

引用格式: 丁伟, 孔志达, 谌阳. 特高压直流换流站导线融冰主接线方案 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(增刊 1): 65-73. DING Wei, KONG Zhida, CHEN Yang. The main wiring scheme for conductor ice melting of UHVDC converter station [J]. Southern energy construction, 2024, 11(Suppl. 1): 65-73. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.10.

特高压直流换流站导线融冰主接线方案

丁伟[✉], 孔志达, 谌阳

(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] 特高压换流站可采用直流运行方式融冰, 但已有的融冰接线仅可用于两端直流场景, 产生的融冰电流为阀组电流 2 倍。为了满足在多端直流场景下也能使用直流运行方式融冰以及更大线路融冰电流的需求, 文章针对特高压换流站融冰主接线方案开展了设计研究。[方法] 提出了多端直流的换流站融冰接线方案; 创新改进了原有融冰接线中的阀组反向接线。[结果] 已达到节省设备投资和占地的目的; 可较已有融冰接线方案提升 50% 的融冰电流。[结论] 文章中的换流站新型融冰接线可满足不同条件下特高压直流线路的融冰需求, 有效提高直流系统运行可靠性和经济性。

关键词: 特高压直流; 导线融冰; 多端直流; 换流站主接线; 运行方式融冰; 三阀组并联

中图分类号: TM7; F426

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)S1-0065-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.10

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



论文二维码

The Main Wiring Scheme for Conductor Ice Melting of UHVDC Converter Station

DING Wei[✉], KONG Zhida, CHEN Yang

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

Abstract: [Introduction] The existing main wiring scheme for ice melting at UHVDC converter stations can only be applied to two-terminal DC systems, and the ice melting current is twice the current of the valve group. The purpose of this study is to meet the needs of using the DC operation mode for ice melting and generating a larger line ice melting current in the multi-terminal DC (MTDC) scenario. This paper conducted a design study on the main wiring scheme for ice melting of the UHVDC converter station. [Method] A wiring scheme for ice melting of converter station that is applicable to MTDC was proposed. The scheme innovatively improved the reverse wiring of the valve group in the original ice-melting wiring scheme. [Result] The purpose of saving equipment investment and land occupation has been achieved. The scheme can increase the ice melting current by 50% compared to the existing ice melting wiring schemes. [Conclusion] The new ice melting wiring scheme for the converter station in this paper can effectively meet the ice-melting requirements of the UHVDC transmission line under different conditions and improve the operation economy and reliability of the transmission line.

Key words: UHVDC; conductor ice melting; multi-terminal DC; main wiring of converter station; operation mode for ice melting; three-valve group parallel wiring

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

我国西部地区众多能源基地的规划发电容量巨大, 如西藏某地区光伏开发容量约为 21 GW, 适合采

用多端特高压柔直技术将电能输送至中、东部负荷中心。在西电东送的场景下直流线路一般距离较远, 线路路径跨越多个中、重冰区。若该线路某段覆冰严重, 将可能导致整体直流系统停运, 并对受端负荷

中心的电网安全造成巨大威胁^[1-2]。

应对线路覆冰风险,除了抬高线路杆塔的抗冰设计水平^[3-4],还可考虑对线路融(除)冰。输电线路融冰相关的标准中提出:在经济技术比较后可考虑融冰或防冰等措施^[5];融冰系统的设计应与变电部分统筹考虑^[6]。我国某电网公司所发布的输电线路装备技术导则中也要求中、重冰区 220 kV 及以上线路、110 kV 重要线路应具备融冰功能^[7]。因此如何在特高压换流站中考虑线路融冰需求是需要研究解决的课题。

融(除)冰操作现主要有机械除冰、加装固定式融冰装置、沿线外加电源融冰等技术方案。其中加装固定式融冰装置可用于一般变电站交流线路融冰和直流线路的地线融冰^[8-10]。由于特高压直流线路一般距离较长,存在线路多段同时覆冰的情况,直流导线融冰需要采用较大功率的融冰电源(固定式融冰装置难以提供),因此上述三类融冰手段均难以适用。世界首个特高压多端柔直工程昆柳龙工程在中间站点柳北站配置了固定式融冰装置用于全段直流地线的融冰,未配置直流导线融冰。

直流运行方式融冰被提出用于直流导线的融冰^[11-12]。该技术是通过换流站直流阀组并联运行从而在线路上产生一个大电流进行融冰。该技术近期

已应用在向(家坝)—上(海)、锦(屏)—苏(南)和溪(洛渡左岸)—浙(江金华)特高压直流工程。但采用该技术的直流线路均为两端直流,且该技术中的融冰电流为流过阀组电流的 2 倍。

融冰时间越短,线路停运时间就越短,所需的融冰电流就更大。参照规范和以往工程经验,融冰时间一般控制在 45 ~ 90 min^[13]。若能在现有直流运行方式融冰技术的基础上进一步加大融冰电流,则可缩短融冰停电时间并覆盖更长的融冰范围。另外,现有的运行方式融冰接线仅能适用于双端直流换流站。因此文章针对在多端直流场景下,以及更大融冰电流需求下的换流站融冰主接线方案开展了进一步研究。

