

珠海“互联网+”柔性直流配电网换流站设计方案

张明瀚, 简翔浩, 陆子凯

(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)

摘要: [目的] 支持能源消费革命的城市—园区双级“互联网+”项目(简称“互联网+”项目)成功试点了多电压等级多端柔性直流配电网技术。[方法] 介绍了“互联网+”项目的整体系统设计方案, 描述了采用可故障自清除的IGCT器件交叉箝位MMC的鸡山I换流站及采用半桥拓扑MMC和直流断路器的鸡山II、唐家换流站的原理, 介绍了相同换流容量的鸡山I、鸡山II换流站的平面布置, 对比了其占地和造价。[结果] 分析可知: 鸡山I、鸡山II换流站均可满足功能要求, 鸡山I换流站占地、设备造价略占优势。[结论] 作为“互联网+”项目的重要组成部分, 鸡山I、鸡山II、唐家换流站的实施, 成功试验了具有故障自清除能力的IGCT换流阀和半桥结构IGBT换流阀, 成功试验了不同原理的直流断路器, 是中低压柔性直流设备标准化的重要依据。

关键词: 柔性直流配电网; IGCT器件交叉箝位MMC; 半桥拓扑MMC; 直流断路器

中图分类号: TM63; TM7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0095-06

Design of Converter Stations of Zhuhai “Internet +” Flexible DC Distribution Network

ZHANG Minghan, JIAN Xianghao, LU Zikai

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

Abstract: [Introduction] The “Internet plus” Project between urban and industrial park in support of the revolution of power consumption (abbr. “Internet +” project) successfully pilots multi-voltage multi-terminal flexible DC distribution network technology. [Method] In this article, the overall design plan was discussed. The principle of JS I converter station, which applied self fault clearance MMC based on cross clamped of IGCT devices, and JS II, TJ converter station, which applied half-bridge topology MMC and DC circuit breaker were described. The layout of JS I and JS II, which shared identical converter capacity was introduced. Their covered area and costs were compared. [Result] The results show that both JS I and JS II converter station are functional available and JS I station is slightly more land-saving and cost-saving. [Conclusion] As an important part of the “Internet +” project, the implementation of JS I, JS II and TJ converter station successfully test both the IGCT converter valve with fault self-cleaning capability and the half-bridge IGBT converter valve, successfully test DC breakers with different principles, which can be regarded as an important basis for device standardization.

Key words: flexible DC distribution network; cross clamped IGCT devices; half-bridge MMC; DC circuit breaker

柔性直流技术是一种以电压源换流器、自关断器件和脉宽调制技术为基础的新型直流技术。柔直技术的特点是无换相失败、可为无源网络提供无功支援、可构成多端网络。如将其应用于城市配电网建设, 具有如下优点^[1]:

1) 与常规交流三相线路相比, 采用直流输电仅须正负极线路, 可节约33%的输电线路走廊, 在人口密集区实现土地集约化利用。

2) 满足越来越多直流负荷, 如电动汽车、储能接入电网的需求, 直流配电网的建设将大幅提升接入匹配性, 减少交流-直流转换环节, 提高用电效率和电能质量。

3) 柔性直流功率流向可控, 可实现交流-直流间快速功率支援, 供电可靠性得以提高。

4) 对于与大电网隔绝的边远地区, 构建柔性直流微电网可提高供电可靠性。

国内外已开展相应研究, 并建成了数个示范工程, 极大促进了柔性直流在配电领域的发展。已建成的柔性直流配电工程如表1所示^[2-4]。

收稿日期: 2019-10-07 修回日期: 2020-02-05

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)

