

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210253

特高压混合级联系统受端交流故障问题分析

刘晨^{1,2}, 孙攀磊^{1,2}, 刘旭辉^{1,2}, 吴庆范^{1,2}, 曹森^{1,2}, 霍城辉^{1,2}, 卢麒^{1,2}

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 受端混合级联直流输电系统具有经济性高、灵活性强等诸多优势, 应用前景十分广泛。当其受端 VSC 发生交流系统故障时, 换流阀功率输送能力减弱, 此时, 整流站功率持续输出会加剧直流侧的功率盈余, 造成 VSC 换流器电压急剧升高。故障结束后, 系统需要较长时间恢复功率正常输送, 严重影响系统的正常运行和稳定性。针对特高压混合级联系统受端换流器发生交流故障时直流侧过电压问题及故障结束后的功率恢复问题, 提出了电压-功率协同控制策略及基于受端交流电压变化的交流低压限流控制策略。最后采用真实控制保护装置搭建基于 RTDS 仿真系统的硬件在环仿真平台, 验证了所提策略的可行性。

关键词: 特高压混合级联; 交流故障; 直流过压; 故障恢复; RTDS

Analysis of AC faults in the receiving-end of a hybrid cascaded multi-terminal HVDC system

LIU Chen^{1,2}, SUN Panlei^{1,2}, LIU Xuhui^{1,2}, WU Qingfan^{1,2}, CAO Sen^{1,2}, HUO Chenghui^{1,2}, LU Qi^{1,2}

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The receiving-end hybrid cascaded multi-terminal HVDC system has a wide range of application scenarios because of its economy, flexibility and many other advantages. When an AC system failure occurs in receiving-end of an inverter VSC station, the power transmission capacity of the VSC is weakened, and during the fault, the continuous output power of the rectifier station will aggravate the power surplus on the DC side, resulting in a sharp increase in VSC converter voltage. After the failure, the system takes a long time to restore power to normal delivery, seriously affecting the normal operation and stability of the system. Aiming at the problem of overvoltage on the DC side and the power recovery problem when the AC fault occurs in the receiving end converter of the hybrid cascaded multi-terminal HVDC system, this paper proposes a voltage-power coordinated control strategy and an AC low voltage based on the change of the receiving end AC voltage. It uses real control and protection devices to build a hardware-in-the-loop simulation platform based on the RTDS simulation system, which verifies the feasibility of the proposed strategy.

This work is supported by the Major Science and Technology Project of Henan Province: Research on Key Technologies and Equipment Development of VSC-UHVDC Power Transmission (No. 191110210900).

Key words: hybrid cascaded multi-terminal HVDC; AC faults; DC overvoltage; recovery; RTDS

0 引言

近年来, 基于电压源型换流器的柔性直流输电技术(VSC-HVDC)为直流输电提供了新的发展方向, 其功率控制更加灵活、独立, 可接入无源网络, 同时具有限制短路电流、防止大规模停电的作用^[1]。目前仅国内就已形成7条高压柔性直流输电工程, 单站容量最高达到3 000 MW。然而, 柔性直流输

电系统的容量和电压等级较低, 直流线路故障穿越须依赖额外设备或改进换流器拓扑, 因而其在特高压直流输电领域缺乏成熟的应用方案^[2-5]。为此, 将传统直流输电换流器LCC与柔性直流输电换流器VSC灵活组合, 形成了能够同时发挥LCC-HVDC成本低、损耗小、容量大以及VSC-HVDC无换相失败^[6-7]、控制灵活^[8-9]等技术优势的新型混合直流输电技术。该技术逐步成为当前直流输电领域的研究热点, 也是未来电网发展的重要方向。

混合直流输电系统通过LCC和VSC的不同组合型式, 可形成不同类型的系统方案, 以适应不同

基金项目: 河南省重大科技专项项目资助“特高压柔性直流输电关键技术研究及装备研制”(191110210900)

的应用场合^[10-11]。其中, 混合级联型 LCC-VSC 直流输电系统, 为特高压直流系统提供了一种更为经济、灵活、快捷的输电方式。混合级联型 LCC-VSC 直流输电系统特点为一端采用传统直流换流器 LCC, 一端采用 LCC 与多个并联的柔性直流换流器 VSC 混合级联, 具有多重优势: 充分发挥特高压直流系统大容量、远距离输电优势, 实现大规模能源基地电力高效、经济外送^[12]; LCC 和 VSC 混合级联可在直流线路故障下利用 LCC 自然阻断故障电流, 从而避免 VSC 换流器过流; 受端 VSC 具备快速、独立控制无功功率的能力^[13-15], 有助于稳定交流系统电压, 抑制 LCC 换相失败; 采用多个 VSC 并联能有效地应对当前 VSC 换流单元容量较小、功率传输能力无法比拟 LCC 的问题。

