Current Coordinated Control Strategy of Multiple DC Systems with Embedded DC System*

CAI Hui[1*], HAN Xingning[1], ZHOU Ting[2], LIU Bailiang[2], GAO Song[2], SUN Wentao[1]
(1.State Grid Jiangsu Economic and Technological Research Institute, Nanjing Jiangsu 210024, China;
2.State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210024, China)

Abstract: The voltage dependent current order limiter (VDCOL) control is an important current control strategy in high voltage direct current (HVDC) systems. To overcome the issue that traditional VDCOL cannot effectively deal with the commutation failure (CF) in multiple HVDC systems with embedded DC system, a coordinated control strategy of VDCOL considering the reactive power and voltage interaction is proposed. Firstly, based on the analysis of the limitations of traditional control strategy, the degree of reactive power interaction between inverters is calculated, then a virtual voltage index reflecting the overall commutation voltage state of adjacent HVDC systems is constructed. Then, the virtual voltage index is introduced into the original control strategy as part of the input voltage signal, and a trigger control strategy based on the main control current order is added to coordinate the control of VDCOL. Finally, the simulation of multiple DC systems is performed based on PSCAD/EMTDC, and the effectiveness of the proposed coordinated control strategy on CF mitigation in multiple HVDC systems is validated.

Key words: DC transmission; commutation failure; embedded DC; VDCOL; reactive power interaction; coordinated control strategy
EEACC: 7220; 8120 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.030

含嵌入式直流的多直流系统电流协同控制策略*

蔡 晖[1*], 韩杏宁[1], 周 挺[2], 刘柏良[2], 高 松[2], 孙文涛[1]
(1.国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210024; 2.国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘 要: 低电压限电流(Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)控制是直流系统重要的电流控制策略, 针对传统VDCOL难以有效应对含“嵌入式”直流的多直流系统换相失败问题, 提出了考虑无功电压交互影响的多直流VDCOL协调控制策略。首先, 在分析传统控制策略局限性的基础上, 计算了直流系统换流母线间的无功电压交互影响程度, 构建反映邻近直流系统整体换相电压状态的虚拟电压指标。然后, 将虚拟电压指标作为输入电压信号的一部分引入原有控制逻辑中, 并附加基于主控电流指令调节的启动控制策略, 对各回直流VDCOL进行协同控制。最后, 基于PSCAD/EMTDC搭建了多直流系统电磁暂态仿真模型, 验证了所提协同控制策略的有效性和优越性。

关键词: 直流输电; 换相失败; 嵌入式直流; 低电压限电流; 无功交互影响; 协同控制策略
中图分类号: Tm721.1; TP273 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0909-09

为了以经济高效的方式实现大容量和长距离的电力传输, 我国已投运基于电网换相换流器的高压直流输电达数十回[1-2]。但直流系统易因交流故障而发生换相失败乃至闭锁, 影响交直流混联电网的正常运行和功率传输[3]。

直流电流是影响换相失败的重要因素, 低电压限电流(Voltage Direct Current Order Limiter, VDCOL)是直流系统最主要的电流控制策略, 当输入的电压信号低于设定的启动阈值, VDCOL启动并将直流电流指令减小至较低值, 待输入的电压信号恢复至高于启动阈值后, 再将直流电流指令恢复至初始值[4]。但传统的VDCOL存在控制参数固定、输入信号单一、映射关系简单等问题, 导致其在不同故障条件和复杂工况下控制效果较为有限。

针对VDCOL控制参数固定的问题, 文献[5]提出根据电压变化适时调整启动阈值, 构建自适应电压阈值取代原有的固定启动阈值; 文献[6]进一步考虑受端电网强度和直流系统运行状态对启动电压阈值进行校正。除启动电压阈值外, 基于直流系统换相电压及换流站无功交换量, 可划定直流电流指令的调节可行域[7], 在此基础上可采用智能优化算法对包含启动电压阈值在内的多个参数同时进行优化[8]。针对VDCOL输入信号单一的问题, 文献[9]在极控逻辑中附加虚拟电阻, 将经虚拟电阻后的电

