

全-半桥混合型MMC换流器零直流电压控制策略设计

田国稳,周盛玮,杨 臻,熊守江

(国网江西省电力有限公司超高压分公司,江西 南昌 330029)

摘要:随着柔性直流输电系统的广泛应用,特高压柔直工程的广泛出现,系统可靠性问题日益突出。文中针对特高压柔直工程可靠性需求,提出一种基于全-半桥混合型MMC换流器在无闭锁情况下的零直流电压控制策略设计,通过快速降低换流站直流侧电压可实现故障电流抑制,同时维持MMC换流器子模块电容电压均衡,为重启动功能的实现创造条件,进一步提高特高压柔直工程的可靠性。

关键词:全-半桥混合型MMC换流器;控制策略;零直流电压控制;阀控均压控制;桥臂电压计算

中图分类号:TM 763 文献标志码:A 文章编号:1006-348X(2026)02-0008-03

0 引言

柔性直流输电系统全-半桥混合型MMC换流器作为电压源,从原理上分析,可以通过控制策略在无闭锁情况下,快速降低直流侧电压,实现故障清除,同时保持子模块处于均压控制,维持子模块电容电压平衡度,为直流系统重启创造条件^[1-3]。零直流电压控制策略也可应用于阀组在线投退,提高直流系统运行可靠性^[4-5]。针对全-半桥混合型MMC换流器,文中阐述其全桥子模块拓扑负电压输出原理,研究内环控制器和最近电平逼近(nearest level modulation,NLM)控制策略,搭建800 kV混合型MMC换流器单极大地回线PSCAD仿真模型,开展该控制策略的分析,并通过仿真验证理论结果。

1 全桥子模块拓扑

全桥子模块由4个带反并联二极管的IGBT(T1、T2、T3、T4)和1个储能电容组成,正常工作情况下,T1、T4和T2、T3的开通为互补状态。当控制T1、T4管导通时,不论电流方向正负与否,子模块端口电压均为+U_c,此即为正投入状态,如图1所示。

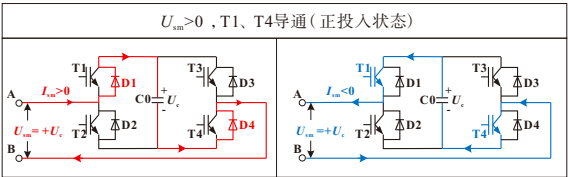


图1 全桥子模块正电压输出图

当控制T2、T3管导通时,不论电流方向正负与否,子模块端口电压为-U_c,此即为负投入状态,如图2所示。

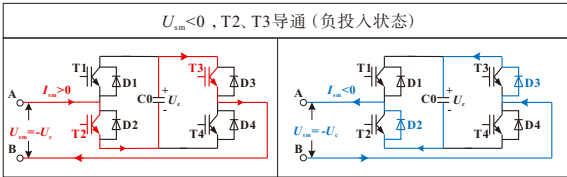


图2 全桥子模块负电压输出图

由此可以看出,全桥子模块通过控制IGBT导通和关断,可以灵活实现子模块正、负电压输出,为实现零直流电压提供基础。

当控制T1、T3管或者T2、T4管导通时,不论电流方向正负与否,子模块端口电压为0,此即为切除状态,如图3所示。

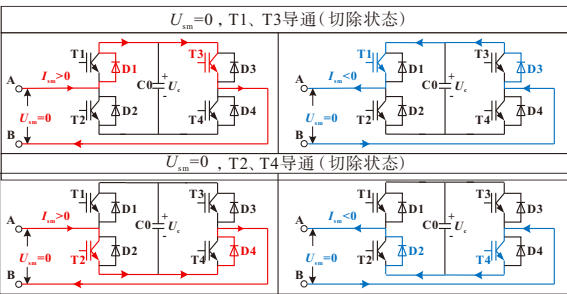


图3 全桥子模块切除状态图

2 MMC换流器控制策略设计

在特高压柔直工程正常运行时,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定直流电压控制。当进入零直流

电压控制模式时,为快速清除故障,内环电流控制器指令值清零,直流功率速降置零,其计算的交流参考波与网侧交流电压的幅值和相位一致,维持与交流电网的并网,但不交换功率,控制策略如图4所示。