文献[16]阐述了特高压混合级联直流输电系统的拓扑结构及运行特点, 文献[17]介绍了该种系统的直流故障特性及恢复策略, 文献[18]分析研究了混合级联直流输电系统的暂态电流特性, 文献[19]针对该系统运行故障中存在的过压等特殊工况, 提出了利用一种大容量可控自恢复消能装置来提升系统暂态性能的方案。文献[20]研究了三种特高压混合级联控制系统运行时的交流故障特征, 分析研究了当受端接入相互耦合的交流电网时交流故障的特征, 但未考虑高端 LCC 发生换相失败时对低端 VSC 换流器过电压水平的影响, 以及故障消失后系统功率恢复输送的问题。

本文基于受端接入耦合交流母线的特高压混合级联输电系统, 分析了受端系统发生交流故障时 LCC 换相失败对 VSC 子模块过电压水平及系统恢复特性的影响。针对故障期间 VSC 直流侧功率盈余的问题, 提出了改善逆变侧交流故障特性的电压-功率协同控制策略。为实现故障结束后系统快速恢复功率, 提出了改善系统恢复特性的交流低压限流控制策略。最后搭建了基于 RTDS 仿真系统的硬件在环仿真平台, 对所提策略进行试验验证。结果表明所提策略可有效降低故障期间 VSC 换流器的过电压水平, 缩短故障结束后系统恢复时间。

1 特高压混合级联直流输电系统

1.1 系统结构

特高压混合级联直流输电系统送端由两个 12 脉动 LCC 换流器串联而成。受端系统由高端的 12 脉动 LCC 换流器与低端 VSC 换流器串联组成。为了与 LCC 换流器的输送容量相匹配, 低端通常由多个 VSC 换流器并联组成。对于 ±800 kV/8 000 MW 混合级联特高压直流工程来说, 低压端由 3 个 VSC

构成是最优的方案^[15]。各个 VSC 换流器通过快速开关 HSS 相互连接。其单极系统拓扑结构如图 1 所示。

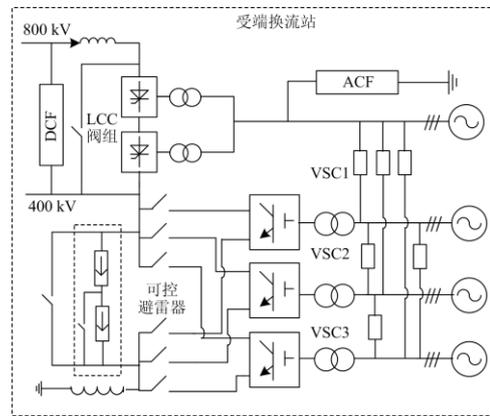


图 1 特高压混合级联输电系统受端拓扑

Fig. 1 Topology of receiving-end of hybrid cascaded multi-terminal HVDC system

1.2 逆变侧交流系统

特高压混合级联直流输电系统逆变侧的 LCC 换流器和 VSC 换流器采用分布式方式连接到不同的交流母线, 以减少交流故障下 LCC 换流器和 VSC 换流器间相互耦合的影响。但交流母线间通常存在电气耦合, 特别是在电气距离较近的情况下, 单个换流器的交流系统发生故障, 也会导致其余换流器的交流母线电压发生不同程度的下降。本文研究的特高压混合级联直流输电系统受端各节点对地和各节点之间的等值阻抗如表 1 所示。

表 1 受端电网节点等值阻抗

Table 1 Equivalent impedance of the receiving end grid node

换流站	LCC1	VSC1	VSC2	VSC3
	阻抗/Ω	阻抗/Ω	阻抗/Ω	阻抗/Ω
LCC1	2.04+j9.70	j350.54	j64.66	j26.43
VSC1	—	1.67+j8.27	j344.76	j156.48
VSC2	—	—	4.47+j12.12	0.13+j7.57
VSC3	—	—	—	8.04+j13.57

1.3 基本控制策略

正常运行时, 整流侧 LCC 换流器运行在直流电流控制模式, 逆变侧 LCC 换流器和其中一个 VSC 换流器运行在定直流电压控制模式, 其他 VSC 换流器运行在有功功率控制模式。逆变侧运行在定直流电压控制模式的 LCC 换流器和 VSC 换流器的直流电压参考值是相同的。

LCC 换流器的控制逻辑如图 2 所示, 其中 I_{dc_ref} 为 LCC 的直流电流参考值, I_{dc} 为 LCC 的直流电流实际值, U_{dc_ref} 为直流电压参考值, U_{dc} 为 LCC 换流器直流电压实际值。当系统运行在整流模式时,

PI 控制器的输入取直流电流误差和直流电压误差的较小值, 为了使系统在稳态运行时处于直流电流控制模式, 整流侧直流电压参考值叠加了电压裕度 U_{marg} 。当系统运行在逆变模式时, PI 控制器的输入取直流电流误差、直流电压误差、熄弧角误差的较大值, 为使系统在稳态运行时处于电压控制模式, 逆变侧直流电流参考值叠加了电流裕度 I_{marg} 。PI 控制器的输出经过反余弦变换产生触发角。