项目来源: 国家电网有限公司科技项目(5100-202418018A-1-1-ZN)
收稿日期: 2025-06-26 **修改日期**: 2025-08-27

压信号作为输入;文献[10]考虑交直流系统无功交互特性,根据逆变站无功功率交换量计算直流电流指令;文献[11]基于换相电压-时间面积理论,考虑电压谐波计算维持正常换相所需要的换相面积,并据此确定直流电流指令;文献[12]则基于泰勒展开预测直流电流变化情况,进而考虑直流电流预测值计算电压输入信号。针对 VDCOL 输入-输出映射关系简单的问题,可将固定斜率的输入-输出特性曲线替换为变斜率的特性曲线,根据不同电压状态对直流电流指令进行分段控制[13-14];为实现电流指令的平滑控制,可以凹函数曲线形式描绘输出与输入之间的映射关系[15],或基于幂函数、Logistic 函数等设计非线性特性曲线[16-17]。

随着新能源在能源结构中的占比不断提升和交流电网规模的不断扩大,省级/区域交流电网运行灵活性及断面输电能力提升需求迫切。若采用交流输电技术予以加强,交流潮流难以有效控制,且受短路电流等因素影响,整体输电能力提升有限。因此,江苏电网提出在省域交流电网内部"嵌入"直流,在其北电南送过江断面建设投运了扬州—镇江±200 kV 直流输电工程,从而提升断面输电能力[18]。根据网架结构和物理特性,可将具有以下特征的直流输电系统定义为"嵌入式"直流:送、受端换流站电气距离较近导致送、受端换流母线电压间存在经交流电网耦合的交互影响。

若多回"嵌入式"直流及传统跨区直流落点电气距离很近,直流电流随自身电压恢复所增大的无功消耗,会对邻近直流系统的换相电压造成不良影响,然而仅少数文献研究了多直流系统 VDCOL 的协同控制。相关研究通过在控制逻辑中引入延时环节并针对不同直流系统设置不同的时间常数,实现多直流系统的差异化协调恢复[19-20],但该类方法依赖于离线的参数设计,故实际上预先设定了直流系统的恢复顺序和优先级,难以实现根据不同的运行状态进行实时协调控制。文献[21]和文献[22]引入实时的换流站交流电压构造输入信号,使距离故障点较远的直流优先恢复、距离故障点较近的直流延迟恢复,但本质上还是根据本地电压状态确定直流电流指令,忽略了其他直流系统的恢复情况。

针对上述问题,本文提出了考虑无功交互影响的多直流 VDCOL 协同控制策略。以直流系统逆变侧换流站间的无功交互影响程度计算结果作为换相电压权重系数,构建反映邻近直流系统整体换相电压状态的虚拟电压,将虚拟电压与本回直流换相电压的较小值作为 VDCOL 的输入电压信号,并附加基于改进电压信号和电流指令的 VDCOL 启动控制策略,进一步提升控制效果及故障响应速度。

1 传统控制方法在多直流系统中的不足

1.1 VDCOL 的控制特性

关于换相失败的本质原因,众多文献已有详细阐述,受限于不具有自关断能力的换流器件,关断角受电压跌落、电流上升等因素影响而小于阀固有极限关断角是换相失败的根本原因[23]。根据换相电压-时间面积理论可推导出关断角表达式:

$$\gamma=\arccos\left(\frac{\sqrt{2}TX_cI_d}{U_L}+\cos\beta\right)-\varphi \tag{1}$$

式中:γ 表示关断角,U_L 为换相电压,T 和 X_c 分别为变压器变比和等效换相电抗,I_d 表示直流电流,β 和 φ 分别表示触发超前角和过零点偏移角度。

由式(1)可以看出,较大的直流电流会导致较小的关断角,因此在故障后的暂态过程中合理控制直流电流,是减小换相失败风险、促进直流系统快速恢复的重要手段。对直流电流的控制主要通过 VDCOL 实现,其输入与输出信号之间的映射关系如图 1 所示,图中 I_{max}、I_{min}、U_{max}和 U_{min}分别为输出电流和输入电压的上、下限控制阈值。

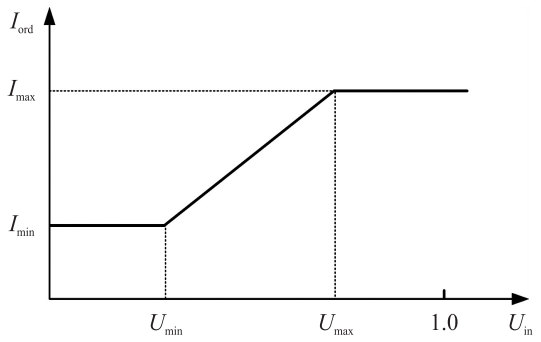


图 1 VDCOL 的输入-输出特性曲线

在电压下降阶段,当输入电压信号小于 U_{max},直流电流指令开始线性下降,当电压小于 U_{min}后,直流电流指令被维持在下限值 I_{min};在电压恢复阶段,直流电流指令根据电压恢复情况逐渐回升,若本地电压处于较高水平,则直流电流会在其控制下快速恢复。VDCOL 与主控直接给定的电流指令之间的较小值为最终确定的直流电流指令。