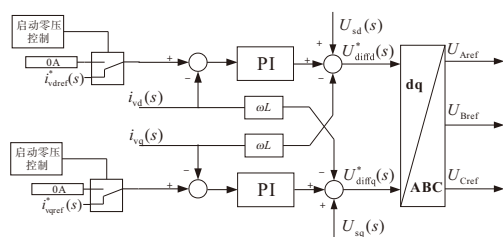


图4 内环电流控制器零直流电压控制策略图

根据MMC换流器的原理,其通过控制上、下桥臂电压差,实现交流电压的输出,控制上下桥臂电压和恒定,实现直流电压的稳定^[6-7]。\$U_{pj}\$ 和 \$U_{nj}\$ 分别为各相上、下桥臂电压。\$U_{dc}\$ 和 \$U_{diff}\$ 分别为换流器直流侧端口直流电压和交流侧输出的交流电压(即参考波)。当启动直流侧零直流电压控制时, \$U_{dc}\$ 由原先定电压控制值200 kV切换至0 kV,而交流参考波 \$U_{ac}\$ 等于内环控制器计算的三相交流电压参考波。

可得式(1):

$$\begin{cases} U_{pj} = \frac{U_{dc}}{2} - U_{diff} \\ U_{nj} = \frac{U_{dc}}{2} + U_{diff} \end{cases} \quad (1)$$

根据(1)式可设计桥臂电压计算策略,如图5所示:

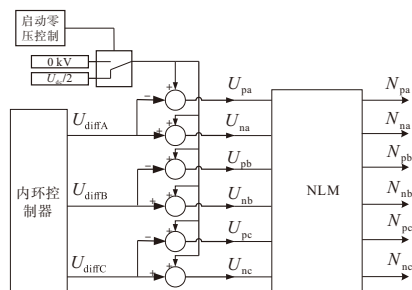


图5 零直流电压模式桥臂投入数量计算图

3 阀控控制策略设计

根据上述内环控制器策略分析,在计算桥臂电压的策略中,直流电压指令值切换为零(见图4),当参考波小于零时,阀控根据NLM策略计算出需要输出负电压的子模块个数,控制对应桥臂的全桥子模块输出负电压,实现零直流电压控制策略,如图6所示。

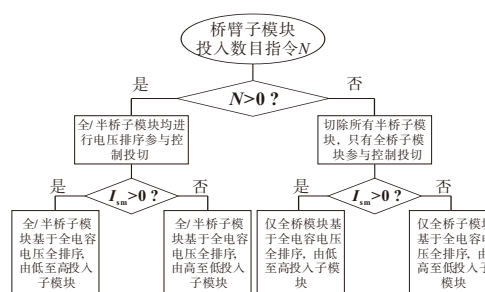


图6 阀控投切及均压控制策略图

4 仿真验证

4.1 仿真建模参数

以某实际特高压柔直工程为例,直流电压选择±800 kV、交流系统为500 kV电压等级,调制比为0.85、电平数为191,换流变接线组别YND11,采用单极大地回线仿真模型。

整流侧定电流控制,逆变侧定电压控制,各器件详细参数如表1所示。

表1 仿真模型参数表

参数名称	数据
额定直流功率(MW)	8 000
额定直流电流(A)	5 000
额定直流电压(kV)	800
子模块IGBT选型(kV/kA)	4.5/5
子模块电容(mF)	24
半桥子模块数量(个)	76
全桥子模块数量(个)	114
子模块额定电容电压(kV)	2.15
换流变额定容量(MVA)	2 250
换流变网侧额定(线)电压(kV)	515
换流变阀侧额定相电压(kV)	195.96
桥臂电抗器(mH)	25
线路直流电阻(Ω)	9

4.2 仿真验证结果

在直流系统功率指令值双阀组3 000 MW运行时,进入零直流电压控制模式后,两侧换流器的内环控制器指令切换至零,如图5所示。直流功率由1 500 MW(单阀组)速降置零,直流电流由3.4 kA速降至0 A,如图7所示,与策略设计预想结果一致。

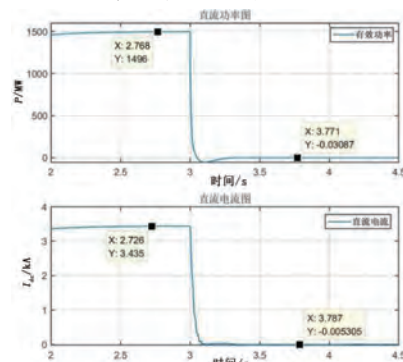


图7 直流电流仿真图

正常运行时,整流站直流电压维持在 800 kV,逆变站直流电压为 770.5 kV,在零直流电压控制后速降至 2.8 kV 左右,如图 8 所示。与策略预期一致,实现直流侧电压的快速降低。