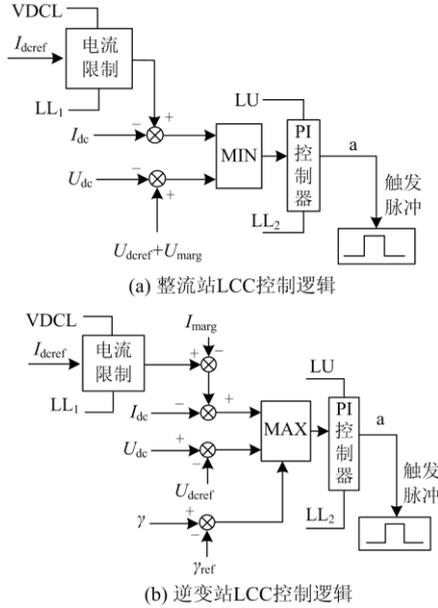


图 2 LCC 换流器控制逻辑
Fig. 2 LCC converter control logic

VSC 换流器外环有功控制逻辑如图 3(a)所示, 当系统运行在定直流电压控制模式时, VSC 换流器直流电压参考值 $U_{\text{dc_ref}}$ 与 VSC 换流器直流电压实际值 U_{d} 的偏差送入 PI 控制器, 控制器输出叠加有功功率参考值 P_{ref} 后, 得到内环电流参 d 轴考值 $i_{\text{dc_ref}}$ ^[21-22]。当 VSC 换流器运行在有功功率控制模式时, 有功功率参考值 P_{ref} 与有功功率实际值 P 的偏差积分, 结果叠加有功功率参考值 P_{ref} 后得到内环电流 d 轴参考值 $i_{\text{d_ref}}$ 。VSC 换流器外环无功控制逻辑如图 3(b)所示, 系统无功功率参考值 Q_{ref} 与无功功率实际值 Q 偏差经积分后, 积分结果与无功功率参考值 Q_{ref} 相加, 得到内环电流 q 轴参考值 $i_{\text{q_ref}}$ 。

内环电流的控制框图如图 3(c)所示, 其中, u_{sd} 为网侧电压 d 轴分量, u_{sq} 为网侧电压 q 轴分量, i_{d} 为网侧电流 d 轴分量, i_{q} 为网侧电流 q 轴分量。 ω 为电网角频率, L 为桥臂电感。内环电流参考值 $i_{\text{d_ref}}$ 、 $i_{\text{q_ref}}$ 与实际值 i_{d} 、 i_{q} 的偏差送至 PI 控制器调解输出后, 将 d 轴和 q 轴解耦, 最终结果经派克反变换得到三相调制波 MOD_A、MOD_B、MOD_C^[23]。