1.2 传统控制策略存在的问题

但对于含"嵌入式"直流的电网场景,传统的 VDCOL 存在一定的局限性。图 2 所示为江苏电网扬州-镇江"嵌入式"直流网架结构,其送端接入扬州、泰州等苏北地区 220 kV 分区电网,受端接入镇江、常州等苏南 220 kV 分区电网[18]。

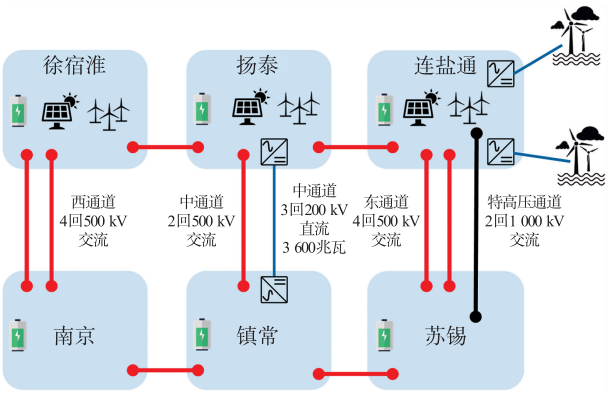


图 2　江苏过江断面“嵌入式”直流工程示意

可以看出,“嵌入式”直流系统与传统大容量跨区直流系统存在较大的差异,主要体现在以下几个方面:一是在网架结构上,“嵌入式”直流送、受端换流站电气距离较近,甚至位于同一个省域面积较小的交流电网;二是在功能定位上,传统跨区直流主要是实现大容量、远距离的电能输送,“嵌入式”直流主要是提升省间或省内重要断面的输电能力,以及局部的潮流灵活控制和新能源消纳;三是在稳定特性上,“嵌入式”直流的送、受端换流母线电压间存在经交流电网耦合的交互影响,且与省域内跨区直流逆变站存在电压交互影响。

由于多回“嵌入式”直流与跨区直流等多直流系统逆变侧换流站间具有较近的电气距离,交流电网发生故障导致的电压跌落,易引起多回直流换相失败。而在故障恢复阶段,本回直流系统过快的恢复速率导致其无功需求快速增大,从受端电网吸收较多的无功功率会由于无功电压交互影响而恶化邻近直流系统的换相条件。若具有较强耦合影响的邻近直流系统换相电压仍处于较低水平,则可能会导致其发生换相失败,如图 3 所示。

显然,传统的 VDCOL 控制策略在应对多直流系统的复杂换相失败问题时,存在一定的局限性。主要在于,传统控制策略仅根据本地单一直流系统的电压状态进行启动与控制,未计及其他直流系统的换相裕度,导致所确定的直流电流指令合理性存疑。另一方面,传统控制策略的启动阈值是由本地电压状态所确定的固定阈值,无法针对不同类型和严重程度的故障快速响应,导致故障后难以快速限制直流电流。为有效减小多直流系统换相失败风险,有必要从上述两方面对传统 VDCOL 进行优化改进。

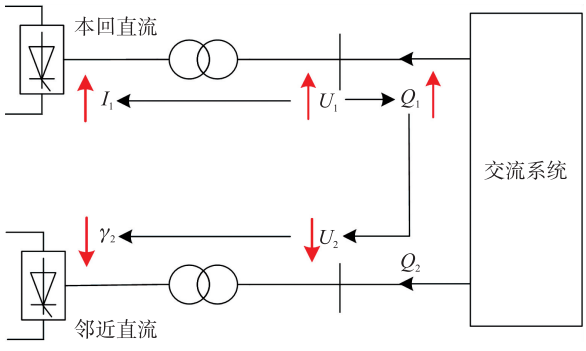


图 3　直流电流快速恢复引起换相失败的原理

2　多直流 VDCOL 协调控制策略

2.1　虚拟电压信号构建

根据上述分析,实现多直流系统 VDCOL 的协调控制,关键在于考虑其他直流系统的实时电压状态确定本回直流系统的电流指令。本文提出根据式(2)所构造的虚拟电压指标,表征同一省域交流电网中邻近直流系统的整体换流母线电压状态:

$$V_{A,i}=\sum_{j=1,j\neq i}^{n-1}(k_jV_{L,j}) \tag{2}$$

式中:$V_{L,j}$表示第 j 回直流系统换流母线线电压,i 和 j 分别表示本回直流系统和邻近直流系统,n 表示直流系统回数,k_j 表示对本回直流系统而言直流系统 j 换流母线电压的权重系数。

显然,对于与本回直流无功电压交互影响程度较大的直流系统,其换流母线电压状态在确定本回直流电流指令时应得到更多的考虑,即在表征整体换流母线电压状态时应具有更大的权重。故权重系数的大小应取决于直流系统间的无功电压交互影响程度,并具有式(3)所示的数学关系:

$$\begin{cases}k_j\in[0,1]\\ \sum\limits_{j=1,j\neq i}^{n-1}k_j=1\end{cases} \tag{3}$$

根据电力系统稳态分析理论中的 PQ 分解法,受端交流电网的潮流方程可以写成:

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}K & 0\\ 0 & J\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta V\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中:ΔP、ΔQ、$\Delta\theta$ 和 ΔV 分别为节点有功功率、无功功率、电压相角和电压幅值的变化量,子矩阵 K 和 J 根据节点阻抗矩阵虚部和节点电压构成。

对于含直流系统逆变站的受端电网,应对上述潮流方程进行修正,如式(5)所示:

$$J'_{ii}=J_{ii}-\frac{\partial Q_i}{\partial V_{L,i}} \tag{5}$$

式中:Q_i 表示第 i 回直流系统在其换流母线节点 i 所注入的无功功率。

基于直流系统运行方程计算其消耗的无功功率:

$$Q_{di}=\frac{3NT}{2\pi X_c}V_{L,i}^2(\cos^2\gamma_i-\cos^2\beta_i)\sqrt{\frac{4}{(\cos\gamma_i+\cos\beta_i)^2}-1} \tag{6}$$

式中：N 为逆变器的桥数，γ_i 和 β_i 分别表示第 i 回直流系统的关断角和触发超前角。

由此可得子矩阵 J 修正后的元素：

$$J'_{ii}=J_{ii}+\frac{3NT}{\pi X_c}V_L(\cos^2\gamma-\cos^2\beta)\sqrt{\frac{4}{(\cos\gamma+\cos\beta)^2}-1} \quad (7)$$

基于修正后的子矩阵，并结合式(4)和式(7)可得式(8)所示的无功电压交互影响关系，其量化了节点 i 处的无功功率变化对节点 j 处电压的影响程度。

$$\Delta V_{L,j}=(J')_{ij}^{-1}\Delta Q_i \quad (8)$$

式中：$(J')_{ij}^{-1}$ 为修正后子矩阵的逆矩阵所对应的元素。

故式(2)中的权重系数 k_j 的取值可由式(9)确定：

$$k_j=\frac{(J')_{ij}^{-1}}{\sum_{j=1,j\neq i}^{n-1}(J')_{ij}^{-1}} \quad (9)$$

综上所述，为考虑邻近直流系统电压状态控制本回直流系统的电流指令，本文将各回直流系统 VDCOL 的电压输入信号替换为式(10)所示的虚拟电压，即根据本回直流换相电压与邻近直流系统整体换相电压的较小值，确定本回直流系统 VDCOL 输出的电流指令。

$$V_{\text{in},i}=\min(V_{L,i},V_{A,i}) \quad (10)$$

2.2 VDCOL 的启动控制策略

由于固定的电压启动阈值(通常设置为 0.9 p.u.)难以应对不同故障工况，本文分别针对对称故障和不对称故障构建对应的 VDCOL 的启动策略。基于坐标变换实现对对称故障的检测，三相对称的交流电压经过 abc-$\alpha\beta$ 变换后得到对应坐标系下的变量：

$$\begin{cases}u_\alpha=\dfrac{2}{3}u_a-\dfrac{1}{3}(u_b+u_c)\\ u_\beta=\dfrac{\sqrt{3}}{3}(u_b-u_c)\end{cases} \quad (11)$$

