分址级联特高压直流输电系统接地方式转换策略

俞 翔[1]，张庆武[1]，高子健[2]，肖建民[1]
（1. 南京南瑞继保电气有限公司，江苏省南京市 211102；2. 国网经济技术研究院有限公司，北京市 102209）

摘要： 分址级联特高压直流输电系统相较于常规两端特高压直流输电系统在接线方式和回线转换方面更加灵活和复杂。文中基于实际送端分址级联特高压直流工程，设计了直流系统接地方式转换策略，从而满足送端低压换流站灵活投退的应用需求。针对接地方式在大地回线和金属回线运行方式下可能存在的转换失败问题，分别提出了小电流阶跃和受端换流站短时接地的应对策略。基于实际控制保护装置与实时数字仿真的试验验证了所提控制策略的有效性。

关键词： 特高压直流；分址级联；接地方式；换流站；回线

0 引言

特高压直流输电（ultra-high-voltage direct current，UHVDC）已成为解决中国能源分布与需求不平衡问题，优化资源配置的重要手段之一[1-4]。随着中国新型电力系统建设的推进，对特高压直流匹配不同容量的送受端电网的需求日益增加。多端特高压直流通过连接多个具有不同外送和消纳能力的交流电网，在实现多电源供电和多落点受电的同时又节省了输电走廊，具有很高的经济性和灵活性，有望成为未来重要的电力输送方式之一[5-10]。

多端直流输电系统按接线方式不同可分为并联型、串联型和混合型等[11-13]。分址级联特高压直流为典型的串联型接线方式，其运行控制方式可借鉴相对成熟的常规特高压工程，且具有方式变换灵活快捷、绝缘成本低、节约输电走廊资源等优点[14-17]，非常适用于中国高海拔地区水电、光伏送出场景。金沙江上游水电的直流送出工程（简称金上直流工程）是世界首个送端分址级联特高压直流输电工程，其送端采用高、低压换流站分址建设的方案，其中，送端双极高压换流器布置在高压换流站，双极低端换流器布置在低压换流站，高、低压换流站通过±400 kV直流线路连接，工程受端换流站采用常规分层接入特高压直流结构，受端换流站通过±800 kV直流线路与送端高压换流站连接[18]。为满足送端低压换流站灵活投退和故障隔离的需求，在高、低压换流站均配置有可连接至接地极的直流场及相应转换开关。在送端高、低压换流站均运行等工况下，送端直流通过低压换流站直流场接地；在送端低压换流站退出等工况下，送端直流既可以通过低压换流站直流场接地，也可以通过高压换流站直流场接地，且送端直流可在不同接地方式之间进行在线转换。

设计合理的接地方式转换策略对提升分址级联特高压直流输电系统的可用率和安全稳定运行水平有着重要意义。目前，针对分址级联特高压直流输电系统正常运行时的接地方式转换方法及转换过程中可能出现的问题还需要深入研究。本文首先提出了一种分址级联特高压直流输电系统接地方式转换策略，继而分析了不同工况下转移支路无分流导致控制系统无法判断转移支路建立进而转换失败的问题，并提出了应对策略。最后，以金上直流工程为例，通过实时数字仿真验证了本文所提策略的工程应用价值。目前，所提策略已应用于金上直流工程。

1 接地方式转换基本策略

1.1 拓扑结构

以金上直流工程为例介绍送端分址级联特高压直流工程拓扑结构，如图1所示，图中仅保留了主要的开关和刀闸。

由图1可见，送端站包含站1和站2，其中，双极低压换流器布置在低压换流站（站1），双极高压换流器布置在高压换流站（站2），站1和站2分别连接各自的交流系统，站1和站2均配置独立的无功补偿装置、极区直流场、直流滤波器（DC filter，DCF）、双极区直流场，可分别通过各自的接地极线路连接

收稿日期：2024-10-10；修回日期：2025-03-27。
上网日期：2025-09-11。
国家电网公司科技项目（5500-202426160A-1-1-ZN）；已申请国家发明专利（申请号：202411227422.2）。

