

架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究

孙 栩,王华伟,雷 霄,赵 兵,王姗姗

(中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:建立了±500 kV 架空线柔性直流电网的电磁暂态仿真模型,较为详细地计算、分析、比较了极间短路等严重故障下的短路电流与换流站闭锁时间。研究表明,合理地配置限流电抗器是限制短路电流、防止多个换流站闭锁的有效手段。研究了限流电抗器的配置方案以及改进的限流措施,使得站外直流线路故障不会造成任何换流站闭锁,满足设计与运行的要求。

关键词: 架空线; 柔性直流电网; 短路电流; 限流电抗器; 换流站; 闭锁

中图分类号: TM 713

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.033

0 引言

国家电网公司正在规划建设基于架空线传输的 ±500 kV 柔性直流电网,采用环形结构,所以需要配置高压直流断路器用以隔离故障。直流短路电流是直流电网构建中一个非常重要的问题,其不但是换流阀过流保护的判定判据,还是制造高压大电流直流断路器的关键参数,所以必须对换流器桥臂和直流断路器流过的短路电流进行计算分析。目前对于柔性直流电网的研究,主要集中于协调控制策略^[1-8]、换流器拓扑^[9-12]、直流断路器研制^[13-14]、电力电子变压器设计^[15-16]等方面,对于直流电网短路电流的专门分析还比较少,本文将对此进行较为细致的计算。

1 计算条件

1.1 系统条件

目前推荐的换流站站点位置为:抽水蓄能接入的丰宁站、风电接入的张北站、光伏接入的康保站、最终馈入北京站。其中,张北风电联网馈入,而康保的光伏则有可能采用联网或者孤岛方式接入柔性直流电网。4 个站点均接入当地 500 kV 电压等级的电网,其中北京站按 63 kA 短路电流计算,其余 3 个站按 30 kA 短路电流计算;北京站及张北站的额定容量设定为 3000 MW,其余 2 个站的额定容量设定为 1500 MW。

1.2 直流电网及换流站拓扑

柔性直流电网的网架结构采用“口”字型结构,如图 1 所示,直流线路长度如表 1 所示。

柔性直流换流站主要有 2 种拓扑:每站 1 个换流器的对称单极结构和每站 2 个换流器的对称双极结构。对于柔性直流电网,其结构及控制已经很复杂,如果再采用对称双极结构,则总的控制架构和运行方式的复杂程度将更深,所以柔性直流电网换流

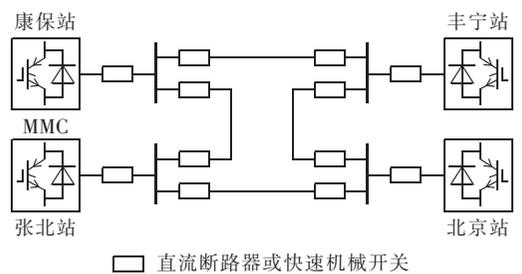


图 1 柔性直流电网的网架结构

Fig.1 Framework of flexible DC grid

表 1 直流线路长度

Table 1 DC line lengths

直流线路	长度/km	直流线路	长度/km
北京—张北	219	康保—丰宁	227
张北—康保	66	丰宁—北京	126

站推荐采用对称单极结构。当采用对称单极结构,极线或直流线路发生接地故障时,不会发生直流极间短路,故障严重程度较低;并且对称单极结构发生极间故障的概率非常低,有利于系统的安全稳定运行。

柔性直流换流器主要有 2 种拓扑:①半桥模块化多电平换流器(MMC)子模块结构+高压大电流直流断路器;②故障自清除 MMC 子模块结构+快速直流机械开关。由于规划中的柔性直流电网采用直流架空线传输,所以发生线路故障的概率比较大。对于电压源型换流器而言,其发生极间故障时,直流阻尼很小,直流短路电流发展速度很快,在几个 ms 之内,直流故障电流就有可能冲到十几 kA 或者几十 kA。拓扑①的原理是一旦直流线路发生极间短路故障,快速定位,通过直流断路器将故障线路切除,为了降低设备制造难度,直流断路器可以不考虑重合闸功能,因此直流电网由开始的环状电网变成后来的链状电网,潮流转移,但是各换流器一直保持在线运行;拓扑②的原理是一旦直流线路发生极间短路故障,各换流站短暂闭锁,时间长度大概为几十 ms,在此

