

基于南澳柔性直流的超导直流限流器运行工况设计研究

殷勤[✉], 郭金川

(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] 电阻型超导限流器的工作原理基于超导体的零电阻效应, 串联于线路中, 正常工作时基本没有电阻。线路发生短路, 电流超过临界电流时超导体失超而阻值迅速增大, 从而起到限制短路电流的作用。因此超导直流限流器正常运行时对电网基本无影响, 系统短路电流超出临界电流后, 会迅速限制电流值, 有效降低对直流设备的要求。文章基于南澳±160 kV 多端柔性直流输电系统, 讨论超导直流限流器可能的多种运行工况, 分析如何实现限流器的各种工况。[方法] 对于可能的5种运行工况, 建议设置隔离开关来实现工况的自动切换。[结果] 结合设备的配置, 给出了超导直流限流器和相关设备的电气主接线、紧凑化平面布置的建议方案; 针对不同的运行工况, 给出了对应的电流通路图。[结论] 对于其他的柔性直流输电系统, 可通过类似分析得出超导直流限流器可能的工况及自动切换的电气主接线方案、布置方案。

关键词: 超导直流限流器; 柔性直流输电; 短路电流抑制; 电气主接线; 紧凑化平面布置

中图分类号: TM7; TM471

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0017-07

开放科学(资源服务)二维码:



Research on the Design of Operating Condition of Multi-Resistance Superconducting DC Current Limiter

YIN Qin[✉], GUO Jinchuan

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

Abstract: [Introduction] The working principle of the resistive superconducting current limiter is based on the zero resistance effect of the superconductor, which is connected in series in the line and basically has no resistance during normal operation. When the circuit is short-circuited and the current exceeds the critical current, the superconductor loses excess and the resistance value increases rapidly, which plays a role in limiting the short-circuit current. So the superconducting DC (Direct Current) current limiter has little effect on the power grid when it is in normal operation. When the system short-circuit current exceeds the critical current, it will quickly limit the current value, effectively reducing the requirements for DC equipment. Based on Nan'ao ±160 kV multi-terminal VSC-HVDC (Voltage Source Converter Based High Voltage Direct Current) system, the possible operating conditions of superconducting DC current limiter are discussed, and how to realize the possible operating conditions is analyzed. [Method] For the five possible operating conditions, it was recommended to set disconnector to achieve automatic switching of operating conditions. [Result] The proposed scheme of electrical connection and compact layout is given based on the configuration of the equipment. And according to different operating conditions, the corresponding current path diagram is given. [Conclusion] The possible working conditions of superconducting DC current limiter and the automatic switching electrical connection and compact layout can be obtained by similar analysis for other flexible DC transmission systems.

Key words: superconducting DC current limiter; flexible DC transmission; short-circuit current suppression; scheme of electrical connection; compact layout

收稿日期: 2022-09-27 修回日期: 2023-04-06

基金项目: 国家重点研发计划“超导直流限流器的关键技术研究”(2017YFB0902300)

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/>).

0 引言

柔性直流输电是一种以电压源换流器、可关断开关器件和脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术为基础的新型输电技术^[1-2],也是目前进入工程应用的最先进的电力电子技术。柔性直流输电具有以下几个方面的技术优势^[3]:

1)不需要交流侧提供换相电流,没有无功补偿和换相失败问题,送、受端换流站均可与弱电网或无源电网联系。

2)能够快速独立控制有功功率和无功功率,实现功率动态连续调节。

3)潮流反转方便快捷,运行方式变换灵活,具备成网条件。

4)可以向电网提供必要的电压和频率支持,实现系统黑启动。

5)输出电压谐波小,设备省、占地少^[4-5]。

与常规直流输电方式相比,柔性直流输电在大容量清洁能源并网、分布式发电并网、大区域电网互联、孤岛供电、城市配电网的增容改造等领域具有较强的技术优势和广阔的应用前景^[6-8]。

由于柔性直流具有电压极性固定的特点,柔性直流输电构建多端网络具有得天独厚的优势。多端网络,为了隔离端间的相互影响,可采用高压直流断路器快速切断故障电流并使故障部分退出运行,避免整个多端柔性直流系统停运而对与其相连的交流系统产生冲击,从而提高电力系统运行的安全、稳定性。