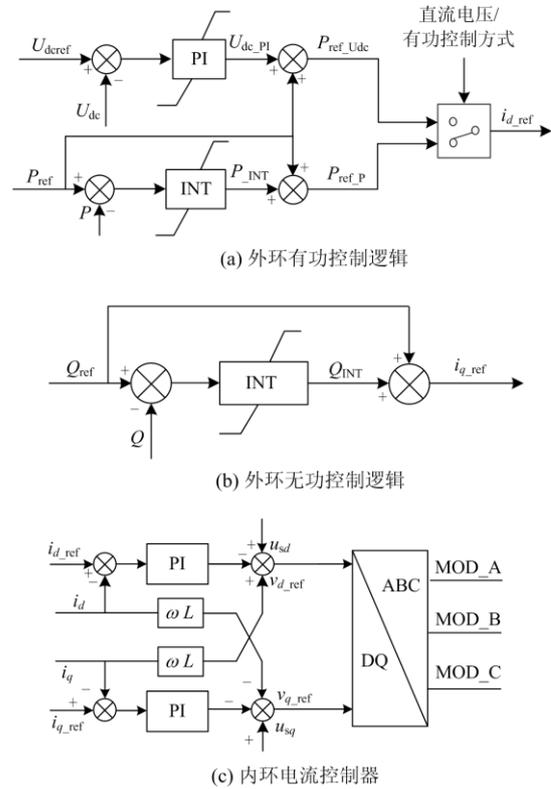


图 3 VSC 换流器控制逻辑
Fig. 3 VSC converter control logic

2 交流系统故障分析

稳态运行时, 特高压混合级联直流输电系统受端 LCC 换流器和 VSC 换流器的直流电压相等, 因而受端高低端换流器的直流电压, 直流电流存在如式(1)关系。

$$\begin{cases} U_{\text{dc_INV}} = U_{\text{dc_LCC}} + U_{\text{dc_VSC}i} \\ I_{\text{dc_LCC}} = I_{\text{dc_L}} = \sum_{i=1}^3 I_{\text{dc_VSC}i} = \frac{U_{\text{dc_REC}} - U_{\text{dc_INV}}}{R_L} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{\text{dc_LCC}}$ 为逆变站 LCC 换流器的端口电压; $U_{\text{dc_VSC}i}$ ($i=1,2,3$) 为逆变站 VSC 换流器的端口电压; $I_{\text{dc_L}}$ 为直流母线电流; $I_{\text{dc_LCC}}$ 为逆变站 LCC 端口电流; $I_{\text{dc_VSC}i}$ ($i=1,2,3$) 为逆变站相应换流器的 VSC 端口电流; $U_{\text{dc_REC}}$ 与 $U_{\text{dc_INV}}$ 分别为整流站与逆变站的极母线电压; R_L 为线路电阻。

对于 VSC 换流器, 当某一换流器所接入的交流母线发生接地故障时, 将导致交流母线电压下降。根据式(2)可知, 故障发生后, 交流母线电压 U_{s} 急剧下降, 造成换流器向交流电网输送功率 $P_{\text{ac_VSC}i}$ ($i=1,2,3$) 受限, 此时由于站间通信延时的存在, 送端 LCC 控制器无法快速响应, 降低输出功率。VSC 换流器从直流侧接收功率 $P_{\text{dc_VSC}i}$ ($i=1,2,3$) 不

能及时下降, 进而引起 VSC 换流器端口电压的升高。其中 U_C 为换流器输出电压, δ 为 U_S 与 U_C 的夹角, X 为换流器与交流母线间的连接电抗, C_{eq} 为 VSC 换流器等效电容。

$$\begin{cases} P_{ac_VSCi} = 3 \frac{U_S U_C \sin \delta}{X} \\ U_{dc_VSCi} = \sqrt{\frac{2}{C_{eq}} \int (P_{dc_VSCi} - P_{ac_VSCi}) dt} \end{cases} \quad (2)$$

在受端交流母线相互耦合的情况下, 某一交流母线的故障会造成每一条交流母线电压不同程度的跌落, 逆变侧高端 LCC 换流器的熄弧角 γ 可以表示为

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kI_{dc}X_C}{U_{ac}} + \cos \beta\right) - \varphi \quad (3)$$

式中: k 为变流变压器的变比; I_{dc} 为直流电流; X_C 为换相电抗; U_{ac} 为交流母线电压的有效值; β 为 LCC 控制系统参数的超前触发电角; φ 为系统发生故障, 并使换相线电压过零点前移角度。

从式(3)可以看出, 当逆变器侧 LCC 交流系统发生电压骤降时, γ 会减小。当 γ 减小至低于换流阀的最小熄弧角(大约 7.2°)时, 将引发逆变侧 LCC 的换相失败, 导致受端电网交流电压与频率的大幅波动^[24-25], 无法维持 LCC 端口直流电压, 造成其直流电压 U_{dc_LCC} 急剧下降^[26-27], 受端 LCC 换流阀接收功率急剧降低。根据式(1), 系统直流电流 I_{dc_L} 将迅速增大, 进而造成 VSC 的直流侧的输入功率显著增加, 引起 VSC 换流器更为严重的过压。

3 故障抑制策略

从故障特性可以看出, 交流故障造成的电压下跌, 影响到受端系统功率送出能力, 引发送受两端功率的不匹配, 造成系统短暂失稳, 引起换流器端口过压以及功率恢复过于缓慢的问题。因此, 抑制故障对系统的影响, 可以从以下两个方面入手:

- 1) 提高故障时受端换流器吸收功率, 减少功率传输能力的损失;
- 2) 加快送端换流器的响应速度, 降低送端换流器出力。

3.1 电压-功率协同控制策略

当受端某一 VSC 换流器发生交流母线电压接地故障时, 由于各站交流母线间存在一定程度的电气隔离, 相较于故障换流器而言, 其余 VSC 换流器仍具有较强的功率输送能力。为了充分利用并联 VSC 的优势, 当直流电压增加时, 可适当提高运行在有功率控制模式下的非故障换流器的输出功

率, 以减少直流侧的功率盈余, 达到稳定直流电压的目的。

详细控制策略如图 4 所示, 当直流电压实际值 U_{dc} 相较于参考值 U_{dc_ref} 的偏移量未超过上限 X 时, 送入调节器值 U_{dc_H} 为 0, 有功功率控制器运行在正常模式上。当直流电压实际值与参考值偏差由于故障或干扰而超出上限时, U_{dc_H} 将根据直流过电压情况按照一定比例增大, VSC 换流器最终接收的有功功率指令也会增大。内环电流控制器的参考值 P_{ref_P} 随之增大, 使非故障换流器吸收更多的盈余功率, 从而达到抑制直流侧过电压的目的。其中 P_H 为盈余功率控制器上限, 其计算方法如式(4)所示, U_C 为交流母线正序电压幅值, U_{CB} 为交流母线正序电压额定值, P_{max} 为换流器最大可输送有功功率, P_{ref} 为当前有功功率参考值。当检测到本站换流器发生交流故障时, U_{dc_H} 上限切换为 0, 电压-功率协同控制器退出, 避免因换流器提高功率输出造成交流故障扩大。