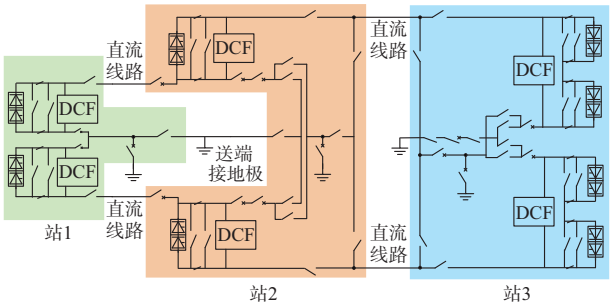


图1　分址级联特高压直流工程主接线图
Fig. 1　Main wiring diagram of site-division cascaded UHVDC project

至接地极。此外，站2还配置有金属回线连接线，在站2可实现整个送端直流的大地金属回线转换。站1和站2通过直流线路相连，该直流线路可视为常规特高压直流中高、低压换流器之间的阀组连接线。受端站（站3）与常规特高压直流接线方式类似，金属回线转换开关与大地回线转换开关均配置在站3。此外，在金属回线运行方式下，直流系统采用送端的接地极进行接地。

1.2　送端接地方式

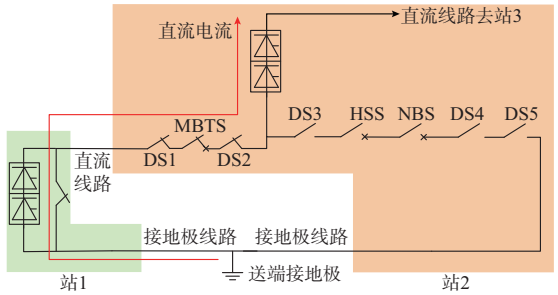
由于送端高、低压换流器分站址建设，当站1换流器处于运行状态时，站1处于接入直流的状态。当站1换流器退出运行且站2换流器处于运行状态时，站2既可以通过“高、低压换流站联络线路-站1旁路隔离刀闸-站1中性母线-站1接地极线路”路径进行接地（简称接地方式1），也可以通过“站2中性母线-站2接地极线路”路径进行接地（简称接地方式2）。两种接地方式如图2所示（以极1为例）。

在站2配置有直流转换开关、中性母线开关和快速开关，其中，直流转换开关和中性母线开关具有大于额定电流的电流转移能力，这也使得直流可在运行状态下进行接地方式的在线转换。

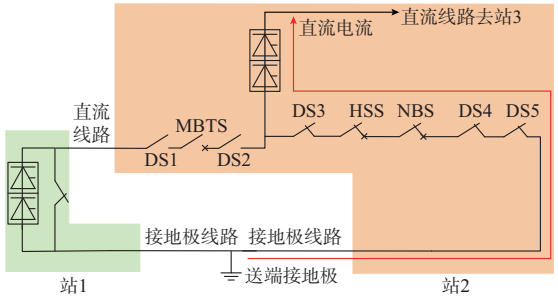
1.3　接地方式转换基本策略

当站1换流器因故障、检修等原因退出运行时，站1换流器已隔离，但直流送端仍采用接地方式1接地，若站1直流场有检修需求，为将站1彻底与直流系统隔离，可将送端直流接地方式转换为接地方式2。为此，设计由接地方式1转换到接地方式2的顺控流程如图3所示。

总体策略为先从接地方式1转换为接地方式1和方式2的并联状态，再转换成接地方式2。需要注意，当站2合上快速开关后便进入了接地方式1和接地方式2并联状态，在分开直流转换开关之前，需要判断接地方式2的回路是否已经建立，具体方法为检测接地方式2支路上电流（流过中性母线开关



(a) 直流送端通过低压换流站接地(接地方式1)



(b) 直流送端通过高压换流站接地(接地方式2)

MBTS：直流转换开关；HSS：快速开关；NBS：中性母线开关；DS：刀闸。

图2　分址级联特高压直流工程送端接地方式
Fig. 2　Grounding mode of site-division cascaded UHVDC project at sending end