随着多端网络的构建及端间电气联系的加强,对直流断路器的开断能力、峰值耐受能力等提出越来越高的要求,导致断路器的制造难度加大。此时考虑采用限流器限制短路电流,一方面可以降低直流断路器的硬件要求和制造难度,另一方面可在很大程度上降低故障瞬间增大的短路电流对整个系统及相关设备的冲击^[9]。基于超导体特性研制的超导直流限流器,正常运行时对电网基本无影响,系统故障时抑制暂态故障电流,成为故障限流器发展的重要方向^[10]。

文章分析限流器的原理,基于南澳±160 kV 多端柔性直流输电系统,讨论可能的多种运行工况,并给出对应的电气接线与平面布置建议。

1 超导限流器的原理及研究现状

超导限流器是利用超导技术而研制出的快速有效的限流装置。根据是否应用超导体产生磁场,超导限流器的原理主要分为电阻型原理和电感型原理两类。电阻型原理超导限流器的工作原理基于超导体的零电阻效应,其串联于线路中,正常工作时基本没有电阻。线路发生短路,短路电流超过临界电流时超导体失超而阻值迅速增大,从而起到限制短路电流的作用^[11-13]。电感型原理超导限流器种类较多,其原理相对电阻型更为复杂多样,主要有饱和铁芯型、变压器型、磁屏蔽型等。

文章的讨论都是以电阻型原理以及基于电阻型的拓展原理作为超导直流限流器研制的关键技术路线。

电阻型超导限流器如图 1 所示,其原理是利用超导体从超导态(无阻)向常态(高阻)快速转变来限制电力系统的故障电流。这一类型超导限流器通常由无感绕制的超导线圈(或线圈组)组成,拥有自动检测故障、结构紧凑、响应迅速、原理简单及实现容易等优点^[14-15]。其不足之处是,需要使用较多超导带材构建并产生所需限流电阻,超导带材失超恢复时间较长(秒级)^[16]。



图 1 电阻型超导限流器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of resistive superconducting current limiter

国际上,电阻型超导限流器发展经历了实验级、配电级和输电级样机研制等阶段。例如,Nexans 德国公司已实现多台(套)10~24 kV 千安级电阻型超导限流器商业化生产^[17];美国超导公司完成了 115 kV/0.9 kA 电阻型超导限流器研制和试验验证^[18-19];韩国完成了 22.8 kV/50 MVA 电阻型超导限流器的并网^[20]。

在我国,关键技术方面也取得突破,江苏中天科技公司完成了 220 kV/1.5 kA 电阻型超导限流器研制^[21];上海交通大学完成了 4 kV/5 kA 电阻型超导直流限流器样机研制和测试。

文章基于南澳±160 kV 多端柔性直流输电系统,讨论超导限流器可能的多种运行工况。

2 超导直流限流器的实际运行工况

超导直流限流器采用高温超导技术,正常情况下零阻接入,实现近零损耗;故障情况下失超高阻接入,限制直流短路电流,有效降低对直流断路器的参数要求。考虑设备检修时不影响系统运行,超导限流器接入的接线方式应满足以下 3 种情况:

1) 正常运行方式:超导限流器与直流断路器串联接入运行。

2) 超导限流器检修模式:超导限流器退出运行时,直流断路器可单独接入运行。

3) 直流断路器检修模式:直流断路器退出运行时,超导限流器与直流断路器被旁路,直流线路不带直流断路器、超导限流器运行。

考虑运行的灵活性,超导限流器由两个电阻构成,每个电阻的室温阻值为 R 。此时通过不同的接线实现超导限流器的 3 种工作模式来适应不同的工况,拓扑结构图如图 2 所示。

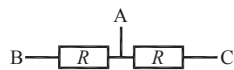


图 2 电阻型超导限流器拓扑结构图

Fig. 2 Topology diagram of resistive superconducting current limiter

模式一:小容量模式,一个电阻接入系统,接线端为 A、B 或 A、C,超导限流器的室温阻值为 R 。

模式二:大电阻模式,两个电阻串联接入系统,接线端为 A、C,超导限流器的室温阻值为 $2R$,与模式一、三相比,限流效果最为明显,耐受时间最短,允许通过的临界电流最小。

