

Research on Application and Configuration of SFCL in VSC-HVDC

Yu Liu¹, Leishi Xiao²

¹Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou Guangdong

Email: 1329664853@qq.com

Received: Nov. 16th, 2019; accepted: Dec. 4th, 2019; published: Dec. 11th, 2019

Abstract

VSC-HVDC is an important means for large-scale access and large-scale interconnection of renewable energy in the future. Aiming at the problem of rapid removal of DC-side faults in VSC-HVDC, this paper proposes a method of SFCL based on superconductor superconducting state/normal state fast transition characteristics, combined with DC circuit breakers to achieve DC fault isolation. Taking one VSC-HVDC as a typical case, PSCAD software is used to simulate and compare the suppression effect of SFCL on cut-off current and bridge arm current in different positions of the system. The research results show that SFCL with current limiting resistor of 10 Ω and quench response time of 0.1 ms at the negative line of the VSC-HVD transmission line, can effectively reduce the rapid requirements of cut-off time for DC circuit breaker, improve converter fault ride-through capability of VSC-HVDC.

Keywords

VSC-HVDC, Superconductor, SFCL

超导限流器在柔性直流输电系统的应用及配置研究

刘禹¹, 肖磊石²

¹广州供电局有限公司, 广东 广州

²广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州

Email: 1329664853@qq.com

收稿日期: 2019年11月16日; 录用日期: 2019年12月4日; 发布日期: 2019年12月11日

摘要

柔性直流输电是未来可再生能源大规模接入和大范围互联的重要手段。本文针对柔性直流输电系统直流侧故障快速清除难题,提出采用基于超导体超导态/正常态快速转变特性的超导直流限流器配合直流断路器的方法,实现直流故障隔离。以某柔性直流输电系统为典型案例,采用PSCAD软件仿真对比在系统不同位置配置限流器对直流断路器截断电流、桥臂电流等抑制效果。研究表明:在柔直系统算例中负极架空线路出口配置限流电阻为 $10\ \Omega$ 、失超响应时间为 $0.1\ \text{ms}$ 的电阻型超导直流限流器,可有效降低对直流断路器截断时间的快速性要求,提升多端柔直系统换流阀故障穿越能力。

关键词

柔性直流, 超导, 限流器

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国能源资源分布不均匀,大型电源基地远离负荷中心,对远距离大容量输电具有较高需求。柔性直流输电是继交流输电、常规直流输电后的新一代输电技术,可实现大规模可再生能源的高效接入,是推进能源结构转型和实现大范围能源互联的重要手段[1] [2]。

目前世界上投运的柔性直流输电系统大多不具备直流故障穿越能力,快速切除并隔离直流故障是大电网柔性互联技术未来发展的重点研究领域。利用超导直流限流器在故障电流下的快速转变特性,配合高压直流断路器的技术路线,可实现对故障电流的有效抑制,直流线路故障的快速可靠切除,降低高压直流断路器在开断时间、关断容量、串联断口等方面研制难度,对提升高压大容量柔性直流输电系统的可靠性水平,推进我国大电网柔性互联技术发展具有较好的技术优势及示范应用意义[3] [4]。

常规柔性直流输电系统在直流架空线路发生单极接地等线路故障,需闭锁三站并跳开其交流侧开关,即停运整个三端系统,以实现直流侧故障的清除及隔离。该技术壁垒即多端柔直系统直流架空线路的故障定位及快速隔离是迫切需要解决的共性关键问题。通过在柔直系统配置电阻型超导直流限流器和直流断路器,研究提出换流阀、直流断路器、直流限流器三类非线性设备匹配协调运行策略,解决系统直流侧故障的快速清除难题[5] [6]。