期间各换流站均不向直流内部馈入能量,故障电流息弧。从成本角度而言,拓扑①需要配置 24 台高压大电流直流断路器,而拓扑②的换流阀所使用的全控型电力电子器件比拓扑①多,两者的成本与各装置的拓扑结构密切相关,需要进行技术经济比较;从技术成熟度而言,目前国内外的 MMC 柔性直流工程都是使用拓扑①技术路线,国内多个厂家都已经具备生产高压大容量半桥 MMC 的能力。综上所述,规划中的柔性直流电网推荐采用拓扑①方案。其换流器主电路如图 2 所示,各设备参数如表 2 所示。

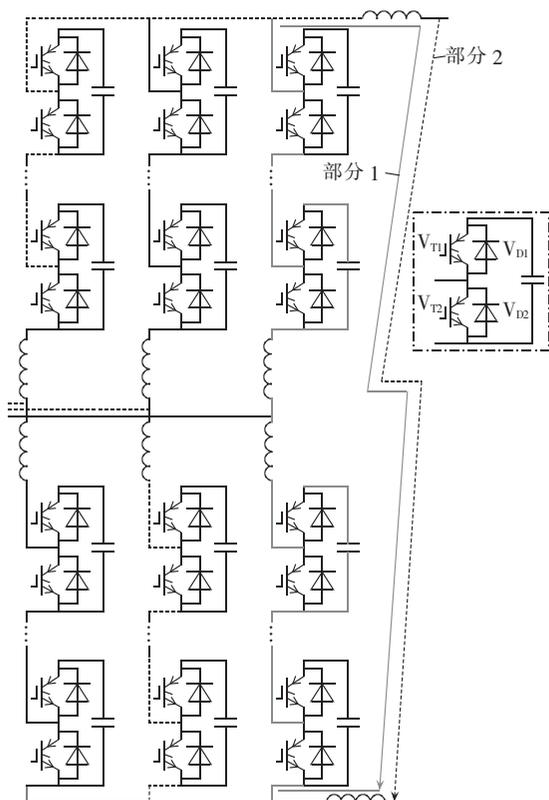


图 2 换流器主电路

Fig.2 Main circuit of MMC

表 2 柔性直流电网换流站主电路参数
Table 2 Main circuit parameters of converter station of flexible DC grid

参数	各换流站参数值			
	北京站	张北站	康保站	丰宁站
桥臂电抗器电感/mH	80	80	150	150
子模块电容器电容/mF	15	15	10	10
子模块数量	455	455	625	625
漏抗/%	15	15	15	15
限流电抗	需要计算比较			

2 直流短路计算原理

MMC 在发生极间短路故障时,故障电流分为电容放电电流和交流系统馈入电流两部分,其短路电流通路如图 2 所示。图中灰色实线部分为电容放电电流通路(点划线方框中为其具体元件名称),虚线

部分为交流系统馈入电流通路。电容放电通路中,投入状态子模块中的电容通过 V_{T1} 放电,而切出状态子模块中的 V_{D2} 提供短路电流回路。

放电回路的电流计算公式如式(1)所示^[4]。

$$i = e^{-t/\tau} \left[U_{dc} \sqrt{\frac{C_0}{nL}} \sin(\omega t) + I \cos(\omega t) \right] \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n}{LC_0} - \left(\frac{R_{stray}}{2L} \right)^2} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{4L}{R_{stray}} \quad (3)$$