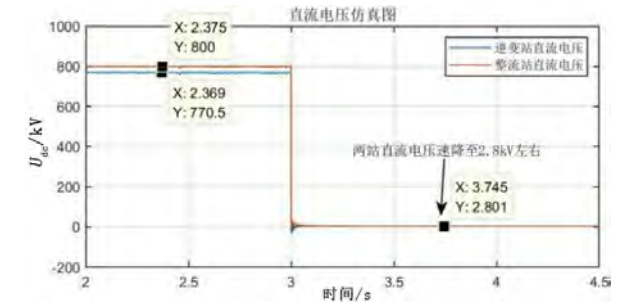


图8 直流电压仿真图

随着内环控制器电流指令值降至零,换流变阀侧电流速降至 0 A,换流阀与交流电网保持并网,但不交换功率。如图 9 所示,因直流电压降至 0 kV 左右,换流变阀侧电压不再承受直流偏置电压,与策略预期一致,实现无闭锁情况下零功率运行状态。

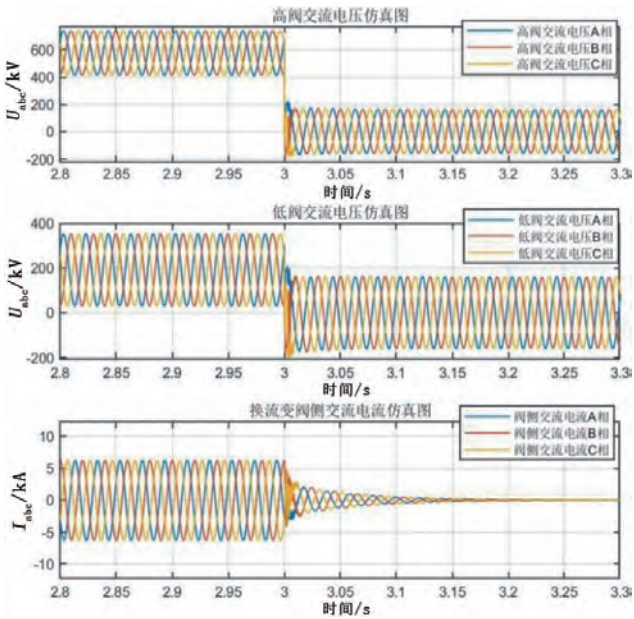


图9 换流阀交流电压电流仿真图

如图 10 所示,如果采用直接闭锁的方式,换流阀闭锁后子模块电压离散程度较高,且闭锁后子块通过自有的均压电阻自放电,MMC 换流阀闭锁后不可控,子模块电容电压无法保持均衡,这些都会对系统造成较大的冲击且不利于系统的重启和恢复。根据上文所述均压控制策略,实现六个桥臂的子模块电容电压均稳定控制在额定 2.15 kV 左右,为后续故障清除后重新启动创造条件。

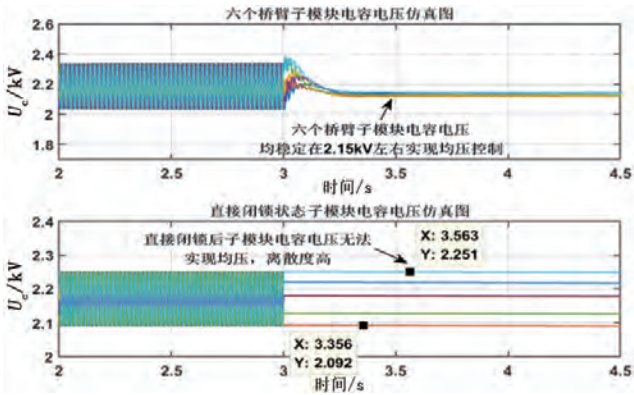


图10 桥臂子模块电容电压仿真图

5 结语

目前,在工程应用中,当换流器区内发生接地类故障,无法可靠隔离时,需通过极闭锁隔离故障。MMC 柔直换流器健全阀组通过控制直流侧电压和电流方式,抑制故障电流,但非完全阻断。若要完全退出故障换流器,则健全阀组需闭锁后跳开交流断路器配合退出,此时,健全阀组不再具备重启条件,降低了直流系统的可靠性和可用率^[8]。

文中针对特高压柔直工程可靠性需求,提出全-半桥混合型 MMC 换流器无闭锁零直流电压控制策略。该策略以全桥子模块可输出正负电压的特性为基础,通过清零内环电流控制器指令,结合阀控 NLM 策略与子模块均压控制,实现直流侧电压控制零压,同时保持换流阀均压控制,为非故障阀组的重启动创造条件。