模式三:大容量模式,两个电阻并联接入系统,接线端为 A 与 B、C,超导限流器的室温阻值为 $0.5R$,与模式一、二相比,允许通过的临界电流最大,耐受时间最长,限流效果稍差。

基于南澳±160 kV 多端柔性直流输电系统,分析

系统发生直流故障时流过超导故障限流器的电压和电流等主要电气应力。基于仿真结果,对超导限流器的设备参数提出要求,额定电压为直流 160 kV、额定电流为 1 kA。同时对超导限流器可能的几种运行工况进行仿真计算,常用的运行工况要求一定的耐受时间,通过的电流较大。而试验工况下要求限流器能快速响应,有显著的限流效果。

根据运行工况的特点有以下结论:

1) 两个电阻并联(大容量模式)是长期运行方式,适用于常用工况。

2) 两个电阻串联(大电阻模式)或单电阻接入(小容量模式)是短时运行方式,可以满足试验工况的要求。

3) 考虑采用旁路开关实现超导限流器的热保护。

综上所述,超导限流器总计有 5 种运行工况:超导限流器与直流断路器串联接入时超导限流器有小容量、大电阻、大容量 3 种运行工况,超导限流器检修工况,直流断路器检修工况。从运行的便利性考虑,可灵活布置隔离开关来切换不同运行工况,与超导限流器串、并联运行以及设备检修时的情况相匹配。

3 超导直流限流器的电气主接线

结合限流器的 5 种运行工况,可在不同的位置设置隔离开关来实现对应的工况。5 种工况的接线图如图 3~图 7 所示。接线图中编号与设备的对应关系如下:

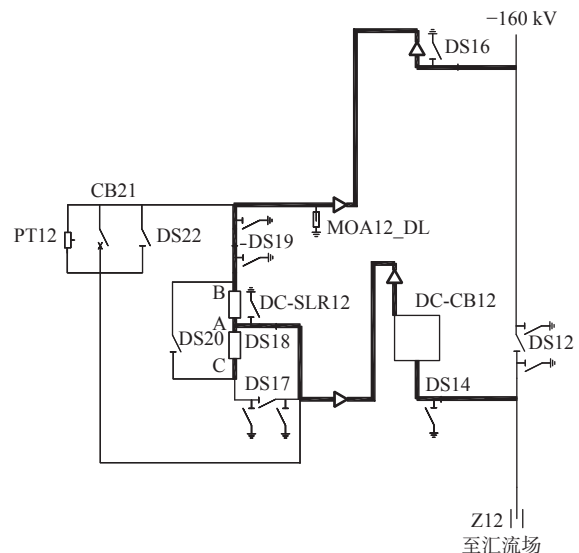


图 3 超导限流器电气接线图示意-小容量模式

Fig. 3 Electrical connection of superconducting current limiter in small capacity mode

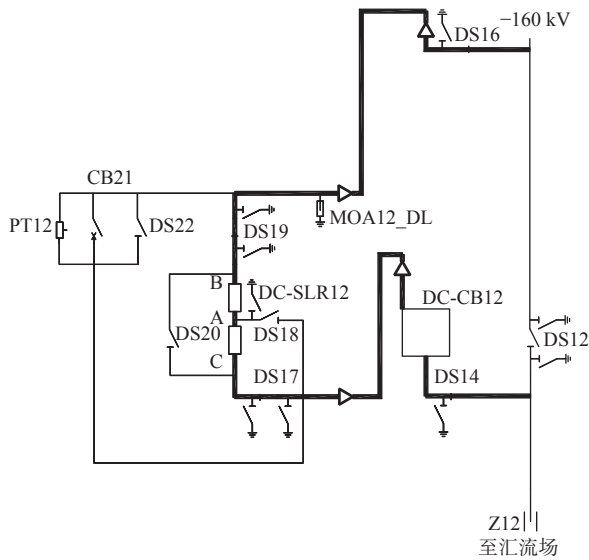


图 4 超导限流器电气接线图示意-大电阻模式

Fig. 4 Electrical connection of superconducting current limiter in large resistance mode