表1 国内外已建成柔性直流配电工程

Tab. 1 Accomplished flexible DC distribution network in the world

工程名称	简介	主要解决问题
芬兰交流改直流配电工程	交流 20 kV 电网降至 630 V, AC/DC 变换至直流 900 V 传输, 到用户侧 DC/AC 变换为交流 600 V, 降 400 V 入户。	因芬兰 80% 的电力供应中断都是由 20 kV 中压配电网故障引起, 该工程可提升供电可靠性和质量。
杭州江东柔直配电网工程	由三个 ± 10 kV 换流站构成, 换流站直流侧并联在 ± 10 kV 直流母线上, 交流侧分别连接至 2 个 AC 10 kV 和 1 个 AC 20 kV 端口, 通过 ± 10 kV/ ± 375 V 直流变压器降至 ± 375 V 接至充电桩。	馈线过载时, 可以安全经济地实现负荷的转移, 降低供电中断时间, 灵活控制系统潮流, 实现馈线间的负荷均衡, 优化电网的供电能力, 提高配电网的可靠性和设备利用率。
贵州柔直配网示范工程	由三个 ± 10 kV 换流站构成, 换流站并联在 ± 10 kV 直流母线上, 拥有 AC 380 V 和 ± 375 V 端口。	实现了分布式电源和交直流负荷灵活接入, 提高了供电可靠性。
苏州交直流混合主动配电网工程	± 10 kV 柔直互联, 光伏、风电、储能互联。	实现了分布式能源灵活消纳, 网、源、荷储协调控制, 并依托工程探索配电网直流供电新模式。

1 珠海“互联网+”柔性直流配电网项目

± 10 kV“互联网+”柔性直流配电网位于珠海唐家湾。项目建设唐家(20)换流站, 鸡山 I (10 MW) 换流站、鸡山 II (10 MW) 换流站, 科技园直流开关站及降压换流站(2 MW)。4 个站点通过直流电缆实现互联, 形成了具有可拓展性的“T 型”电网结构。鸡山 I、鸡山 II、唐家换流站交流侧分别连接至 110 kV 鸡山变电站 10 kV 1 M、10 kV 2 M、110 kV 唐家变电站 10 kV 母线, 作为柔性直流配电网的 3 个电源点。

项目设置了三端直流变压器, 建设了 ± 375 V 微网, 使园区屋面光伏、电池储能、直流充电桩、直流空调等直流设备可高效、可靠、灵活得接入直流微电网。

柔性直流配电网具有三端联网、STATCOM、双端隔离供电、单端供电等 10 种运行方式, 可根据交流电网潮流调整直流传输功率的方向和大小, 实现了 ± 10 kV 直流电网与 10 kV 交流电网的有功、无功统一协调控制, 在故障状态下, ± 10 kV 直流电网可通过备用投切, 为 10 kV 交流电网提供紧急电源支撑。典型运行方式下, 鸡山换流站向唐家换流站输送 20 MW 的有功功率, 可使得唐家变电站的 110 kV 主变压器负载率由 70% 下降到 47.7%, 有效解决唐家变电站内 110 kV 主变负载过重的问题。

“互联网+”项目电气接线图如图 1 所示。柔直配电网由换流站、直流开关站及降压换流站构成。本文将讨论柔直配电网换流站的电气接线型式、柔直关键设备以及总体布置, 并介绍分别采用可故障自清除的换流器和采用直流断路器两种故障清除方式的换流站的原理, 对其占地、造价进行比较。

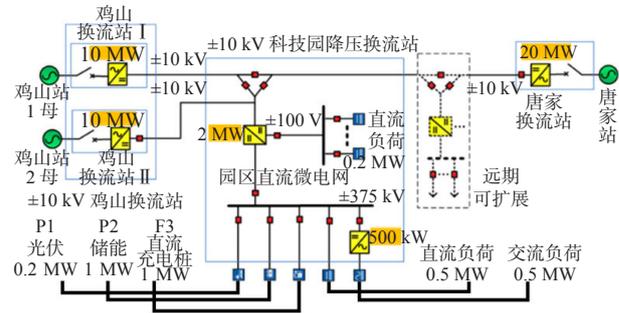


图1 “互联网+”项目电气接线图

Fig. 1 Electrical diagram of “Internet +” project

2 ± 10 kV 柔直配电网换流站

2.1 柔直配电网换流站电气主接线

换流站是完成交、直流电能相互转换的单元。作为配电网的一部分, 其应能实现故障清除, 以缩小停电时长及停电范围。柔直配电网中的换流站包含联络变压器、换流器、直流断路器等主要设备。