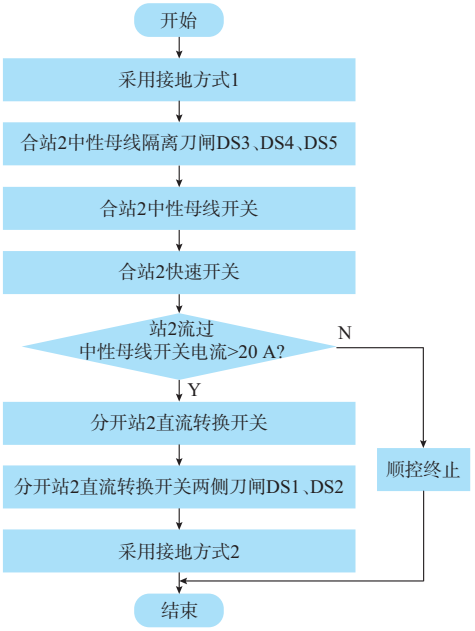


图3　接地方式1转换到方式2的流程图
Fig. 3　Flow chart for transferring from grounding mode 1 to mode 2

的电流）大于设定值（躲过测量误差，可设置为20 A），若该电流判据不满足，则终止顺控操作。

当仅站2换流器运行且通过接地方式2接地时，若需要投入站1换流器，则首先需要切换到接地方式1。为此，设计由接地方式2转换到方式1的顺

控流程见图4。该操作的前提是站1已连接至联络线和接地极且站1换流器处于旁路状态。总体策略为先从接地方式2转换为方式1和方式2的并联状态，再转换成接地方式1。与图3类似，在并联状态下需检测接地方式1支路上的电流（流过直流转换开关的电流）大于设定值，以确认该转移支路完全建立方可分开中性母线开关。此外，转换后站2中性母线区开关刀闸除快速开关以外仍处于合位，以便于站1故障时快速转回接地方式2。

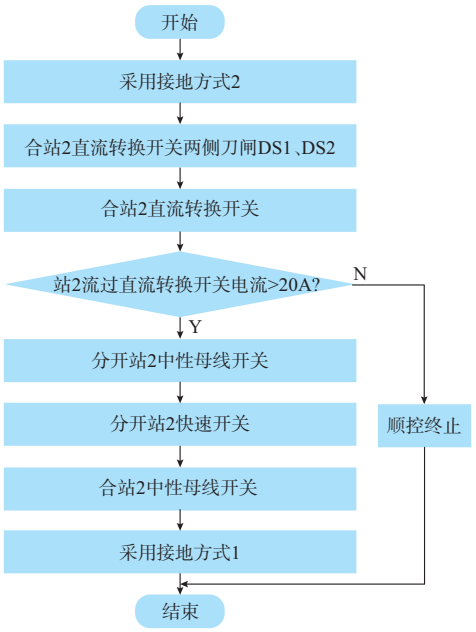


图4　接地方式2转换到接地方式1的流程图
Fig. 4　Flow chart for transferring from grounding mode 2 to mode 1

2　接地方式转换失败问题和应对策略

基于以上接地方式转换策略，送端分址级联特高压直流可在正常运行时实现接地方式的灵活转换。然而，在某些工况下执行上述接地方式转换时，尽管转移支路已成功建立，但可能存在转移支路电流判据不满足的情况，从而导致控制系统误认为转移支路未建立，为防止回路开路过压将终止顺控，导致转换失败。为了克服接地方式转换策略存在的转换失败问题，提高策略的可用性，本文对各种工况进行分析，并提出针对性的应对策略。以下分析均以极1为例，极2与极1分析方法类似，不再赘述。

2.1　转移支路无分流问题分析

2.1.1　大地回线方式

在大地回线接线方式下，以极1开展接地方式转换为例，当极1合上转移支路后，便处于接地方式1和方式2并联的状态。由于直流工程正常运行时要维持各极的直流电流为设定值，可将换流阀等效为电流源。令极1和极2直流电流分别为I_1和I_2，根据叠加原理，极1流过直流转换开关和中性母线开关的电流即为等效电流源I_1和I_2产生的激励叠加。此时，还需再细分为两种工况：1）极2通过接地方式1接地；2）通过接地方式2接地。大地回线方式下极1处于接地转换并联状态时的等效电流源模型，如图5所示。图中：R_{line1}为高、低压换流站联络直流线路电阻；R_{el1}、R_{el2}分别为站1、站2接地极线路电阻。

