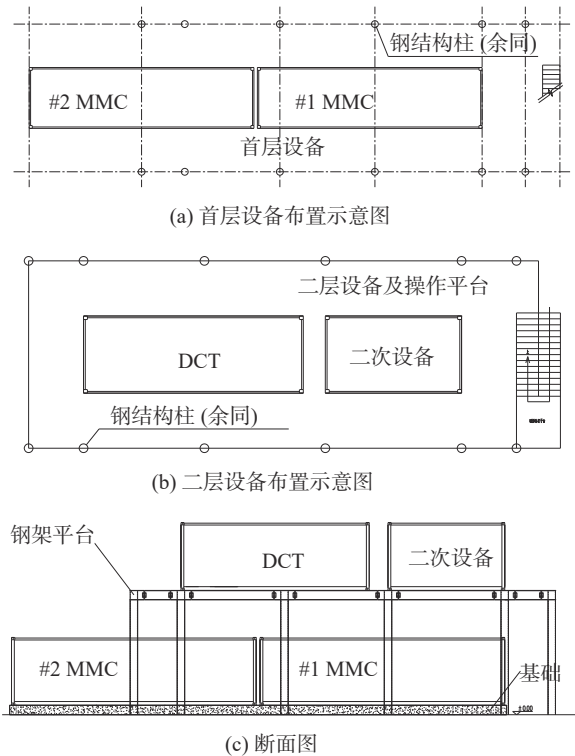


图 9 两层布置方案示意图

Fig. 9 Double-layer arrangement for the containers

4 结论

文章介绍了一种适用于负荷密集、土地资源紧张区域的配电网柔性直流互联策略, 主要结论如下:

1) 对于配电网柔性直流互联系统, 推荐采用对称单极接线, 采用直流变压器代替传统的联接变压器, 运行灵活性更高, 也可减小柔直互联系统的体积和重量; 同时, 不采用含油的联接变压器, 可降低消防风险。

2) 柔直换流器和直流变压器推荐采用全桥+半桥混合拓扑, 相比于直流断路器方案经济性更优, 柔直系统更紧凑; 对于 ± 10 kV 系统, 功率器件采用额定电压为 4500 V IGCT, 相比于额定电压 1700 V IGBT 器件功率模块数量大幅减少, 总体体积、重量及工程造价也大幅降低; 直流变压器采用基于 DAB 中频功率模块的模块化设计, 可有效阻断交、直流系统中的零序分量, 其开关器件也推荐采用 IGCT; 桥臂电抗器推荐采用铁芯电抗器, 体积小, 可减少占地。

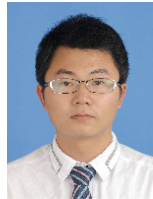
3) 换流站布置推荐采用集装箱式, 可根据实际需要进行标准化设计, 占地面积小, 布置灵活。

参考文献:

- [1] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 2-12. DOI: [10.7500/AEPS20210104007](https://doi.org/10.7500/AEPS20210104007).
HU P F, ZHU N X, JIANG D Z, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(8): 2-12. DOI: [10.7500/AEPS20210104007](https://doi.org/10.7500/AEPS20210104007).
- [2] 蔡欢,袁旭峰,熊炜,等. 柔性互联配电网运行调度研究综述 [J]. *智慧电力*, 2022, 50(6): 92-99, 106. DOI: [10.3969/j.issn.1673-7598.2022.06.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-7598.2022.06.015).
CAI H, YUAN X F, XIONG W, et al. Review on operation scheduling of flexible interconnected distribution network [J]. *Smart power*, 2022, 50(6): 92-99, 106. DOI: [10.3969/j.issn.1673-7598.2022.06.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-7598.2022.06.015).
- [3] 张勇军,刘子文,邓丰强. 柔性互联配电网研究现状综述及其发展探索 [J]. *广东电力*, 2020, 33(12): 3-13. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2020.012.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2020.012.001).
ZHANG Y J, LIU Z W, DENG F Q. Review on research status and development of flexible interconnected distribution networks [J]. *Guangdong electric power*, 2020, 33(12): 3-13. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2020.012.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2020.012.001).
- [4] 沈赋,张微,徐潇源,等. 基于随机森林和最大互信息系数关键特征选择的配电网拓扑辨识研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(17): 1-11. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240088](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240088).
SHEN F, ZHANG W, XU X Y, et al. Topological identification of distribution networks based on key feature selection using RF and MIC [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(17): 1-11. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240088](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240088).
- [5] 《新型电力系统发展蓝皮书》编写组. 新型电力系统发展蓝皮书 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
The compilation team of the blue book on the development of new power systems. Blue book on the development of new power systems [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [6] 季一润. 中压柔性直流配电网关键控制技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019. DOI: [10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001604](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001604).
JI Y R. Research on the key control technologies of medium voltage flexible DC distribution network [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. DOI: [10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001604](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001604).
- [7] 李响,张丹,李秋燕,等. 计及随机性的多分布式电源接入中压配电网承载能力评估 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(17): 150-160. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.231245](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.231245).
LI X, ZHANG D, LI Q Y, et al. Hosting capacity evaluation of distributed generators accessing a medium voltage distribution network considering randomness [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(17): 150-160. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.231245](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.231245).
- [8] 徐政. 柔性直流输电系统(2版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
XU Z. Voltage source converter based HVDC power system (2nd ed.) [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [9] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points [C]//IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, July 25-29, 2010. Minneapolis: IEEE, 2010: 1-8. DOI: [10.1109/PES.2010.5589629](https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589629).
- [10] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing photovoltaic penetration with local energy storage and soft normally-open points [C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, July 24-28, 2011. Detroit: IEEE, 2011: 1-8. DOI: [10.1109/PES.2011.6039561](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039561).
- [11] 胡成奕,严方彬,谢瑜欣. 柔性互联新型配电系统研究现状及发展探索 [J]. *湖北电力*, 2022, 46(2): 1-8. DOI: [10.19308/j.hep.2022.02.001](https://doi.org/10.19308/j.hep.2022.02.001).
HU C Y, YAN F B, XIE L X. Research status and development exploration of flexible interconnection new power distribution system [J]. *Hubei electric power*, 2022, 46(2): 1-8. DOI: [10.19308/j.hep.2022.02.001](https://doi.org/10.19308/j.hep.2022.02.001).
- [12] 王朝亮,吕文韬,许烽,等. 柔性直流配电网 MMC 子模块级联数量优化设计 [J]. *浙江电力*, 2019, 38(4): 8-12. DOI: [10.19585/j.zjdl.201904002](https://doi.org/10.19585/j.zjdl.201904002).
WANG C L, LYU W T, XU F, et al. Optimum design of cascading number of MMC sub-modules in intelligent flexible DC distribution network [J]. *Zhejiang electric power*, 2019, 38(4): 8-12. DOI: [10.19585/j.zjdl.201904002](https://doi.org/10.19585/j.zjdl.201904002).
- [13] 徐玉韬,谈竹奎,郭力,等. 贵州电网柔性直流配电系统设计方 案 [J]. *供用电*, 2018, 35(1): 34-39. DOI: [10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.01.006](https://doi.org/10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.01.006).
XU Y T, TAN Z K, GUO L, et al. Design scheme of flexible DC power distribution system in Guizhou power grid [J]. *Distribution & utilization*, 2018, 35(1): 34-39. DOI: [10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.01.006](https://doi.org/10.19421/j.cnki.1006-6357.2018.01.006).
- [14] 张明瀚,简翔浩,陆子凯. 珠海“互联网+”柔性直流配电网换流站设计方案 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(1): 95-100. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.015](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.015).
ZHANG M H, JIAN X H, LU Z K. Design of converter stations of Zhuhai "internet +" flexible DC distribution network [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(1): 95-100. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.015](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.015).
- [15] 尹昌新,朱洁,蒋迅,等. 多端柔性闭环中压配电网示范工程 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(2): 66-73. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000009](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000009).
YIN C X, ZHU J, JIANG X, et al. Demonstration project of multi-terminal flexible closed-loop medium-voltage distribution network [J]. *Proceedings of the CSU-EPASA*, 2019, 31(2): 66-73. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000009](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000009).
- [16] 徐焕新,陈勇民,陈芳林,等. 6英寸8kA/6.5kV IGCT器件特性研究 [J]. *电力电子技术*, 2023, 57(6): 134-136, 140. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2023.06.035](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2023.06.035).
XU H X, CHEN Y M, CHEN F L, et al. Study of characteristics of 6-inch 8 kA/6.5 kV IGCT device [J]. *Power electronics*, 2023,