± 10 kV 柔直配电网可采用^[5]单极不对称、单极对称和双极等 3 种接线型式。因单极不对称接线设立专门的接地极, 使工作电流流过; 双极接线虽然提高了可靠性, 但需多个换流器, 成本较高; 而单极对称具有对称的直流电压, 可简化主接线设计, 适用于本项目应用场景。

常规直流利用阀交流侧断路器开断、换流器闭锁等方式切除直流故障电流, 将导致整个系统短时停运, 冲击与之并联运行的交流系统, 降低系统可靠性^[6]。“互联网+”项目中, 鸡山 I 换流站应用可自清除故障的换流器, 鸡山 II、唐家换流站采用机械式直流断路器, 均可快速隔离故障间隔, 减少停电时长及停电范围, 提高柔直配电网运行可靠性。

2.1.1 直流部分电气主接线

1) 鸡山 I 换流站

鸡山 I 换流站电气主接线图如图 2 所示。采用了单极对称接线型式。直流部分设备由换流器及直流出线设备组成。

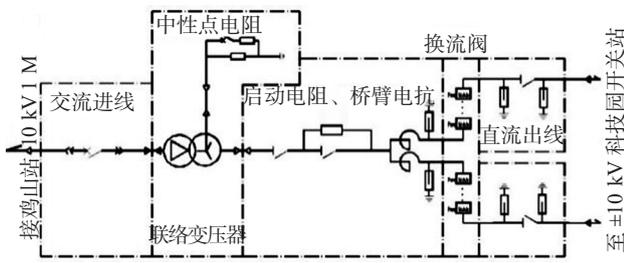


图 2 鸡山 I 换流站电气主接线图

Fig. 2 Electrical circuit diagram of JS I converter station

鸡山 I 换流站的直流母线不配置直流断路器，其换流器采用具有直流故障电流自清除能力的拓扑结构，依靠换流器自身清除故障。为尽可能减少额外箝位电路所带来的损耗，减少额外电路对装置可靠性的影响，减少额外电路对正常运行和启动充电过程中子模块电容电压的一致性带来的影响，拓扑结构采用基于 IGCT 器件的交叉箝位 MMC 拓扑结构^[7]。

换流器共由 6 个桥臂组成，正、负极各 3 个桥臂。单桥臂由 28 个 IGBT 功率模块和 7 个 IGCT 模块串联组成，其中 3 个 IGBT 冗余模块，1 个 IGCT 冗余模块。3 个桥臂共用 1 组桥臂电抗器。换流器设置启动回路。直流出线装设直流 PT、直流 CT、避雷器和隔离开关等设备。基于 IGCT 器件交叉箝位的 MMC 原理图如图 3 所示。直流故障时通过箝位电路将子模块电容串入电流回路中，利用子模块电容电压迫使二极管反向截止，实现阻断故障电流的目标。使用该结构可在不改变原子模块结构、不改变原控制方式、每桥臂仅增加 N/4 个 IGCT 箝位子模块的条件下实现直流故障阻断能力^[8]。

2) 鸡山 II 换流站、唐家换流站

鸡山 II 换流站、唐家换流站电气主接线图如图 4 所示。采用了单极对称接线型式。直流部分设备由换流器、机械式直流断路器、直流电抗器和直流出线设备组成。

换流器采用可模块化多电平半桥拓扑结构，换流器共由 6 个桥臂组成，正、负极各 3 个桥臂。3 个桥臂共用 1 组桥臂电抗器，设置启动回路。直流出线装设直流电抗器、机械式直流断路器、直流 PT、直流 CT、避雷器、隔离开关等设备。