$$P_H = \frac{U_C}{U_{CB}} P_{max} - P_{ref} \quad (4)$$

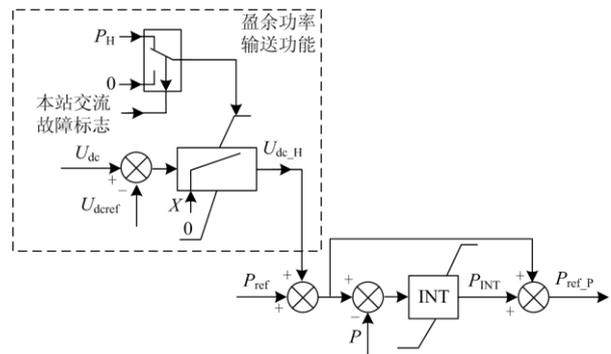


图 4 电压-功率协同控制策略

Fig. 4 Voltage-power coordinated control strategy

3.2 交流低压限流控制策略

传统的 LCC 直流输电系统, 当受端发生交流故障时, 交流电压跌落会引起换相失败, 造成直流母线电压降低, 直流电流增大。针对该问题, 常规方案是在送端 LCC 配置低压限流控制器, 当电压跌落时限制 LCC 故障出力, 抑制直流过流。而特高压混合级联直流输电系统, 逆变侧 VSC 换流器交流系统故障越严重, 直流电压越高^[28], 传统的基于直流电压的低压限流控制器无法起到应有的作用。相反, 当受端 LCC 换流器所接入交流系统发生故障时, VSC 换流器仍具有较强的功率输送能力, 但交流电压畸变导致逆变侧 LCC 换相失败, 引起直流电压跌落明显, 送端直流电压低压限流控制器动作, 限制

整流侧功率，极易造成系统短时功率中断，引起故障结束后功率恢复时间过长。

文献[19]提到了交流故障发生时通过强制移相来减少整流站功率输送的方案，但未给出具体的试验数据。而且系统移相后需要等待较长的去游离时间^[29]，影响系统恢复特性。考虑故障清除时，VSC已存在过电压，常规的LCC定电压恢复策略，会导致直流母线的过电压进一步增大，无法适用于特高压混合级联直流输电系统。本文提出一种基于直流电压与受端交流电压的低压限流控制策略来改善系统在交流故障中的运行特性。

图5为基于直流电压与受端交流电压的低压限流控制框图，在原有的直流电压低压限流策略的基础上，增加基于受端交流电压的低压限流策略。图中， U_{dc} 为直流电压， U_{psf_LCC} 、 U_{psf_VSCi} ($i=1,2,3$)分别为逆变侧LCC换流器及各VSC换流器正序交流电压幅值。逆变侧各换流器正序交流线电压幅值取最小值后，经线性环节处理得到低交流电压直流电流参考限值 I_{VDCL2} 。 T_1 和 T_2 为直流电压惯性环节时间常数，惯性环节的作用是故障开始时快速限流，故障结束时平缓提升直流电流。取直流低压限流的输出 I_{VDCL1} 和交流低压限流输出 I_{VDCL2} 的较小值作为整流侧直流电流参考值限值，从而实现交流故障发生时较少送端功率输出的目的。 I_{max} 为直流电流最大限值，站间通信故障的情况下，选择 I_{max} 作为低交流电压限流模块的输入，达到屏蔽低直流电压限流模块的效果。

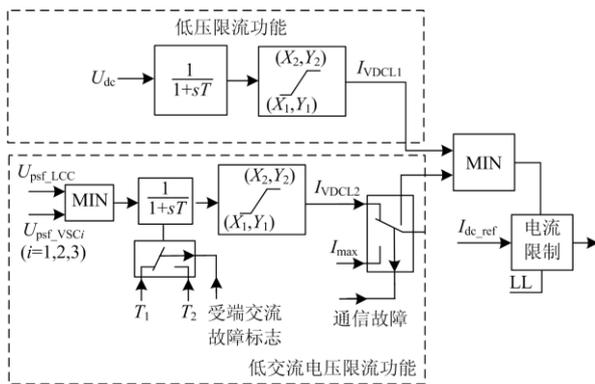


图5 交流低压限流控制策略

Fig. 5 AC low-voltage current-limiting control strategy

综上所述，增交低交流电压限流策略后的低压限流控制器，能够解决特高压混合级联直流输电系统发生交流系统故障时，原有的低压限流控制器不适用的问题，确保系统各侧故障时，整流侧都能做到快速限制直流电流，故障结束后系统功率能够快速恢复。