1 换流站主接线典型方案

两端直流中未加融冰功能的换流站典型主接线如图 1 所示。

特高压换流站直连接线一般含有四个阀组,如图 1 所示,分别为极 2 高端、极 2 低端、极 1 高端、极 1 低端,图中极 1 对应+800 kV,极 2 对应-800 kV。该接线主要有以下几种运行方式:对称双极(每极同时 1 个阀组或 2 个阀组投入)运行方式;单极金属回线运行方式;单极大地方式等^[14]。在正常运行方式下阀组串联接入直流线路之间,线路上的电流即为

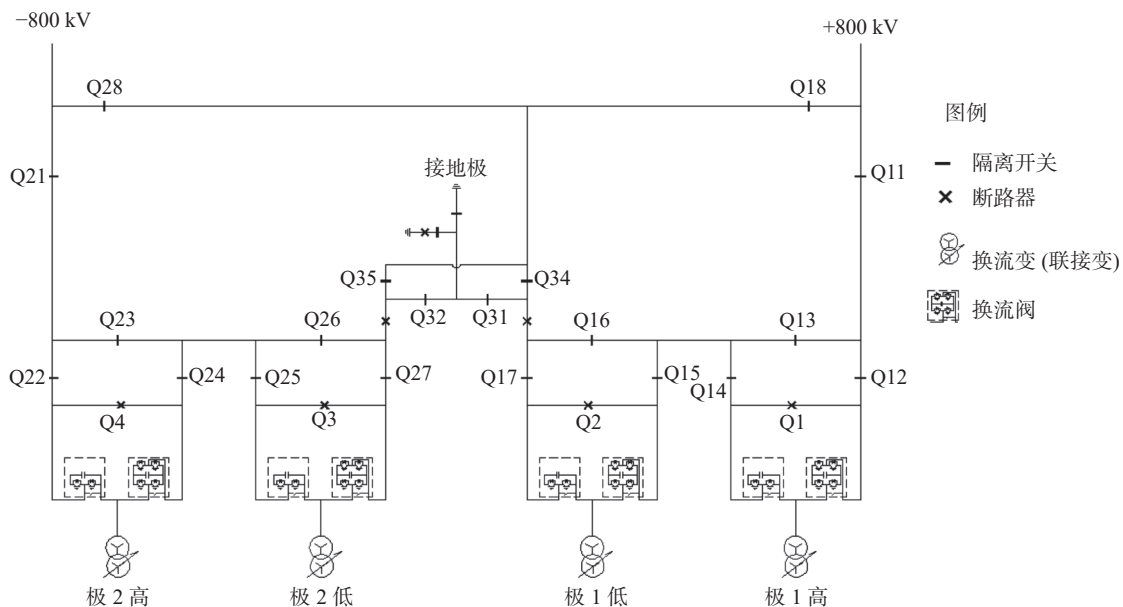


图 1 两端直流换流站典型主接线

Fig. 1 Typical main wiring scheme for two-terminal DC converter station

一个阀组流过的电流。

双端和三端的直流系统简图如图 2 所示, 双端直流方式仅有电流在换流站 A 和 B 之间流动, 但三端有多种可能的工作状态。大致分为两类: 三端中的某端停运, 变为两端直流; 三端换流站均运行, 流过某换流站的电流为其他两站之和。

三端直流中首尾两端换流站典型接线同图 1。中间换流站(图 2 中换流站 C)的典型极线拓扑如图 3 所示^[15-17]。中间端换流站有 2 回直流出线, 需增加配置相应隔离开关实现多种工作状态之间的切换。如在三端换流站均运行状态下, Q41 ~ Q44、Q29、Q19 闭合; 若 A,B 运行, C 停运, 则 Q41 ~ Q44 闭合, Q29 和 Q19 打开。

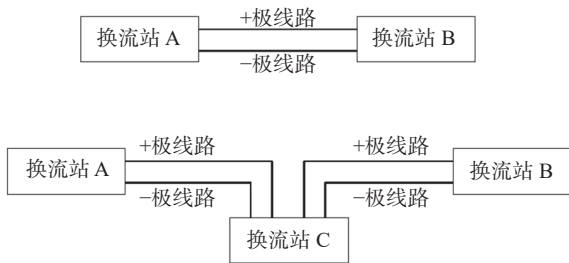


图 2 双端和三端直流系统简图

Fig. 2 Simplified diagram of two-terminal and three-terminal DC systems

2 已有的换流站融冰接线方案

向上、锦苏和溪浙直流中应用的融冰接线方案如图 4 所示。在此接线下, 将两极的两个低端阀组短接, 两极的两个高端阀组并联接入正负极线路之间, 这样在单个阀组功率不变的情况下, 线路上电流可达到原最大电流的 2 倍, 以此满足线路的融冰需求^[18-20]。