半桥 MMC 拓扑结构如图 5 所示。正、负极各 3 个桥臂， M 个子模块和电感串联形成单个桥臂。

半桥模块如图 5 所示，两个 IGBT 反向并联二极管，相互串联后与电容器并联，形成子模块。

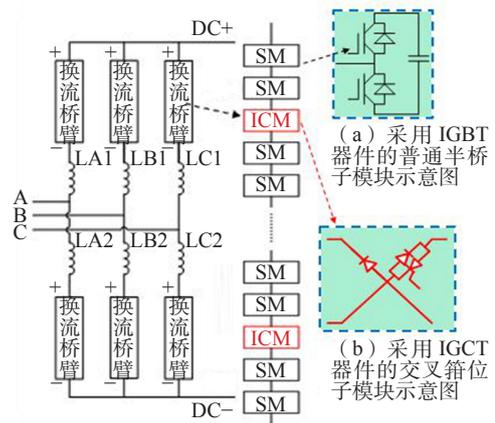


图 3 基于 IGCT 器件交叉箝位的 MMC 原理图

Fig. 3 Schematic diagram of MMC based on cross clamped of IGCT devices

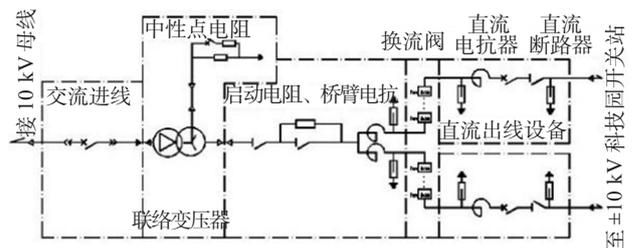


图 4 鸡山 II 换流站电气主接线图

Fig. 4 Electrical circuit diagram of JS II converter station

正常运行时，每个特定时刻单相导通 M 个子模块（即上下桥臂共导通 M 个子模块），交流侧可形成 $M+1$ 个电平的电压，每相导通的 M 个子模块电容电压叠加形成直流侧电压。如果 M 足够大，换流器直流侧输出额定直流电压，交流侧输出正弦波电压。

半桥 IGBT 模块在故障状态下无故障清除能力，须配置直流断路器，实现故障清除。

直流断路器应满足以下工况要求^[9]：

- 1) 正常运行条件下，故障电流将在 10 ms 内达到其稳态值，电流上升速度快。
- 2) 故障电流的稳态值为额定电流的十几倍甚至几十倍。
- 3) 故障电流是单极性的，不存在过零点，对于机械开关而言，熄弧困难。
- 4) 断路器需在 ms 级内动作，以避免故障扩散、扩大事故范围。
- 5) 直流电流无法突变，开断后需吸收直流系统储存的 MJ 级能量。

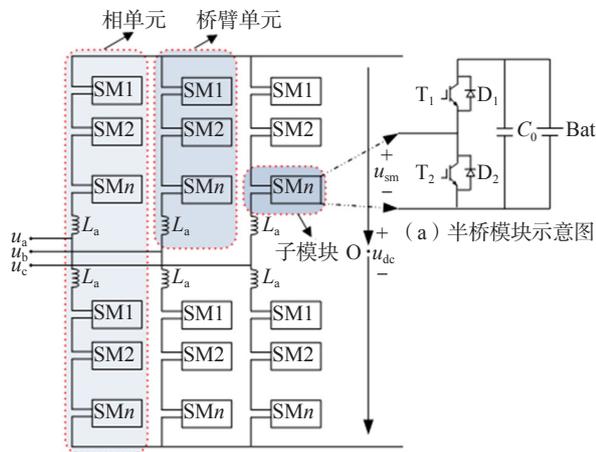


图5 半桥 MMC 原理图

Fig. 5 Schematic diagram of half-bridge MMC

目前已用于商业运行的直流断路器为全固态、机械式和混合式断路器。鸡山 II 换流站选用机械式直流断路器。机械式直流断路器原理如图 6 所示。

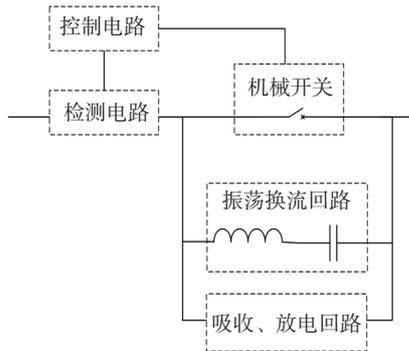


图6 机械式直流断路器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of mechanical DC circuit breaker