其中, ω 为角频率; τ 为时间常数; n 为桥臂子模块数; L 为桥臂电感值; C_0 为子模块电容值; R_{stray} 为电抗器直流电阻、电容器串联等效电阻、器件开通关断损耗及导通损耗的等效杂散电阻和放电回路金属构件的接触电阻的总和; U_{dc} 为换流器直流侧电压。电压源型换流器极间短路最大放电电流可近似如式(4)所示。

$$i = \sqrt{\frac{C_0 U_0^2}{nL}} \quad (4)$$

其中, U_0 为换流器直流侧额定电压。

3 直流限流电抗器配置

3.1 直流限流电抗器集中配置

现有的多端直流输电工程,无论是柔性直流还是常规直流,其限流电抗器(平波电抗器)都集中布置于换流器出口。柔性直流电网限流电抗器集中配置时,电抗器布置位置及计算考虑的故障位置如图 3 所示。

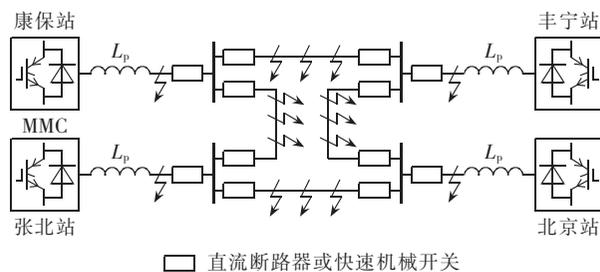


图 3 直流限流电抗器集中布置及故障位置图

Fig.3 Centralized configuration of DC current-limiting inductors and fault locations

图中,故障点位于各换流器的出口以及各条直流线路的两端和中点。换流器出口故障与直流线路两端故障相比较,各换流器向故障点贡献的短路电流相同,整个直流电网的电气特性完全一致,只是个别直流断路器流经的故障电流幅值及方向存在区别。本文在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 上搭建仿真模型进行计算。由于直流短路故障电流发展得很快,因此要求柔性直流电网中的相关直流断路器尽快断开,目前从故障发生到断路器完全断开的总时间大约为 6 ms,其中控制保护装置故障检测保

护出口时间约 3 ms,正在研制的 ±500 kV 直流断路器的开断时间约 3 ms,考虑一定裕度,所以本文统计的是 10 ms 之内的直流线路短路电流最大值。同时,由于 IGBT 过负荷能力目前还很弱,换流阀本体具有过流保护功能,故障电流达到 2 倍额定电流时,换流站就闭锁。经过分析,对于抑制直流故障电流快速上升最有效的手段是在换流器出口配置较大的限流电抗器。本文首先以各换流器出口配置 100 mH、150 mH、200 mH 限流电抗器为例计算直流线路短路电流的最大值以及换流站闭锁的情况,分别见表 3 及表 4(以张北—康保线路右端处发生极间故障为例,其直流故障电流最为严重)。

表 3 不同换流器出口处限流电抗器电感值对应的短路电流最大值

Table 3 Maximum short circuit current corresponding to inductance of current-limiting inductor at MMC exit port

限流电抗器 电感值/mH	短路电流最大值/kA							
	1 ms	2 ms	3 ms	4 ms	5 ms	6 ms	7 ms	10 ms
100	6.7	11.8	17.4	19.4	20.0	22.4	22.8	26.6
150	5.5	9.3	13.5	16.6	17.2	19.7	20.7	23.8
200	4.8	7.9	11.0	14.1	15.6	18.2	19.7	21.9

表 4 不同换流器出口处限流电抗器电感值对应的换流站闭锁时间

Table 4 Converter station blocking time corresponding to inductance of current-limiting inductor at MMC exit port

限流电抗器 电感值/mH	闭锁时间/ms			
	北京站	张北站	康保站	丰宁站
100	11.8	3.4	3.2	4.2
150	12.6	4.2	3.6	4.6
200	13.2	5.0	3.8	5.4