图 4 中粗虚线为较图 1 增加的部分, 即增加了 Q51 ~ Q56 隔离开关和相关支路。正常运行时 Q51 ~ Q55 断开, Q56 闭合, 融冰时 Q51 ~ Q55 闭合, Q56 断开。融冰时通过两个阀组的电流路径如下。极 1 阀组电流路径: 极 1 线路(+800 kV)—Q11—Q12—极 1 高端阀组—Q14—Q16—Q31—Q32—Q54—极 2 线路(-800 kV)。极 2 阀组电流路径: 极 1 线路—Q18—Q55—Q53—Q52—极 2 高端阀组—Q51—Q26—Q54—极 2 线路。

极 2 高端阀组需要保持换流器件的电压方向(图 4 中阀组右侧电压高, 左侧电压低), 极 2 高端阀组靠中性线侧需调整接高压极线侧, 靠高压极线侧需调整接中性线侧, 这种接线为阀组反向接线。因此在极 2 高端阀组两端增加 Q51 和 Q52 开关和连接线。融冰方式下 Q22 和 Q24 断开, Q51 和 Q52 闭合。融冰工况下正负极之间 2 个阀组并联, 输电线路流过的电流为正常运行方式下额定电流的 2 倍。

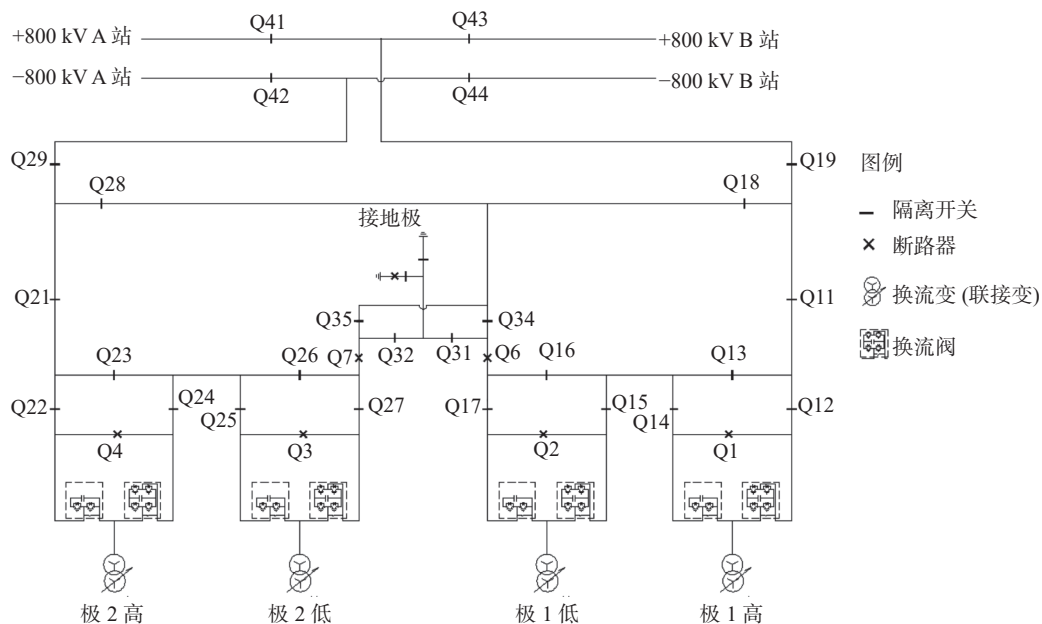


图 3 多端直流中间换流站典型主接线

Fig. 3 Typical main wiring scheme for multi-terminal DC intermediate converter station

