

特高压混合三端直流输电系统换流站电流转移抑制策略

彭茂兰¹, 黄曼茜², 刘航¹, 许建中²

(1. 中国南方电网超高压输电公司 检修试验中心, 广东 广州 510663;
2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:特高压混合多端直流输电系统需要具备有效的换流站电流转移抑制策略, 尤其针对阀组投退过程, 应避免因过流而触发暂时性闭锁。基于特高压混合三端直流输电系统, 提出了2种采用受端直流电流作为控制量的电流转移抑制策略: 基于直流电流-直流电压偏差量的电流转移抑制策略控制对象为阀组的直流电压; 基于直流电流-直流功率偏差量的电流转移抑制策略控制对象为交流有功功率。然后基于PSCAD/EMTDC搭建了特高压混合三端直流输电系统的仿真模型, 通过对比采用策略前、后系统的动态特性验证了所提抑制策略的有效性, 并对比了2种电流转移抑制策略性能的优劣。仿真结果表明, 投阀时基于直流电流-直流电压偏差量策略的抑制过流性能更为优越, 退阀时基于直流电流-直流功率偏差量策略的抑制效果更为优越。

关键词:特高压混合三端直流输电系统; MMC; 电流转移抑制策略; 阀组投退

中图分类号: TM 721.1

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202202015

0 引言

以大型可再生能源基地电力外送为主的“西电东送”是我国重要的能源战略, 利用特高压多端直流输电技术可以有效地应对大型可再生能源基地电力外送面临的挑战^[1]。特高压混合多端直流输电系统在远距离、大容量输电方面具有优势, 同时结合了传统直流与柔性直流的优点, 与传统直流相比, 其无换相失败问题并且可以向弱受端交流电网供电, 实现海上风电场的功率输送^[2], 与柔性直流相比, 其功率损耗较小且降低了换流器与电缆投资成本^[3], 具有良好的发展前景。

我国建设的世界上首项特高压多端混合直流工程——乌东德特高压混合三端直流工程已进入阶段性投产, 工程依托金沙江下游乌东德水电站分别为广西、广东送电, 与建设2个单回常规直流方案相比, 乌东德特高压混合三端直流工程采用特高压多端直流的技术方案, 网损降低约100 MW, 年费用节省约4.8亿元, 节省走廊占地约3667 m²^[4]。

目前, 已有学者针对特高压混合多端直流输电系统开展了相关的研究, 围绕柔直换流器启动充电策略^[5-6]、系统正常启动/停运顺序控制方案^[7-8]、站间协调控制策略^[9-10]、控制保护配置方案^[11-13]等问题已有不少研究成果。其他站电流部分转移至本站所

引发的一类过流现象称为电流转移, 该问题产生的根本原因为本站直流电压低, 如: 阀组投退过程中站间电压升降速率不匹配将导致电流转移至电压低的柔性直流换流站。特高压混合多端直流输电系统电压电流等级高, 换流器造价昂贵, 一旦发生换流站过流问题, 后果严重。

关于阀组投退控制问题, 目前已有学者提出有效的常直和柔直阀组投退控制策略。常直阀组的投退控制策略主要分为小触发角解锁^[14]和零电压解锁^[15]2种方式。文献^[16-18]提出了完整的特高压混合三端直流输电系统阀组投退控制策略。当阀组投退过程中出现电流转移问题时, 可能触发暂时性过流保护从而闭锁换流阀组, 导致电力传输中断。现有的阀组投退控制策略在执行中仍存在电流转移风险, 而且尚未有研究提出有效的电流转移抑制策略。

本文以特高压混合三端直流输电系统为例, 设计了2种采用受端直流电流作为闭环控制量的电流转移抑制策略, 并以阀组投退过程为典型工况进行分析研究。策略1为基于直流电流-直流电压偏差量的电流转移抑制策略(以下简称“*I-U*电流转移抑制策略”), 采用受端直流电流作为闭环控制量, 作用于阀组的直流电压抑制电流转移; 策略2为基于直流电流-直流功率偏差量的电流转移抑制策略(以下简称“*I-P*电流转移抑制策略”), 将受端换流站的电流-功率不平衡量引入阀组的定有功功率参考值中, 在无需比例积分(PI)环节的前提下可实现换流站电流转移的抑制。基于PSCAD/EMTDC搭建了特高压混合三端直流输电系统仿真模型, 通过对比采用策略前、后系统的动态特性, 验证电流转移抑制策

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-12-21

在线出版日期: 2022-02-28

基金项目: 南网超高压输电公司科技项目(012000KK52180016)

Project supported by the Science and Technology Program of EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid(012000KK52180016)

略的有效性;通过对比分别投入2种电流转移抑制策略时系统的动态特性,分析2种电流转移抑制策略性能的优劣。仿真结果表明所提出的电流转移抑制策略能有效解决阀组投退过程中换流站过流问题。

