

混合级联多端直流系统的分阶段协调故障穿越策略

喻建瑜¹, 范栋琛¹, 徐凯², 孔祥平¹, 郑俊超¹, 戴强晟¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031)

摘要:混合级联多端直流系统整流器的反下垂特性削减了系统吸收功率盈余补偿的能力,进而导致故障穿越能力受限。提出了一种利用设备自身过流裕度抵御交流故障的保护方案,通过分阶段的协调控制策略实现不同程度的故障穿越。直流受端多个换流器按照预先制定的运行模式协调配合,疏散模块化多电平换流器(MMC)组送出功率能力受阻产生的系统盈余功率。仿真结果表明,该协调故障穿越策略无需在直流侧配置泄能装置,就可实现在不同故障深度下快速稳定过渡到预先设定的稳定运行点,提高了混合级联多端直流系统的故障穿越能力。

关键词:混合级联多端直流系统;故障穿越;电压裕度;低压限流环节

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204026

0 引言

近年来,为满足新能源远距离大容量输电和区域电网互联的需求^[1-2],国内外相继投产了ABB Skagerrak 海峡4号双极混合直流输电、±800 kV 昆柳龙三端混合直流输电^[3]等工程。混合直流输电技术结合了基于电网换相换流器LCC(Line Commutated Converter)的常规直流输电技术和基于模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)的柔性直流输电技术,可友好匹配送、受端系统,运行方式灵活,控制模式多变^[4]。

目前针对混合级联多端直流系统的研究集中于稳定性分析、控制保护装置设计以及控制策略优化等^[5-8]。但受制于单一拓扑结构和现有设备制造水平,混合级联多端直流系统的应用场景和适用范围受限。文献[9-10]提出了一种新型混合级联多端直流系统拓扑,其可实现跨区域、大容量及多落点地馈入受端交流电网,具备更好的输电可靠性和灵活性。文献[11-18]研究了混合级联多端直流系统拓扑结构的运行特性及其控制保护策略。文献[14-15]提出了混合级联多端直流系统协调控制策略,该策略可避免故障时系统出现不平衡电流,实现LCC和MMC组之间的功率支援。文献[16]提出了采用桥臂电流不平衡保护与换流器分步闭锁策略,抑制站内交流故障下子模块过电压应力。

然而目前针对混合级联多端直流系统拓扑结构

的过负荷和故障穿越能力分析研究较少。特别地,当受端交流系统发生短路故障时,受端换流站高端LCC换相失败,LCC直流侧旁通,同时受端交流系统短路故障引起MMC组送出功率能力受阻,这将导致MMC阀元件产生过压过流问题,进而超过器件耐受能力。受端换流站分散接入交流电网的方案降低了LCC与MMC组间交流电场的耦合性,但若MMC组功率器件长期按照过负荷能力运行(即以1.5倍额定电压运行)^[17],当MMC组送出功率能力受阻时,仍会导致换流阀子模块所承受电压超过1.5倍额定电压,故障穿越能力受限,无法满足换流阀故障穿越的要求,进而危害系统的稳定运行。为了解决上述问题,文献[18]配置暂态能量耗散装置以便疏解交流系统短路故障时系统中盈余的功率。

本文从利用设备裕度满足系统消能需要的角度出发,设计了一种分阶段协调故障穿越控制策略。首先介绍了混合级联多端直流系统的拓扑结构和相应控制策略,并针对采用带有电压裕度的下垂组合控制器的混合级联多端直流系统,分析其故障穿越能力受限来源于整流器的反下垂特性,为此设计了电压裕度快通道控制环节和分阶段协调故障穿越控制策略。仿真结果表明所提策略可以实现MMC组内、逆变侧高端间、整流逆变两侧的功率协调和配合,提高了系统的故障穿越能力,证明了所提策略的有效性。

1 MMC组交流故障工况特性分析

混合级联多端直流系统拓扑结构和典型控制系统见附录A图A1—A4。单极等效电路示意图和各站电压-功率($U-P$)特性曲线如图1所示。图中:MMC₁为主导站;MMC₂和MMC₃分别为辅助站1和辅助站2;LCC-I、LCC-R分别为逆变侧高端LCC和整流侧LCC; P_{dc} 、 P_{dc_Mi} ($i=1,2,3$)和 P_{dc_R} 分别为直流侧注

收稿日期:2021-09-29;修回日期:2022-02-11

在线出版日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807027);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020084,J2020078)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807027) and the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.(J2020084,J2020078)

入MMC组、MMC_i的有功功率和LCC-R输出的有功功率; U_{dc_M} 、 U_{dc_1} 、 U_{dc_R} 分别为MMC组、LCC-I、LCC-R的直流电压; U_{th1} 、 U_{th2} 分别为第一、第二电压裕度; U_{dc_M0} 为MMC组的额定直流电压; P_{dc0} 为直流线路额定直流功率; $P_{dc_i}^{Mi}$ 为MMC_i的额定送出功率。

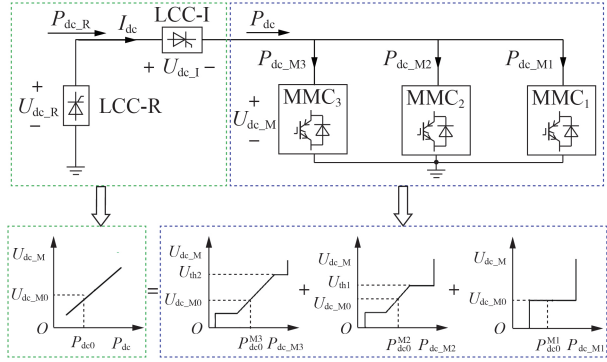


图1 单极直流电路等效示意图和各站U-P特性曲线

Fig.1 Equivalent schematic diagram of unipolar DC circuit and U-P characteristic curve of each station

混合级联多端直流系统拓扑具有辐射形多端系统的特点,优先考虑利用设备的电压裕度穿越故障,本文采用利用设备电压裕度的U-P下垂组合控制策略^[19],控制策略框图见附录A图A5。该控制策略覆盖1个MMC主导站及2个MMC辅助站组成的类三端直流系统,辅助站正常运行时采用定直流功率控制,一旦主导站因故障失去定直流电压控制作用,辅助站能够稳定地切换到定直流电压控制,并作为平衡节点吸收系统的盈余功率。