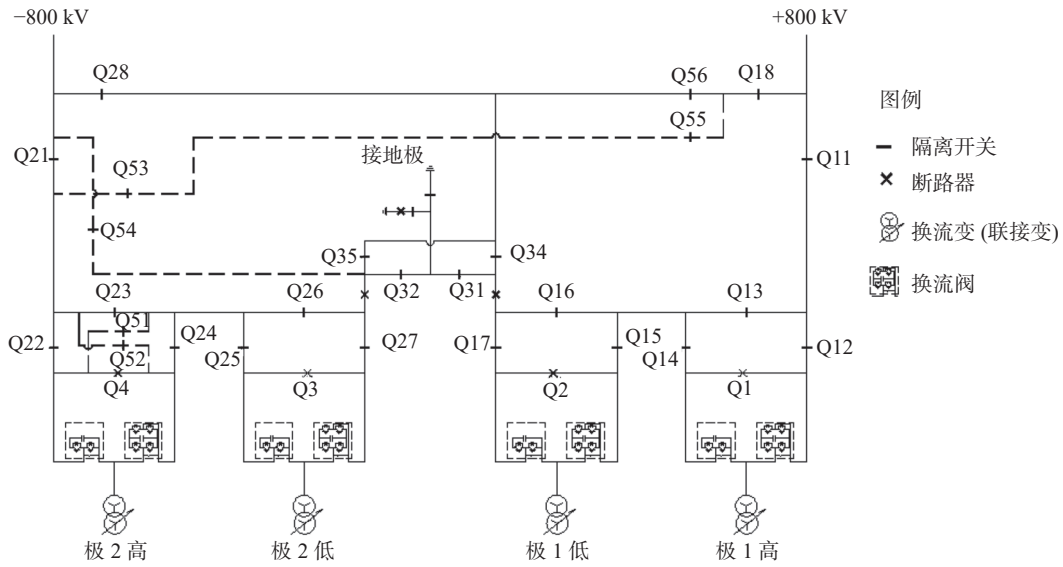


图 4 已有的换流站融冰极线

Fig. 4 Existing wiring scheme for ice melting of converter station

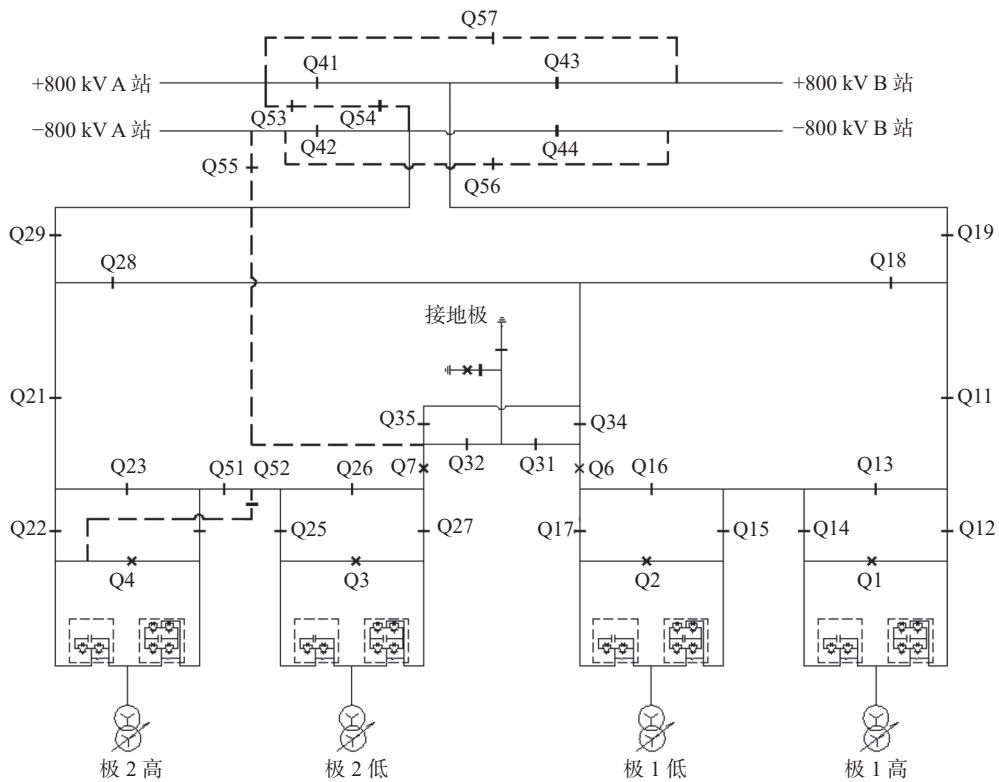


图 5 多端直流中间换流站融冰接线

Fig. 5 Wiring scheme for ice melting of multi-terminal DC intermediate converter station

该接线仅能适用于双端直流或多端直流的终端站,对于多端直流的中间换流站不能套用。该接线中极 2 高端阀组为了在融冰运行方式时保持阀组电压方向,增加了 Q51 和 Q52 上的两条支路。

3 多端直流的换流站融冰接线方案

3.1 中间换流站双阀组并联的融冰接线方案

多端直流中两端终端站的融冰接线方案同图 4,

但中间换流站的融冰接线需重新设计。本文提出了一种适用于中间换流站的融冰接线方案如图 5 所示。

图 5 粗虚线为较图 3(不带融冰功能)增加的部分: Q51 ~ Q57 隔离开关, 其中 Q51 ~ Q55 的作用是融冰时将两个极的高端阀组并联, 非融冰时 Q51 是常闭, 其它均为常开。Q56 和 Q57 的作用是配合已有开关完成不同运行状态间的转换, 非融冰时常开。

以图 2 中三端直流为例, 共有 6 种工作状态, 刀闸开闭和电流路径情况如下。

状态 1: 双端直流运行中 A、B 两站运行, C 站停运。这时 Q41 ~ Q44 闭合, Q19、Q29、Q56 和 Q57, 断开, C 换流站被旁路, 未接入线路中。

状态 2: 双端直流运行中 A、C 两站运行, B 站停运。

1) 状态转换的刀闸开合状态

Q56、Q57、Q43、Q44 断开, Q19、Q29、Q41、Q42 闭合。

2) 融冰阀组并联的刀闸开合状态

Q51、Q22、Q25、Q27、Q13、Q15、Q17、Q18、Q28、Q34、Q35 断开; Q52 ~ Q55、Q21、Q23、Q24、Q26、Q31、Q32、Q11、Q12、Q14、Q16 闭合。中间换流站 C 站投入融冰运行时, 上述开关的开合情况相同。

3) 电流路径

流经极 1 高端阀组电流路径: 极 1 线路(+800 kV 线路)—Q41—Q11—极 1 高端阀组—Q16—Q32—Q55—极 2 线路(-800 kV 线路)。

流经极 2 高端阀组电流路径: 极 1 线路(+800 kV 线路)—Q539—Q21—Q23—极 2 高端阀组—Q24—Q52—Q26—Q55—极 2 线路(-800 kV 线路)。