1 特高压混合三端直流输电系统中电流转移现象分析

1.1 特高压混合三端直流输电系统结构

图1为特高压混合三端直流输电系统结构,图中 Z_{s1} — Z_{s3} 分别为交流系统 S_1 — S_3 的等值阻抗。额定直流电压为 ± 800 kV,电网换相型换流器 LCC_1 为送端换流站,模块化多电平换流器 MMC_j ($j=2,3$)为受端换流站,系统采用真双极接线方式,每极由高、低端阀组串联组成,送端单个阀组为12脉动电网换相型换流器(LCC),受端换流站单个阀组为“半桥+全桥”子模块混合型模块化多电平换流器(MMC)。 LCC_1 采用定直流电流控制, MMC_2 采用定有功功率控制, MMC_3 采用定直流电压控制, MMC_j 的控制框图如附录A图A1所示。

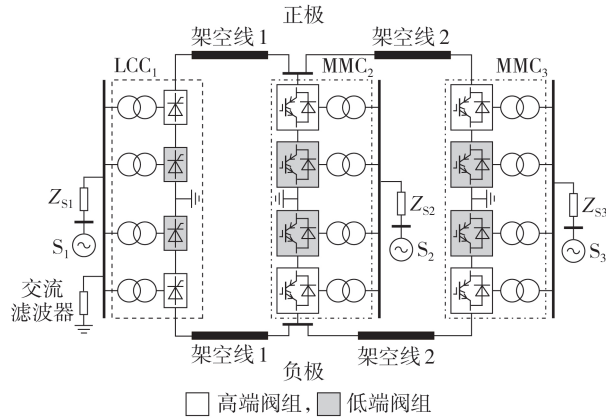


图1 特高压混合三端直流输电系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of hybrid three-terminal UHVDC transmission system

1.2 电流转移现象分析

当特高压混合三端直流输电系统正常运行时,架空线2上的电流方向为自 MMC_2 流向 MMC_3 。特高压混合三端直流输电系统执行高端阀组(以下简称“高阀”)投入/退出操作,即若高阀退出运行,不影响低端阀组(以下简称“低阀”)正常运行;若低阀正常运行,投入高阀不影响低阀正常运行。系统正极双高阀、单高阀运行模式示意图如附录A图A2所示。高阀投入时,先将直流电流从旁路刀闸BPI(By-Pass Isolator)转移至旁路开关BPS(ByPass Switch),再通过电流控制器作用,将电流从BPS转移至高阀,最后分开BPS,提升高阀直流电压,高阀投入完毕;高阀退出时,先降低高阀的直流电压,再闭合BPS,闭锁高阀,最后将直流电流从BPS转移至BPI,高阀

退出完毕。具体高阀投入、退出流程分别如附录A图A3、A4所示。

以图1所示特高压混合三端直流输电系统为例,由 LCC_1 发出的投退阀组指令分别经过站间通信延时 T_1 、 T_2 后到达 MMC_2 、 MMC_3 ,MMC高阀直流电压参考值 U_{dcref} 以一定速率升降。由于通信延时等因素,可能出现 MMC_2 高阀升压过慢或降压过快的情况,此时 MMC_2 直流电压低于 MMC_3 直流电压,导致电流从 MMC_3 部分转移至 MMC_2 。阀组投退过程中的电流转移现象可能触发桥臂过流保护动作,导致阀组投退失败。

2 电流转移抑制策略

针对上文分析的电流转移现象,本节提出了适用于特高压混合三端直流输电系统的换流站电流转移抑制策略。由于图1所示系统的送端 LCC_1 采用定直流电流控制,即不考虑送端直流电流 I_{dc1} 的变化,若控制受端 MMC_2 直流电流 I_{dc2} 稳定,则受端 MMC_3 直流电流 I_{dc3} 也将保持稳定。基于这个思路,本节设计了2种采用 MMC_2 直流电流 I_{dc2} 作为控制量的 I - U 电流转移抑制策略和 I - P 电流转移抑制策略,具体实现过程如下。

2.1 I - U 电流转移抑制策略

考虑直接采用直流电流作为直流电压参考值闭环控制的反馈量,根据实际电流动态调节高阀投退过程中电压参考值,在 MMC_2 待投退高阀的控制系统中,采用直流电流额定值 I_{dcbase} 减去本站直流电流测量值 I_{dc2} ,得到直流电流偏差量 ΔI_{dc2} ,如式(1)所示。

$$\Delta I_{dc2} = I_{dcbase} - I_{dc2} \quad (1)$$

ΔI_{dc2} 经过PI环节后得到电压偏差量 ΔU_{dc2} ,将原阀组电压参考值 U_{dcref0} 加上 ΔU_{dc2} ,得到新的阀组电压参考值 U_{dcref2} ,如式(2)所示。

$$U_{dcref2} = U_{dcref0} + \Delta U_{dc2} \quad (2)$$

I - U 电流转移抑制策略的控制框图如图2所示。若部分电流从 MMC_3 转移至 MMC_2 ,表现为 $|I_{dc2}| > |I_{dcbase}|$,即 $\Delta I_{dc2} > 0$ (受端 MMC_2 的直流电流为负值),由于电流偏差量 $\Delta I_{dc2} > 0$,阀组电压偏差量 ΔU_{dc2} 增加;根据式(2),电压参考值 U_{dcref2} 增加,经控制作用,

