

柔直配网关键电气设备选型研究

陆子凯, 简翔浩, 张明瀚

引用本文:

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.

LU Zikai, JIAN Xianghao, ZHANG Minghan. Research on the Selection of Key Electrical Equipments of Flexible DC Distribution Network[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(2): 105-110.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[海上柔性直流换流站关键电气设备选型研究](#)

Research on the Selection of Key Electrical Equipments in Offshore VSC-HVDC Converter Station
南方能源建设. 2019, 6(1): 31-35 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.006>

[海上平台柔性直流换流站工程应用方案研究](#)

Research on VSC-HVDC Converter Station Application on Offshore Platform
南方能源建设. 2017, 4(1): 66-70 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.012>

[多端柔性直流配电网的可靠性和经济性评估](#)

Reliability and Economy Assessment of Multi-terminal Flexible DC Distribution Network
南方能源建设. 2020, 7(4): 67-74 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.010>

[集约式绿色换流站设备选型及优化布置研究](#)

Research on Equipment Selection and Optimal Layout of Intensive Green Converter Station
南方能源建设. 2020, 7(1): 107-112 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.017>

[±800kV柔直换流站全封闭阀厅智能巡检系统研究](#)

Research on Intelligent Inspection System in Enclosed Valve Hall of ±800 kV VSC-HVDC Converter Station
南方能源建设. 2019, 6(4): 144-151 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.023>

柔直配网关键电气设备选型研究

陆子凯¹, 简翔浩¹, 张明瀚²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 南方电网国际有限责任公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 合理选择柔性直流配网的关键设备, 有助于优化换流站的布置方案, 也对提升换流站的可靠性和降低工程投资成本具有重要作用。[方法] 通过介绍珠海唐家湾示范工程的关键设备, 分析比较关键设备不同型式的优缺点, 给出关键电气设备选型的选型意见。[结果] 阐述了柔直配网换流站的设备选型原则, 重点分析研究了关键电气设备的选型方案, 为柔直配网工程的推广提供研究基础。[结论] 相关的研究结果将为后续的柔直配网工程的仿真建模和工程设计提供参考依据。

关键词: 柔直配网; 关键电气设备; 设备选型

中图分类号: TM7; TM732

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)02-0105-06

开放科学(资源服务)二维码:



Research on the Selection of Key Electrical Equipments of Flexible DC Distribution Network

LU Zikai¹, JIAN Xianghao¹, ZHANG Minghan²

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

2. China Southern Power Grid International Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] Reasonable selection of key equipments of flexible DC distribution network will help to optimize the layout of the converter station, and it also plays an important role on improving the reliability of the converter station and reducing the investment cost of the project. [Method] By introducing the key equipments of flexible DC distribution network of Tangjiawang typical project in Zhuhai, the advantages and disadvantages of different types of key equipments were analysed and compared, and the the selection suggestions of key electrical equipment were given. [Result] By focusing on the analysis of the type selection scheme, this paper expound the principle of equipment selection for flexible DC converter station and provides the research basis for the future project of flexible DC distribution network. [Conclusion] The relevant research results of this paper can provide important reference for the simulation modeling and the engineering design of flexible DC distribution Network projects in the future.

Key words: flexible DC distribution network; key electrical equipments; selection of equipments

2095-8676 © 2021 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/>).

随着城市配电网系统接入越来越多的分布式新能源和储能设备, 大型数据中心、电动汽车充电站、直流家电等直流负荷也日益增多, 构建柔直配网能有效接纳清洁的新能源和直流负载, 减少换流过程中的电能损耗和减少换流设备的经济投资, 能有效地提高系统的效率^[1]。对于城市柔性直流配

网换流站而言, 电气设备的选择对换流站的整体布置和工程设计具有较大的影响, 合理地选择柔性直流配网的关键设备能降低工程的总体造价及有效利用城市中心的土地资源^[2]。因此, 有必要对中低压柔直配网的关键设备进行选型研究, 掌握目前中低压柔直配网的关键装备的工作原理、布置要求、制造水平等, 有助于后续相关工程的技术推进和方案落实。