超导限流器从原理上主要分为电阻型和电感型两类。电阻型工作原理基于超导体的零电阻效应,系统正常运行时不体现电阻,系统发生故障短路电流超过限流器临界电流时,超导体失超而阻值迅速增大,起到限制短路电流的作用。电阻型超导直流限流器充分利用超导体的零电阻和状态快速转变特性,具有结构简单、抗扰动能力强、对柔直系统影响小等显著优势。从国外对超导限流器的研究现状看,美国超导公司完成了 $115\ \text{kV}/0.9\ \text{kA}$ 电阻型超导限流器研制和试验验证;美国 SuperPower 公司正在开展 $138\ \text{kV}/0.8\ \text{kA}$ 矩阵式电阻型超导限流器研制;韩国电力科学研究院完成 $154\ \text{kV}/2\ \text{kA}$ 电阻型超导限流器样机研制。在国内,天津百利机电公司研制的 $220\ \text{kV}/0.8\ \text{kA}$ 饱和铁心型超导限流器于2012年在天津电网挂网;广东电网公司完成目前国际上容量最大的超导限流器($500\ \text{kV}/3.15\ \text{kA}$ 饱和铁芯型)研制;江苏中天科技公司完成 $220\ \text{kV}/1.5\ \text{kA}$ 电阻型超导限流器研制。但国内外尚未见电阻型超导直流限流器工程应用于柔性直

流输电系统的研究报告, 即利用超导限流器快速失超响应特性, 解决柔直系统短路故障电流上升率高, 需快速闭锁换流阀等突出难题[7][8]。

本文分析了柔直系统在闭锁前后短路电流演变机理及超导直流限流器失超特性, 提出了柔直系统不同故障工况下的控制保护策略, 采用 PSCAD 电磁暂态软件仿真研究了系统不同短路工况, 不同位置配置电阻型超导直流限流器对直流故障电流、直流断路器截断电流、换流器桥臂电流的限流效果, 为超导直流限流器的工程应用提供基础数据和策略储备。

2. MMC 柔直系统短路电流暂态演变及超导限流器失超特性分析

MMC 柔直系统直流侧故障主要分为双极短路故障、单极接地故障和断线故障, 其中双极短路故障对系统危害最严重, 本文以双极短路故障为例为故障电流演变过程进行分析。

2.1. 换流阀闭锁前

换流站出口故障时子模块闭锁前的等效电路如图 1 所示, 该阶段直流故障电流主要由子模块中电容放电及交流电源馈流组成, 其中子模块电容放电占故障电流的主导。

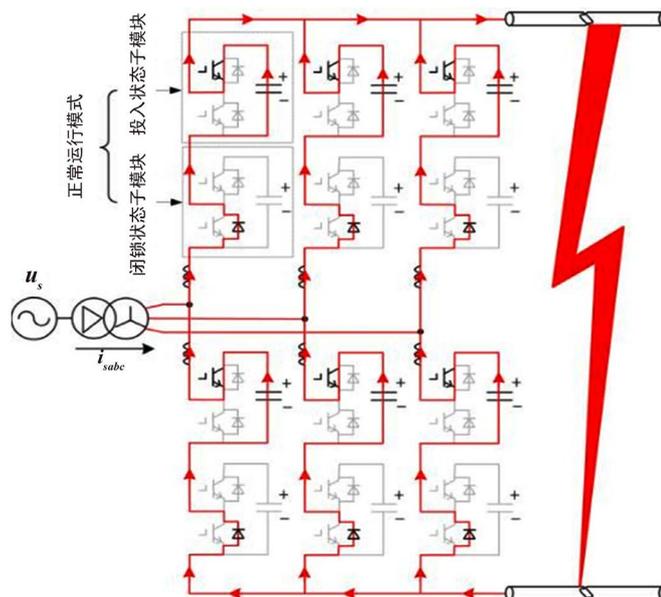


Figure 1. Diagram of bipolar short-circuit current path
图 1. 双极短路电流路径示意图

闭锁前各相单元投入状态的子模块个数相同, 可将双极短路故障等效为 RLC 二阶放电回路, 如图 2 所示。

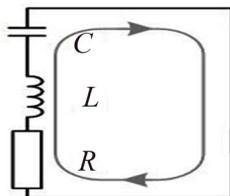


Figure 2. RLC equivalent circuit
图 2. RLC 等效电路

其中电阻 R 主要是 IGBT 通态电阻和桥臂电阻, 数值很小。电感 L 主要由桥臂电抗值决定, 电容 C 由子模块电容值决定。当系统容量和电压一定, 换流阀子模块电容越大、桥臂电抗越小, 故障电流越大。双极短路闭锁前就是电容快速放电过程, 短路电流具有快速上升特性。因此, 在短路回路中增加电阻型超导直流限流器, 可增大放电回路中能量消耗速度, 降低直流线路的故障过流水平。