当整流侧控制系统采用定直流电流控制模式时,直流侧注入MMC组的有功功率 P_{dc} 可表示为:

$$P_{dc} = U_{dc_M} I_{dc0} \quad (1)$$

式中: I_{dc0} 为直流电流参考值。以MMC₁的额定送出功率 P_{dc0}^{M1} 、额定直流电流 $I_{dc0}/3$ 、额定直流电压 U_{dc_M0} 为基准值,可得标么化后各电气变化量的表达式为:

$$\Delta P_{dc} = 3 \Delta U_{dc_M} \quad (2)$$

式中: ΔP_{dc} 为 P_{dc} 变化量, ΔU_{dc_M} 为 U_{dc_M} 变化量,二者均为标么值。而当整流侧控制系统采用定直流功率控制模式时,直流侧注入MMC组的有功功率 P_{dc} 为:

$$P_{dc} = \frac{U_{dc_M}}{U_{dc_M} + U_{dc_10}} P_{dc_R0} \quad (3)$$

式中: U_{dc_10} 为LCC-I额定直流电压; P_{dc_R0} 为LCC-R输出的有功功率参考值。假设稳态下MMC组直流端口电压与LCC-I直流端口电压相等,即 $U_{dc_M0} = U_{dc_10}$,由式(3)可进一步计算得到标么化后各电气变化量表达式为:

$$\Delta P_{dc} = \frac{3}{4} \Delta U_{dc_M} \quad (4)$$

当MMC_i送出功率能力受阻时,忽略换流器损耗,直流系统功率盈余 ΔP_{sp} 可表示为:

$$\Delta P_{sp} = \Delta P_{dc} + \Delta P_{dc_M1} - \Delta P_{dc_M2} + \Delta P_{dc_M3} \quad (5)$$

式中: ΔP_{dc_M1} 为主导站功率缺额(故障前、后主导站输送功率差); ΔP_{dc_M2} 和 ΔP_{dc_M3} 分别为辅助站1和辅助站2故障前、后增发功率。由式(5)可知,当交流侧发生故障时,直流系统功率盈余由3种形式构成,分别是直流侧馈入功率、故障站功率缺额以及支援站增发功率。当功率缺额被直流馈入功率和增发功率完全补偿时,系统可充分吸收盈余功率,增发功率和直流馈入功率的补偿方式影响着系统吸收盈余功率的能力。其中,式(2)和式(4)表明,直流侧馈入MMC组的功率 ΔP_{dc} 随MMC两端直流电压升高呈线性增加。而单位电压下,相比于定直流功率控制模式,整流侧采用定电流控制模式会向MMC组注入更多的有功功率,加速升压过程,对MMC故障穿越控制有着更高要求。因此,本文针对定直流电流控制模式的整流侧控制系统,进行故障特征分析及故障穿越策略设计。

结合图1和式(2)、(5),当系统过渡到新的稳定状态时,直流电压稳定,无功功率盈余,即 $\Delta P_{dc} = 0$,可得故障站功率缺额 ΔP_{dc_M1} 与故障站直流电压变化量 ΔU_{dc_M} 的静态特征关系,如图2所示。

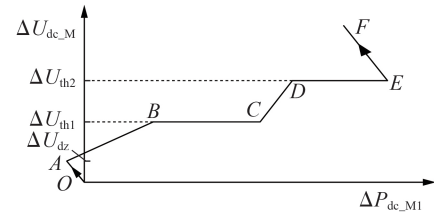


图2 故障下 ΔP_{dc_M1} 与 ΔU_{dc_M} 的特征曲线

Fig.2 Characteristic curve of ΔP_{dc_M1} and ΔU_{dc_M} under fault conditions

图2中, ΔU_{th1} 和 ΔU_{th2} 分别为第一电压裕度和第二电压裕度变化量,预先设置电压裕度可保证系统运行于最优运行点。OA段和EF段的斜率为-3,在这2个阶段下功率盈余将导致直流进一步攀升,具有反下垂特性,为非稳定状态,其中 ΔU_{dz} 为电压死区。AB段斜率为 $K_{M1} + K_{M2} - 3$ (K_{M1} 和 K_{M2} 分别为辅助站1和辅助站2的下垂斜率),CD段斜率为 $K_{M2} - 3$,这2段下垂曲线可以减小特性切换的暂态过程中出现的过调量。如果故障发生在辅助站1网侧,那么 $\Delta P_{dc_M2} - \Delta U_{dc_M}$ 特性关系曲线相较于图2缺少第一电压裕度,此时可简化AB段过程,辅助站2同理。

忽略电压死区,图2中各拐点的坐标分别为:

$$\begin{cases} B((K_{M1} + K_{M2} - 3)\Delta U_{th1}, \Delta U_{th1}) \\ C(\Delta P_{max} + (K_{M2} - 3)\Delta U_{th1}, \Delta U_{th1}) \\ D(\Delta P_{max} + (K_{M2} - 3)\Delta U_{th2}, \Delta U_{th2}) \\ E(2\Delta P_{max} - 3\Delta U_{th2}, \Delta U_{th2}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{\max}$ 为 MMC 单站送出的功率极限。混合级联系统在进行 MMC 容量设计时需考虑 $N-1$ 故障, 当主导站 MMC 退出运行时, 剩余的辅助站可以保证传输 1.5 倍正常运行功率, 即 $\Delta P_{\max}=0.5 \text{ p.u.}$ 。需要注意的是, 当 MMC 交流部分存在紧密的电气连接时, 主导站侧发生交流故障将导致辅助站交流电压一同跌落, 送出功率降低, 且交流部分耦合程度越强, 送出功率极限值 $\Delta P_{\max}$ 越小。

组合控制策略中, 以 MMC 组汇集母线为公共直流母线, 逆变侧高端 LCC 表现为直流恒压特性, 为作用于整流侧 LCC 的直流电压偏置, 系统可视为 LCC-3MMC 形式的辐射型多端直流系统。由图 2 中点 E 坐标可知, 该系统可承受的最大功率缺额极限为 $2\Delta P_{\max}-3\Delta U_{th2}$ 。对比于四端电压源换流器(VSC)系统, 单端故障下系统理论可承受的最大功率缺额为 $3\Delta P_{\max}$ 。根据上述分析, 这是由于整流侧 LCC 的反下垂特性导致系统功率补偿能力削减, 进而导致系统缺失功率支援功能, 同时直流侧馈入 MMC 组的功率变化量随电压升高线性增加, 进一步缩减了系统可承受的功率缺额极限量。

另一方面, 由于系统可承受的最大功率缺额极限为 $2\Delta P_{\max}-3\Delta U_{th2}$, 其大小与预先设置的最高电压裕度值成反比, 且与辅助站 1 和辅助站 2 设置的下垂斜率值无关。当 MMC 组内采用电压-功率下垂组合控制策略时, 系统无法吸收由整流侧 LCC 反下垂特性所引起的注入 MMC 组盈余功率量, 即 $3\Delta U_{th2}$ 。因此, 为实现整流侧与逆变侧之间的功率调控, 本文提出了混合级联多端直流系统分阶段协调穿越控制策略。

2 混合级联多端直流系统分阶段协调故障穿越策略

2.1 电压裕度快通道环节

图 3 为不同电压裕度下 ΔP_{dc_M1} 与 ΔU_{dc_M} 的特征曲线。由图可知, 不同电压裕度下的最大功率缺额极限值 $\Delta P_{dc_M1}^{\max}$ 落点均位于线段 EF 上, 这表明 $\Delta P_{dc_M1}^{\max}$ 随着第二电压裕度增大而减小。