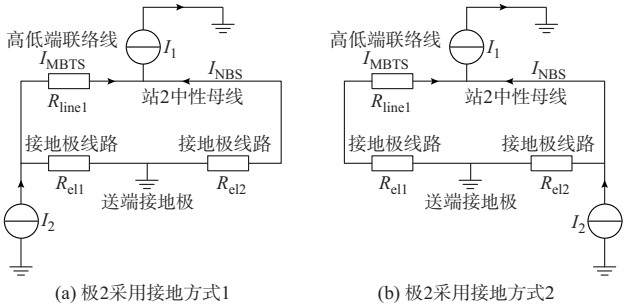


图5　大地回线下接地转换并联状态等效电流源模型
Fig. 5　Equivalent current source model for parallel grounding transfer state of ground return

当极2采用接地方式1时，流过直流转换开关的电流I_{MBTS}和流过中性母线开关的电流I_{NBS}分别为：

$$I_{MBTS}=\frac{I_1R_{el2}+I_2R_{el1}}{R_{el1}+R_{el2}+R_{line1}} \tag{1}$$

$$I_{NBS}=\frac{I_1(R_{el1}+R_{line1})-I_2R_{el1}}{R_{el1}+R_{el2}+R_{line1}} \tag{2}$$

由于电流I_1和I_2均不会小于0，I_{MBTS}不存在为0的可能，而I_{NBS}存在为0的可能。即当极2采用接地方式1时，当极1从接地方式1转换到方式2，存在转移支路无电流导致的转换失败问题。

当极2采用接地方式2时，流过直流转换开关电流I_{MBTS}和流过中性母线开关电流I_{NBS}分别为：

$$I_{MBTS}=\frac{I_1R_{el2}-I_2R_{el2}}{R_{el1}+R_{el2}+R_{line1}} \tag{3}$$

$$I_{NBS}=\frac{I_1(R_{el1}+R_{line1})+I_2R_{el2}}{R_{el1}+R_{el2}+R_{line1}} \tag{4}$$

由于电流I_1和I_2均不会小于0，I_{NBS}不存在为0的可能，而I_{MBTS}存在为0的可能。即当极2采用接地方式2时，当极1从接地方式2转换到方式1时，存在转移支路无电流导致的转换失败问题。而由于直流正常运行时一般为双极平衡运行，即$I_1=I_2$，该问题出现的概率相对较高。

2.1.2　金属回线方式

在极1金属回线接线方式下，整个直流系统的接地点采用送端的接地极，当极1合上转移支路后，便处于接地方式1和方式2并联的状态，此时极2无

法运行，故无须考虑极2影响。金属回线方式下极1处于接地转换并联状态时的等效电流源模型，如图6所示。图中：R_{line2}为连接站2和站3的极1直流线路和金属回线（金属回线采用极2线路）电阻。

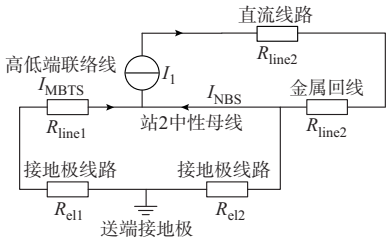


图6　金属回线下接地转换并联状态等效电流源模型
Fig. 6　Equivalent current source model for parallel grounding transfer state of metallic return

由图6可见，由于站2中性母线区域电阻几乎为0，接地方式并联状态下将分得所有的极1直流电流，即$I_{NBS}=I_1$，$I_{MBTS}=0$。由此可得出结论：在金属回线方式下，从接地方式2转换到方式1时，100%存在转移支路无电流导致的转换失败问题，即无法实现接地方式2到方式1的转换。

2.2　应对策略

由上述分析可以看到，在不同的接线方式下均一定程度存在着并联支路无分流导致的接地方式转换失败问题。本文分别针对大地回线方式和金属回线方式提出了不同的应对策略。

2.2.1　大地回线方式下问题应对策略

为避免转换过程中的转移支路无流现象，考虑到图5中两条并联支路的电阻接近，故小幅调整一个极的电流应可使转移支路的电流增大至满足阈值，进而提出如下策略：若在接地转换过程中并联状态下，控制系统检测到转移支路无电流，则在一个极（一般为方式转换极）执行短时电流阶跃（可设定为1～2 s），在直流电流小于0.5 p.u.时执行向上阶跃，大于0.5 p.u.时执行向下阶跃。若此时电流判据满足，则继续执行后续操作；若仍不满足，则终止顺控。