2.2. 换流阀闭锁后

在闭锁后的初始阶段, 由于桥臂电抗的续流作用, 续流二极管维持导通状态。在桥臂电流衰减到零以前, 短路电流主要由桥臂电抗续流和交流电源馈流两部分组成, 并逐渐衰减。在闭锁后的过渡阶段, 该阶段二极管全部导通, 桥臂电抗续流和交流系统同时向短路点放电。在不控整流阶段, 系统进入由交流电源和二极管桥式电路组成的不控整流阶段, 此时故障电流来自交流电源馈流。

通过对 MMC 柔直系统严重故障即双极短路工况放电回路分析, 在放电回路中加入具有瞬时转变特性的超导限流电阻, 可有效降低短路电流水平, 实现换流阀暂时性闭锁甚至不闭锁, 提升柔直系统故障穿越能力。

电阻型超导限流器是基于超导体的超导态/正常态转变特性抑制短路故障电流的新型电力装备, 其基本工作原理是: 当电网处于正常运行状态时, 串入电网中的超导限流器阻抗为零, 对电网不产生影响; 一旦电网发生短路故障, 故障电流超过限流器临界电流时自动触发, 产生一个合适阻抗, 有效抑制短路故障电流; 在短路故障消除后, 超导限流器自动恢复到零阻抗状态无阻通流。如图 3 所示。

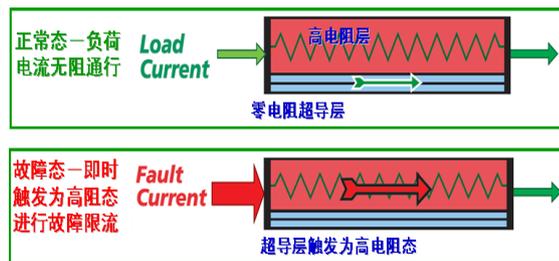


Figure 3. Principle of resistive SFCL

图 3. 电阻型超导限流器原理

采用二代高温超导带材的电阻型超导直流限流器, 当系统短路电流超过其临界响应电流后, 其失超电阻值与带材温度有关, 该变化规律示意图如图 4 所示。

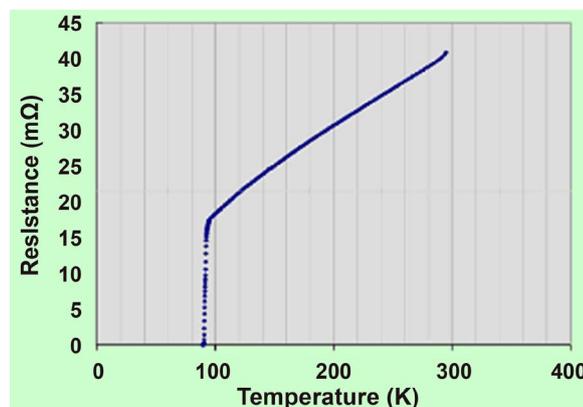


Figure 4. Schematic of SFCL resistance changes with temperature

图 4. 超导限流电阻随温度变化示意图

3. 柔直系统算例的直流侧故障清除策略

该多端柔性直流输电系统包括 A (受端)、B (送端) 和 C (送端) 三个换流站。设计容量分别为 200 MW、100 MW 和 50 MW, 采用基于半桥型子模块级联型多电平换流器, 其中 B 换流站到 C 换流站为 12.5 km 直流架空线路。工程主要作用是将分散的间歇性清洁风电通过 B 换流站和 C 换流站接入并通过 A 换流站输出。

针对 B 换流站至 C 换流站之间的直流架空线路故障清除难题, 通过在该线路 B 换流站出口正负极线上各加装一台直流断路器, 以实现 C 换流站故障及架空线路短路故障的选择性隔离, 避免三站系统整体停运, 如图 5 所示。