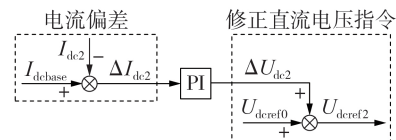


图2 I - U 电流转移抑制策略框图
Fig.2 Block diagram of transfer current suppression strategy based on deviation of DC current and DC voltage

MMC₂直流电压 U_{dc2} 增大,解决了 MMC₃ 电流转移至 MMC₂ 的问题。

2.2 I-P 电流转移抑制策略

考虑直接将直流电流转化为有功功率,实时调节有功功率参考值,通过有功功率外环控制,达到根据实际电流动态调节阀组投退过程中电压的目的。在 MMC₂ 在运阀组的控制系统中,用直流电流额定值 I_{dcbase} 减去本站直流电流测量值 I_{dc2} ,得到直流电流偏差量 ΔI_{dc2} ,该过程与 2.1 节所提策略过程相同,其数学表达式如式(1)所示。将直流电流偏差量 ΔI_{dc2} 与阀组直流电压额定值 U_{dcbase} 相乘,得到有功功率偏差量 ΔP_{dc2} ,如式(3)所示。

$$\Delta P_{dc2} = \Delta I_{dc2} U_{dcbase} \quad (3)$$

将有功功率偏差量 ΔP_{dc2} 与原有有功功率参考值 P_{dref0} 相加可以得到新的有功功率参考值 P_{dref2} ,将其作为电流矢量控制中定有功功率的参考值,如式(4)所示。

$$P_{dref2} = P_{dref0} + \Delta P_{dc2} \quad (4)$$

I-P 电流转移抑制策略的控制框图如图 3 所示。若部分电流从 MMC₃ 转移至 MMC₂,有 $|I_{dc2}| > |I_{dcbase}|$,根据式(1)、式(3)以及式(4), $\Delta I_{dc2} > 0$ (受端 MMC₂ 的直流电流为负值), $\Delta P_{dc2} > 0$,则 $|P_{dref2}| < |P_{dref0}|$ (受端 MMC₂ 的有功功率为负值)。由于 MMC₂ 有功功率参考值减小,控制器有功外环的有功功率偏差量 $\Delta P_{dc2} = P_{dref2} - P_{dc2} > 0$ 。

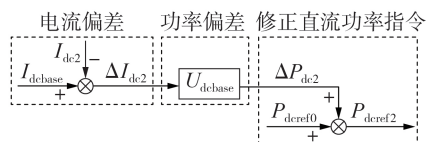


图3 I-P 电流转移抑制策略框图

Fig.3 Block diagram of transfer current suppression strategy based on deviation of DC current and DC power

由附录 A 图 A1 可知, ΔP_{dc2} 经过有功功率控制的 PI 环节后得到交流电流参考值 d 轴分量 i_{sdref} 。由于有功功率偏差量 $\Delta P_{dc2} > 0$, $|i_{sdref}|$ 绝对值减小 (i_{sdref} 为负值), 经控制作用, 交流电流 d 轴分量 i_{sd} 减小, 最终交流系统 S_2 侧有功功率 P_{S2} 也减小。

对于逆变站 MMC₂, 就能量平衡角度而言, 直流侧输入阀组的能量 W_{dc2} 等于阀组中所有子模块电容储能的变化量 ΔW_{MMC2} 与阀组输出至交流侧的能量 W_{S2} 之和, 如式(5)所示。

$$W_{dc2} = \Delta W_{MMC2} + W_{S2} \quad (5)$$

当阀组交流侧有功功率 P_{S2} 减小时, 由式(5)可知, 阀组中子模块电容储能变化量 $\Delta W_{MMC2} > 0$, 引起阀组直流电压上升, 直流电流下降^[12], 最终克服了

MMC₃ 将电流转移至 MMC₂ 的问题。

3 仿真验证

为了验证和比较 2 种 MMC₂ 电流转移抑制策略的有效性, 在 PSCAD / EMTDC 环境中搭建了如图 1 所示特高压混合三端直流输电系统的仿真模型。通过对比采用电流转移抑制策略前、后系统的动态特性, 验证所提策略的有效性; 通过对比分别投入 2 种策略时系统的动态特性, 验证 2 种控制策略性能的优劣。