式中：u_a、u_b、u_c 分别为三相电压瞬时值。

进而得到旋转矢量：

$$u_{\alpha\beta}=\sqrt{u_\alpha^2+u_\beta^2} \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)则可得到：

$$u_{\alpha\beta}=\sqrt{2\times[(u_a-u_b)^2+(u_b-u_c)^2+(u_a-u_c)^2]/9} \quad (13)$$

此外，将零序电压大小作为单相交流故障下的启动判据，如式(14)所示：

$$u_0=u_a+u_b+u_c \quad (14)$$

式中：u_0 表示零序电压。

分别对 $u_{\alpha\beta}$ 和 u_0 设置相应的启动阈值，根据相关经验将三相故障和单相故障下的启动阈值分别设置为 0.15 和 0.05。为进一步提升故障响应速度，本文在其启动后迅速减小主控给定的直流电流指令，由于最终确定的直流电流指令是 VDCOL 输出与主控电流指令之间的较小值，故该方法本质上是在故障初始阶段用电流指令的阶跃变化取代原有按固定斜率变化的方式。

根据式(1)，若不计过零点偏移角度，则直流电流可由式(15)表征：

$$I_d=\frac{V_L}{\sqrt{2}kX_c}(\cos\gamma-\cos\beta) \quad (15)$$

若在任意一个微小时间段内将 V_L 看作常数，β 在直流系统关断角控制启动前可认为近似等于稳态运行值，一般约为 38°，则直流电流可近似表示为 γ 余弦值的线性函数：

$$I_d\approx\lambda(\cos\gamma-\cos 38°) \quad (16)$$

式中：λ 指代某一常数。

根据式(16)，当 I_d 减小至 0.95 p.u.，γ 将从 0° 提升至 8.4°；当 I_d 减小至 0.9 p.u.，则可将 γ 将增加到 11.8°。而阀维持正常换相所需的固有极限关断角通常在 7.2°左右，考虑到实际发生较严重故障时电压跌落速度较快，故本文在控制策略启动后将主控给定的直流电流指令迅速减小至 0.9 p.u.，在恢复后期主控电流指令恢复至故障前状态，直流电流在 VDCOL 协调控制作用下恢复。

2.3 多直流协同控制策略

本文所提协同控制策略的具体控制逻辑如图 4 所示，图中 U_{level1} 和 U_{level2} 分别为启动控制策略中单相故障和三相故障时的启动阈值，当输入电压信号大于启动阈值时，控制策略启动并将直流电流指令迅速切换到 0.9 p.u.。其他直流系统的换相电压经相应的延时后乘以对应的权重系数，从而构建虚拟电压指标，

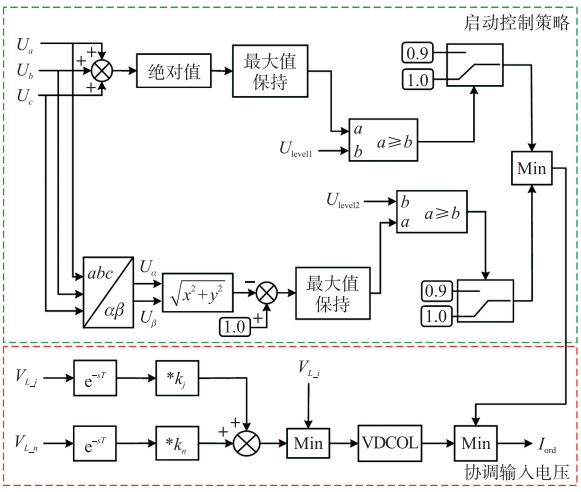


图 4 协同控制策略逻辑框图

与本回直流系统换相电压取小后作为 VDCOL 的输入信号,VDCOL 的输出与启动控制策略输出的电流指令取小后,输出最终的直流电流指令 I_{ord}。

关于通信延时的取值,当前实际直流工程中整流站和逆变站间具备通信通道,二者之间信号的传输延时约 20 ms~30 ms[6,24],由于“嵌入式”直流系统与跨区直流系统逆变站均位于同一省域交流电网,电气距离较近,故本文将通信延时取为 10 ms,能够满足协同控制策略的要求。