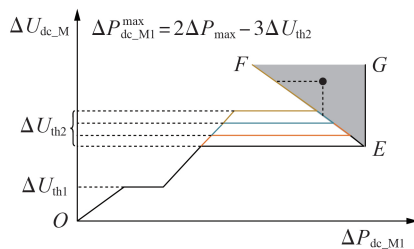


图3 不同电压裕度下 ΔP_{dc_M1} 与 ΔU_{dc_M} 的特征曲线

Fig.3 Characteristic curves of ΔP_{dc_M1} and ΔU_{dc_M} under different voltage margins

对于阴影区域 EFG 的任意一点, 向横轴投影, 与线段 EF 的交点为该直流电压下混合级联多端直

流系统可提供的最大补偿功率量(可承受的功率缺额极限), 此时功率缺额量明显大于功率补偿量, 盈余功率向子模块电容电压充电, 直流电压进一步提升, 运行点将离开预先设定的稳定区域。因此, 为保证混合级联多端直流系统的故障穿越能力, 穿越暂态过程中运行点要尽可能地远离区域 EFG , 预留足够的功率备用。

根据附录 A 图 A6 暂态运行点轨迹分析, 本文在图 A5 所示控制系统的基础上增加电压裕度快通道控制, 如图 4 所示。图中: $U_{dc_ref_max}$ 为最大直流电压参考值; P_s 、 P_{s_ref} 分别为交流侧有功功率及其参考值; I_{sd_ref} 为交流电流 d 轴分量参考值。由图可知, 电压裕度快通道控制无需经过积分环节进行电压裕度快、慢通道的选择切换, 节省了延迟时间 T_d , 而在进行快通道解锁时选择对应的比例积分(PI)参数, 保留了积分环节进而保证了输出参考值的连续性。快通道解锁的判定条件可利用已测数据做插值, 预测到达电压裕度的时刻, 当其位于预先设定的时间窗内时, 快通道解锁。

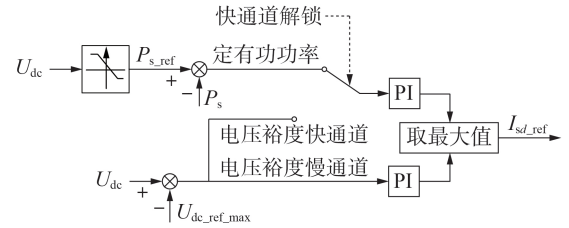


图4 电压裕度快通道控制框图

Fig.4 Block diagram of voltage margin fast channel control

2.2 分阶段故障穿越策略

由第 1 节分析可知, MMC 组受其交流功率送出限制, 仅依靠 MMC 组自身调节直流电压的能力有限, 而 LCC 中配有低压限流环节 VDCOL (low Voltage Dependent Current Order Limiter), 因此可通过配置 LCC-MMC 组的协调控制策略, 利用整流侧 LCC 的 VDCOL 配合实现进一步故障穿越。

根据整流侧 LCC 采用定直流电流控制模式时 VDCOL 是否触发, 混合级联多端直流系统的分阶段协调控制策略可以分为 2 个阶段, 如附录 A 图 A7 所示。第一阶段, 当故障站功率缺额小于等于 MMC 组最大功率补偿极限时, 由 MMC 组调节汇集母线处的直流电压至预先设定的电压裕度, 而逆变侧高端 LCC 调节直流线路处的直流电压, 防止直流线路过压。第二阶段, 当故障站功率缺额大于 MMC 组最大功率补偿极限时, MMC 直流母线电压超过预先设定的最大电压裕度, 逆变侧高端 LCC 切换至协调控制策略, 降低直流线路处的直流电压, 触发整流侧 LCC 的 VDCOL, 直流电流的减少使得馈入 MMC 的直流

功率降低,系统重新恢复至稳态。

本文在逆变侧高端LCC的定直流电压控制器中增设二次低压偏差控制环节VDEC(secondary low Voltage Dependent Error Contoller),控制框图及其控制特性分别如附录A图A8、A9所示。由图A9可知,VDEC的静态特性由2段不同斜率的线段组成。斜率较小的线段对应MMC组单独调控过程,此时逆变侧高端LCC以稳定输电线路母线电压为目标,则要求VDEC的斜率控制在一定范围内。斜率较大的线段对应LCC-MMC组协调控制过程,VDEC的输出量应能触发整流侧LCC的VDCOL,线段的斜率应与VDCOL相互配合。

LCC-MMC组协调控制过程中,逆变侧高端LCC直流端电压变化量 ΔU_{dc_I} 和MMC组直流端电压变化量 ΔU_{dc_M} 之间的关系可以描述为:

$$\Delta U_{dc_I} = -K_{VDEC} \Delta U_{dc_M} - C_{VDEC} \quad (7)$$

式中: K_{VDEC} 和 C_{VDEC} 分别为VDEC特性曲线中斜率较大线段的斜率和截距。

同时根据附录A图A10所示VDCOL静态特性曲线,直流电流变化量 ΔI_{dc} 将被限制为:

$$\Delta I_{dc} = \frac{K_{VDCOL}}{2} (\Delta U_{dc_I} + \Delta U_{dc_M}) - C_{VDCOL} \quad (8)$$

式中: K_{VDCOL} 和 C_{VDCOL} 分别为VDCOL特性曲线中的斜率和截距。

2.3 协调控制策略下的故障特性分析

整流侧LCC参与协调控制策略后,直流线路电压和直流电流在VDCOL的调节下过渡到新的稳态,则馈入MMC组的直流功率变化量可用式(9)近似。

$$\Delta P_{dc} \approx 3\Delta U_{dc_M} + 3\Delta I_{dc} \quad (9)$$

将式(7)和式(8)代入式(9)可得:

$$\Delta P_{dc} = \frac{3}{2} [2 - K_{VDCOL} (K_{VDEC} - 1)] \Delta U_{dc_M} - \frac{3}{2} K_{VDCOL} C_{VDEC} - 3C_{VDCOL} \quad (10)$$

进入协调控制前,辅导站和主导站MMC已经运行于功率输送的极限,将式(10)代入式(5),则馈入MMC组的直流功率变化量应满足:

$$\Delta P_{dc_M1} = K_{CORD} \Delta U_{dc_M} + \Delta P_{CORD} \quad (11)$$

式中: $K_{CORD} = -3[2 - K_{VDCOL} (K_{VDEC} - 1)]/2$,为曲线斜率; $\Delta P_{CORD} = 2\Delta P_{max} + 3K_{VDCOL} C_{VDEC}/2 + 3C_{VDCOL}$,为曲线截距。

假设协调控制下主导站网侧发生小扰动记为 $\Delta P'_{M1}$,则频域下MMC直流电压扰动为:

$$\Delta U'_{dc_M}(s) = \frac{1}{K_{CORD} + sC_{MMC}} \Delta P'_{M1}(s) \quad (12)$$