机械式断路器由三个支路并联构成，分别是通流、振荡换流和吸收放电支路。

1) 通流支路：快速真空断路器构成，用于导通与开断直流系统电流。

2) 振荡换流支路：由电容、电感和晶闸管串联而成，将产生反向高频率振荡电流。

3) 吸收放电支路：该支路由避雷器并联而成，用于吸收短路电流能量，抑制分断过程产生的过电压。

振荡换流支路产生反向谐振电流，强迫主回路电流产生过零点，从而开断直流电流。机械式断路器通态损耗小，但随着断路器的额定电压与开断电

流的提升，振荡电路中的电感和电容的容量与体积也随之提升。

2.1.2 交流部分电气主接线

如图 2 和图 4 所示，鸡山 I、鸡山 II、唐家换流站交流部分均采用 10 kV 线路变压器的单元接线。交流部分由 10 kV 开关柜、联络变压器、启动电阻柜、桥臂电抗器和中性点电阻柜构成。联络变压器阀侧中性点经电阻接地。

2.2 换流站原理

鸡山 I 换流站为基于 IGCT 交叉箝位的 MMC 结构，鸡山 II、唐家换流站为半桥拓扑和直流断路器结构。三者原理比较如表 2 所示。

表 2 唐家、鸡山 I、鸡山 II 换流站原理对比

Tab.2 Principle comparison of JS I、JS II converter station

方案	优点	缺点
唐家换流站、鸡山 II 换流站常规半桥 MMC+ 机械式断路器	(1) 技术成熟； (2) 价格便宜。	交流侧故障需跳交流断路器来实现故障隔离，换流器需能承受约 60 ms 的短路电流；如直流断路器为混合式直流断路器，交流侧故障时同时跳交流和直流断路器，则换流器承受短路电流的时间可减少。
鸡山 I 换流站 IGCT 交叉箝位 MMC	(1) 可快速清除交直流侧故障； (2) 若箝位模块损坏，可转为半桥 MMC 运行。	IGCT 供货商少，运维不便。

2.3 换流站布置

2.3.1 总体布置原则

柔直配网换流站总平面布置^[10]，应结合站区地形，按照交流、直流进、出电缆方向，在装置楼内合理布置配电装置。整体布置应可靠、安全、先进，同时遵循工艺流程的顺序、实现土地集约化利用、节省造价、方便运维。

鸡山 I、鸡山 II 换流站换流器容量均为 10 MW，两站合站建设，但故障清除原理不同，具有较好的可比较性，本文介绍鸡山 I、鸡山 II 换流站的布置。

鸡山 I、鸡山 II 换流站均户内屏柜布置，屏柜布置呈现“10 kV 交流进线设备—联络变压器—启动电阻—桥臂电抗器—换流器—直流断路器（如有）—直流出线柜”的工艺流程，应遵循以下原则：

1) 工艺流程顺畅，便于电缆进出线。

2) 各功能分区有明确划分，不因功能分区混乱，造成运维不便。

3) 设计时充分考虑土建施工、电气安装以及运维的便捷性，布置应同时满足紧凑性和合理性。

2.3.2 布置方案

结合现场实际状况，“互联网+”工程换流站采用全户内布置。

±10 kV 鸡山 I 换流站按户内两层布置设计。鸡山 I 换流站按照电气功能划分为 10 kV 交流开关柜、联络变压器、中性点电阻柜、桥臂电抗器柜、换流器和直流开关柜。

1) 交流部分

10 kV 交流进线、启动电阻、中性点电阻、桥臂电抗器、桥臂设备位于鸡山换流站一层，单列布置；联络变压器独立布置于联络变压器室。以上设备通过交流电缆互联。

2) 直流部分

换流器柜和直流开关柜位于鸡山换流站二层。换流器柜交流侧通过母线桥与一层桥臂设备柜互联，直流侧通过母线桥连接至直流开关柜。直流开关柜内装设直流电缆头，引接至出线直流电缆。

±10 kV 鸡山 II 换流站按户内一层布置设计。鸡山 II 换流站按照电气功能划分为 10 kV 交流开关柜、联络变压器、中性点电阻柜、桥臂电抗器柜、桥臂设备柜、换流器柜、直流电抗器柜、直流断路器柜和直流开关柜。上述设备除联络变压器，其他设备均布置于同一个配电室中，双列面对面布置。