3.1 特高压混合三端直流输电系统仿真模型

图 1 所示特高压混合三端直流输电系统的具体参数如附录 A 表 A1 所示。直流系统采用架空线输电, 架空线 1 长度为 932 km, 架空线 2 长度为 557 km。仿真中 3 个换流站阀组投、退的执行流程分别如附录 A 图 A2、A3 所示, 由 LCC₁ 发出投退指令, MMC₂、MMC₃ 分别经 10、20 ms 延时后收到指令并执行。

3.2 电流转移抑制策略有效性验证

以阀组投退这类可能引发电流转移的典型工况为例, 在高阀投入、退出 2 种工况下, 对电流转移抑制策略进行有效性验证。

3.2.1 高阀投入

图 4 为高阀投入过程中, 不采取任何电流转移抑制策略与采用 I-U 电流转移抑制策略、采用 I-P 电流转移抑制策略时特高压混合三端直流输电系统的

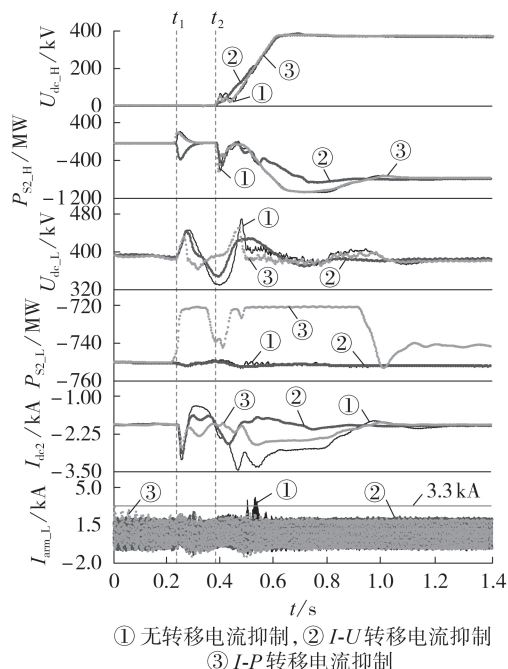


图4 高阀投入时特高压混合三端直流输电系统动态特性
Fig.4 Dynamic characteristics of high-side valve group entering to hybrid three-terminal UHVDC transmission system

动态特性。图中: $U_{dc2,H}$ 、 $P_{S2,H}$ 和 $U_{dc2,L}$ 、 $P_{S2,L}$ 分别为MMC₂高阀和低阀直流电压、交流有功功率; $I_{arm,L}$ 为MMC₂低阀桥臂电流; t_1 、 t_2 分别为将电流由BPS转移至高阀的转移时刻、高阀电压的提升时刻。由图可知:在不采取任何电流转移抑制策略的情况下,高阀电流开始转移后,MMC₂直流电流出现较大波动;高阀开始升压时,由于低阀直流电压出现较大跌落,部分电流自电压更高的MMC₃转移至MMC₂,MMC₂直流电流上升。在 t_1 时刻低阀投入 I - P 电流转移抑制策略,采用MMC₂直流电流 I_{dc} 作为闭环控制量对MMC₂低阀交流有功功率进行控制后,MMC₂直流电流转移现象得到一定抑制;在 t_2 时刻采用 I - U 电流转移抑制策略,采用MMC₂直流电流 I_{dc2} 作为闭环控制量对MMC₂阀组的直流电压进行控制后,MMC₂直流电流上升问题得到抑制。

柔直阀暂时性闭锁电流取决于桥臂电流,工程中根据最严重的短路故障计算得出一个电流上升率,用跳闸出口电流值减去控制链路延时乘以该电流上升率得出柔直阀暂时性闭锁电流,仿真中MMC₂阀控暂时性闭锁电流应取3.3 kA。由图4中 $I_{arm,L}$ 波形可知,若不采用转移电流抑制策略,则电流波动范围超过3.3 kA,将引发暂时性闭锁。在2种电流转移抑制策略下,电流波动范围不超过定值,有效避免了暂时性闭锁。

在高阀投入过程中,2种电流转移抑制策略均具有抑制过流的作用。在 I - U 电流转移抑制策略下,电流较快恢复稳态,阀组有功波动幅度较小。在 I - P 电流转移抑制策略下,电流恢复稳态较慢,阀组有功波动幅度较大,而且控制策略作用有限,表现为低阀有功调节幅度较大,但抑制过流效果不显著。总体而言,在高阀投入期间 I - U 电流转移抑制策略相较 I - P 电流转移抑制策略的过流抑制性能更为优越。