4 系统仿真验证

依据上文所述拓扑结构，基于许继 HCM3000 控制保护平台^[30-31]搭建 RTDS 仿真系统。该系统的单极和双极容量分别为 4 000 MW 和 8 000 MW。具体参数如表 2 所示。

表 2 系统参数

Table 2 System parameters

对象	参数	值
整流侧 LCC	交流电压	525 kV
	直流功率	2 000 MW
	直流电压	400 kV
逆变侧 LCC	交流电压	510 kV
	直流功率	2 000 MW
	直流电压	400 kV
逆变侧 VSC	交流电压	510 kV
	直流功率	1 000 MW
	直流电压	400 kV
	单个桥臂子模块个数	210
	桥臂电抗	50 mH
	子模块电容	18 mF

为验证本文所提策略的有效性，模拟特高压混合级联直流输电系统在不同运行工况下 VSC1 换流器所接入交流系统发生金属性接地故障。

特高压混合级联直流输电系统运行在 1+3 模式 (3 个 VSC 同时运行) 时，VSC1 换流器控制直流电压，VSC2、VSC3 换流器控制有功功率，模拟 VSC1 发生单相金属性接地故障 0.1 s，试验结果如图 6 所示。由于各交流母线间存在耦合关系，故障期间 VSC2、VSC3 交流母线电压幅值也会相应跌落。从图中可以看出，策略投入的情况下，VSC2、VSC3 内环电流参考值明显增大(负值为吸收功率)，对比有无策略的工况，新策略可以明显降低故障期间 VSC1 换流器的过压水平。

1+2 运行方式(2 个 VSC 同时运行)下，VSC1 控制直流电压，VSC2 控制有功功率，模拟 VSC1 换流器发生三相金属性接地故障 0.1 s，仿真波形如图 7 所示。从试验结果可以看出，对于强制移相与低压限流两种不同策略，故障期间 VSC 换流器过压水平基本一致。采取强制移相策略时，系统恢复需要等待较长时间去游离，且系统恢复过程中功率波动较大，故障结束后 0.211 s，系统功率恢复正常水平。而采用低压限流的策略，故障结束后 0.1 s，系统功率即可恢复至正常水平。