根据珠海唐家湾示范项目的应用场景, 目前柔

收稿日期: 2020-05-27 修回日期: 2020-07-22

基金项目: 中国能建广东院科技项目“中低压柔性直流电网关键技术研究”(EV04421W)

直配网可以将站点按功能划分为换流站、开关站和降压换流站。换流站实现能量从交流到直流的变换；开关站实现多个站点间的连接，实现多种运行方式切换；降压换流站实现能量从高电压等级变换

为低电压等级。示范项目的网络图如图 1 所示。本文结合柔直配网换流站建设的需要，分析换流站关键设备的选型和使用情况，比较每种设备的不同形式的优缺点，提出设备的选型建议。

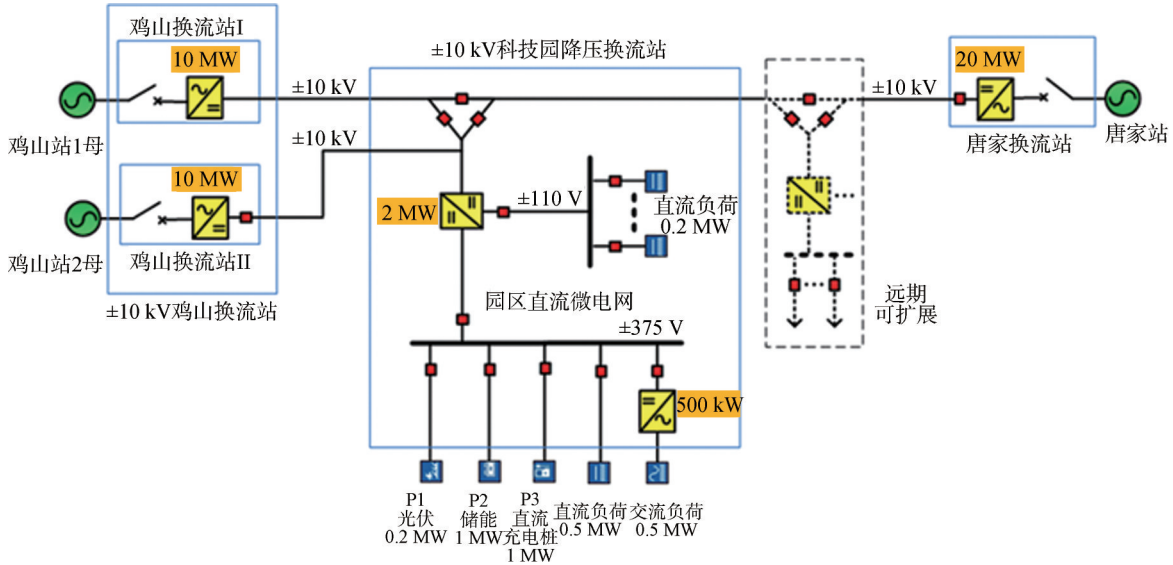


图 1 柔直配网网络图

Fig. 1 Diagram of flexible DC distribution network

1 柔性直流配电网关键电气设备

柔直配网中的主要设备可以按照功能划分为交流进线部分、联络变阀侧设备、换流阀区域和直流出线部分。由于中低压直流配电系统的电压等级较低、容量较小，并且由于项目通过 3 个 VSC 与交流系统交换能量，在一端 VSC 退出运行时，系统可改

变为双端手拉手的运行方式，可靠性相对较高，因此采用了经济性更佳的双极对称方式，电气接线图如图 2 所示。关键的电气设备分为 VSC、联接变压器、桥臂电抗器、启动设备、直流电抗器、中低压直流断路器、直流变压器等。关键设备的主要作用如下：