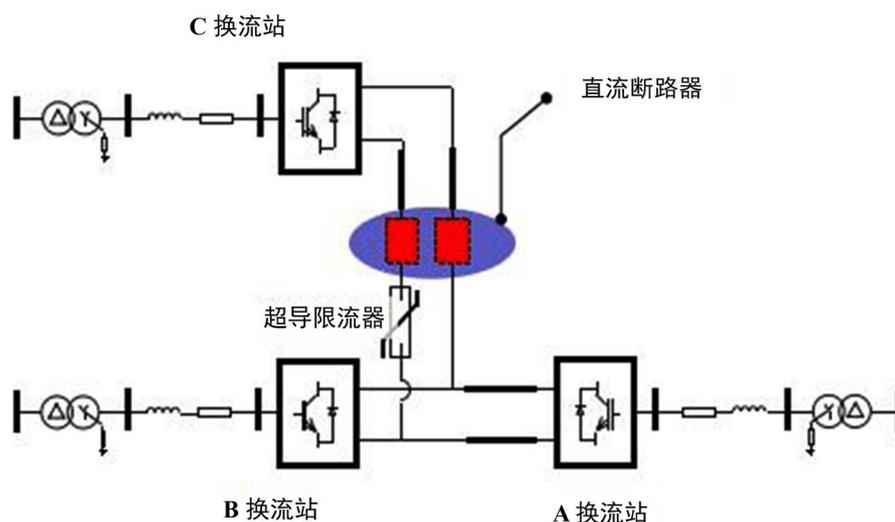


Figure 5. Schematic of HVDC circuit breakers in VSC-HVDC

图 5. 柔直系统加装直流断路器示意图

同时, 针对该故障区间不同故障类型, 如双极短路和单极接地故障, 对换流阀等一次设备的冲击影响不同, 引起保护动作不同, 导致换流阀闭锁与否结果不同。因此, 针对不同故障类型, 柔直控制保护采取不同策略。

4. 超导限流器在柔直系统配置的仿真分析

4.1. 不配置限流器系统仿真

本文针对柔直系统中 C 换流站直流侧故障清除案例, 仿真分析在该直流架空线路发生负极接地短路故障, 加装限流器前后直流线路电流、换流器桥臂电流、直流断路器机械支路电流等关键暂态特性参数变化, 为柔直系统控制保护策略优化和提升系统故障穿越能力提供基础数据支撑。

仿真中设置三站按额定功率运行, 在 2 s 时刻连接 B 换流站和 C 换流站的直流架空线路发生负极接地短路, 在该非严重性短路故障下, C 换流站闭锁退出运行, 直流断路器跳开隔离线路故障, A-B 站保持运行。线路电流仿真结果如图 6 所示, 桥臂电流仿真结果如图 7 所示。

从图 6 仿真结果看, 该单极接地故障电流演变时序为: 故障发生后 1 ms 内主要体现为电缆对地电容放电, 故障电流呈高频振荡; 其后 A 换流站和 B 换流站不闭锁, MMC 子模块电容和交流系统持续向接地点馈入短路电流, 该阶段故障电流峰值为 2.5 kA。故障发生后 9 ms, 直流断路器机械断口电流过零熄弧, 截断电流为 1.8 kA。