3.3.2 高阀退出

图5为高阀退出过程中,不采取任何电流转移抑制策略与采用 I - U 电流转移抑制策略、采用 I - P 电流转移抑制策略时特高压混合三端直流输电系统的动态特性。图中, t_3 、 t_4 分别为降低高阀以及闭锁高阀的时刻。由图可知,在不采取任何电流转移抑制策略的情况下,高阀开始降压后,由于低阀直流电压出现跌落,部分电流自电压更高的MMC₃转移至MMC₂,MMC₂直流电流上升,同时MMC₂直流电流出现波动。当 t_3 时刻采用 I - U 电流转移抑制策略时,MMC₂直流电流上升问题得到一定控制;当 t_3 时刻低阀投入 I - P 电流转移抑制策略时,MMC₂直流电流波动现象得到抑制。

在高阀退出运行的过程中,2种电流转移抑制

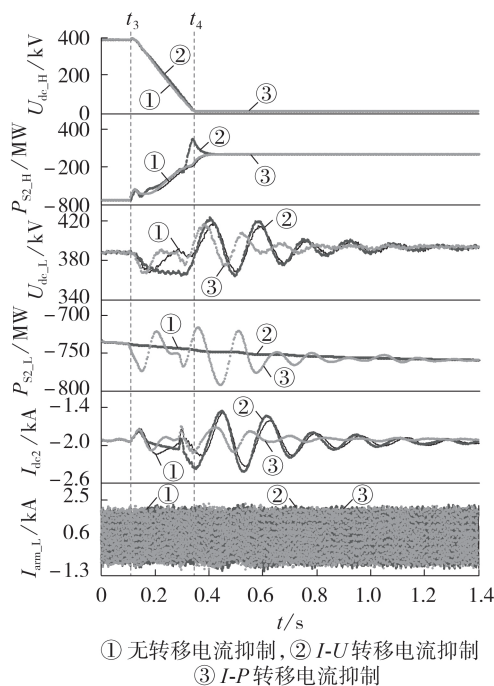


图5 高阀退出时特高压混合三端直流输电系统动态特性

Fig.5 Dynamic characteristics of high-side valve group existing to hybrid three-terminal UHVDC transmission system

策略均具有稳定直流电流的作用。 I - U 电流转移抑制策略对于电流的抑制效果有限,当 t_4 时刻高阀退出时, I - U 电流转移抑制策略会引发低阀电压下降,导致过流加剧;而 I - P 电流转移抑制策略的过流抑制效果较好,兼有稳定低阀直流电压的作用,但低阀有功功率波动幅度较大。总体而言,在高阀退出期间, I - P 电流转移抑制策略相较 I - U 电流转移抑制策略的过流抑制性能更为优越。