该策略可支撑直流侧故障穿越、阀组在线投退,避免闭锁操作对设备的冲击,缩短故障恢复时间,对提升特高压柔直系统运行安全性与电网互联稳定性具有重要实践意义。

参考文献:

[1] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等.模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J].电力系统自动化,2011,35(23):82-87.
[2] 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.
[3] 陈桂.柔性直流输电系统模块化多电平换流器的端口特性及故障穿越研究[D].南京:东南大学,2021.(下转第 40 页)

风处于六级,但发生倒杆、断线情况。

表 1 倒杆相关系数计算表

强对流轮次	倒杆数量/杆	断线数量/条	倒杆和大风橙黄预警总次数(黄+橙)相关系数	倒杆和影响指数相关系数	断线和大风橙黄预警总次数(黄+橙)相关系数	断线和强对流影响指数相关系数
“3.3”强对流	40	85	0.9	0.93	0.78	0.91
“3.27”强对流	11	59	0.41	0.62	0.18	0.4
“4.11”强对流	13	47	0.71	0.8	0.59	0.71
“4.18”强对流	12	38	0.17	0.28	0.07	0.15
“4.21”强对流	107	143	0.82	0.91	0.69	0.83
整体	4	377	0.75	0.89	0.72	0.87

4 结语

文中通过分析江西八轮强对流过程,得出以下结论:首先,短临预警信号是当前准确性最高、对电网应急指挥最具指导价值的气象信息;其次,所构建的SCI指数能够有效量化强对流天气的综合致灾强度,且与电网实际灾损情况具有极强的统计学相关性,证实了其作为灾害评估工具的科学性和实用性。

基于上述结论,文中提出如下建议:一是强化短临预警的核心应用,将其作为应急响应启动和资源预置的刚性触发条件;二是深化SCI的实战应用,将其嵌入应急指挥系统(ECS),开发实时计算与可视化功能,实现灾害影响的动态感知与风险评估;三是构建基于SCI的应急后评价体系,通过横向(不同单位)纵向(不同过程)对比,精准查找电网韧性和应急流程中的薄弱环节,推动从“被动抢险”向

“精准预警-动态控制-持续进化”的现代化应急管理模式转变,最终全面提升江西电网应对极端天气的能力与韧性。

参考文献:

[1] 孙世军,朱坤双,韩洪.基于数据融合的电网强对流临近预警技术研究[J].电子设计工程,2023,31(12):53-57.

[2] 李存斌,计丽妍,赵德福,等.基于数据驱动的电力系统灾变演化及防控研究与展望[J].电力系统自化,2022,44(09):1-11.

[3] 何馥彤.电网灾变风险分析及应急能力评估模型研究[D].北京:华北电力大学,2024.

[4] 许海超.强对流灾害预警评估及对流系统寿命预测[D].天津:天津大学,2022.

[5] 刘英,柳崇健,周海光.突发性强灾害天气预警系统:理论与应用[J].地球科学进展,2008,11(23):1141-1149.

[6] 周之栩,尹浩,陶威.湖州“4·9”强对流天气特征分析[J].浙江气象,2021,42(01):7-10.

[7] 吴楠,喻迎春,刘玲,等.江西强对流天气预警信息发布质量评估和分析[J].科技传播,2021,13(19):39-42.

[8] 杜维柱,张晓华,卢毅,等.基于机器学习与数值预报技术的电网短期临近气象预警模型设计[J].电子设计工程,2023,31(19):99-103.

[9] 熊小伏,王伟,王建,等.基于天气雷达数据的强对流天气下输电线风偏放电预警方法[J].电力自动化设备,2018,38(04):36-43.

(上接第10页)

[4] 尹太元,王跃,段国朝,等.基于零直流电压控制的混合型MMC-HVDC直流短路故障穿越策略[J].电工技术学报,2019,34(增刊1):343-351.

[5] 李红梅,行登江,高扬,等.子模块混联MMC-HVDC系统直流侧短路故障电流抑制方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):57-64.

[6] 管敏渊,徐政,屠卿瑞,等.模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J].电力系统自动化,2010,34(02):48-52.

[7] 屠卿瑞,徐政,郑翔,等.模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J].高电压技术,2010,36(02):547-552.

[8] 张建忠,陈桂,张雅倩,等.混合型MMC非闭锁型直流短路故障穿越策略分析和比较[J].电力自动化设备,2021,41(04):41-47,63.