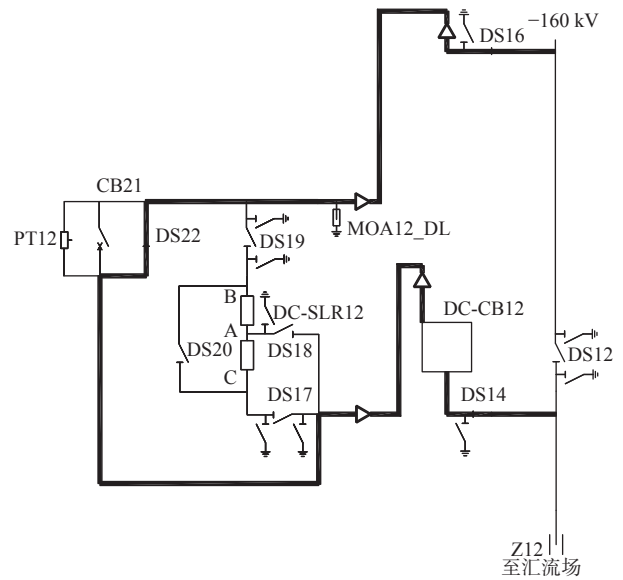


图 6 超导限流器电气接线图示意-限流器检修模式

Fig. 6 Electrical connection of superconducting current limiter in maintenance mode

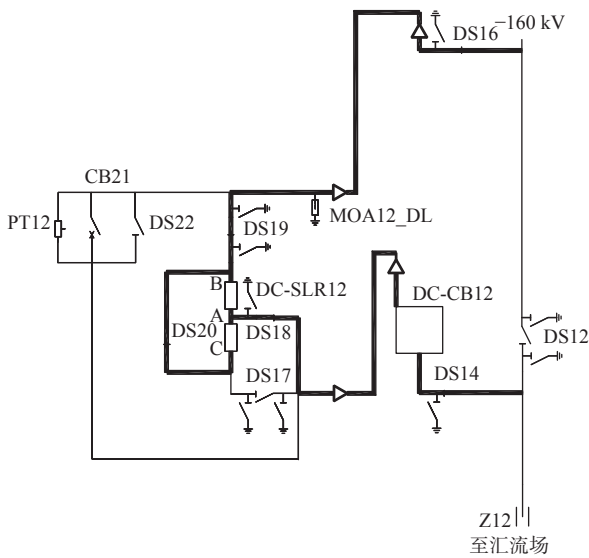


图 5 超导限流器电气接线图示意-大容量模式

Fig. 5 Electrical connection of superconducting current limiter in high capacity mode

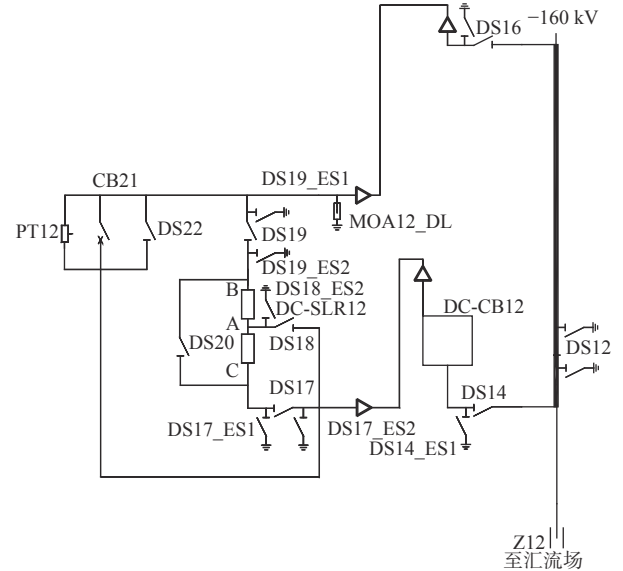


图 7 超导限流器电气接线图示意-直流断路器、限流器检修模式

Fig. 7 Electrical connection of DC circuit breaker and current limiter in maintenance mode

1)DC-CB12: 直流断路器。

2)DC-SLR12: 限流器, A、B、C 为 3 个接线端, 根据不同工况接入不同接线端。

3)CB21: 旁路开关。

DS12、DS14、DS16 ~ DS20、DS22: 隔离开关。

4)PT12: 电压互感器。

5)MOA12_DL: 避雷器。

工况 1-小容量模式(电流路径如粗实线所示):