式中: C_{MMC} 为等效电容。式(12)表明该传递函数有一个极点,即 $-K_{CORD}/C_{MMC}$ 。则当 K_{CORD} 为正时,满足 $K_{VDCOL} (K_{VDEC} - 1) < 2$,此时可保证交流系统发生扰动时,协调控制系统仍能稳定于设定的运行点。

结合式(11),拓展可得分阶段协调控制策略下

故障主导站功率缺额变化量 ΔP_{dc_M1} 与MMC组直流电压变化量 ΔU_{dc_M} 的特征关系,如图5所示,图中 ΔU_{dc_I} 为拓展后的电压裕度值。如图中线段HI所示,LCC-MMC组分阶段协调控制策略提高了混合级联多端直流系统所能承受的最大功率缺额极限,加强了故障穿越能力。一方面,电压裕度控制中由于定电流侧控制反下垂特性造成的暂态过程失控的故障情况,可在协调控制作用下重新恢复稳定运行,如点a所示;另一方面,协调控制为功率缺额量超出MMC组内调节极限的故障提供了稳定运行点,如点b所示。由式(8)可进一步得出,第二阶段协调控制策略与故障点位置无关,仅与MMC组达到送出功率极限时的状态相关。

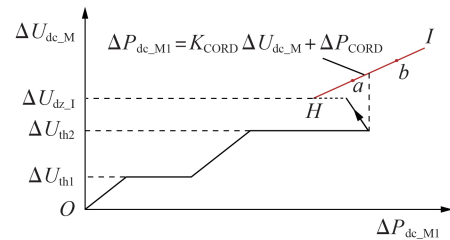


图5 分阶段协调控制策略下 ΔP_{dc_M1} 与 ΔU_{dc_M} 的特征曲线

Fig.5 Characteristic curve of ΔP_{dc_M1} and ΔU_{dc_M} under staged coordinated fault ride-through strategy

3 仿真验证

3.1 系统参数配置

在PSCAD/EMTDC上搭建附录A图A1所示混合级联多端直流系统仿真模型。直流输电线路额定电压为800 kV,额定直流电流为5 kA,MMC组额定直流电压为400 kV,单站额定功率为667 MW,桥臂子模块个数为218(实际投入个数为200),子模块电容值为18 mF。MMC直流控制系统下垂控制等环节及LCC直流控制系统VDCOL、VDEC等环节的参数配置见附录B表B1。根据附录B表B1,可绘制仿真系统模型的故障静态特性,如附录B图B1所示。

3.2 故障仿真分析

稳态运行方式下,MMC汇集母线电压为1.00 p.u.,主导站输出功率为0.93 p.u.,辅助站输出功率为1.00 p.u.,无功功率均为0。逆变侧高端LCC直流侧端电压为1.00 p.u.,输出功率为0.99 p.u.。在主导站变压器网侧设置三相对称故障,通过设置不同的接地电阻值模拟故障电压跌落深度,不同电压跌落深度下主导站换流器产生的功率缺额量不同,根据运行工况可以分为以下几个阶段。

1)电压跌落范围为[0.62,0.90] p.u.。

图6为故障工况下网侧电流 I_{ac} 和MMC组两端直流电压 U_{dc_M} 波形,图中 I_{ac} 和 U_{dc_M} 均为标么值。当电压跌落程度较低时,主导站可以通过增大网侧电

流输出以维持功率平衡。MMC组直流电压经过短暂波动后仍保持在额定工况下。故障前主导站输出功率为0.93 p.u.,下垂控制启动阶段可承受的功率缺额为-0.06 p.u.,通过电流最大限幅值1.60 p.u.可计算出,当电压跌落范围为[0.62,0.90] p.u.时,仅通过主导站的定直流电压控制即可实现这一阶段的故障穿越。

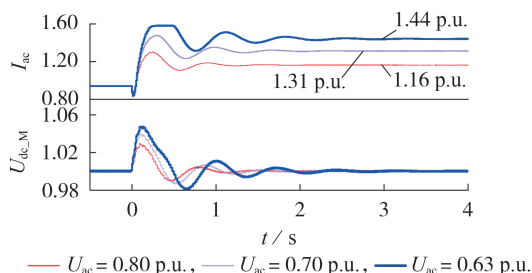


图6 故障工况下 I_{ac} 和 U_{dc_M} 波形($U_{ac} \in [0.62, 0.90]$ p.u.)

Fig.6 Waveforms of I_{ac} and U_{dc_M} under fault conditions($U_{ac} \in [0.62, 0.90]$ p.u.)

2) 电压跌落范围为[0.45,0.62) p.u.。

该故障工况下辅助站2的有功功率、直流电压波形如附录B图B2所示。由图可知,随着电压继续跌落,主导站交流电流达到限幅后,无法保证故障前后输出功率相同,直流系统出现功率盈余,MMC子模块电容电压充电,汇集母线电压攀升,待越过电压死区后,辅助站在下垂控制作用下增大送出功率,之后系统恢复稳定运行,随着故障程度加深,直流电压稳定运行点基本按照图B1中线段AB轨迹上升。值得注意的是,由于辅助站下垂控制采用的连续性死区而非阶跃死区,主导站交流侧功率缺额为负数时仍存在稳定工作点,其对应电压跌落范围为[0.58,0.62) p.u.以内的故障工况。

3) 电压跌落范围为[0.23,0.45) p.u.。

该故障工况下辅助站2的有功功率、直流电压波形如附录B图B3所示。由图可知,直流电压稳定于第一电压裕度(1.10 p.u.),这表明辅助站1已切换至电压裕度控制,代替主导站作为平衡节点,吸收系统的盈余功率。该阶段对应于图B1中的线段BC,考虑到变压器网侧压降及换流器损耗,点C横坐标存在约0.02 p.u.的误差。换流器损耗变化量可视为恒常量,严重故障后主导站和辅助站在控制器的作用下,于交流出口处表现为恒定电流源,其幅值为限幅值,换流器内部损耗大幅增加,等同于承担了部分直流侧的功率盈余。

4) 电压跌落范围为[0.12,0.23) p.u.。

该故障工况下辅助站2的有功功率、直流电压波形如附录B图B4所示。由图可知,当辅助站1达到其功率极限时,由辅助站2接管定直流电压控制,作为直流系统的平衡节点,直流电压稳定在预先设

定的第二电压裕度(1.15 p.u.),第二电压裕度预测时刻通过对电压值为1.12 p.u.和1.14 p.u.的时刻做线性插值得到,时间窗设置为0.30 s,比较时间窗和预测时刻判定快通道是否需要解锁。

附录B图B5对比了电压跌落至0.13 p.u.时,有、无配置电压快通道控制环节的直流电压波形图。由3.1节分析可知,仅依赖电压裕度慢控制环节时,需要经过2次长延时的PI输出量比较及解锁激活过程,暂态过程运行轨迹靠近最大功率补偿的极限,直流电压超调量容易威胁到功率器件的最大耐受耐压能力。而配置电压裕度快通道控制使得辅助站2的功率支援速度更快,能快速获得第二电压裕度附近MMC组内的紧急功率支撑,更小的电压超调量以及更加快速地稳定到预先设定的工作运行点保障了系统的稳定裕度。这一阶段对应图B1所示的线段DE,考虑到变压器网侧压降及换流器损耗,点E横坐标存在约0.02 p.u.的误差。