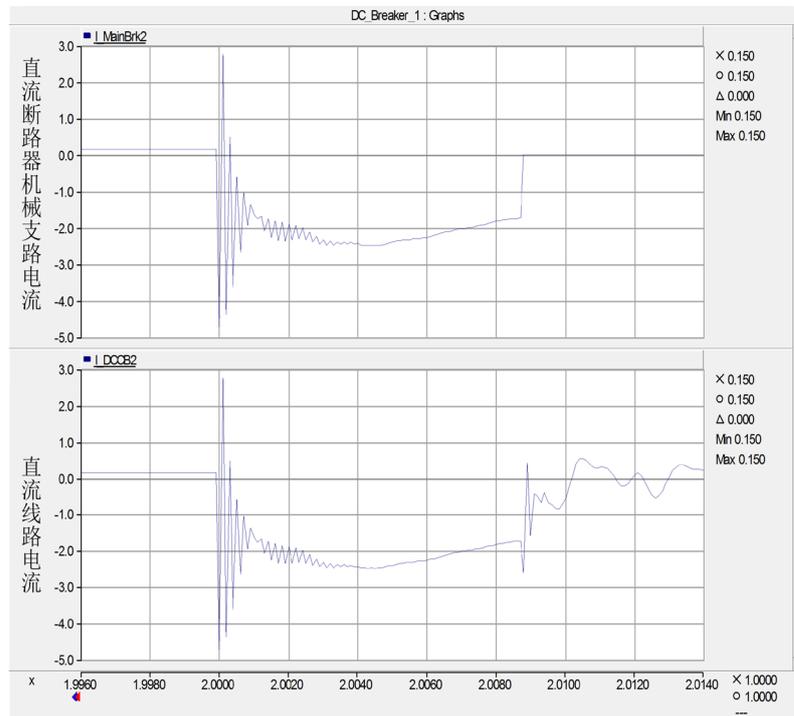


Figure 6. Simulation results of line current
图 6. 线路电流仿真结果

从图 7 桥臂电流仿真结果看, 故障发生后 B 换流站桥臂电流均出现抬升, 其中上桥臂电流峰值为 560 A, 下桥臂电流峰值为 529 A。该站桥臂过流保护四段动作门槛值为 624 A, 动作延时 0.2 ms。即该故障下桥臂过流接近保护动作定值。

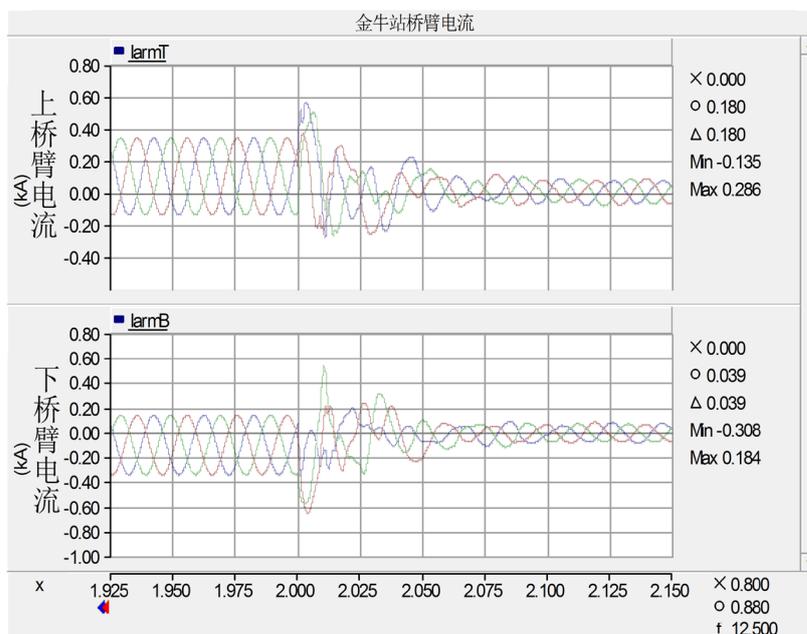


Figure 7. Simulation results of leg current of B converter station
图 7. B 换流站桥臂电流仿真结果

4.2. 直流线路配置限流器系统仿真

通过在案例中直流线路配置限流电阻为 $10\ \Omega$ 、失超响应时间为 $0.1\ \text{ms}$ 的电阻型超导直流限流器, 仿真分析相关故障特征参数的变化, 结果如图 8、图 9 所示。