进一步，计算所需的电流阶跃量。根据2.1.1节分析，当极2采用接地方式1时，I_{NBS}可能不满足大于20 A的条件。为满足条件，I_{NBS}变化量ΔI_{NBS}需大于40 A，若仅改变极1电流指令，根据式(2)有：

$$\Delta I_{NBS}=\frac{\Delta I_1(R_{el1}+R_{line1})}{R_{el1}+R_{el2}+R_{line1}}>40\ \text{A} \tag{5}$$

式中：ΔI_1为极1电流指令变化量（阶跃量）。

将金上直流工程电阻典型值（$R_{line1}=0.449\ \Omega$，$R_{el1}=1.424\ \Omega$，$R_{el2}=1.336\ \Omega$）代入式(5)可得，ΔI_1须大于68.5 A。

当极2采用接地方式2时，I_{MBTS}可能不满足大于20 A的条件。为满足条件，I_{MBTS}的变化量ΔI_{MBTS}需大于40 A，若仅改变极1电流指令，根据式(3)有：

$$\Delta I_{MBTS}=\frac{\Delta I_1 R_{el2}}{R_{el1}+R_{el2}+R_{line1}}>40\ \text{A} \tag{6}$$

同理，将电阻值代入后可得ΔI_1须大于96 A。

综上，ΔI_1取大值，在大地回线方式下若解决转移支路无分流问题，极1电流须至少阶跃96 A，考虑裕度可阶跃200 A，折算直流功率阶跃（单极）为80 MW。

2.2.2　金属回线方式下问题应对策略

根据分析，由于站2中性母线区域电阻几乎为0，无论多大的直流电流，I_{MBTS}无法分得电流，故电流阶跃的方法无法解决此问题，需要改变当前拓扑，进而提出如下策略：通过短时合上站3接地的方式（站外接地或站内接地），来使得高、低压换流站联络线路流过电流。以合上站3站外接地的方式为例，该状态下等效电流源模型如图7所示。

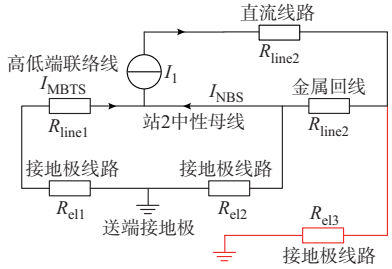


图7　金属回线下接地转换并联状态等效电流源模型（站3接地）
Fig. 7　Equivalent current source model for parallel grounding transfer state of metallic return (station 3 grounding)

图7中，R_{el3}为站3接地极线路电阻（金上直流工程中R_{el3}典型值为0.766 Ω）。根据图7可计算出在站3站外接地开关合上后有：

$$I_{MBTS}=\frac{I_1 R_{line2} R_{el2}}{\left[\dfrac{(R_{el1}+R_{line1})R_{el2}}{R_{el1}+R_{el2}+R_{line1}}+R_{el3}+R_{line2}\right](R_{el1}+R_{el2}+R_{line1})} \tag{7}$$

在最小电流运行水平下$I_1=500$ A，将金上直流工程电阻典型值（$R_{line2}=7.128\ \Omega$，$R_{el3}=0.766\ \Omega$，其余同2.2.1节）代入式(7)，得到$I_{MBTS}=171$ A，远大于电流阈值20 A。

此外，若采用站3站外接地的方式，由于需合上金属回线转换开关及其两侧刀闸，耗时较长，可在执行接地方式转换之前使站3先完成站外接地，然后再执行接地方式转换，待方式转换完成后再断开站3金属回线转换开关及其两侧刀闸，恢复原有的金

属回线方式。若采用站3站内接地的方式，受到站内设备和人身安全等因素限制，站内接地网不能长时间流过大电流[19-20]，故可在转换到接地方式并联状态后短暂合上站内接地开关并在时间t后分开（t不应超过相应标准），使高、低压换流站联络线路流过电流从而完成转换。考虑到站内设备和人身安全、控制保护配合复杂度等因素，最终金上直流工程实际采用了站3站外接地的方案。