5) 电压跌落范围为[0,0.12) p.u.及主导站闭锁。

当发生严重故障超出电压裕度控制的穿越能力时,混合级联多端直流系统控制模式将会切换至协调控制模式。该工况下的MMC直流电压、线路直流电压、直流电流波形如附录B图B6所示。由图可知,故障下的MMC直流电压特性同下垂控制相同,电压稳定运行点随故障严重程度线性变化,变化曲线基本符合图B1中的线段HI。

协调控制下逆变侧母线电压和直流电流随着故障加重而下降,变化规律满足提前设定的静态曲线。主导站全站闭锁是功率缺额最严重的工况,相比于三相金属接地故障增加了换流器损耗的缺额量,最大缺额值达到0.97 p.u.。附录B图B7对比了发生三相金属接地后有、无VDEC时直流电压波形图。根据式(6)计算,主导站功率缺额为0.93 p.u.,显然超过了MMC组能承受的最大缺额极限值0.75 p.u.,在缺少泄能装置保护情况下,故障无法通过设备裕度实现穿越。而配置了VDEC后,当MMC组直流母线电压进入VDEC特性曲线的大斜率段时,送端LCC的VDCOL相应触发,送、受端协调控制提高了系统可承受的最大功率缺额极限值,实现了通过设备裕度完成故障穿越过程。

根据上述仿真结果,可得到本仿真模型在不同电压跌落深度下MMC直流电压的稳定运行点,如附录B图B8所示。该特性曲线由3条直线和2条下垂线组成,分别对应以上5个阶段,系统可穿越变压器网侧金属性接地故障及MMC单站闭锁的情况,MMC最大瞬时直流电压保持在1.33 p.u.以内,最大稳定运行点的直流电压为1.280 p.u.。仿真结果表明,本文提出的分阶段协调故障穿越策略避免了由于整流侧LCC对故障MMC组的反下垂特性带来吸

收系统盈余功率能力不足的问题,可保证系统的故障穿越能力。

4 结论

本文针对基于LCC-MCC组的混合级联多端直流输电系统在遭受不同程度故障时的静态特性进行了详细分析,并提出分阶段协调故障穿越控制策略。策略的第一阶段为MMC单独调控过程,此阶段可承受一定电压跌落深度下的故障工况,即故障站功率缺额小于MMC组最大功率补偿极限时,由MMC组调节汇集母线处的直流电压至预先设定的电压裕度,而逆变侧高端LCC调节直流线路处的直流电压,防止直流线路过压。第二阶段为LCC-MMC组共同调控过程,此阶段可承受MMC交流近端金属接地或主导站闭锁等严重故障工况,即故障站功率缺额大于MMC组最大功率补偿极限时,逆变侧高端LCC切换至协调控制策略,触发整流侧LCC的VDCOL,系统充分吸收盈余功率,直流线路电压稳定。

分阶段协调故障穿越控制策略给出了一种利用设备裕度抵御交流故障的保护方案,通过采用多个阶段的协调控制模式实现不同严重程度故障穿越,直流侧无需能量耗散支路,直流受端多个换流器按照预先制定的运行模式协调配合,疏散系统盈余功率,保证系统稳定运行。仿真结果表明,协调控制策略在不同故障深度下均能快速稳定过渡到预先设定的稳定运行点,提高了混联系统的故障穿越能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-9.
- [2] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 7-9.
- [3] 谢惠藩, 付超, 李诗旻, 等. 昆柳龙多端直流线路故障恢复及换流站在线退站的系统稳定特性分析[J]. 南方电网技术, 2021, 15(6): 7-14.
XIE Huifan, FU Chao, LI Shiyang, et al. Analysis on system stability characteristic of DC line fault recovery and converter station online disconnection of KLL MTDC[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(6): 7-14.
- [4] LI G, LIANG J, JOSEPH T, et al. Feasibility and reliability analysis of LCC DC grids and LCC/VSC hybrid DC grids[J]. IEEE Access, 2019, 7: 22445-22456.
- [5] 王曦, 李兴源, 魏巍, 等. 柔性直流和常规直流互联输电系统协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 102-108.
WANG Xi, LI Xingyuan, WEI Wei, et al. Coordinated control strategy for interconnected transmission system of VSC-HVDC and LCC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 102-108.
- [6] LI G, AN T, LIANG J, et al. Power reversal strategies for hybrid LCC/MMC HVDC systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(1): 203-212.
- [7] HALEEM N M, RAJAPAKSE A D, GOLE A M, et al. Investigation of fault ride-through capability of hybrid VSC-LCC multi-terminal HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 241-250.
- [8] 常东旭, 郭琦, 朱益华, 等. 多端混合直流与稳控系统的接口设计与仿真研究[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3772-3780.
CHANG Dongxu, GUO Qi, ZHU Yihua, et al. Interface design and simulation of multi-terminal hybrid HVDC and security and stability control system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3772-3780.
- [9] 刘杉, 余军, 贺之渊, 等. 基于VSC与LCC混合的多点传输直流输电系统拓扑结构研究与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2980-2988, 3148.
LIU Shan, YU Jun, HE Zhiyuan, et al. Research on the topology and characteristic of multi-terminal HVDC based on VSC and LCC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2980-2988, 3148.
- [10] 徐政, 王世佳, 李宇璇, 等. 适用于远距离大容量架空线路的LCC-MMC串联混合型直流输电系统[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 55-63.
XU Zheng, WANG Shijia, LI Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 55-63.
- [11] 杨硕, 郑安然, 彭意, 等. 混合级联型直流输电系统直流故障特性及恢复控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 166-172, 179.
YANG Shuo, ZHENG Anran, PENG Yi, et al. DC fault characteristic analysis and recovery control strategy for hybrid cascaded HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 166-172, 179.
- [12] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 一种基于直流断路器两端电压的混合级联多端直流输电断路器自适应重合闸方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2623-2631.
CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. An adaptive reclosure method for hybrid cascade multi-terminal HVDC circuit breaker based on two-terminal voltage of DC circuit breaker[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2623-2631.
- [13] 曾蕊, 李保宏, 刘天琪, 等. 受端多落点级联型混合直流输电系统协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 111-117.
ZENG Rui, LI Baohong, LIU Tianqi, et al. Coordinated control strategy of receiving-end multi-point cascaded hybrid DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 111-117.
- [14] 郭春义, 吴张曦, 赵成勇. 特高压混合级联直流输电系统中多MMC换流器间不平衡电流的均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6653-6663.
GUO Chunyi, WU Zhangxi, ZHAO Chengyong. Balancing control strategy for unbalanced current between multiple MMC converts in hybrid cascaded UHVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6653-6663.
- [15] 吕佳宁, 叶小晖, 杨明玉. 混合级联多端直流输电系统的功率协调控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 9-15.
LÜ Jianing, YE Xiaohui, YANG Mingyu. Power coordination control strategy for hybrid cascaded multi-terminal HVDC system[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 9-15.
- [16] 郭贤璐, 刘路路, 周杨, 等. LCC-MMC混合级联系统MMC换流器过电压应力抑制策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 412-419.
GUO Xianshan, LIU Lulu, ZHOU Yang, et al. Overvoltage mitigation control strategies of MMC converter in a hybrid LCC-MMC HVDC system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 412-419.