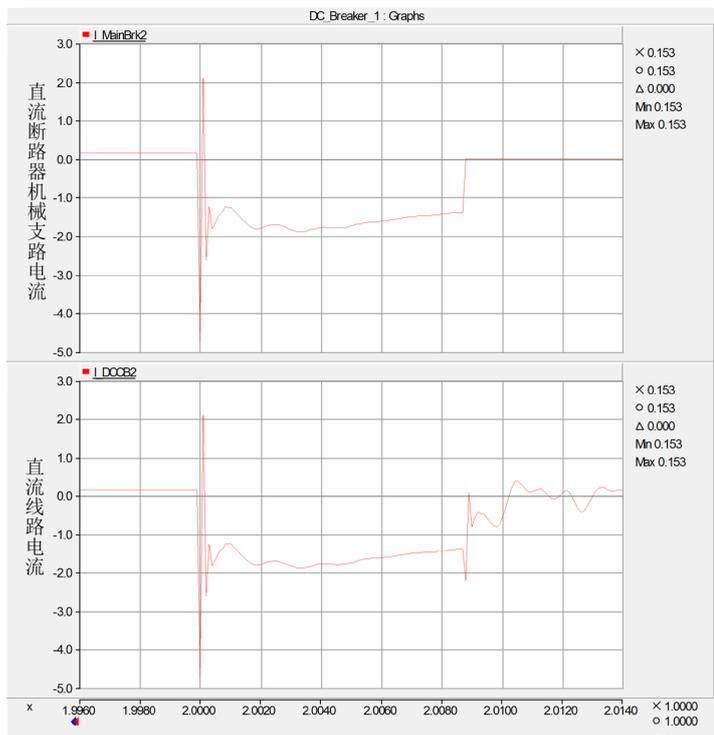


Figure 8. Simulation results of line current

图 8. 线路电流仿真结果

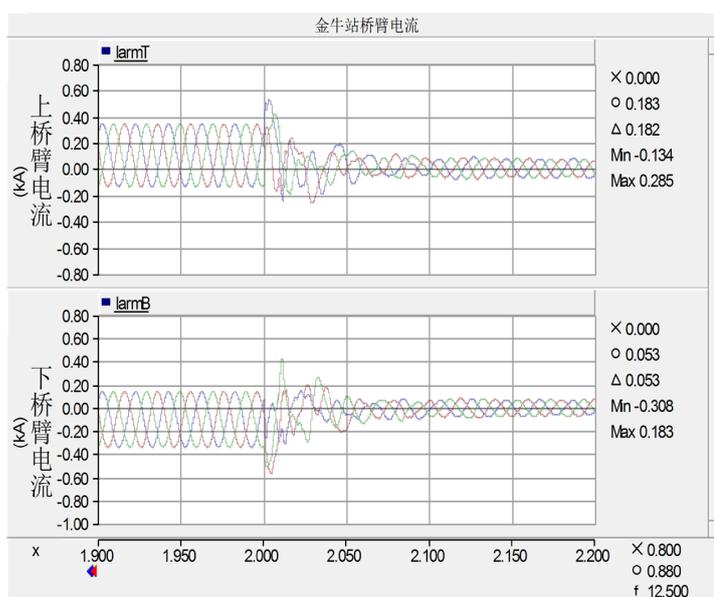


Figure 9. Simulation results of leg current of B converter station

图 9. B 换流站桥臂电流仿真结果

加入电阻型超导直流限流器后, 线路短路电流在 2 ms 时刻至直流断路器截断电流前的峰值为 1.9 kA, 直流断路器截断电流为 1.3 kA, 对线路故障电流抑制率达到为 25%。

从图 9 仿真结果看, B 换流站上桥臂电流峰值为 522 A, 下桥臂电流峰值为 406 A, 本仿真案例中结合电阻型超导直流限流器的配置, 对短路故障下桥臂过流也有较好的抑制效果, 对直流断路器电流截断时间的快速性要求也相应降低, 显著提升直流断路器制造难度及机械断口动作寿命。需要指出的是, 当线路发生单极接地等非严重性故障(单极接地为非严重)时, A 换流站和 B 换流站换流阀能够耐受直流断路器跳开前的短时过流, 实现不闭锁性能, 但面向未来更高电压等级、更大短路电流水平的柔性直流系统, 考虑选择性直流保护出口延时和直流断路器跳开时间, IGBT 存在无法耐受短路电流的情况必须闭锁换流阀, 超导限流器的技术优越性可得到更多体现。