3　仿真验证

为验证本文所提的分址级联特高压直流输电系统接地方式转换策略的可行性，采用金上直流工程实际控制保护装置和按工程成套设计参数搭建的实时数字仿真（real-time digital simulator，RTDS）模型组建了闭环仿真系统，对相关策略进行了仿真测试。金上直流工程额定容量为8 000 MW，额定直流电流为5 000 A，额定直流电压为±800 kV，送端站换流器额定直流电压为±400 kV。

3.1　大地回线下接地方式转换

测试条件如下：双极大地回线运行方式，极1和极2均仅高压换流器运行，直流电流均为500 A（最小电流），送端极1和极2均采用接地方式2接地，操作运行人员后台发出极1从接地方式2转换为接地方式1的指令。

大地回线下接地方式转换仿真波形见图8。

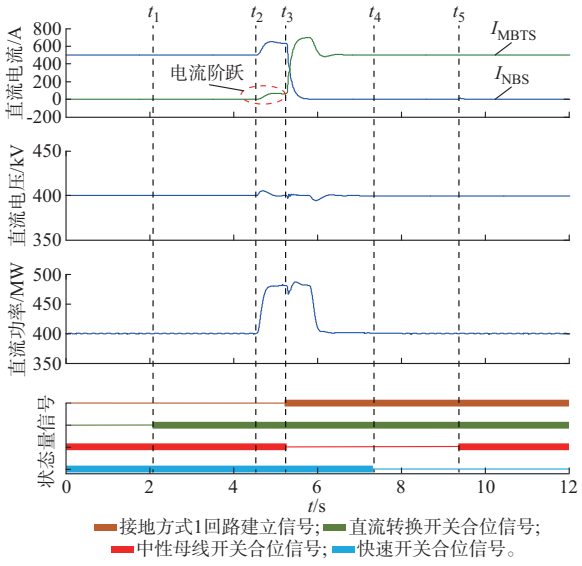


图8　大地回线下接地方式转换仿真波形

Fig. 8　Simulation waveforms for grounding mode transfer of ground return

可以看出，在从接地方式2转换到方式1顺控流程开始后，t_1时刻直流转换开关合上，此时处于接地方式1和方式2并联状态，但是直流转换开关对应的转移支路并没有电流，I_{MBTS}不满足条件，控制系统检测到该情况后经一定延时在t_2时刻启动持续时间1.2 s、幅值为200 A的电流阶跃（对应80 MW的功率阶跃），使得I_{MBTS}增大到66 A左右，从而判断出直流转换开关对应的转移支路已成功建立。然后，再于t_3时刻分开中性母线开关，完成方式转换，经一定延时在t_4时刻分开快速开关，再经一定延时在t_5时刻合上中性母线开关，为下一次快速转换接地方式2做好准备。可以看到，在转换过程中直流电压和功率的波动均较小，对直流系统影响很小。

3.2　金属回线下接地方式转换

测试条件如下：极1金属回线运行方式，极1仅高压换流器运行，直流电流均为500 A（最小电流），送端极1采用接地方式2接地，操作运行人员后台发出极1从接地方式2转换为方式1的指令。