- [17] 韩坤,张磊,范彩云,等. 混合级联多端直流输电研究及其动态模型试验[J]. 电力电子技术,2020,54(5):1-3,8.
HAN Kun,ZHANG Lei,FAN Caiyun,et al. Hybrid cascaded multi-terminal direct current transmission research and its dynamic model test[J]. Power Electronics,2020,54(5):1-3,8.
- [18] 刘泽洪,王绍武,种芝艺,等. 适用于混合级联特高压直流输电系统的可控自恢复消能装置[J]. 中国电机工程学报,2021,41(2):514-524.
LIU Zehong,WANG Shaowu,CHONG Zhiyi,et al. Controllable and adaptive energy absorption device for hybrid cascaded UHVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(2):514-524.
- [19] 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.

作者简介:



喻建瑜

喻建瑜(1994—),男,硕士,主要研究方向为柔性直流的控制与保护(E-mail: yujianyu3210@163.com);

范栋琛(1993—),男,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: fdctc@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Staged coordinated fault ride-through strategy for hybrid cascaded multi-terminal DC system

YU Jianyu¹,FAN Dongchen¹,XU Kai²,KONG Xiangping¹,ZHENG Junchao¹,DAI Qiangsheng¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.,Nanjing 211103,China;

2. State Grid Corporation of China,Beijing 100031,China)

Abstract: The anti-droop characteristics of the rectifier in the hybrid cascaded multi-terminal DC system weaken the system capability of power surplus compensation, which leads to the limitation of fault ride-through capability. A protection scheme that relies on the equipment's own overcurrent capability to against AC faults is proposed, and fault ride-through in different degrees can be realized by the staged coordinated control strategy. Multiple different converters at the DC receiving end coordinate and cooperate according to the pre-established operating modes to evacuate the system surplus power that caused by the blockage of the modular multilevel converter group. The simulative results show that the coordinated fault ride-through strategy can realize the rapid and stable transition to the preset stable operating point under different fault depths without the need to configure the discharge device on the DC side, which improves the fault ride-through capability of the hybrid cascaded multi-terminal DC system.

Key words: hybrid cascaded multi-terminal DC system; fault ride-through; voltage margin; low voltage dependent current order limiter

附录 A

LCC-MMC 混合级联多端直流输电系统拓扑结构如图 A1 所示。该系统为正负双极带接地极的接线架构，采用送端 LCC、受端 LCC 与真双极 MMC 组级联的合级联型拓扑。整流侧 LCC 单极由双 12 脉动换流器级联构成，逆变侧高端为 12 脉动 LCC，低端则由 3 个半桥型子模块 MMC 并联组成 MMC 组，于直流侧汇集到直流电压母线上。逆变侧高端 LCC 与低端 MMC 组级联形式具备分散接入交流电网的条件，各疏散 50% 的直流功率，1 个常规 LCC 及 3 个 MMC 接入可满足多负荷中心、多落点需求，且运行方式多样，可运行于双极对称、单极全压或半压等运行方式下。

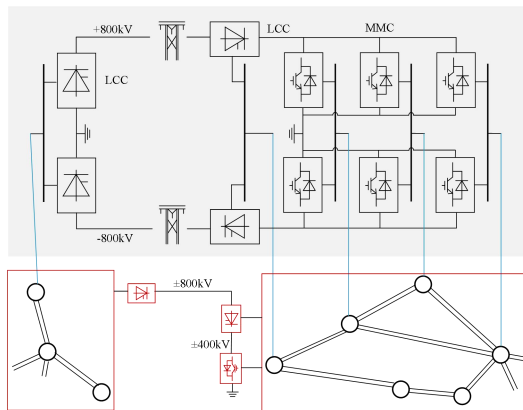


图 A1 混合直流输电系统拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of hybrid DC transmission system

如图 A2 所示,整流侧 LCC 直流控制系统设置电压控制器与电流控制器,电压控制器常设有 0.3 p.u.的裕度,使整流侧在常规运行状态下选择电流控制器,电流控制器有定电流和定功率 2 种控制模式。

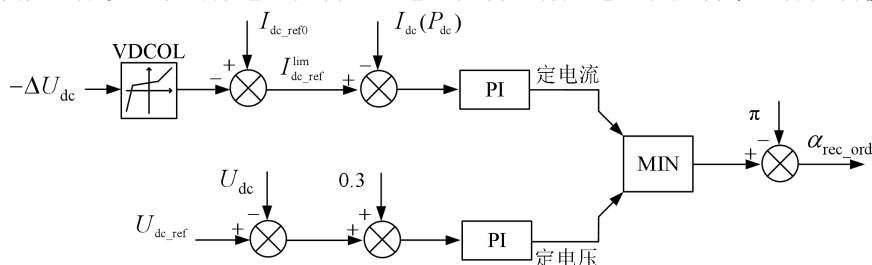


图 A2 整流侧 LCC 直流控制系统框图

Fig.A2 Block diagram of LCC DC control system at rectifier side

如图 A3 所示, 逆变侧 LCC 增设最小熄弧角控制器, 控制器间的配合过程与整流侧相似, 逆变侧的电流控制器也常设有 0.1 p.u. 的裕度, 使逆变侧在常规运行状态下选择电压控制器。

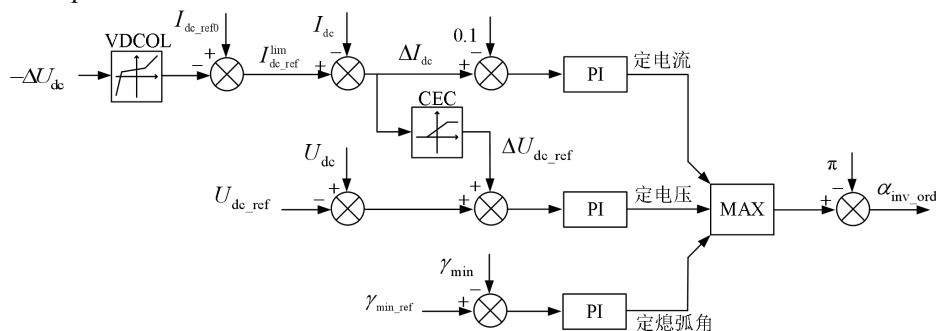


图 A3 逆变侧 LCC 直流控制系统框图

Fig.A3 Block diagram of LCC DC control system at inverter side

如图 A4 所示, MMC 直流控制系统包括锁相环、相模变换、双闭环控制器、环流抑制控制器。锁相环跟

踪变压器网侧交流电压，生成基频静止坐标系和负序 2 倍频静止坐标系。基于基频静止坐标系，双闭环控制器生成基频差模电压调制指令值；基于 2 倍频静止坐标系，环流抑制控制器生成 2 倍频共模电压调制指令值。经过反派克变换，组合共差模电压调制指令值生成 6 桥臂电压调制指令值。场站解闭锁后，定电压站选择定直流电压控制运行方式，定功率站选择定有功功率控制运行方式。