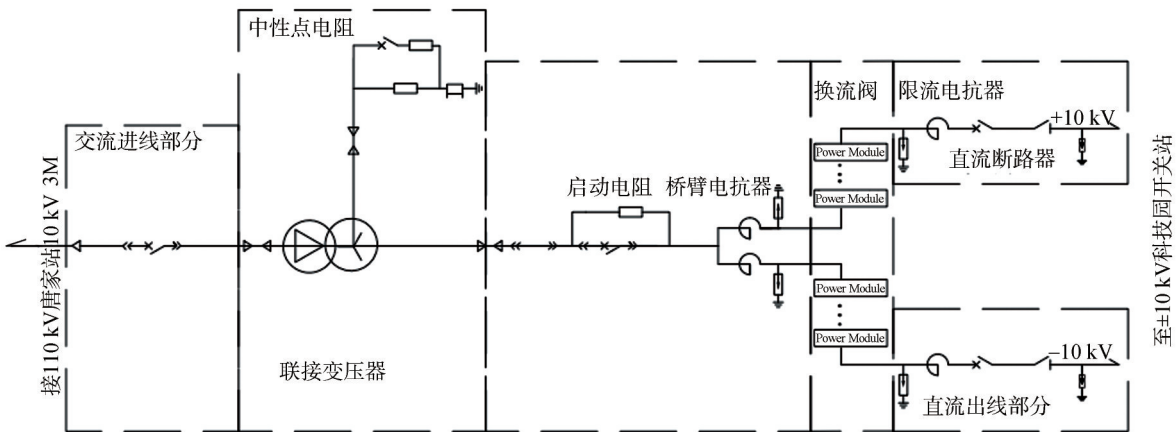


图 2 电气接线图

Fig. 2 Electrical circuit diagram

1) VSC换流阀

VSC换流阀是实现城市的交流配网与柔直配网之间转换的核心设备,VSC换流阀选型适合的技术方案包括有两电平换流阀、三电平换流阀、半桥MMC换流阀和基于IGCT交叉箝位的MMC换流阀^[3]。

2) 联接变压器

联接变压器是柔直配网换流站中的关键设备,网侧和交流进线部分相连,阀侧连接启动设备和桥臂电抗器^[4]。在珠海唐家湾示范项目中,联接变压器用于为柔直配网提供接地点,保证中压交直流配电网的电气隔离,并且保证交直流配电网电压发生变化时,换流阀仍然能够输出额定的有功和无功功率。

3) 启动设备

启动电阻连接在联接变压器的阀侧,功能主要为降低子模块中电容的充电电流,避免设备免受电流电压冲击,减小对交流系统的影响^[5]。

4) 桥臂电抗器

桥臂电抗器一般位于VSC换流阀上下两个桥臂上,能够限制直流故障电流和故障电流的上升率,同时也能限制交、直流侧的谐波。通过增大桥臂电抗器的阻值可以减缓短路电流的增长速度,限制短路电流的峰值,也对有功与无功的调节具有一定的影响^[4]。

5) 中低压直流断路器

中低压直流断路器作为柔直配网线路组网的关键设备,可以毫秒内承载、开断正常电流和故障电流,快速切除柔直配网中的故障设备或线路,从而阻止系统故障的扩散,极大地提高柔直配网系统的可靠性^[6]。目前,中低压机械式直流断路器和中低压混合式直流断路器在实际工程中均有运用。

6) 限流电抗器

限流电抗器的主要作用在于抑制短路电流故障电流的上升速度,实现直流断路器和换流阀保护动作的配合,实现直流系统的故障穿越,保障系统的安全运行^[7]。在珠海唐家湾示范项目中,唐家换流站和鸡山2换流站均采用了限流电抗器配合直流断路器的方案,实现故障清除能力,有效降低换流阀本体的成本。