3　算例分析

3.1　仿真模型及参数设置

基于 PSCAD/EMTDC 构建了多直流系统仿真模型,如图 5 所示。直流系统 2 和 3 逆变侧电气距离较近,且直流系统 2 换流母线电压等级为 230 kV,直流系统 3 换流母线电压等级为 525 kV,旨在模拟省域内落点较近的“嵌入式”直流和传统跨区直流,直流系统 1 表征换流母线电压等级为 525 kV 的跨区直流。

由于直流系统 1 的换流母线与其他直流系统电气距离较远,其他直流系统换流母线处发生故障对直流系统 1 影响较小,故令直流系统 1 的 VDCOL 仍然保持受本地电压状态控制。对于直流系统 2,根据本文方法计算得到其他直流系统换相电压的权重系数分别为 0.136 和 0.864;对于直流系统 3,其他直流系统换相电压的权重系数分别为 0.197 和 0.804。显然,由于直流系统 2 和 3 具有更强的无功电压交互影响程度,在确定各自的直流电流指令时需要更多地考虑邻近直流系统的电压恢复状态。

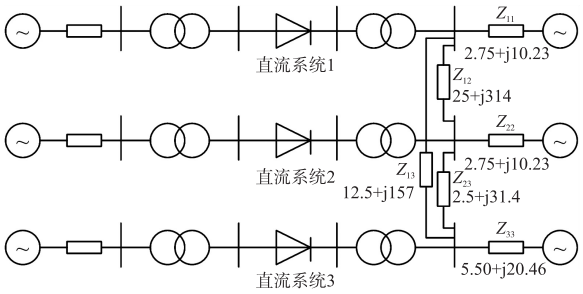
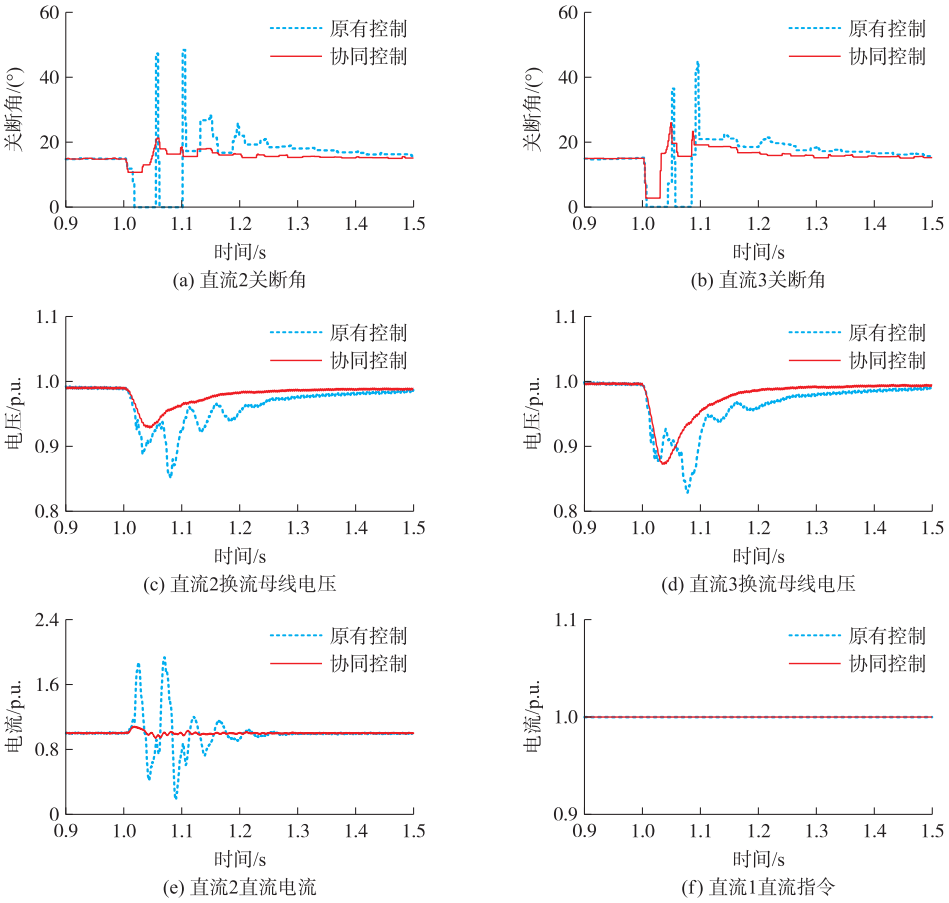