4 结论

针对其他站电流部分转移至本站所引发的过流问题,本文提出了 I - U 电流转移抑制策略和 I - P 电流转移抑制策略,并以高阀投退过程为典型工况进行分析研究。

可得如下结论: I - U 电流转移抑制策略采用受端MMC₂直流电流 I_{dc2} 作为闭环控制量,作用于低阀的直流电压,在高阀投入期间使用 I - U 电流转移抑制策略,抑制过流的性能更为优越; I - P 电流转移抑制策略将受端MMC₂的直流电流、有功功率不平衡量引入低阀的定有功功率参考值中,在无需PI环节的前提下可以抑制MMC₂的过流现象,在高阀退出期间采用 I - P 电流转移抑制策略,抑制过流的性能更为优越。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孙豪,夏云礼,李浩,等. ± 800 kV 云广特高压直流工程阀组控制系统分析[J]. 电工技术, 2019(21): 65-67, 72.
SUN Hao, XIA Yunli, LI Hao, et al. Research on the valve group level control of ± 800 kV Yunnan-Guangdong UHVDC project[J]. Electric Engineering, 2019(21): 65-67, 72.
- [2] 郭春义,赵剑,刘炜,等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊1): 1-10.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement 1): 1-10.
- [3] HUANG Y, HUANG W H, LI M, et al. Steady-state control strategy of multi-terminal hybrid UHVDC[C]//2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications. Warsaw, Poland: IEEE, 2017: 1-9.
- [4] 刘强,杜忠明,佟明东,等. 特高压多端直流技术的应用及前景分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(11): 9-14.
LIU Qiang, DU Zhongming, TONG Mingdong, et al. Utilization and prospect analysis of UHV multi-terminal DC technologies[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(11): 9-14.
- [5] 熊岩,饶宏,许树楷,等. 特高压多端混合直流输电系统启动与故障穿越研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 478-486.
XIONG Yan, RAO Hong, XU Shukai, et al. Research on start and fault ride-through strategy for ultra-high voltage multi-terminal hybrid DC transmission system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 478-486.
- [6] 石万里,胡付有,李晓霞,等. 多端柔性直流混合型MMC启动充电过程策略分析[J]. 电工技术, 2020(3): 11-14.
SHI Wanli, HU Fuyou, LI Xiaoxia, et al. Analysis of start-up charging strategy for multi-terminal flexible DC hybrid MMC[J]. Electric Engineering, 2020(3): 11-14.
- [7] 李婧靓,黄伟煌,刘涛,等. 特高压多端混合直流输电系统的控制策略研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 47-55.
LI Jingjing, HUANG Weihuang, LIU Tao, et al. Research on control strategy of multi-terminal hybrid UHVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 47-55.
- [8] 钟诚,吴星昭. 基于LCC-MMC的混合三端直流输电系统启动方法研究[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(5): 1-7.
ZHONG Cheng, WU Xingzhao. Research on starting method of hybrid three-terminal HVDC transmission system based on LCC-MMC[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(5): 1-7.
- [9] 陈凌云,程改红,邵冲,等. LCC-MMC型三端混合直流输电系统控制策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 146-152.
CHEN Lingyun, CHENG Gaihong, SHAO Chong, et al. Research on control strategy for a 3-terminal LCC-MMC HVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 146-152.
- [10] 黄松,易映萍,朱龙臻,等. 正负双极混合多端直流输电系统控制策略的研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 51-57, 96.
HUANG Song, YI Yingping, ZHU Longzhen, et al. Research on control strategy of positive and negative bipolar hybrid multi-terminal HVDC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 51-57, 96.
- [11] 王前进,樊艳芳. 基于反行波与信号处理的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 114-121.
WANG Yongjin, FAN Yanfang. Longitudinal protection method based on reverse traveling wave and signal processing for UHVDC power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 114-121.
- [12] 陆书豪,贾秀芳. LCC-FHMMC混合直流输电系统阀侧故障特性及保护策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 211-216, 224.
LU Shuhao, JIA Xiufang. Grounding fault characteristics of converter valve-side and protection strategy in LCC-FHMMC hybrid DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 211-216, 224.
- [13] 俞翔,王杨正,张庆武,等. 特高压并联型三端混合直流输电系统功率转带策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 150-156.
YU Xiang, WANG Yangzheng, ZHANG Qingwu, et al. Power transfer strategy of parallel three-terminal hybrid UHVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 150-156.
- [14] 张尧,房宣合,胡烈良,等. 特高压直流输电系统阀组投退策略[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1858-1864.
ZHANG Yao, FANG Xuanhe, HU Lieliang, et al. Blocking and deblocking strategies of valve group for UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 1858-1864.
- [15] 李艳梅,李泰,李少华,等. ± 800 kV 特高压直流输电工程换流器投退策略分析[J]. 电力与能源, 2015, 36(6): 751-757.
LI Yanmei, LI Tai, LI Shaohua, et al. Strategy of converter entry/exit for ± 800 kV UHVDC project[J]. Power & Energy, 2015, 36(6): 751-757.
- [16] 孙仕达. 混合三端直流输电系统不间断运行与控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
SUN Shida. Uninterrupted operation and control strategy of a hybrid three-terminal HVDC transmission system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [17] 刘静佳,梅红明,刘树,等. 特高压多端混合直流输电系统阀组计划投/退控制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 158-165.
LIU Jingjia, MEI Hongming, LIU Shu, et al. Planned valve group entry/exit control method for UHV multi-terminal hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 158-165.
- [18] 郭贤珊,周扬,杨美娟,等. 基于阀组串联的柔性直流单阀组在线投入/退出控制方案[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3393-3398.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, YANG Meijuan, et al. Research on control scheme for single converter online entry/exit in dual-converter based VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3393-3398.

作者简介:



彭茂兰

彭茂兰(1991—),女,工程师,硕士,主要研究方向为直流输电工程设计与试验技术(E-mail: pml1081170912@163.com);

黄曼茜(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流输电技术(E-mail: 18577105086@163.com);

刘航(1992—),男,工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输电控制与保护系统(E-mail: Berlinliu@foxmail.com);

许建中(1987—),男,副教授,博士,主要研究方向为柔性直流输电(E-mail: xujianzhong2005@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Transfer current suppression strategies for hybrid three-terminal UHVDC transmission system converter station

PENG Maolan¹, HUANG Manxi², LIU Hang¹, XU Jianzhong²

(1. Maintenance & Test Center, EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An effective transfer current suppression strategy for converter station is necessary in hybrid multi-terminal UHVDC system, especially aiming at the process of valve group entry / exit, and temporary blocking due to overcurrent should be avoided. Based on the hybrid three-terminal UHVDC system, two transfer current suppression strategies using the DC current of receiving end as control quantity are proposed. The control object of the transfer current suppression strategy based on the deviation of DC current and DC voltage is the DC voltage of the valve group, while the control object of the transfer current suppression strategy based on the deviation of DC current and DC power is the AC active power. Then, based on PSCAD / EMTDC, a simulation model of the hybrid three-terminal UHVDC system is built. The effectiveness of the proposed strategies is verified by comparing the dynamic characteristics of the system before and after applying the strategies, and the performance of the two transfer current suppression strategies is compared. The simulation results show that the strategy based on the deviation of DC current and the DC voltage is better for overcurrent suppression during valve entry, while the strategy based on the deviation of DC current and DC power is better during valve exit.