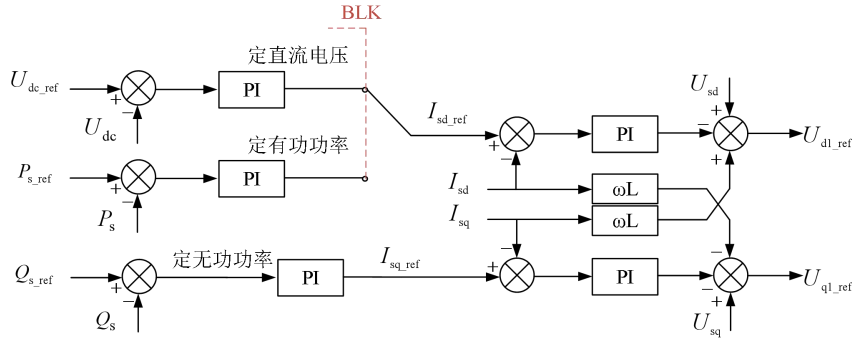


图 A4 低端 MMC 直流控制系统框图

Fig.A4 Block diagram of low-terminal MMC DC control system

如图 A5 所示，下垂控制与裕度控制间通过各自的 PI 环节输出量比较完成控制器的切换过程。正常运行状态下，下垂控制输出 d 轴直流参考值，最大电压裕度控制输出电流最小限幅值。故障后由于积分环节正输入量，电压裕度控制输出持续增大，直至超过下垂控制输出量，下一时刻比较环节切换至电压裕度控制。

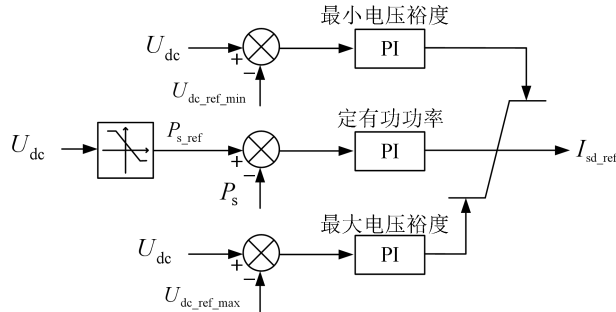


图 A5 电压裕度与电压-功率下垂组合控制框图

Fig.A5 Block diagram of combination of voltage margin and voltage-power droop control

运行点轨迹示意图如图 A6 所示，图中点 a 、点 b 为 2 次电压裕度控制激活时刻，相比于 2 次电压越限时刻分别延迟了所需积分时间 T_{d1} 、 T_{d2} 。更短的延时时间、有助于辅助站尽早进行功率支援，运行轨迹点 b 下移，直流电压超调量减小。而延时时间越长，暂态过程的运行轨迹越接近线段 EF (最大功率补偿能力)，系统的稳定裕度越小。混合级联多端直流系统的分阶段协调控制策略如图 A7 所示。

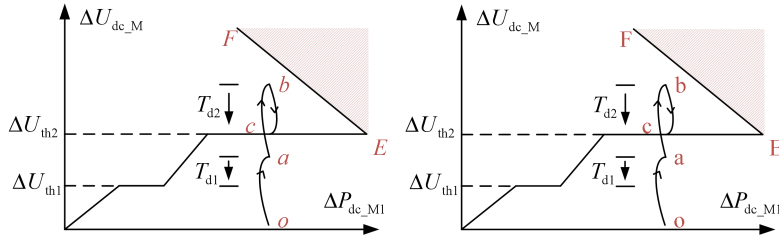


图 A6 暂态过程中运行点轨迹示意图

Fig.A6 Schematic diagram of trajectory of operating point during transient process

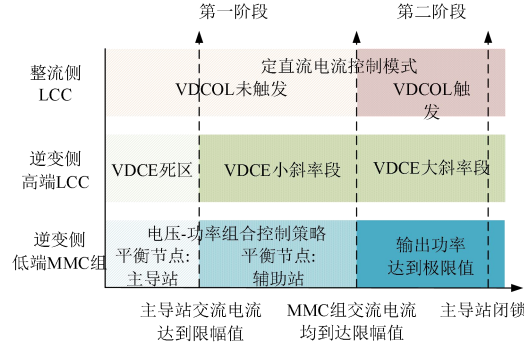


图 A7 各阶段故障穿越协调控制策略

Fig.A7 Coordinated control strategy of fault ride-through in various stages

本文在逆变侧 LCC 定直流电压控制器增配的二次控制低压偏差环节如图 A8 所示，由计算电压指令值变化量 $\Delta U_{dc_I}^{ref}$ 。低压偏差环节的静态特性见附录 A 图 A9。常规直流中配有低压限流控制功能，低压限流控制环节的静态特性见附录 A 图 A10。

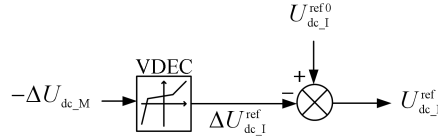


图 A8 高端 LCC 低压偏差控制框图

Fig.A8 Block diagram of voltage dependent error controller

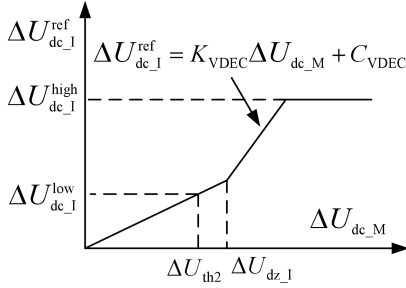


图 A9 VDEC 环节静态特性

Fig.A9 Static characteristics of VDEC

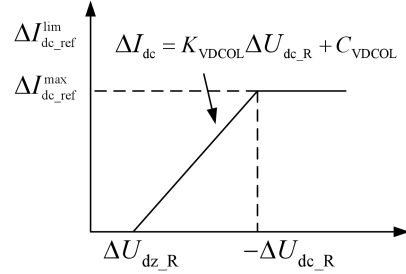
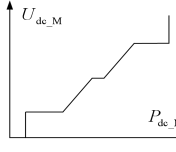
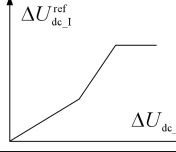
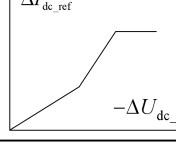
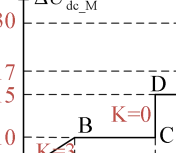