如图 3 所示, 限流器 DC-SLR12 在试验工况运行时, DS14、DS18、DS19、DS16 隔离开关闭合, 限流器只有 B-A 段电阻接入。超导限流器与直流断路器串联接入直流线路运行。

工况 2-大电阻模式(电流路径如粗实线所示): 如图 4 所示, 限流器 DC-SLR12 在试验工况运行时,

DS14、DS17、DS19、DS16 隔离开关闭合, 限流器的 B-A 和 A-C 段电阻串联接入。超导限流器与直流断路器串联接入直流线路运行。

工况 3-大容量模式(电流路径如粗实线所示): 如图 5 所示, 限流器 DC-SLR12 长期运行时, DS14、DS18、DS19、DS20、DS16 隔离开关闭合, 限流器的 B-A、A-C 段电阻并联接入。超导限流器与直流断路器串联接入直流线路运行。

工况 4-超导限流器检修模式(电流路径如粗实线所示): 如图 6 所示, 限流器 DC-SLR12 检修时, DS14、DS22、DS16 隔离开关闭合。仅有直流断路器 DC-CB12 接入直流线路运行。

工况 5-直流断路器检修模式(电流路径如粗实线所示): 如图 7 所示, 限流器和断路器都检修时, DS12 隔离开关闭合。直流线路不带直流断路器、超导限流器运行。

根据运行需要, 可设置 DS12、DS14、DS16 ~ DS20、DS22 总计 8 个隔离开关来实现超导限流器 5 种工况的切换。

如图 3 ~ 图 7 电气接线图所示, 为保护限流器 DC-SLR12, 还配置了旁路开关 CB21, 旁路开关的关合电流、合分闸时间与限流器的性能相匹配。并考虑旁路开关的检修工况, 设置了并联的隔离开关 DS22。旁路开关需要检修时, 闭合隔离开关 DS22。

限流器 DC-SLR12 在系统正常运行情况下, 超导限流器主体部分即超导线圈在超导态, 基本呈现零电阻, 仅母排等连接及焊接部分有微小电阻, 因此超导限流器整体电压基本接近零。在系统出现短路故障(暂态)时, 超导线圈失超, 超导限流器电阻逐渐增大, 超导限流器两端电压由零(近似)随之增大。为了方便判断限流器电阻的运行工况, 实现超导限流器两端端间电压的在线监测, 可采用直流电压测量装置 PT12 对超导限流器两端进行极间测量。

4 超导直流限流器的布置方案

结合限流器的 5 种运行工况, 与电气接线图对应, 对和限流器直接相连的主要设备进行布置, 如图 8 所示。

为了尽可能节约用地、紧凑布置, 和超导限流器 DC-SLR12 的 B、A、C 端相连的隔离开关 DS17 ~ DS19 平行布置在同一列, 充分利用宽度方向, 也保

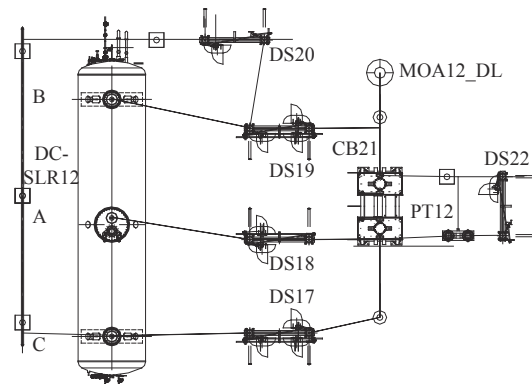


图 8 超导限流器电气布置示意图

Fig. 8 Layout of superconducting current limiter

证了在不同运行方式下隔离开关间的间距满足带电距离要求、接线流畅。与超导限流器 C-B 端连接的隔离开关 DS20 考虑到接线方便、减少占地, 布置在 DS19 左上方, 用超导限流器旁的一系列绝缘子完成与超导限流器接线端子的连接。