金属回线下接地方式转换仿真波形见图9。

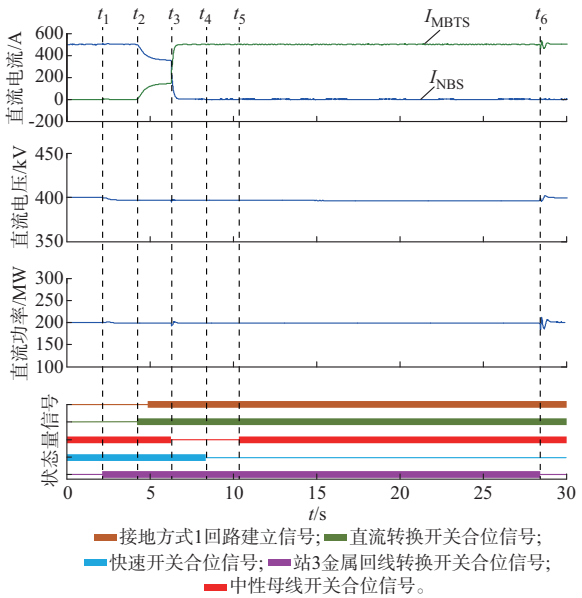


图9　金属回线下接地方式转换仿真波形

Fig. 9　Simulation waveforms for grounding mode transfer of metallic return

由图9可见，金属回线下，在从接地方式2转换到方式1顺控流程开始后，在合上站3的金属回线转换开关两侧刀闸后，在t_1时刻合上站3的金属回线转换开关完成站外接地，待站3的金属回线转换开关合上2 s后，在t_2时刻合上站2的直流转换开关。此时，处于接地方式1和方式2并联状态，直流转换开关对应的转移支路流过电流逐步增大，直到满足电流判据，控制系统判断出直流转换开关对应的转移支路已成功建立。然后，在t_3时刻分开中性母线开关，完成方式转换，经一定延时在t_4时刻分开快速开关，再经一定延时在t_5时刻合上中性母线开关，在快

速开关合位消失后20 s,即t_6时刻分开站3的金属回线转换开关及其两侧刀闸。注意金属回线转换开关的合位保持时间需考虑其合闸机构储能时间,不宜过短。从图中可以看到,在转换过程中直流电压和功率的波动均较小,对直流系统影响很小。

4 结语

本文针对分址级联特高压直流输电系统接地方式需要灵活转换以获得更高灵活性和可用性的需求,设计了分址级联特高压直流输电系统接地方式转换策略。详细分析了不同接线方式下可能存在转移支路无电流导致的转换失败问题,并提出了相应的应对策略。结合理论计算和仿真结果可得到如下结论:

1)在双极大地回线运行方式下,存在转移支路无电流问题,本文提出小电流阶跃的方式可实现转移支路的通流,从而完成对转移支路建立的确认步骤。同时,基于各种接线方式计算了电流阶跃量,有效减轻了转换过程对直流功率的影响。

2)在单极金属回线运行方式下,存在转移支路无电流问题,且电流阶跃的方法无法解决该问题,本文提出短时改变直流拓扑即合上受端换流站接地开关刀闸的方法。在解决转移支路无电流问题的同时,也减轻了转换过程对直流功率的影响。

本文所述策略主要针对分址级联特高压直流输电系统,针对其他类型多端直流系统的具体策略需要根据实际情况做出相应调整。

参考文献

[1] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等.±800 kV 6 400 MW特高压直流输电工程设计[J].电网技术,2006,30(1):1-8.
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary exploration for design of ±800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW [J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.

[2] 陈浩,郝丽丽,吕肖旭,等.特高压直流合约交易电量约束下送端电网日前调度优化[J].电力系统自动化,2022,46(17):218-226.
CHEN Hao, HAO Lili, LYU Xiaoxu, et al. Day-ahead scheduling optimization of sending-end power grid under trading electricity quantity constraint of UHVDC contract [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 218-226.

[3] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.

[4] 刘杉,谭开东,姜喆,等.基于可控自恢复消能装置的直流送端暂态过电压抑制方法[J].电力系统自动化,2024,48(9):142-150.
LIU Shan, TAN Kaidong, JIANG Zhe, et al. Suppression method of transient overvoltage at DC transmission terminal based on controllable self-recovery energy dissipator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 142-150.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 李周,王宇涵,顾伟,等.直流电网及其运行控制策略发展趋势[J].电力系统自动化,2024,48(24):1-21.
LI Zhou, WANG Yuhan, GU Wei, et al. Development trend of DC power grid and its operation control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 1-21.

[8] 范征,韩丛达,周静,等."双碳"目标下未来电网形态发展模式及演变路径初探[J].新型电力系统,2024(3):272-281.
FAN Zheng, HAN Congda, ZHOU Jing, et al. Exploring the development model and evolution path of future power grid forms under the dual carbon target[J]. New Type Power Systems, 2024(3): 272-281.

[9] 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.

[10] 黄曼茜,刘航,许建中.降低三端直流系统入地电流与功率损失的换流站电流调整策略[J].电力系统自动化,2022,46(13):130-138.
HUANG Manxi, LIU Hang, XU Jianzhong. Current adjustment strategy of converter station for reducing grounding current and power loss of three-terminal DC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 130-138.

[11] 张文亮,汤涌,曾南超.多端高压直流输电技术及应用前景[J].电网技术,2010,34(9):1-6.
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.