4.3. A 换流站出口配置限流器系统仿真

针对青汇线单极接地故障, A 换流站和 B 换流站均向接地点馈入短路电流, 仿真分析在定电压站 A 站出口配置同参数的电阻型超导直流限流器, 对短路电流等抑制效果, 仿真结果如图 10 所示。

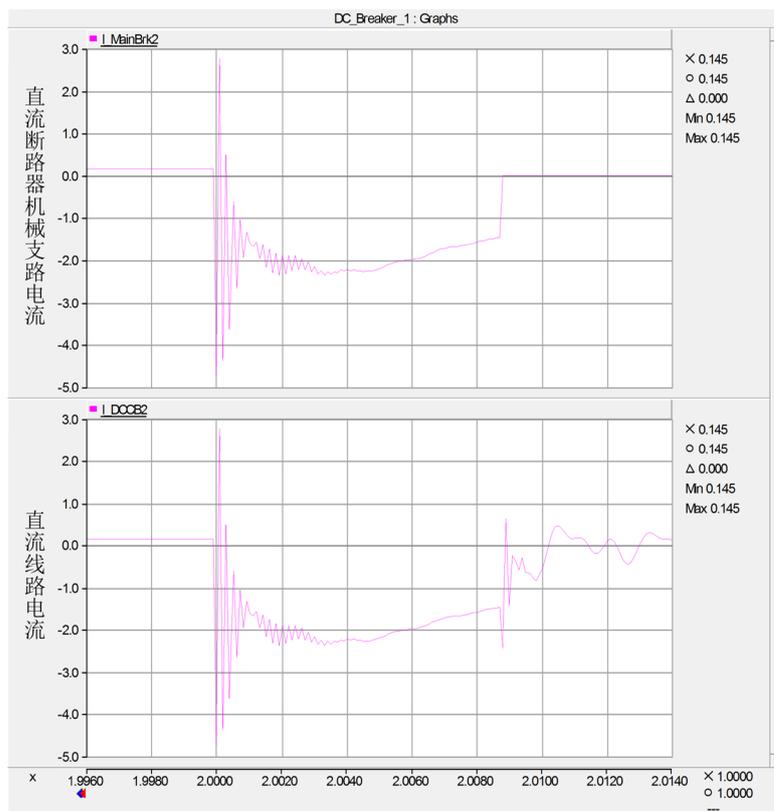


Figure 10. Simulation results of line current

图 10. 线路电流仿真结果

从仿真结果看, 线路短路电流在 2 ms 时刻至直流断路器截断电流前的峰值为 2.26 kA, 直流断路器截断电流为 1.5 kA。通过仿真对比, 在 B 站和 C 站之间母线出口布置限流器, 可取得最优的限流效果。

5. 结语

本文针对柔性直流输电系统直流侧故障快速清除难题, 提出采用基于超导体超导态/正常态快速转变

特性的电阻型超导直流限流器配合直流断路器的方式实现直流故障隔离。以某柔直加装机械式直流断路器和超导直流限流器为典型案例, 提出系统不同故障类型下直流控制保护策略, 采用 pscad 软件仿真对比在系统不同位置配置限流器对故障电流和直流断路器截断电流的抑制效果。研究表明: 在直流架空线路负极出口配置限流电阻为 $10\ \Omega$ 、失超响应时间为 $0.1\ \text{ms}$ 的电阻型超导直流限流器, 在该线路发生单极接地故障下, 可使直流断路器截断电流从 $1.8\ \text{kA}$ 降低至 $1.3\ \text{kA}$, 换流站桥臂电流峰值从 $560\ \text{A}$ 降低至 $406\ \text{A}$, 可有效降低对直流断路器截断时间的快速性要求, 提升多端柔直系统换流阀故障穿越能力。本文提出的柔直系统直流故障清除方法, 对未来更高短路电流水平的柔性直流输电示范工程建设, 具有良好借鉴意义。

参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 李谦, 肖磊石. 过电压保护与接地装置运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [4] 李谦, 饶章权, 肖磊石. 大型接地网多维度评价技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [5] 信赢. 超导限流器综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 1-9.
- [6] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [7] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.
- [8] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111.