1) 交流部分

其中 10 kV 交流进线、中性点电阻、桥臂电抗器布置在配电室北侧，联络变压器单独布置于联络变压器室。上述设备相互间通过交流电缆互联。

2) 直流部分

换流器布置在配电室南侧，上、下桥臂换流器柜，上、下桥臂设备柜双列面对面布置。上、下桥臂设备柜通过交流电缆与桥臂电抗器互联，通过交流母线桥与换流器柜互联。换流器柜直流侧通过直流母线桥与直流电抗器互联。

直流电抗器、直流断路器和直流开关柜布置于配电室东北侧，通过直流母线桥互联。直流开关柜内装设直流电缆头，引接至出线直流电缆。

鸡山换流站平面布置如图 7、图 8 所示。

2.4 换流站占地及造价对比

鸡山 I、鸡山 II 换流站占地面积对比和设备造价对比如图 9 和图 10 所示。

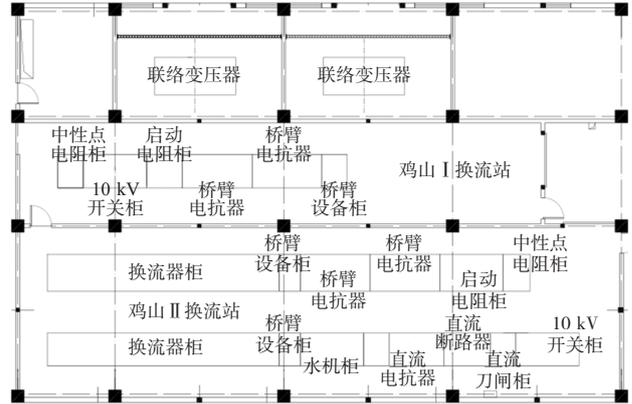


图 7 鸡山换流站一层平面布置图

Fig. 7 Layout plan of JS converter station 1st floor

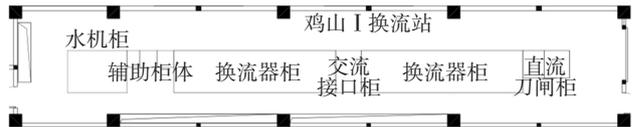


图 8 鸡山换流站二层平面布置图

Fig. 8 Layout plan of JS converter station 2nd floor

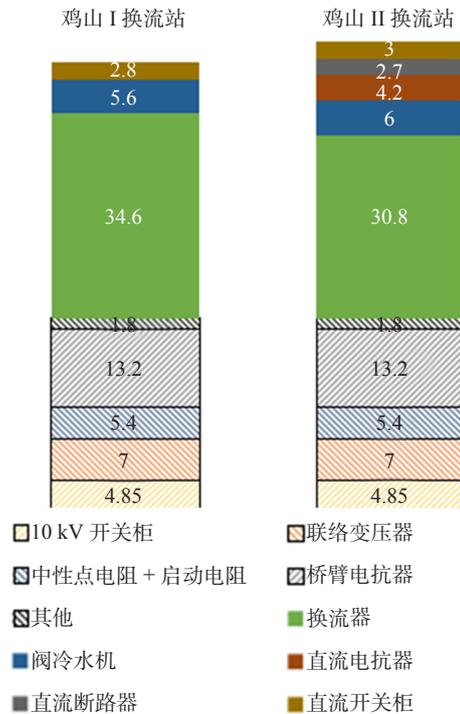


图 9 占地面积比较 (单位为 m², 斜线为交流设备)

Fig. 9 Area comparison (unit in m², slashed as AC devices)