旁路开关 CB21 与超导限流器并联, 起到保护的作用。但限流器存在 B-A 段电阻接入、B-A 和 A-C 段电阻串联接入、B-A 和 A-C 段电阻并联接入 3 种运行工况, 需考虑如何完成旁路开关的并联连接。对限流器的 3 种运行工况进行分析, 限流器的 B 端接线端子均是接入系统的, 不同工况的区别在于 A 与 C 端接线端子如何接入。因此旁路开关一端与连接 B 端接线端子的隔离开关 DS19 相连, 另一端与连接 A 端接线端子的隔离开关 DS18、C 端接线端子的隔离开关 DS17 的并接点相连, 从而实现旁路开关对超导限流器不同工况下的保护。和电气接线图一致, 再在旁路开关处并联隔离开关 DS22 与电压互感器 PT12。在电缆头处安装了避雷器 MOA12_DL。

采用示意图的布置, 可以实现超导限流器不同工况的切换, 旁路开关对超导限流器的保护以及电压互感器对超导限流器运行状态的监测, 并同时做到了紧凑化布置、充分利用空间。

5 结论

基于超导体特性研制的超导直流限流器, 正常运行时对电网基本无影响, 系统故障时抑制暂态故障电流, 可以有效降低对直流设备尤其是直流断路器的要求, 减小构建多端直流网络的设备选型困难性, 成为限流器发展的重要方向。文章基于南澳 ± 160 kV

多端柔性直流输电系统,讨论超导限流器可能的多种运行工况,得出以下结论:

1)考虑各种情况,超导限流器总计有 5 种运行工况:超导限流器与直流断路器串联接入时超导限流器有小容量、大电阻、大容量 3 种运行工况,以及超导限流器检修、直流断路器检修工况。从运行的便利性考虑,设置 DS12、DS14、DS16~DS20、DS22 总计 8 个隔离开关可以实现超导限流器 5 种工况的切换。

2)对于其他的柔性直流输电系统,可通过类似的分析得出超导限流器可能的运行工况;再通过隔离开关的合理配置来切换不同的运行工况。对于超导限流器的 3 种工作模式,需对具体的柔性直流输电系统进行分析来判断何时采用哪种工作模式。

3)建议对超导限流器并接旁路开关,以实现保护。同时对超导限流器的端间电压进行监测,从而实时监测限流器的运行情况。

4)针对电气接线图,给出了紧凑化的电气布置示意,为后续的相关工程提供参考。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 许树楷,罗雨.背靠背输电系统中柔性直流与常规直流的协调控制策略[J].南方能源建设,2016,3(2):9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.002.
XU S K, LUO Y. Study on coordination control strategy of VSC/LCC BiB HVDC [J]. *Southern energy construction*, 2016, 3(2): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.002.
- [3] 于昊洋,张艳,陈正曦,等.中国—韩国—日本跨国联网构建方案及经济性研究[J].全球能源互联网,2018,1(增刊1):203-212. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2018.s1.001.
YU H Y, ZHANG Y, CHEN Z X, et al. Construction scheme and economic analysis of China-Korea-Japan interconnection project [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2018, 1(Suppl. 1): 203-212. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2018.s1.001.
- [4] 李岩,罗雨,许树楷,等.柔性直流输电技术:应用、进步与期望[J].南方电网技术,2015,9(1):7-13. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.01.002.
LI Y, LUO Y, XU S K, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation [J]. *Southern power system technology*, 2015, 9(1): 7-13. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.01.002.
- [5] 陆子凯,简翔浩,张明瀚.多端柔性直流配电网的可靠性和经济性评估[J].南方能源建设,2020,7(4):67-74. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.010.
LU Z K, JIAN X H, ZHANG M H. Research of VSC HVDC application to China southern power grid [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(4): 67-74. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.010.
- [6] 徐政.柔性直流输电系统(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2017.
XU Z. Flexible HVDC systems (2nd ed.) [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [7] 黄志秋,陈冰,周敏.海上风电送出工程技术与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
HUANG Z Q, CHEN B, ZHOU M. Offshore wind power transmission engineering technology and application [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016.
- [8] RAO H. Architecture of Nan'ao multi-terminal VSC-HVDC system and its multi-functional control [J]. *CSEE journal of power and energy systems*, 2015, 1(1): 9-18. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2015.00002.
- [9] 肖磊石,盛超,谭翔宇,等.不同类型直流超导限流器的技术经济分析[J].低温与超导,2020,48(1):38-43. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2020.01.008.
XIAO L S, SHENG C, TAN X Y, et al. Technical and economic analysis of different types of superconducting fault current limiters [J]. *Cryogenics & superconductivity*, 2020, 48(1): 38-43. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2020.01.008.
- [10] 梁飞,宋萌.电阻型超导限流器的研究综述[J].云南电力技术,2018,46(6):127-133. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7345.2018.06.036.
LIANG F, SONG M. Review of resistive superconducting fault current limiter [J]. *Yunnan electric power*, 2018, 46(6): 127-133. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7345.2018.06.036.
- [11] 张翠萍.高温超导限流器的研究进展[J].中国材料进展,2017,36(5):335-343. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.05.03.
ZHANG C P. Progress and status of high temperature superconducting fault current limiter [J]. *Materials China*, 2017, 36(5): 335-343. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.05.03.
- [12] BOCK J, HOBL A, SCHRAMM J, et al. Resistive