- 57(6): 134-136, 140. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2023.06.035](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2023.06.035).
- [17] 水利电力部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册-第 1 册: 电气一次部分 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.
Northwest Electric Power Design Institute of the Ministry of Water Resources and Electric Power. Electric power engineering electrical design manual, book one: electrical primary part [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1989.
- [18] 郑通, 王奎, 郑泽东, 等. 基于 MMC 拓扑的电力电子变压器研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(15): 5630-5648 DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.220315](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220315).
ZHENG T, WANG K, ZHENG Z D, et al. Review of power electronic transformers based on modular multilevel converters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15): 5630-5648. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.220315](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220315).
- [19] 毛承雄, 范澍, 王丹, 等. 电力电子变压器的理论及其应用 (I) [J]. *高电压技术*, 2003, 29(10): 4-6. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.2003.10.002](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.2003.10.002).
MAO C X, FAN S, WANG D, et al. Theory of power electronic transformer and its applications [J]. *High voltage engineering*, 2003, 29(10): 4-6. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.2003.10.002](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.2003.10.002).
- [20] 曾嵘, 赵彪, 余占清, 等. IGCT 在直流电网中的应用展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4307-4317. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.172714](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.172714).
ZENG R, ZHAO B, YU Z Q, et al. Development and prospect of IGCT power device in DC grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4307-4317. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.172714](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.172714).
- [21] 陆子凯, 简翔浩, 张明瀚. 柔直配网关键电气设备选型研究 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(2): 105-110. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.016](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.016).
LU Z K, JIAN X H, ZHANG M H. Research on the selection of key electrical equipments of flexible DC distribution network [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(2): 105-110. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.016](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.016).
- [22] 周文鹏, 曾嵘, 赵彪, 等. 大容量全控型压接式 IGBT 和 IGCT 器件对比分析: 原理、结构、特性和应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2940-2956. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212576](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212576).
ZHOU W P, ZENG R, ZHAO B, et al. Comparative analysis of large-capacity fully-controlled press-pack IGBT and IGCT: principle, structure, characteristics and application [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2940-2956. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212576](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212576).
- [23] 赵鹏豪, 王朝亮, 许建中, 等. 一种具有直流故障穿越能力的 MMC 子模块拓扑 [J]. *电网技术*, 2014, 38(12): 3441-3446. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2014.12.027](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2014.12.027).
ZHAO P H, WANG C L, XU J Z, et al. A sub-module topology of MMC with DC fault ride-through capability [J]. *Power system technology*, 2014, 38(12): 3441-3446. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2014.12.027](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2014.12.027).
- [24] 刘瑞煌, 杨景刚, 贾勇勇, 等. 中压直流配电网中直流变压器工程化应用 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(23): 131-140. DOI: [10.7500/AEPS20190429020](https://doi.org/10.7500/AEPS20190429020).
LIU R H, YANG J G, JIA Y Y, et al. Engineering applications of DC transformer in medium-voltage DC distribution network [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(23): 131-140. DOI: [10.7500/AEPS20190429020](https://doi.org/10.7500/AEPS20190429020).

作者简介:



苏成

苏成(第一作者, 通信作者)

1987-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事变电站、换流站工程设计工作(e-mail) sucheng@gedi.com.cn。

简翔浩

1975-, 男, 学士, 正高级工程师, 主要从事变电站、换流站工程设计工作(e-mail) jianxianghao@gedi.com.cn。

孔志达

1977-, 男, 学士, 正高级工程师, 主要从事直流输电技术研究及设计工作(e-mail) kongzhida@gedi.com.cn。

伦振坚

1975-, 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事交流工程设计和继电保护研究的工作(e-mail) lunzhenjian@gedi.com.cn。

(编辑 徐嘉铖)