由仿真结果可以看出，所提策略可有效抑制故障期间系统直流过电压，缩短故障结束后系统功率

恢复时间, 提高了系统运行的稳定性与可靠性。

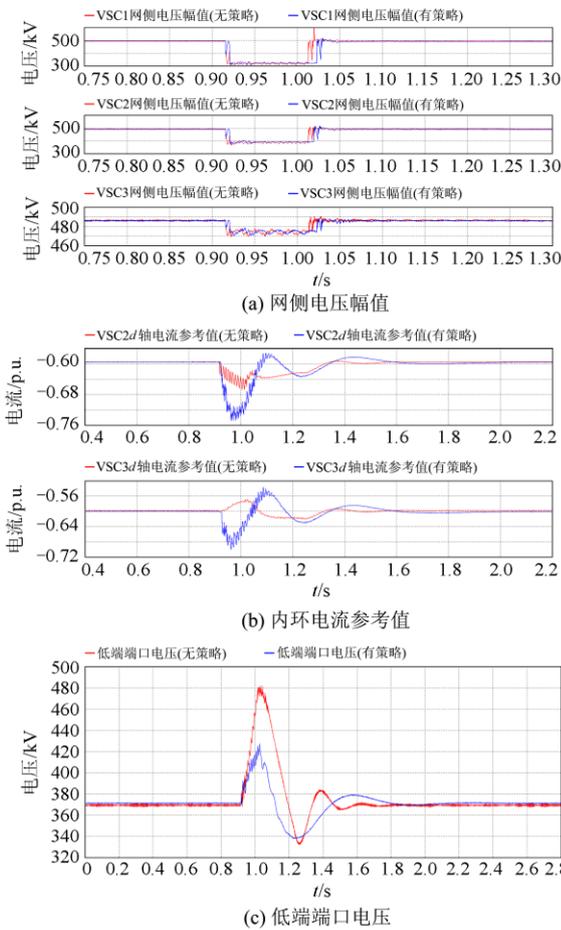


图 6 1+3 运行模式下交流故障
Fig. 6 AC failure in 1+3 mode

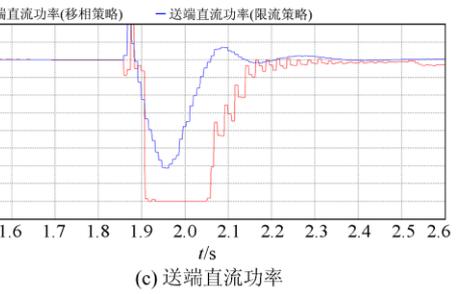
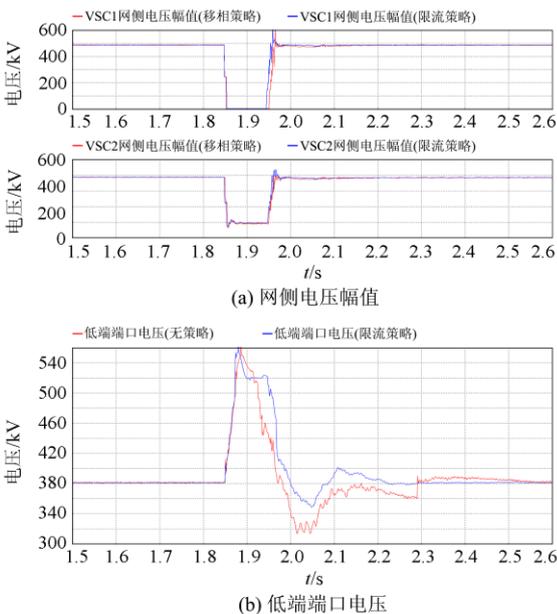


图 7 1+2 运行模式下交流故障
Fig. 7 AC failure in 1+2 mode

5 结论

本文针对特高压混合级联直流输电系统发生交流系统故障时受端 VSC 换流器直流过压, 以及故障结束后系统恢复时间较长的问题。首先分析研究了交流系统故障导致 VSC 换流器过电压的故障机理。提出了缓解 VSC 换流器过压问题的电压-功率协同控制策略。再根据故障结束后的系统恢复特性, 提出了基于受端交流电压的低压限流控制策略。最后通过搭建 RTDS 仿真试验平台, 验证了所提策略可有效抑制故障期间系统的直流过电压水平, 缩短故障结束后系统功率的恢复时间, 具备切实的可行性。

参考文献

- [1] 何英静, 李继红, 但扬清, 等. 柔性直流输电系统对多直流馈入系统运行性能的改善作用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 106-111.
HE Yingjing, LI Jihong, DAN Yangqing, et al. Study on performance improvement of multiple DC infeed systems by MMC-HVDC system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 106-111.
- [2] 李传西, 黄金海, 田培涛, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流线路超高速保护关键技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 57-61, 94.
LI Chuanxi, HUANG Jinhai, TIAN Peitao, et al. Research on key technology of ultra-high speed protection of flexible multi-terminal DC line based on MMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 57-61, 94.
- [3] 宁文元, 杨晓楠, 刘瑛琳, 等. 基于时频谱的混合直流输电线路保护方法[J]. 电力建设, 2019, 40(10): 126-132.
NING Wenyuan, YANG Xiaonan, LIU Yinglin, et al. Research on protection method based on time-spectrum for hybrid HVDC transmission line[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(10): 126-132.

- [4] 张文嘉, 王荃荃, 李海坤, 等. 基于对称双极接线的全桥型 MMC-HVDC 直流侧短路故障穿越控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 147-154.
ZHANG Wenjia, WANG Quanquan, LI Haikun, et al. DC short circuit fault ride-through method based on symmetrical bipolar FBSM-MMC HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 147-154.
- [5] 陆锋, 李钰, 许建中, 等. 混合型 MMC 降低子模块电容电压波动的优化策略[J]. 电力建设, 2019, 40(4): 110-118.
LU Feng, LI Yu, XU Jianzhong, et al. Optimized strategy for reducing capacitor voltage ripple in hybrid modular multilevel converter[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4): 110-118.
- [6] ALVES A G P, ROLIM L G B, DIAS R F S, et al. VSC plug-and-play operation using online grid parameter estimation for PI self-tuning[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(18): 4359-4367.
- [7] PERILLA A, RUEDA T J L, RAKHSHANI E, et al. Directional derivative-based method for quasi-stationary voltage support analysis of single-infeed VSC-HVDC units[J]. High Voltage, 2020, 5(5): 511-522.
- [8] 蔡巍, 赵媛, 胡应宏, 等. 张北柔性直流电网变电站能耗装置系统仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 212-220.
CAI Wei, ZHAO Yuan, HU Yinghong, et al. Simulation study on energy consumption device in power substation of Zhangbei flexible HVDC power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 212-220.
- [9] LIU Y, XIE S, LIANG H, et al. Coordinated control strategy of multi-terminal VSC-HVDC system considering frequency stability and power sharing[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(22): 5188-5196.
- [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.
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.
- [11] 陈浩, 张英敏, 曾琦, 等. 真双极 MMC-HVDC 系统线路过载紧急控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 107-114.
CHEN Hao, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. An emergency control strategy for line overload in bipolar MMC-HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 107-114.
- [12] 鲜文渊, 乔颖, 李立, 等. 可再生能源交流孤网转并网运行中的电压控制策略[J]. 可再生能源, 2021, 39(1): 74-80.
XIAN Wenyuan, QIAO Ying, LI Li, et al. Voltage control strategy for renewable energy AC isolated grid to grid-connected operation[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(1): 74-80.
- [13] 徐瑞林, 李明睿, 张激颀, 等. 渝鄂背靠背柔直系统交流故障穿越策略研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(6): 42-50.
XU Ruilin, LI Mingrui, ZHANG Lianqiang, et al. Research of AC fault ride-through strategy for Chongqing-Hubei VSC-HVDC back-to-back project[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(6): 42-50.
- [14] 刘洋, 邵广惠, 蒋维勇, 等. LCC-HVDC 背靠背系统降低电网短路电流应用研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 242-250.
LIU Yang, SHAO Guanghui, JIANG Weiyong, et al. Application research of LCC-HVDC back-to-back system to reduce short circuit current of power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 242-250.
- [15] KHALIFA A H, THANH H N, NAJI A S. Fault-tolerant control of MMCs based on SCDSMs in HVDC systems during DC-cable short circuits[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 100: 379-390.
- [16] 刘泽洪, 马为民, 王绍武, 等. 混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1214-1222.
LIU Zehong, MA Weimin, WANG Shaowu, et al. The schematic design of hybrid cascaded ultra HVDC and its modification in dynamic model experiment[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1214-1222.
- [17] 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. Characteristics of hybrid cascaded DC fault current transmission system and recovery control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 166-172, 179.
- [18] 许冬, 李探, 梅念, 等. VSC 与 LCC 混合级联直流输电系统暂态电流抑制方法[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 166-171.
XU Dong, LI Tan, MEI Nian, et al. Transient current suppression method for VSC and LCC cascaded hybrid HVDC system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 166-171.