- superconducting fault current limiters are becoming a mature technology [J]. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2015, 25(3): 5600604. DOI: 10.1109/tasc.2014.2364916.
- [13] GARCIA W R L, TIXADOR B, RAISON B, et al. Technical and economic analysis of the R-type SFCL for HVDC grids protection [J]. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2017, 27(7): 5602009. DOI: 10.1109/tasc.2017.2739642.
- [14] 龚珺, 诸嘉慧, 方进, 等. 电阻型高温超导限流器暂态电阻特性分析 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(9): 2130-2138. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170310.
- GONG J, ZHU J H, FANG J, et al. Analysis of transient resistance characteristics for resistive type high temperature superconducting fault current limiter [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2018, 33(9): 2130-2138. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170310.
- [15] 诸嘉慧, 陈盼盼, 戴银明, 等. 适用于电阻型超导限流器的超导带材选取与实验研究 [J]. *低温与超导*, 2019, 47(12): 52-56. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2019.12.011.
- ZHU J H, CHEN P P, DAI Y M, et al. HTS tape selection and test for resistive type superconducting fault current limiter [J]. *Cryogenics & superconductivity*, 2019, 47(12): 52-56. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2019.12.011.
- [16] 刘路昕, 张京业, 戴少涛, 等. 电阻型超导限流器研发现状及所面临的技术瓶颈 [J]. *低温与超导*, 2016, 44(7): 1-5,9. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2016.07.001.
- LIU L X, ZHANG J Y, DAI S T, et al. Present status of research and development and technical bottlenecks of resistive superconducting fault current limiter [J]. *Cryogenics & superconductivity*, 2016, 44(7): 1-5,9. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2016.07.001.
- [17] DOMMERQUE R, KRÄMER S, HOBL A, et al. First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: production, test and installation [J]. *Superconductor science and technology*, 2010, 23(3): 034020. DOI: 10.1088/0953-2048/23/3/034020.
- [18] SCHMIDT W, GAMBLE B, KRAEMER H P, et al. Design and test of current limiting modules using YBCO-coated conductors [J]. *Superconductor science and technology*, 2010, 23(1): 014024. DOI: 10.1088/0953-2048/23/1/014024.
- [19] KRAEMER H P, SCHMIDT W, CAI H, et al. Superconducting fault current limiter for transmission voltage [J]. *Physics procedia*, 2012, 36: 921-926. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.230.
- [20] LEE H, LEE J, MOON S. Plenary talk-HTS superconducting wire development and applications in Korea [C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Beijing, China, October 25-27, 2013. Beijing, China: IEEE, 2013: 263-263.
- [21] 黄炜昭. 220 kV高温超导故障限流器在深圳电网的应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- HUANG W Z. Application of 220 kV high temperature superconducting fault current limiter to the Shenzhen power grid [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

作者简介:



殷勤

殷勤 (第一作者, 通信作者)

1989-, 女, 高级工程师, 电气工程专业硕士, 主要从事变电站和换流站设计的相关研究工作 (e-mail)yinqin@gedi.com.cn。

郭金川

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)