[12] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[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] 黄怡，吴迪，王智冬，等．级联多端双起点特高压直流与两端特高压直流方案经济性比选影响因素分析[J]．电力建设，2011，32(12)：84-88.
HUANG Yi，WU Di，WANG Zhidong，et al. Economic influence factors analysis of CMT-UHVDC and two-terminal UHVDC selection[J]. Electric Power Construction，2011，32(12)：84-88.

[15] 张刘春，张翠霞，张搏宇，等．±800 kV级联多端特高压直流输电工程的绝缘配合[J]．电网技术，2012，36(12)：60-65.
ZHANG Liuchun，ZHANG Cuixia，ZHANG Boyu，et al. Insulation coordination of ±800 kV cascaded multi-terminal DC transmission project[J]. Power System Technology，2012，36(12)：60-65.

[16] 刘凯．串联多端高压直流系统直流线路保护方案[J]．南方电网技术，2020，14(10)：78-86.
LIU Kai. Protection solution for transmission line in series multi-terminal HVDC system [J]. Southern Power System Technology，2020，14(10)：78-86.

[17] 向往，梅晓波，赵峥．内陆清洁能源基地±800 kV/10 000 MW直流外送拓扑设计[J]．高电压技术，2024，50(6)：2052-2066.
XIANG Wang，MEI Xiaobo，ZHAO Zheng，et al. Topology design of ±800 kV/10 000 MW HVDC transmission for inland large-scale renewable energy bases [J]. High Voltage Engineering，2024，50(6)：2052-2066.

[18] 张庆武，徐莹，沈天骄，等．级联多端特高压直流控制保护系统配置及策略[J]．电网技术，2024，48(4)：1799-1807.
ZHANG Qingwu，XU Ying，SHEN Tianjiao，et al. Configuration and strategies of the control and protection system for CMT-UHVDC[J]. Power System Technology，2024，48(4)：1799-1807.

[19] 朱益华，郭琦，李书勇，等．高压直流无接地极运行实现方法[J]．电力系统自动化，2016，40(16)：153-158.
ZHU Yihua，GUO Qi，Li Shuyong，et al. Realization of high voltage direct current operation without grounding electrode[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(16)：153-158.

[20] 张勇，谢惠藩，梅勇，等．普侨直流普洱换流站内接地网替代接地极双极运行方案[J]．电力系统自动化，2016，40(9)：135-141.
ZHANG Yong，XIE Huifan，MEI Yong，et al. Analysis on bipolar operation of Puqiao UHVDC with station ground mat replacing electrode in Puer rectifying station[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(9)：135-141.

俞　翔(1989—)，男，通信作者，硕士，高级工程师，主要研究方向：高压直流输电及其控制保护技术。E-mail：yuxiang3@nrec.com

张庆武(1982—)，男，博士，研究员级高级工程师，主要研究方向：高压直流输电及其控制保护技术。E-mail：zhangqw@nrec.com

高子健(1992—)，男，硕士，工程师，主要研究方向：直流输电系统设计与控制保护技术。E-mail：gaozijian@chinasperi.sgcc.com.cn

（编辑　代长振）

Grounding Mode Transfer Strategy for Site-division Cascaded UHVDC Transmission Systems

YU Xiang[1]，*ZHANG Qingwu*[1]，*GAO Zijian*[2]，*XIAO Jianmin*[1]

(1. NR Electric Co.，Ltd.，Nanjing 211102，China；
2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co.，Ltd.，Beijing 102209，China)

Abstract: The site-division cascaded ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission system exhibits greater flexibility and complexity in connection configurations and return circuit transfer compared to conventional two-terminal UHVDC transmission systems. Based on an actual sending-end site-division cascaded UHVDC project，this paper designs a transfer strategy for the grounding modes of DC system，which satisfies the requirements for flexible commissioning and decommissioning of the sending-end low-voltage converter station. To address potential grounding mode transfer failures during ground return and metallic return operation modes，this paper proposes countermeasures involving small current step injection and short-term grounding of the receiving-end converter station，respectively. The effectiveness of the proposed control strategy is validated through experiments utilizing actual control and protection devices in conjunction with real-time digital simulation.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5500-202426160A-1-1-ZN).

Key words: ultra-high voltage direct current (UHVDC)；site-division cascading；grounding mode；converter station；return