状态 3: 双端直流运行, B、C 运行, A 停运

1) 状态转换的刀闸开合情况

Q41、Q42、Q56、Q57、Q19、Q29 闭合, Q43、Q44 打开。此时与 A 换流站线路侧隔离开关打开。

2) 电流路径

极 1 阀组电流路径: 极 1 线路(+800 kV 线路)—Q57—(电流路径同状态 2)—Q56—极 2 线路。

极 2 阀组电流路径: 极 1 线路—Q57—(电流路径同状态 2)—Q56—极 2 线路。

状态 4 ~ 状态 6, 三端直流运行

1) 状态转换的刀闸开合情况

Q19、Q29、Q41、Q42、Q56、Q57 闭合, Q43、

Q44 打开。

2) 电流路径与状态 2 相同, C 站至 A 站的电流不通过 Q56 和 Q57, 至 B 站电流通过 Q56 和 Q57。

该接线方案将换流站融冰功能(实现双阀组并联功能)和换流站投入运行状态切换相互独立设计。此接线下实现阀组并联融冰功能的刀闸开合状态完全一致。

3.2 改进的阀组反向接线

融冰工况中, 为了保持极 2 高端阀组换流器件的电压方向, 需要采用阀组反向接线。即极 2 高端原靠中性线侧需调整接高压极线侧, 极 2 高端靠高压极线侧需调整接中性线侧。图 5 接线方案相比图 4 采用了一种改进的接线, 节省了一条支路, 具体如图 6 对比所示。

已有技术方案中, 融冰电流依次通过 Q52—极 2 高—Q51, Q22 和 Q24 断开, 需要开关 Q51 和 Q52 上的两条支路完成此功能。改进方案电流依次通过 Q23—Q24—极 2 高—Q52, Q51 和 Q22 断开, 改进在完成此功能时利用了已有的正常开关支路(Q24, Q23), 因此较已有技术方案节省一条支路, 对于换流站的节省投资、占地均有帮助。 ± 800 kV 换流站若按改进后接线布置, 换流站直流场在电气工艺流程方向可节省 10 m 左右占地, 整个直流场约可节省 4 000 m² 占地。

该改进接线可直接用于多端直流各换流站以及双端直流换流站中。

4 三阀组并联融冰接线方案

图 4 提及的双阀组并联接线技术能产生阀组额定电流 2 倍的融冰电流。受换流器件限制, 现成熟应用的特高压柔性直流换流站单站最大功率为 5 000 MW, 对应的线路额定电流为 3 125 A, 2 倍电流为 6 250 A。此电流应用于长距离输电线路融冰时, 依然会出现融冰电流偏小, 融冰时间较长等问题。为了进一步缩短融冰时间和提升融冰电流, 本文提出了一种换流站三阀组并联融冰接线方案, 如图 7 所示。

较图 4 增加了 Q57 隔离开关和相关连接支路, 可将极 1 低端阀组也并入到了两极线路之间。三阀组并联融冰时各开关状态为: Q14, Q16, Q21, Q22, Q25, Q27, Q31, Q32, Q51, Q56 打开; Q11, Q12, Q13,

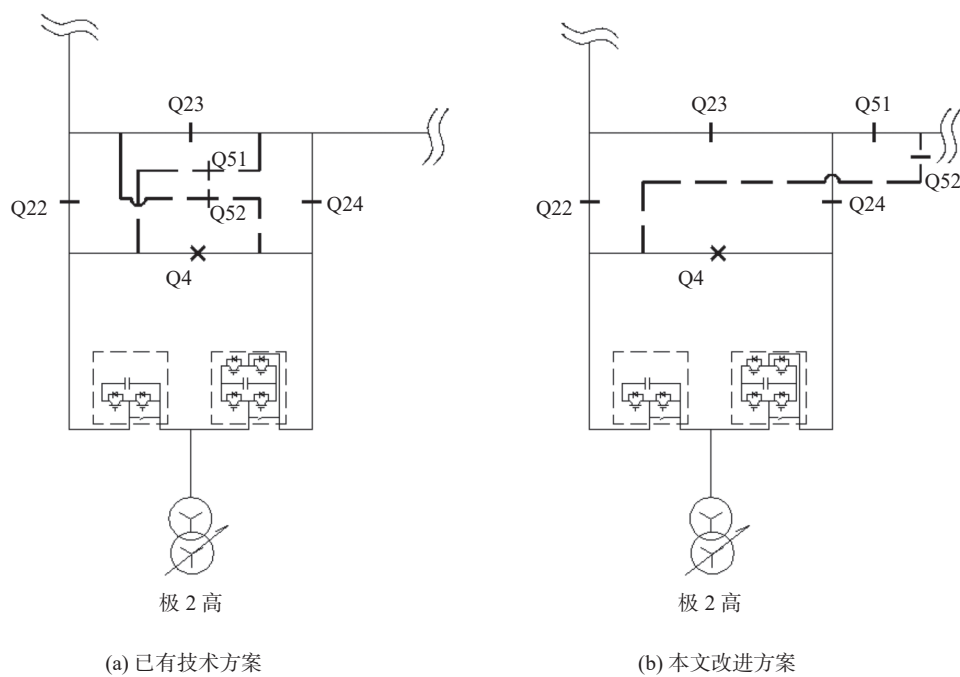


图 6 改进的阀组反向接线(右)