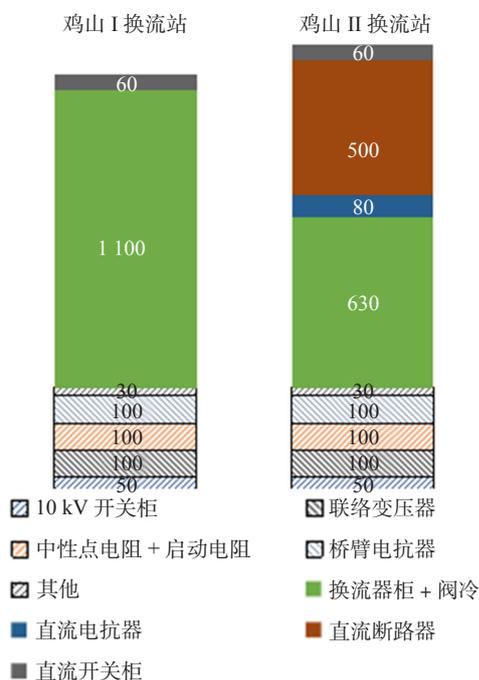


图 10 设备造价比较 (单位为万元, 斜线为交流设备)
Fig. 10 Equipment cost comparison (unit in 10 thousand yuan, slashed as AC devices)

可知, 两个换流站交流设备几乎一致, 占地和设备造价的区别来自直流设备。鸡山 I 换流站使用 IGCT 交叉箝位 MMC, 省去了直流电抗器和直流断路器, 约比半桥 MMC+ 断路器方案节约占地 10%。两个方案造价大致持平, IGCT 交叉箝位 MMC 略少。

3 结论

本文介绍了互联网+柔性直流配电网示范工程的换流站设计方案。该工程的 3 个换流站通过直流电缆和直流断路器实现互联, 形成了具有拓展性的“T 型”电网结构。换流站设计方案中, 采用对称单极接线方式。通过介绍和比较, 可知:

1) 鸡山 I、鸡山 II 换流站布置符合布局合理、紧凑、电气功能分区明确、方便运维、节约用地、等原则。

2) 鸡山 I 换流站使用了 IGCT 交叉箝位 MMC 技术, 在占地和造价上略占优势。

3) 作为“互联网+”项目的重要组成部分, 鸡山 I、鸡山 II、唐家换流站的成功实施, 成功试验了具有故障自清除能力的 IGCT 换流阀和半桥结构 IGBT 换流阀, 成功试验了不同原理的直流断路器, 是中低压柔性直流设备标准化的重要依据。

参考文献:

- [1] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (8): 98-104.
JIANG D Z, ZHENG H. Research status and developing prospect of DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36 (8): 98-104.
- [2] 徐玉韬, 谈竹奎, 郭力, 等. 贵州电网柔性直流配电系统设计 [J]. 供用电, 2018, 35 (1): 34-39.
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.
- [3] 刘国伟, 赵彪, 赵宇明, 等. 中压柔性直流配电技术在深圳电网的应用框架 [J]. 南方电网技术, 2015, 9 (9): 1-10.
LIU G W, ZHAO B, ZHAO Y M, et al. Application framework of vsc medium-voltage DC distribution technology in Shenzhen Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9 (9): 1-10.
- [4] 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.
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-EPSA, 2019, 31 (2): 66-73.
- [5] 刘国伟, 赵宇明, 袁志昌, 等. 深圳柔性直流配电网示范工程技术方案研究 [J]. 南方电网技术, 2016, 10 (4): 1-7.
LIU G W, ZHAO Y M, YUAN Z C, et al. Study on demonstration project technical scheme of VSC-DC distribution system in Shenzhen [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10 (4): 1-7.
- [6] 曹润彬, 李岩, 许树楷, 等. 特高压混合多端直流线路保护配置与配合研究 [J]. 南方电网技术, 2018, 12 (11): 52-58+83.
- [7] 谢瑞, 周兴扬, 徐欢建, 等. 柔性直流输电系统换流阀选型研究 [J]. 华东电力, 2014, 42 (12): 2511-2515.
- [8] 赵彪, 魏天宇, 许超群, 等. 基于 IGCT 的高压大容量模块化多电平变换器 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (2): 562-570+653.
- [9] 李斌, 马久欣, 温伟杰, 等. 适用于中压直流配电网的新型多端口机械式直流断路器 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (8): 2385-2392.
- [10] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入与换流站设计方案 [J]. 南方电网技术, 2015, 9 (1): 58-62.

作者简介:



张明瀚

张明瀚 (通信作者)

1990-, 男, 广东广州人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司工程师, 宾夕法尼亚大学电气工程专业硕士研究生, 主要从事变电站、换流站电气一次设计工作 (e-mail) vince_zhang1122@163.com。

(责任编辑 郑文棠)