7) 直流变压器

直流变压器是连接中压和低压直流电网的核心

设备,基于当前的电力电子技术,直流变压器可以实现不同电压等级以及交直流形式的电能变换,可满足高压直流至低压直流以及不同直流端口间的电能变换^[8]。示范项目中首次应用了基于SiC全控器件的高效率三端口直流变压器,通过直流变压器连接±10 kV电网和布置在科技园园区的直流微电网系统。

2 柔直配网电气设备选型原则

柔直配网换流站设计时需要综合考虑站区的地理位置、土建施工和电气安装的特点和业主运行部门的需求,实现交、直流的功能分区,并选择合理的电气设备。设备选型时需要考虑如下几点:

1) 柔直配网的电气设备设计时需要考虑安全性和运维的便捷性,注重配网设备小型化。选型时应考虑与现有直流设备的制造能力与直流配电技术发展水平相适应。

2) 设计时应考虑柔直配网的电气设备的尺寸问题,由于城市中心的土地资源较为紧张,需考虑设备的紧凑化,尽量减少设备的占地面积。

3) AC/DC换流器的选择应综合考虑系统的需求及换流器的性能、可靠性、损耗、占地、体积、安装条件、综合造价等因素。

4) 应根据负荷条件、故障处理要求和设备制造水平选择适用的直流断路器。

3 VSC换流阀选型

3.1 子模块选型

柔性直流换流站是完成AC/DC双向变换的主要站点,其主要由AC/DC换流阀构成。在高压直流输电领域,换流阀已得到广泛应用,在中低压直流配网中应用的技术难度不大,在拓扑结构上,两电平和三电平换流阀的主要技术风险是IGBT的直接串联技术,而且损耗和电压波形较差,因此目前大多数项目基本采用MMC结构,采用MMC结构避免IGBT的直接串联,同时中压柔直配电网系统的电压相比高压直流输电要低,子模块数量相对较小,技术风险相对可控。目前已有的子模块为半桥IGBT MMC子模块、全桥IGBT MMC子模块和基于IGCT交叉箝位的MMC子模块。

模块式IGBT生产厂家广泛,已形成系列的标

准电压,是柔性直流输电主流的器件类型。唐家换流站和鸡山2换流站换流阀使用的IGBT器件的电压等级主要为1.7 kV。考虑到电容电压上存在波动,以及器件动作时产生的尖峰电压,因此,在实际工程中选择IGBT电压等级时需要考虑留有1.5倍~2倍裕量。同时需要设置一定的冗余子模块,示范工程中单桥臂子模块为28个,其中冗余子模块为3个,冗余度约为10.7%。

对比IGBT,IGCT具有更低的导通损耗。在示范项目中首次应用了国产的IGCT器件,但目前IGCT主要制造商仍较少,对后续的运维更换会有一些影响。基于IGCT交叉箝位的MMC目前已有容量为10 MW(鸡山I换流站),原理图如图3所示。该换流阀使用的IGCT器件的电压等级主要为4 500 V,其需要承受的额定电压为IGBT子模块电压的2倍,所承受的电流与桥臂电流相同。IGCT箝位模块单桥臂需要7个IGCT子模块,其利用故障电流对电容充电,当功率模块电容电压上升,故障电流衰减,实现换流阀的清除故障电流的功能^[2]。

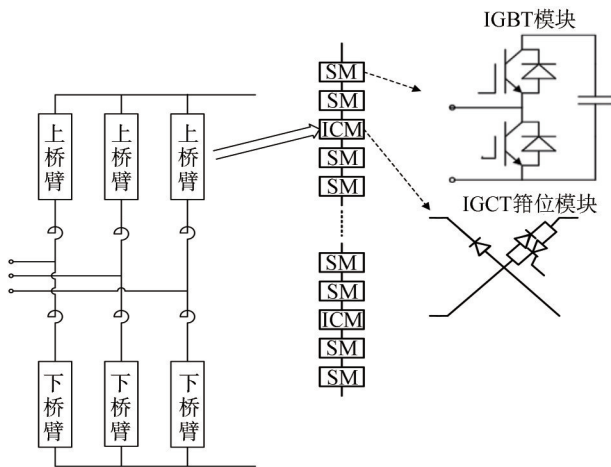


图3 IGCT交叉箝位的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of cross clamped of IGCT devices