Fig. 6 Improved valve group reverse wiring (right)

Q15, Q17, Q24, Q26, Q28, Q23, Q34, Q52, Q53, Q54, Q57 闭合。流经各阀组的电流路径如下:

流经极 2 高端阀组电流路径: 极 1 线路(+800 kV) —Q18—Q55—Q23—极 2 高端阀组—Q24—Q52—Q26—Q54—极 2 线路(-800 kV)。

流经极 1 高端阀组电流路径: 极 1 线路(+800 kV) —Q11—极 1 高端阀组—Q57—Q34—Q28—极 2 线路(-800 kV)。

流经极 1 低端阀组电流路径: 极 1 线路(+800 kV) —Q11—Q13—极 1 低端阀组—Q34—Q28—极 2 线路(-800 kV)。

以现有的特高压柔直换流站最大额定功率 5 000 MW 为例, 单个阀组的额定电流为 3 125 A, 该方案下两极之间并联了 3 个阀组, 可输出 9 375 A 的融冰电流。现阶段直流隔离刀闸额定电流最大可至 8 000 A, 因此不能让三阀组并联后的总融冰电流同时流过刀闸。基于此, 极 1 的两个阀组电流路径在 -800 kV 线路前经过金属回线转换支路上的 Q28, 极 2 高端阀组电流则经过 Q54。3 章和 4 章介绍的融冰接线方案中经过两个阀组并联后电流的刀闸额定电流应选 6 250 A, 如图 5 中的 Q55 和图 7 中的 Q34、Q28。其余刀闸可按额定电流 3 125 A。

该接线方案充分利用换流站原有接线中的开关, 在双阀组并联接线的基础上通过增设一组隔离开关 Q57, 即达到了三阀组并联运行效果, 与双阀组并联融冰方案相比可不增加占地。

多端直流中间站也可按此思路设计三阀组并联接线, 如图 8 所示。较图 5 增加了 Q57, Q58 隔离开关及支路以实现三阀组并联功能。

5 结论

在跨越冰区的长距离特高压直流工程中, 直流运行方式融冰的技术手段已有应用。但现有融冰接线仅适用于两端直流, 融冰电流为 2 倍阀组额定电流。

本文针对换流站融冰接线开展设计研究, 提出了以下创新:

1) 提出了一种适用于多端直流中间换流站的融冰接线, 可适用于各种直流工况下的融冰。填补了多端直流条件下直流运行方式融冰的技术空白。

2) 改进了阀组反向接线, 节省了设备间接线, 投资和占地, 该技术通用于双端直流和多端直流。

3) 提出了适用于双端和多端特高压直流的三阀组并联融冰的接线方案。较双阀组并联接线可提升

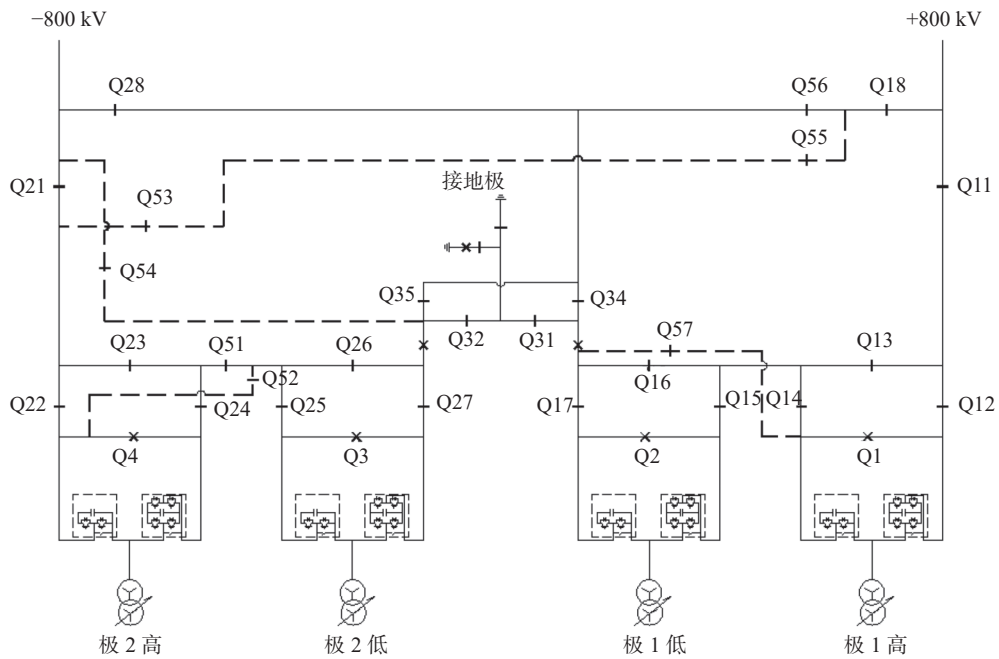


图 7 三阀组并联接线

Fig. 7 Three-valve group parallel wiring

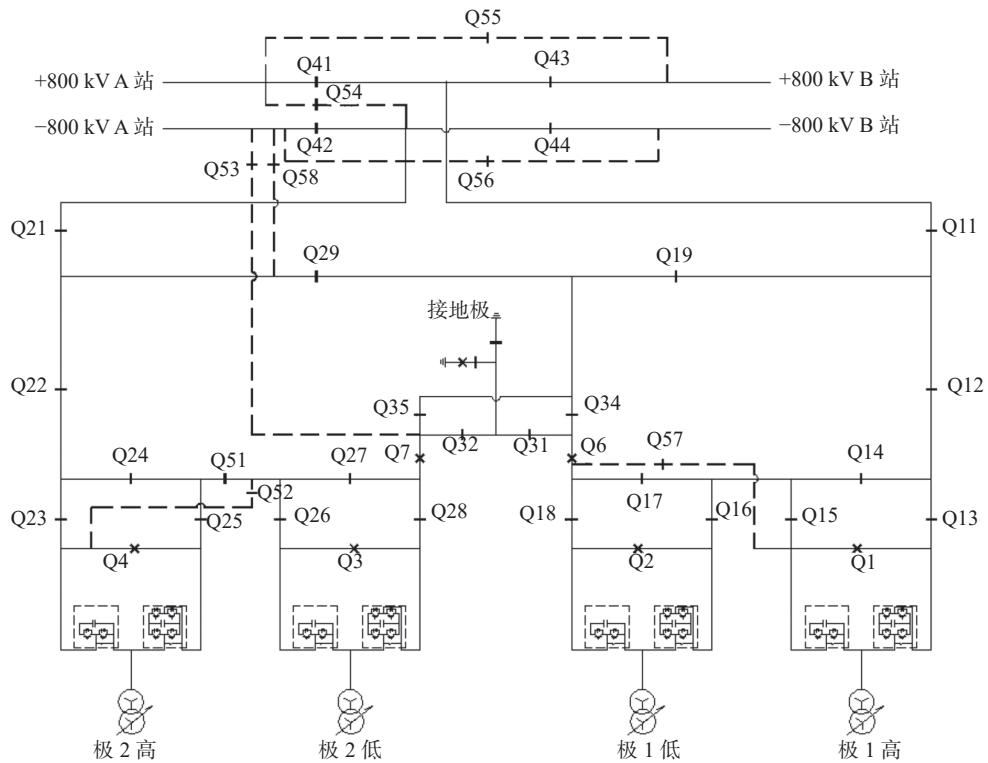


图 8 三阀组并联接线(中间换流站)

Fig. 8 Three-valve group parallel wiring scheme(Intermediate converter station)

50% 的融冰电流。

以上新型换流站融冰接线可满足不同条件下的

融冰需求, 提升直流输电线路的可靠性和运行经济性。现阶段本文中的多端和三阀组融冰接线暂未应

用在实际工程中,若后续应用,还需考虑直流运行方式切换操作时间较长、加重运维人员工作量、保护定值对应调整等问题。

参考文献:

- [1] 吴子怡,周唯.滇西北至广东特高压直流送端换流站融冰方案技术经济分析[J].南方能源建设,2017,4(3):131-135. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.03.024.
WU Z Y, ZHOU W. Selection analysis of Northwest Yunnan to Guangdong EHV DC converter station's ice melting scheme [J]. Southern energy construction, 2017, 4(3): 131-135. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.03.024.
- [2] 侯婷,刘涛,杨柳,等.新一代高性能柔性直流背靠背技术及工程应用[J].南方能源建设,2023,10(5):1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.001.
HOU T, LIU T, YANG L, et al. New generation high-performance VSC-HVDC back-to-back technology and application in project [J]. Southern energy construction, 2023, 10(5): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.001.
- [3] 庄志翔,郭剑,张珏,等.±500 kV 直流线路工程多冰区与结构工程量关系研究[J].南方能源建设,2022,9(1):96-102. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.014.
ZHUANG Z X, GUO J, ZHANG J, et al. Research on the relationship between structural engineering quantity and multi ice area of ± 500 kV DC transmission line engineering [J]. Southern energy construction, 2022, 9(1): 96-102. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.014.
- [4] 闵光云,赵鑫,刘小会.架空覆冰输电线路舞动研究进展[J].南方能源建设,2023,10(5):116-128. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.015.
MIN G Y, ZHAO X, LIU X H. Research progress of galloping of overhead iced transmission lines [J]. Southern energy construction, 2023, 10(5): 116-128. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.015.
- [5] 国家能源局.重覆冰架空输电线路设计技术规程:DL/T 5440—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
National Energy Administration. Technical specification for the design of overhead transmission line in medium and heavy icing area: DL/T 5440—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [6] 国家能源局.直流融冰系统设计技术规程:DL/T 5511—2016[S].北京:中国计划出版社,2016.
National Energy Administration. Technical code for design of DC de-icing system: DL/T 5511—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [7] 饶宏,傅闯,朱功辉,等.南方电网直流融冰技术的研究与应用[J].南方电网技术,2008,2(6):7-12. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2008.06.002.
RAO H, FU C, ZHU G H, et al. Research & application of DC-based deicing technology in CSG [J]. Southern power system technology, 2008, 2(6): 7-12. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2008.06.002.
- [8] 谢惠藩,朱坚,唐金昆,等.直流融冰装置理论与应用的若干问题探讨[J].南方电网技术,2013,7(3):13-20. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2013.03.003.
XIE H F, ZHU J, TANG J K, et al. Investigation on several issues of theory and application of DC de-icers [J]. Southern power system technology, 2013, 7(3): 13-20. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2013.03.003.
- [9] 常浩,石岩,殷威扬,等.交直流线路融冰技术研究[J].电网技术,2008,32(5):1-6.
CHANG H, SHI Y, YIN W Y, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line [J]. Power system technology, 2008, 32(5): 1-6.
- [10] 陈亦平,刘文涛,和识之,等.直流融冰装置在南方电网的应用分析[J].南方电网技术,2011,5(4):74-77. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2011.04.018.
CHEN Y P, LIU W T, HE S Z, et al. Analysis on the application of DC de-icer in China southern power grid [J]. Southern power system technology, 2011, 5(4): 74-77. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2011.04.018.
- [11] 陈鹤,朱旭东,辛业春.覆冰输电线路除冰技术研究综述[J].吉林电力,2022,50(6):30-34,48. DOI: 10.16109/j.cnki.jldl.2022.06.016.
CHEN H, ZHU X D, XIN Y C. Summary on ice melting technology of ice-covered transmission lines [J]. Jilin electric power, 2022, 50(6): 30-34,48. DOI: 10.16109/j.cnki.jldl.2022.06.016.
- [12] 班国邦,吕黔苏,马晓红,等.直流融冰技术应用比较研究[J].电力大数据,2021,24(9):83-92. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2021.09.011.
BAN G B, LÜ Q S, MA X H, et al. Comparative study on application of DC ice-melting technology [J]. Power systems and big data, 2021, 24(9): 83-92. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2021.09.011.
- [13] 宋宏佳.输电线路导线及地线复用新型直流融冰装置技术研究综述[J].南方能源建设,2018,5(3):72-76. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.011.
SONG H Q. Overview on technology of new model DC ice-melting device for phase wire and ground wire of transmission line [J]. Southern energy construction, 2018, 5(3): 72-76. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.011.
- [14] 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司.高压直流输电设计手册[M].北京:中国电力出版社,2017.
Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd., of China Power Engineering Consulting Group. High-voltage direct current design manual [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [15] 庞广恒,曾南超,杨万开.特高压直流系统融冰运行方式试验与工程调试[J].电网技术,2014,38(1):22-27. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.004.

- PANG G H, ZENG N C, YANG W K. Test of de-icing operating mode for UHVDC power transmission system and its practice in engineering commissioning [J]. *Power system technology*, 2014, 38(1): 22-27. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.004](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.004).
- [16] 杨万开, 吴庆范, 庞广恒. 特高压直流融冰方式控制策略及试验分析 [J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3313-3319. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2015.11.045](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2015.11.045).
- YANG W K, WU Q F, PANG G H. Analysis of control strategy and test for de-icing operation mode of UHVDC project [J]. *Power system technology*, 2015, 39(11): 3313-3319. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2015.11.045](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2015.11.045).
- [17] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 (2 版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- ZHAO W J. HVDC transmission engineering technology (2nd ed.) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [18] 束洪春, 赵红芳, 张旭, 等. 昆柳龙混合直流工程送端换流站电气主接线可靠性分析 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(22): 115-123. DOI: [10.7500/AEPS20210308002](https://doi.org/10.7500/AEPS20210308002).
- SHU H C, ZHAO H F, ZHANG X, et al. Reliability analysis of main electrical connection for sending-end converter station in Kunliulong hybrid DC project of China [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(22): 115-123. DOI: [10.7500/AEPS20210308002](https://doi.org/10.7500/AEPS20210308002).
- [19] REEVE J. Multiterminal HVDC power systems [J]. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, 1980, PAS-99(2): 729-737. DOI: [10.1109/TPAS.1980.319666](https://doi.org/10.1109/TPAS.1980.319666).
- [20] JUHLIN L E, LISS G, EKSTROM A. Parallel connection of convertors for HVDC transmission [J]. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, 1978, PAS-97(3): 714-724. DOI: [10.1109/TPAS.1978.354542](https://doi.org/10.1109/TPAS.1978.354542).

作者简介:



丁伟

丁伟 (第一作者, 通信作者)

1987-, 男, 高级工程师, 武汉大学电力系统硕士, 主要从事高压直流、变电一次技术研究及设计工作 (e-mail) dingwei@gedi.com.cn。

孔志达

1977-, 男, 正高级工程师, 广东工业大学电力系统及其自动化学士, 主要从事高压直流、变电技术研究工作 (e-mail) kongzhida@gedi.com.cn。

谌阳

1986-, 男, 高级工程师, 重庆大学高电压技术硕士, 主要从事高压直流、变电一次技术研究及设计工作 (e-mail) chenyang@gedi.com.cn。

(编辑 赵琪)