- 2020, 3(2): 166-171.
- [19] 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.
- [20] NIU C, YANG M, XUE R, et al. Research on inverter side AC fault ride-through strategy for hybrid cascaded multi-terminal HVDC system[C] // 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 30-November 1, 2020, Wuhan, China: 800-805.
- [21] 张群, 赵倩, 郝俊芳, 等. 谐波注入法在柔性直流电网工程中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4): 113-117.
ZHANG Qun, ZHAO Qian, HAO Junfang, et al. Application of harmonic injection method to in flexible DC grid project[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(4): 113-117.
- [22] GEN L, TING A, JUN L, et al. Studies of commutation failures in hybrid LCC/MMC HVDC systems[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 193-204.
- [23] 杨洋, 王瑶, 李浩涛, 等. 子模块混合型 LCC-MMC 混合直流输电系统的启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 58-64.
YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 58-64.
- [24] 王璐, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 考虑直流电流变化的 HVDC 系统不对称故障换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 17-23.
WANG Lu, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Analysis of asymmetric fault commutation failure in an HVDC system with DC current variation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 17-23.
- [25] 程艳, 张健, 管萸, 等. HVDC 换相失败时受端电网的电压与频率联合控制策略[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 241-245.
CHENG Yan, ZHANG Jian, GUAN Ti, et al. Coordinated control strategy of voltage and frequency support at receiving end of HVDC system under commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 241-245.
- [26] 王涛, 肖繁, 曹森, 等. 换相失败交流系统临界电压计算[J]. 湖北电力, 2019, 43(4): 1-7.
WANG Tao, XIAO Fan, CAO Sen, et al. Calculation on critical voltage of AC system for commutation failure[J]. Hubei Electric Power, 2019, 43(4): 1-7.
- [27] PIRHADI A, TAVAKOLI B M. Design of DC-side fault current limiter for MMC-HVDC systems: safety of the MMC along with frequency stability[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(13): 2419-2429.
- [28] 范雪峰, 黄金海, 宋延涛, 等. 柔性直流交流连接区故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 151-159.
FAN Xuefeng, HUANG Jinhai, SONG Yantao, et al. Fault analysis of flexible DC/AC connection area[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 151-159.
- [29] 宋延涛, 许梦阳. 永富工程直流线路故障重启控制策略优化研究[J]. 电工技术, 2018(19): 115-119.
SONG Yantao, XU Mengyang. Research on the optimization of fault recovery control strategy of Yongreng-Funing project line[J]. Electric Engineering, 2018(19): 115-119.
- [30] 刘旭辉, 张爱玲, 曹森, 等. 基于 HCM3000 直流控制保护平台新型仿真系统实现与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 180-186.
LIU Xuhui, ZHANG Ailing, CAO Sen, et al. Implementation and application of new generation simulation system based on HCM3000 DC control protection platform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 180-186.
- [31] 苏进国, 李泰, 张爱玲, 等. 基于工程平台的直流控制保护系统全数字仿真建模与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 180-187.
SU Jinguo, LI Tai, ZHANG Ailing, et al. Full-digital simulation modeling and application for control and protection system based on HVDC project platform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 180-187.

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-06-15

作者简介:

刘晨(1992—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为直流输电控制系统; E-mail: liuchen_xj@foxmail.com

孙攀磊(1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电, 直流配电网理论及仿真研究。E-mail: 871217502@qq.com

(编辑 姜新丽)