3.2 换流阀的形式

目前,已有容量为10 MW和20 MW的MMC换流阀在实际工程应用,其中唐家换流站(20 MW)为阀塔式布置,阀塔周围采用壳罩式屏蔽结构,鸡山2换流站(10 MW)采用模块化设计,屏柜式布置,具备现场即插即用的特点。基于IGCT交叉箝位的MMC结构的容量已有10 MW(鸡山1换流站),采用屏柜式布置。三站换流阀比较如表1

所示。

表1 三站换流阀对比表

Tab. 1 Comparison of VSC in three stations

换流站	主要技术参数	优势	劣势
唐家换流站	20 MW, ±10 kV	技术成熟,造价较低,IGBT生产厂家众多	直流线路发生短路故障时将产生一个不控整流器效应,需要直流断路器和限流电抗器配合来清除直流故障电流
鸡山2换流站	10 MW, ±10 kV	同上	同上
鸡山1换流站	10 MW, ±10 kV	具有直流故障自清除能力,无需配置直流断路器和限流电抗器,占地少	IGCT生产厂家少,控制较复杂,国产的IGCT可靠性水平有待提升,换流阀本体造价相对较高

4 联接变压器选型

联接变压器用于为柔直配网提供接地点,保证中压交直流配电网的电气隔离。在珠海唐家湾示范项目中,联接变压器采用 Δ/Y 形式,阀侧绕组的中性点接地电阻为3.75 k Ω ,在此电阻上并联一个600 Ω 的电阻,该电阻平时不投入运行,仅在保护系统故障诊断时用,接线图如图4所示。采用这种接地方式可降低直流线路的绝缘水平。

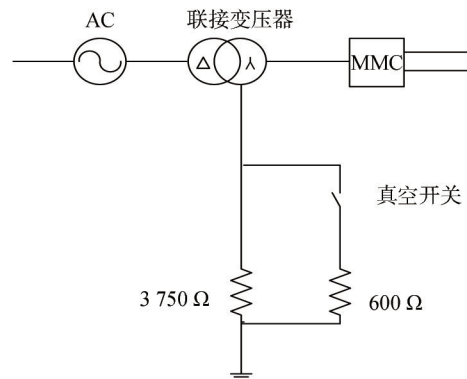


图4 中性点电阻接线图

Fig. 4 Diagram of Neutral point resistance

考虑到短路故障时,联接变压器可能有较大的震动,且联络变压器重量较重。为了有利于搬运需求,联接变压器通常布置于站址首层。在建设项目时,可以根据站址空间来选择干式联接变压器或油联接变压器,室内选择干变,室外选择油变。

5 桥臂电抗器和启动回路选型

5.1 桥臂电抗器

由于饱和引起的桥臂电抗器电感值下降, 不应低于设计电感值的 80%。采用较大的电抗值, 有利于降低二倍频环流幅值和改善公共连接点的谐波电压, 降低谐波电流。如果换流阀的电平数目比较高, 或等效开关频率比较高, 交流谐波经计算后已经小于标准规定很多, 可适当减小电抗的数值, 以降低桥臂电抗器的体积和经济投资。如果电平数目较低, 计算后谐波电流超出标准值, 需要适当增大电抗的数值。

铁芯电抗器体积小, 但重量重, 且存在铁芯饱和的可能。空芯电抗器漏磁较大, 对钢筋混凝土建筑物以及控制保护设备均有一定的影响。在珠海唐家湾示范项目换流站采用户内布置的形式, 因此采用了铁芯电抗器。