图 A10 VDCOL 环节静态特性

Fig.A10 Static characteristics of VDCOL

附录 B

表 B1 主要控制环节参数配置

Table B1 Parameter configuration of main controller			
项目	参数	数值	静态特性
下垂特性	下垂死区	0.02 p.u.	
	辅助站 1 下垂斜率	3.00	
	辅助站 2 下垂斜率	3.00	
电压裕度	电流限幅	1.60 p.u.	
	辅助站 1 电压裕度	1.10	
	辅助站 2 电压裕度	1.15 p.u.	
电压偏差	第一段死区	0.02 p.u.	
	第一段斜率	1.00	
	第二段起始点	0.17 p.u.	
	第二段斜率	3.52	
最大电压偏差量	最大电压偏差量	0.40 p.u.	
	第一段死区	0.05 p.u.	
	第一段斜率	2.00	
	第二段起始点	0.25 p.u.	
低压限流	第二段斜率	0.25	
	最大电流偏差限幅	0.45 p.u.	

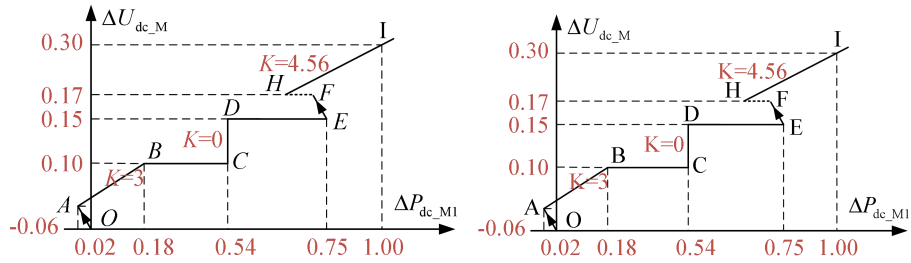


图 B1 仿真模型 ΔP_{dc_M1} 与 ΔU_{dc_M} 的特征关系曲线

Fig.B1 Characteristic curve of ΔP_{dc_M1} and ΔU_{dc_M} of simulation model

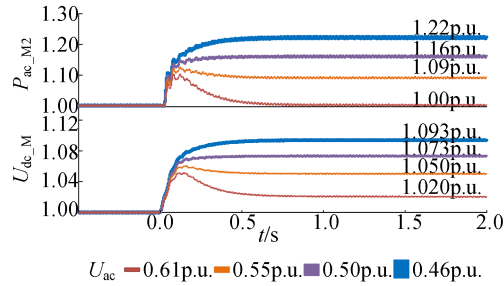


图 B2 故障工况下辅助站 2 的有功功率、直流电压波形($U_{ac} \in [0.45, 0.62]$ p.u.)

Fig.B2 Waveforms of active power in second auxiliary station and DC voltage under fault conditions($U_{ac} \in [0.45, 0.62]$ p.u.)

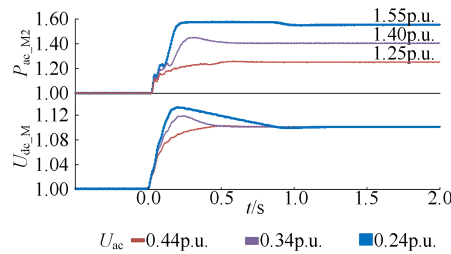


图 B3 故障工况下辅助站 2 的有功功率、直流电压波形($U_{ac} \in [0.23, 0.45]$ p.u.)

Fig.B3 Waveforms of active power in second auxiliary station and DC voltage under fault conditions($U_{ac} \in [0.23, 0.45]$ p.u.)

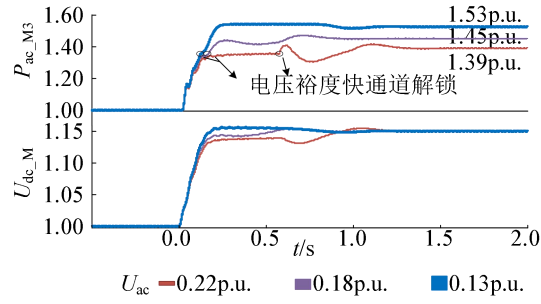


图 B4 故障工况下辅助站 2 的有功功率、直流电压波形($U_{ac} \in [0.12, 0.23]$ p.u.)

Fig.B4 Waveforms of active power in second auxiliary station and DC voltage under fault conditions($U_{ac} \in [0.12, 0.23]$ p.u.)

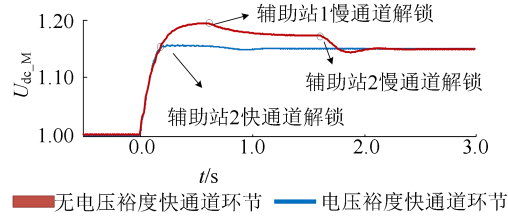


图 B5 有、无电压裕度快通道控制的 MMC 直流电压波形

Fig.B5 Waveforms of MMC DC voltage with and without voltage margin fast channel control

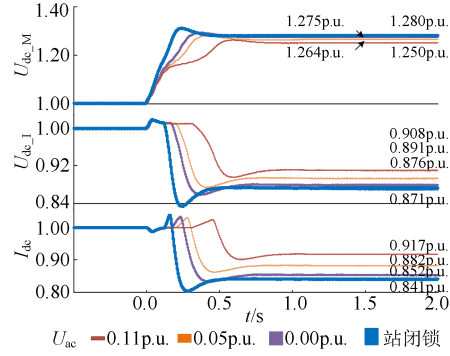


图 B6 故障工况下的 MMC 直流电压、线路直流电压、直流电流波形($U_{ac} \in [0, 0.12]$ p.u.)

Fig.B6 Waveforms of MMC DC voltage, DC line voltage and DC current under fault conditions($U_{ac} \in [0, 0.12]$ p.u.)

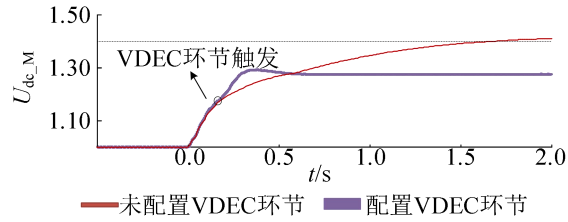


图 B7 有、无 VDEC 环节的 MMC 直流电压波形

Fig.B7 Waveforms of MMC DC voltage with and without VDEC control

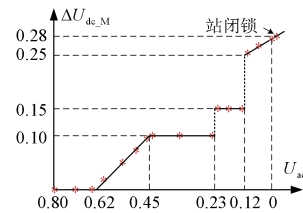


图 B8 不同电压跌落下的 MMC 直流电压静态特性曲线

Fig.B8 Static characteristic curves of MMC DC voltage under different voltage drop