Key words: hybrid three-terminal UHVDC transmission system; MMC; transfer current suppression strategy; valve group entry / exit

(上接第117页 continued from page 117)

Commutation failure prevention control strategy based on double criteria for UHVDC hierarchical connection system

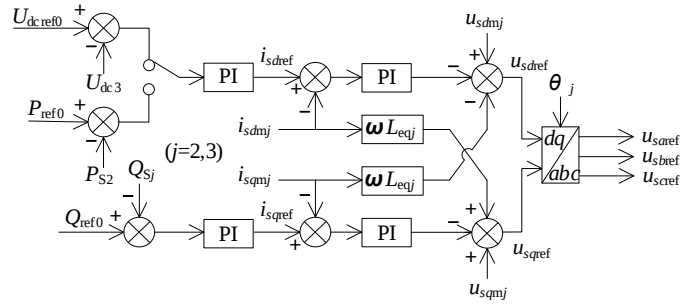
WANG Yuhong, CHEN Liwei, KOU Ran, ZENG Qi, ZHU Jie

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In UHVDC (Ultra-High Voltage Direct Current) hierarchical connection system, the fault of the receiving end AC system at inverter side may cause the commutation failure of the high terminal and low terminal converters simultaneously. In this regard, comprehensively considering the voltage and current factors of commutation failure of converters, a commutation failure prevention control strategy based on double criteria for UHVDC hierarchical connection system is proposed. This strategy is based on the changing characteristics of the commutation bus voltage and dynamically regulates the extinction angle reference in the extinction angle-time area control. At the same time, based on the changing characteristics of DC current, the correction value of the thyristor trigger angle in the current-time area control is obtained. Besides, the thyristor trigger angle of each layer is optimized, which can prevent the commutation failure of the high terminal and low terminal converters simultaneously. A simulation model is built in PSCAD / EMTDC to verify the proposed commutation failure prevention control strategy under different working conditions. The simulation results show that this strategy can quickly respond to inverter-side AC system faults, reduce the risk of simultaneous commutation failures of high terminal and low terminal converters and prevent the simultaneous commutation failure of high terminal and low terminal converters in the hierarchical connection system.

Key words: hierarchical connection; commutation failure; control strategy; UHVDC; extinction area

附录 A



注: U_{dcref0} 、 P_{ref0} 、 Q_{ref0} 分别为初始状态下阀组电压、交流有功功率、无功功率参考值; U_{dc3} 、 P_{S2} 、 Q_{Sj} 分别为 MMC₃ 阀组电压、交流系统 S₂ 有功功率、交流系统 S_j 无功功率实测值; i_{sdrref} 、 i_{sqrref} 和 u_{sdrref} 、 u_{sqrref} 分别为交流电流和电压参考值的 d、q 轴分量; i_{sdmj} 、 i_{sqmj} 和 u_{sdmj} 、 u_{sqmj} 分别为交流系统 S_j 电流和电压实测值的 d、q 轴分量; ω 为系统角频率; L_{eqj} 为 MMC_j 的桥臂等效电感; θ_j 为锁相环输出的交流电压相角; u_{saref} 、 u_{sbref} 、 u_{scref} 分别为交流电压参考值的 a、b、c 相分量。