5.2 启动回路

当 MMC 换流阀启动时, 交流系统会对 MMC 换流阀的直流电容进行不控整流充电, 因此为避免冲击电流和暂态恢复电压影响系统, 需要在这个过程中加入启动电阻, 启动结束后电阻将被旁路。功率模块中的电容值对启动电阻选型影响较大。在珠海唐家湾示范项目中, 启动柜由直流测量装置和启动电阻组成, 唐家换流站的启动电阻的额定电压为 10.5 kV, 电阻值为 100 Ω。

6 中低压直流断路器选型

由于半桥结构的 MMC 换流阀, 没有故障自清除能力, 因此需采取直流断路器和直流电抗器配合的方案来切除故障电流。同时, 柔直配网在多种运行方式间灵活切换时需要直流断路器。示范工程中的开关站有三个端口, 通过三路直流电缆相连, 对此开关站推荐使用三端口断路器方案。与传统方案相比, 三端口混合式直流断路器将多条直流线路交汇点处的多台直流断路器整合为一体, 可以在保持混合式直流断路器原有性能的基础上, 减少电力电子器件的使用数量, 从而降低设备的投资成本。三站直流断路器技术比较如表 2 所示。

7 直流变压器

直流变压器方案包括有非隔离型变压器和隔离

表 2 三站的直流断路器对比表

Tab. 2 Comparison of DC circuit breakers in three stations

换流站	结构及原理	主要技术参数	优势	劣势
唐家	采用强迫过零的机械式直流断路器	$\pm 10.7 \text{ kV}$; 1 000 A	通态损耗小、结构紧凑、占地小、成本低	开断相对时间较长, 不可重合闸
鸡山 2	同上	$\pm 10.7 \text{ kV}$; 500 A	同上	同上
科技园	三端口混合式直流断路器, 基于电流转移的原理	$\pm 10.7 \text{ kV}$; 1 000 A	可节省一个电力电子换流支路, 开断迅速, 可快速重合闸	控制保护和运维较复杂

型变压器, 在电压变比较高的应用场合, 非隔离型的滤波器体积显著增加, 效率相对较高, 但经济性相对较差。隔离型直流变压器通过高频变压器, 使变换器运行时的占空比保持在合理的范围, 有利于提升变换器效率和降低滤波器体积。目前主要的隔离型直流变压器拓扑为 LLC 和 DAB^[8], 在选择直流变压器时需要考虑技术成熟度、经济性、灵活性以及系统应用场景的需求, 考虑到珠海唐家湾示范项目多端口输出的需求, 项目采用三端口直流变压器, 高压侧为 $\pm 10 \text{ kV}$ 高压端口, 低压侧有两个电压等级: 分别为双向 2 MW 功率流动的 $\pm 375 \text{ V}$ 低压端口和单向 200 kW 功率流动的 $\pm 110 \text{ V}$ 低压端口, 拓扑结构如图 5 所示。为了实现系统高压接入, 高压