从以上的结果可以看出,在换流器出口处配置限流电抗器达到 200 mH 时,直流线路上短路电流 6 ms 内基本可以限制在 15 kA 左右,10 ms 内基本可以限制在 20 kA 左右,可以满足直流断路器的开断要求。但是桥臂上电流上升很快,触发过流保护,即使限流电抗达到 200 mH,4 ms 内 1 个换流站闭锁,5 ms 内 2 个换流站闭锁,6 ms 内 3 个换流站闭锁。可见,即使直流断路器可以断开直流线路上流过的短路电流,但是此时多个换流站都已经闭锁,失去了配置直流断路器的意义。

3.2 直流限流电抗器分散配置

如果将限流电抗器分散配置,即只配置线路电抗器 L_x ,或者 L_x 和平波电抗器 L_p 混合配置(如图 4 所示),有可能改善以上分析的问题。当然,分散配置时换流器出口故障和直流线路两端故障下,故障电气特性并不一致,需要分别考虑。

下文以只配置 L_x 为例进行分析计算, L_x 分别为 100 mH、150 mH、200 mH 工况下,直流线路短路电流的最大值以及换流站闭锁的情况分别见表 5 及表 6(以张北—康保线路故障为例)。

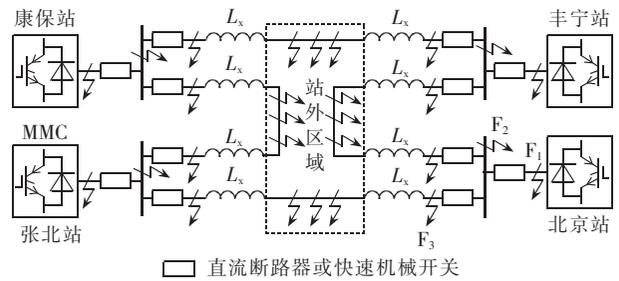


图 4 直流限流电抗器分散布置及故障位置图

Fig.4 Decentralized configuration of DC current-limiting inductors and fault locations

表 5 不同线路限流电抗器电感值对应的短路电流最大值
Table 5 Maximum short circuit current corresponding to inductance of current-limiting inductor

限流电抗器 电感值/mH	短路电流最大值/kA							
	1 ms	2 ms	3 ms	4 ms	5 ms	6 ms	7 ms	10 ms
100	3.9	7.0	10.0	11.5	11.7	12.4	13.4	17.0
150	2.9	5.5	7.7	9.9	11.3	11.4	11.9	14.5
200	2.5	4.5	6.3	8.1	9.8	10.4	10.7	12.8

表 6 不同线路限流电抗器电感值对应的换流站闭锁时间
Table 6 Converter station blocking time corresponding to inductance of current-limiting inductor

限流电抗器 电感值/mH	闭锁时间/ms			
	北京站	张北站	康保站	丰宁站
100	17.0	3.4	2.0	11.2
150	20.8	4.6	2.6	15.3
200	24.0	5.2	3.0	17.4

从表中可以看出,张北—康保短线路发生极间短路故障,限流电抗器分散布置下,即使线路电抗器 L_x 达到 200 mH,6 ms 内仍然存在多个换流站闭锁的情况。可见,柔性直流电网某处发生极间短路故障,关键的问题并不是直流断路器无法断开直流线路上汇集的故障短路电流,而是换流站由于过流保护造成的过快闭锁。为此考虑 2 种改进措施:①将张北—康保直流线路的 L_x 增加到 350 mH,增加两站之间的电气距离;②额定功率 1500 MW 的换流站的过流保护定值从 2.0 p.u. 提高到 2.4 p.u.,额定功率 3000 MW 的换流站的保护定值维持不变。综上所述,相同故障情况下采用改进措施后的直流线路短路电流的最大值以及换流站闭锁的情况见表 7 及表 8。

从表中可以看出,采取改进措施后,柔性直流电网线路上发生极间短路故障时,流经直流断路器的

表 7 采用改进措施后的短路电流最大值
Table 7 Maximum short circuit current when improved measures are applied