图 A1 MMC_j 控制框图

Fig.A1 Control block diagram of MMC_j

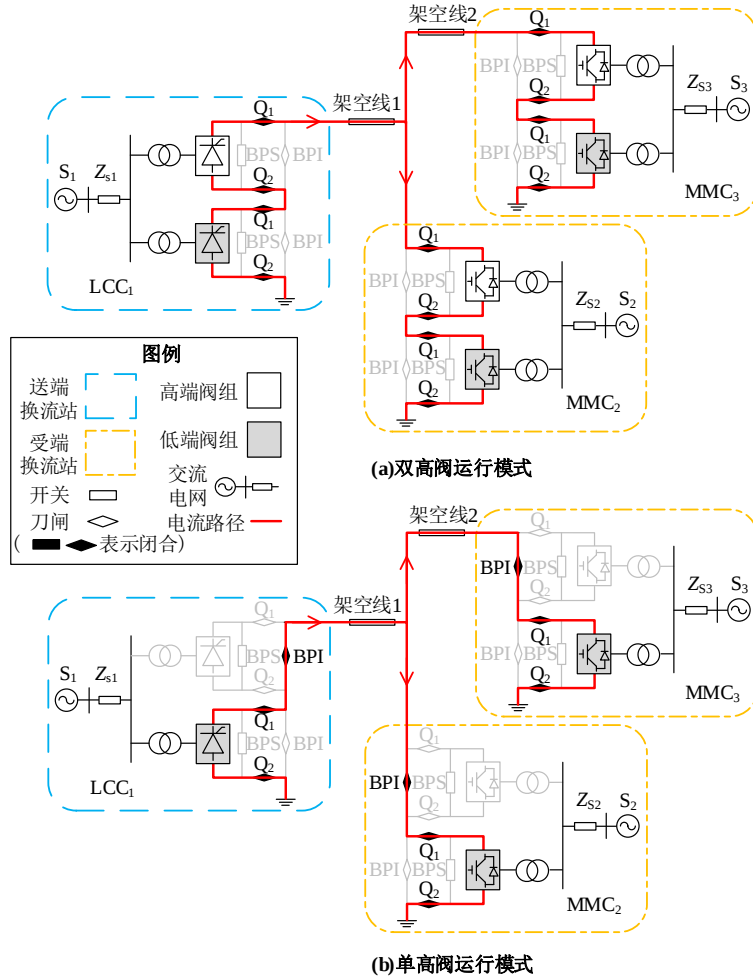


图 A2 特高压混合三端直流输电系统运行模式示意图

Fig.A2 Schematic diagram of operation modes of hybrid three-terminal UHVDC transmission system

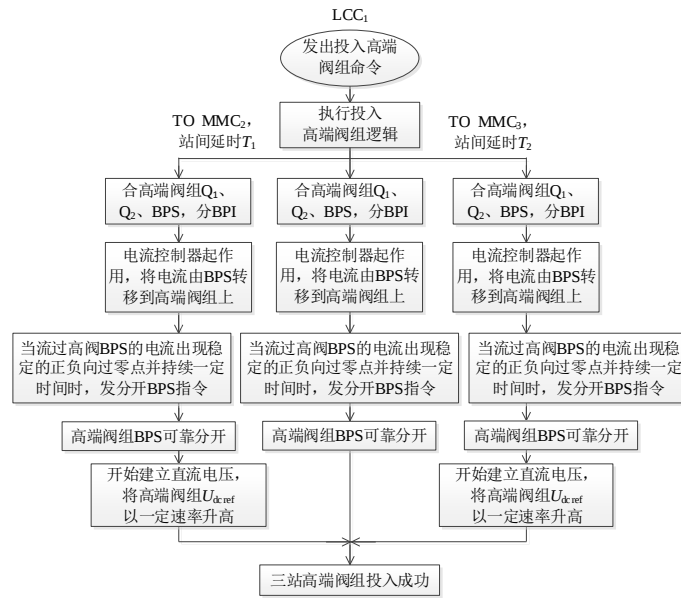


图 A3 特高压混合三端直流输电系统高阀投入流程图

Fig.A3 Flowchart of high-side valve group entering to hybrid three-terminal UHVDC transmission system

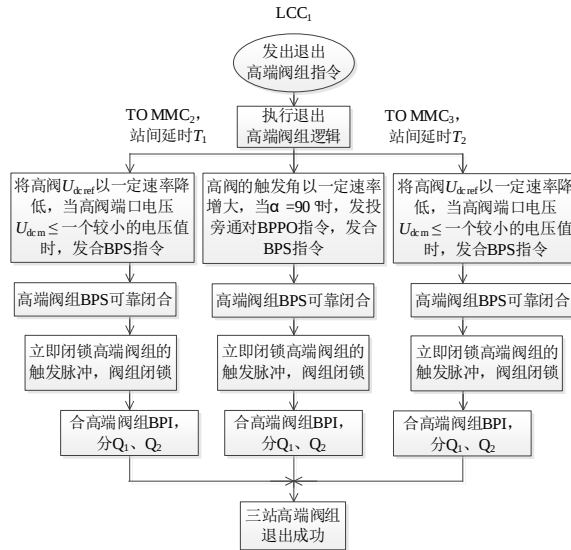


图 A4 特高压混合三端直流输电系统阀组退出流程图

Fig.A4 Flowchart of high-side valve group exiting off hybrid three-terminal UHVDC transmission system

表 A1 特高压混合三端直流输电系统主要参数

Table A1 Main parameters of hybrid three-terminal UHVDC transmission system

换流站	参数	参数值
整流站 LCC ₁	额定直流电压/kV	400
	额定功率/MW	2 000
	换流变压器容量/(MV·A)	1 218×2
	换流变压器容量/(MV·A)	5
逆变站 MMC ₂	额定功率/MW	750
	换流变压器容量/(MV·A)	870
	额定直流电流/kA	1.875
逆变站 MMC ₃	额定功率/MW	1 250
	换流变压器容量/(MV·A)	1 440
	额定直流电流/kA	3.125