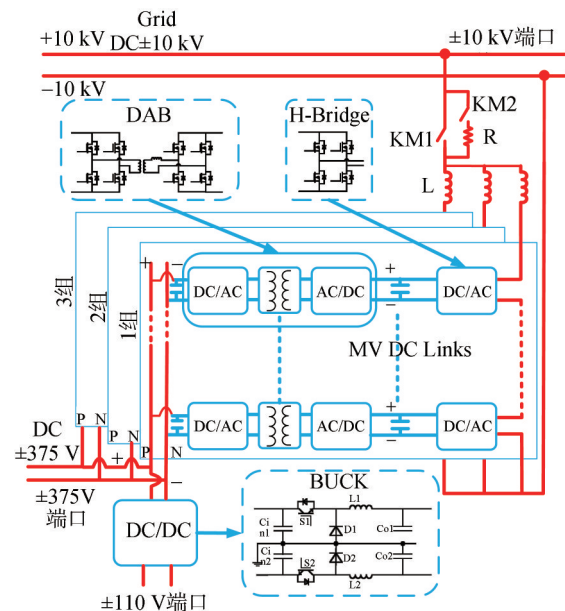


图 5 直流变压器拓扑图

Fig. 5 Topology diagram of DC transformer

侧采用功率模块级联的方式,可实现连接实现高、低压侧隔离,在 $\pm 375\text{ V}/\pm 110\text{ V}$ 则采用BUCK降压拓扑结构。三端口直流变压器采用柜式设计,连接三个端口直电网。适用于城市直流配电的高效率多端口直流变压器对提升能源综合利用效率、新能源渗透率和供电的稳定性有重要作用。

8 结 论

本文通过介绍珠海唐家湾示范工程的关键设备,结合柔直配网工程建设的特点,阐述了柔直配网换流站的设备选型原则,重点分析研究了关键电气设备的选型方案,通过比较关键电气设备不同形式的优缺点,给出关键电气设备选型的选型意见:

1) 选择换流阀时需综合考虑系统的需求和换流阀的性能、可靠性、损耗、占地、综合造价等因素,以提升柔直换流阀实用化的水平。

2) 选择直流断路器时候应综合考虑应用场景、负荷条件、故障处理要求和当前的设备制造水平。

3) 对于城市配电网而言,换流站空间有限,地价昂贵,需要求配网设备体积尽可能小。

随着城市配电网的不断发展,柔直配网展现了在推动城市高可靠性供电,提升配网互联互通,灵活可控,促进分布式新能源的接入等多方面的独特优势。对柔直配网关键电气设备提出合理的选型建议有助于降低工程的总体造价及有效利用城市中心的土地资源,对提高换流站的可靠性和运行的安全性具有重要意义,是促进柔直配网工程推广的重要环节,将为我国新型配电网的发展提供重要的助力。

参考文献:

- [1] 张勇军,刘子文,宋伟伟,等. 直流配电系统的组网技术及其应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):39-49.
ZHANG Y J, LIU Z W, SONG W W, et al. Networking technology and application of DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (23) : 39-49.
- [2] 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.
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.

- [3] 何湘宁,宗升,吴建德,等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5162-5170.
HE X N, ZONG S, WU J D, et al. Technologies of power electronic equipment interconnecting and networking in distribution grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (29) : 5162-5170.
- [4] 钟杰峰,陈丽萍,袁康龙,等. 多端柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 南方能源建设,2015,2(增刊1):38-45.
ZHONG J F, CHEN L P, YUAN K L, et al. Analysis on present situation and application prospect of VSC-MTDC technology [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2 (Supp. 1) : 38-45.
- [5] 宋海彬,戴甲水,郭莉萨,等. 柔性直流输电系统启动回路中启动电阻的研究[J]. 贵州电力技术,2017,20(2):65-69.
SONG H B, DAI J S, GUO L S, et al. Research on starting resistance in the starting circuit of flexible HVDC transmission system [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2017, 20 (2) : 65-69
- [6] 童铸. 柔性交直流混合配电网系统构建及设备选型分析[J]. 新型工业化,2019,9(12):21-25.
TONG Z. Construction of flexible AC/DC hybrid distribution network system and analysis of equipment selection [J]. The Journal of New Industrialization, 2019, 9 (12) : 21-25.
- [7] 王守相,褚程程,刘琪,等. 基于VSC的直流配电网限流电抗器位置和参数优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):89-95.
WANG S X, ZHUO C C, LIU Q, et al. Optimal allocation method for location and parameter of current-limiting reactor in VSC-based DC distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (12) : 89-95.
- [8] 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.
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.

作者简介:



陆子凯

陆子凯 (通信作者)

1992-, 男, 广东广州人, 工程师, 曼彻斯特大学电气工程专业, 硕士, 主要从事变电站、换流站电气一次设计工作 (e-mail) luzikai@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)