时间/ms	短路电流最大值/kA	时间/ms	短路电流最大值/kA
1	1.7	5	6.5
2	3.0	6	7.6
3	4.2	7	8.6
4	5.4	10	10.3

表 8 采用改进措施后的换流站闭锁时间
Table 8 Converter station blocking time
when improved measures are applied

换流站	闭锁时间/ms	换流站	闭锁时间/ms
北京站	29.6	康保站	6.2
张北站	8.4	丰宁站	30.2

故障电流在 6 ms 内都小于 15 kA, 完全满足直流断路器的要求; 而且 6 ms 内没有换流站闭锁, 满足设计初衷。

直流输电系统直接发生极间短路故障的概率非常低, 一般都是双极同时发生接地故障间接造成的双极极间短路。单极接地故障在站外架空线上发生的概率较高, 所以以上的分析都是针对图 4 中站外区域而言的, 计算结果也表明直流电网直流线路发生极间故障, 不会有换流站闭锁, 从运行的角度看满足要求。目前柔性直流电网的站内(图 4 虚线框外部分)的布置一般都采用封闭式, 发生单极接地故障的概率很小, 间接引起的极间故障概率极小, 几乎几十年一遇。但是从设计的角度看, 必须对站内故障进行计算校验, 保证只有故障对应站因为站内故障必须闭锁, 其他 3 个换流站不发生闭锁。因此对各站发生站内极间短路故障下, 所有站的闭锁情况进行计算扫描, 如表 9 所示。

表 9 发生站内极间短路故障时各换流站的闭锁时间
Table 9 Converter station blocking time when in-station pole-to-pole short circuit fault occurs

故障对应站	闭锁时间/ms			
	北京站	张北站	康保站	丰宁站
北京站	0.6	12.8	17.6	14.3
张北站	23.0	0.4	12.4	27.6
康保站	29.4	16.0	0.3	24.2
丰宁站	20.2	22.2	9.6	0.4

从表 9 可以看出, 柔性直流电网 1 个换流站发生站内区域故障时, 只有对应的本站闭锁, 其他站不会闭锁。同时, 必须说明的是, 站内故障分为换流器出口故障(F_1)、母线故障(F_2)和线路断路器站内侧故障(F_3), 这些故障都会引起对应站闭锁, 但是都有各自的保护策略, 动作后果也不同: 故障 F_1 引起相应换流器断路器断开, 其他断路器不动作; 故障 F_2 引起母线上所连的所有断路器均断开; 故障 F_3 执行线路保护逻辑, 对应线路两侧断路器断开, 其余断路器不动作。

4 结论

本文对柔性直流电网发生严重短路故障时的故障电流进行了较为详细的计算和比较分析, 得到以下结论。

a. 配置合理的限流电抗器是抑制直流短路电流的有效手段。

b. 限流电抗器集中布置时, 线路发生极间故障, 在直流断路器断开之前, 已经有多个换流站闭锁。

c. 限流电抗器应分散布置或者混合布置, 还应采取加大短线路限流电抗器电抗值、加大 1500 MW 换流站过流保护定值等改进措施。

d. 区分了柔性直流电网的站内与站外故障, 站外线路故障的发生概率相对较大, 但是不会引起任何换流站闭锁; 站内严重故障的发生概率极小, 只会引起对应站的闭锁。所提限流电抗器的配置方案满足了设计与运行的要求。

参考文献:

- [1] 姜喜瑞, 贺之渊, 汤广福, 等. 基于禁忌搜索优化算法的高压大容量柔性直流输电模块电容电压平衡算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 71-80.
JIANG Xirui, HE Zhiyuan, TANG Guangfu, et al. A capacitor voltage balancing control strategy for high-voltage large-capacity VSC-HVDC systems based on tabu search hard optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 71-80.
- [2] 范心明, 管霖, 何健明. 风电接入下柔性直流输电的无源解耦控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 311-319.
FAN Xinming, GUAN Lin, HE Jianming. Decoupling passivity control of VSC-HVDC connected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 311-319.
- [3] 韩坤, 吴金龙, 刘欣和, 等. 大规模多节点模块化多电平柔性直流输电换流阀控制周期优化设计方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 36-43.
HAN Kun, WU Jinlong, LIU Xinhe, et al. Optimized design of converter valve control period for large-scale multi-node MMC-based HVDC-flexible[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 36-43.
- [4] 王姗姗. 模块化多电平 VSC-HVDC 系统主电路参数选择的理论和方法[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.
WANG Shanshan. The theory and method of main circuit parameter selection in modular multilevel converter based VSC-HVDC system[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2011.
- [5] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.
- [6] 刘先正, 王兴成, 温家良, 等. 基于键图法的直流电网系统模型[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1605-1610.
LIU Xianzheng, WANG Xingcheng, WEN Jiali, et al. System model of DC grid based on bond graph method[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1605-1610.
- [7] 徐殿国, 刘瑜超, 武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12.
XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12.
- [8] 熊凌飞, 韩民晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策

- 略[J]. 电网技术,2015,39(6):1586-1592.
XIONG Lingfei,HAN Minxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology,2015,39(6):1586-1592.
- [9] 徐政,薛英林,张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.
XU Zheng,XUE Yinglin,ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5051-5062.
- [10] 王一,刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新的拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术,2015,39(8):2312-2319.
WANG Yi,LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology,2015,39(8):2312-2319.
- [11] 李笑倩,刘文华,宋强,等. 一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报,2014,34(36):6389-6397.
LI Xiaoqian,LIU Wenhua,SONG Qiang,et al. An enhanced MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(36):6389-6397.
- [12] 朱晋,韦统振,霍群海. 一种新型全桥变桥臂型 VSC-HVDC 交流拓扑[J]. 中国电机工程学报,2013,33(3):52-61.
ZHU Jin,WEI Tongzhen,HUO Qunhai. A new full-bridge alternative arm based VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(3):52-61.
- [13] 魏晓光,高冲,罗湘,等. 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):95-102.
WEI Xiaoguang,GAO Chong,LUO Xiang,et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):95-102.
- [14] 周万迪,魏晓光,高冲,等. 基于晶闸管的混合型无弧高压直流断路器[J]. 中国电机工程学报,2014,34(18):2990-2996.
ZHOU Wandi,WEI Xiaoguang,GAO Chong,et al. Thyristor based hybrid arc-less high voltage direct current circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(18):2990-2996.
- [15] 肖皓中,许建平,陈章勇,等. 副边双谐振软开关全桥直流变压器研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):132-136.
XIAO Haozhong,XU Jianping,CHEN Zhangyong,et al. Research of secondary dual resonant full-bridge DC-DC transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):132-136.
- [16] 李子欣,王平,楚遵方,等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术,2013,37(9):2592-2601.
LI Zixin,WANG Ping,CHU Zunfang,et al. Research on medium- and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology,2013,37(9):2592-2601.

作者简介:



孙 栩(1978—),男,天津人,高级工程师,博士,主要从事高压直流输电及电力系统仿真方面的研究(E-mail:sunxu@epri.sgcc.com.cn)。

Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid

SUN Xu,WANG Huawei,LEI Xiao,ZHAO Bing,WANG Shanshan

(China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: An electromagnetic transient simulation model of flexible DC grid with ± 500 kV overhead lines is built and the short circuit current and blocking time of converter station are calculated,analyzed and compared in detail for serious pole-to-pole short circuit faults. Results show that the rational configuration of current-limiting inductors is an effective method to restrain the short circuit currents and prevent the blocking of multiple converter stations. The current-limiting inductor configuration schemes and the improved current-limiting measurements are studied to avoid the converter station blocking due to out-station DC line faults,meeting the requirements of design and operation.

Key words: overhead line; flexible DC grid; short circuit currents; current-limiting inductor; converter station; blocking