图 5　多直流系统仿真模型

3.2　仿真对比分析

在直流系统 3 逆变侧母线设置三相接地故障,1.0 s 开始,1.05 s 清除,接地电感为 0.76 H。由图 6(a)及图 6(b)的关断角对比曲线可知,与原有 VDCOL 控制策略相比,直流系统 2 和 3 的换相失败分别减少了 2 次和 1 次,协同控制下直流 2 的关断



(a) 直流2关断角　(b) 直流3关断角

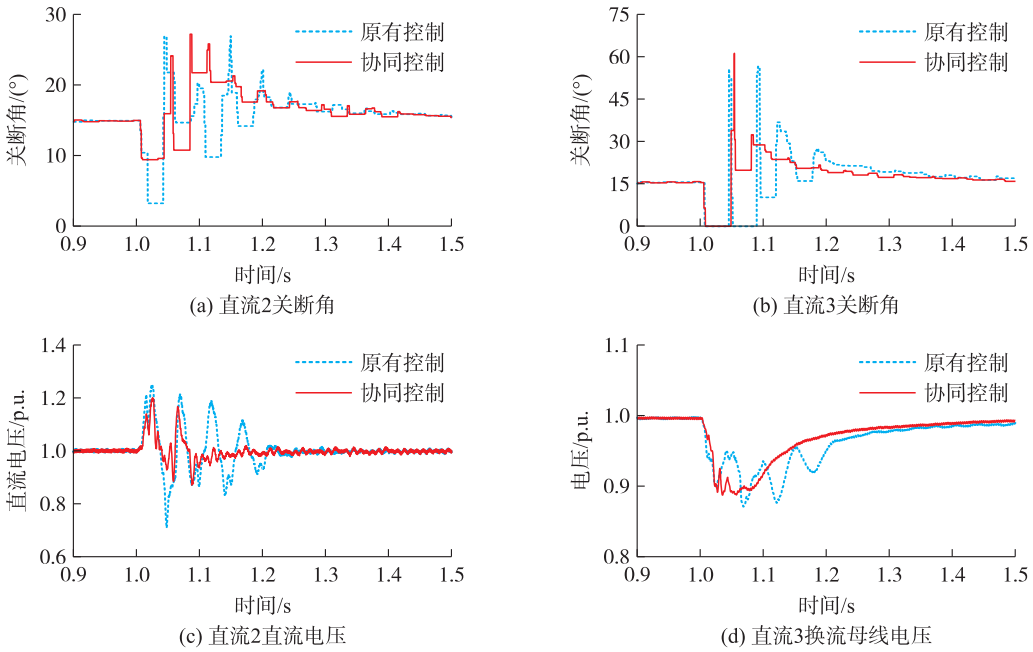
(c) 直流2换流母线电压　(d) 直流3换流母线电压

(e) 直流2直流电流　(f) 直流1直流指令

图 6　接地电感 0.76 H 下的控制效果对比

角可保持在 10°以上,高于极限关断角。即此时采用协同控制可预防直流 2 因直流 3 处发生故障而换相失败。由于交流故障发生在直流系统 3 的换流母线处,故其电压相对较小,由于协同控制逻辑在确定 VDCOL 输入时根据式(10)进行取小,使得直流系统 2 的直流电流保持处于较低水平,从而可减少直流系统 2 逆变侧消耗的无功功率,有利于直流系统 3 换流母线电压的恢复,最低电压保持在 0.85 p.u.以上,如图 6(c)~图 6(e)所示。由于直流系统 1 的换流母线电压水平较高,且电流指令仅取决于本地电压状态,其最终直流电流指令与原有 VDCOL 输出一致,始终保持 1.0 p.u.,所提协同控制策略不会影响远端无故障直流系统的正常运行。

在直流系统 3 逆变侧母线设置单相接地故障,1.001 s 开始,0.05 s 后清除,接地电感为 0.29 H。由图 7(a)和图 7(b)中的关断角曲线可知,不对称故障下协同控制策略有效抑制了多直流系统换相失败,其原因可由图 7(c)和图 7(d)所示的直流电流响应和换流母线电压响应分析得到。考虑直流系统 3 的换相电压状态确定直流系统 2 的电流指令,有效减小了直流电流,进而减小了直流系统 2 的无功功率需求,从而改善了直流系统 3 与受端交流系统的无功交互特性,有效提升了其换流母线电压水平。



(a) 直流2关断角 (b) 直流3关断角

(c) 直流2直流电压 (d) 直流3换流母线电压

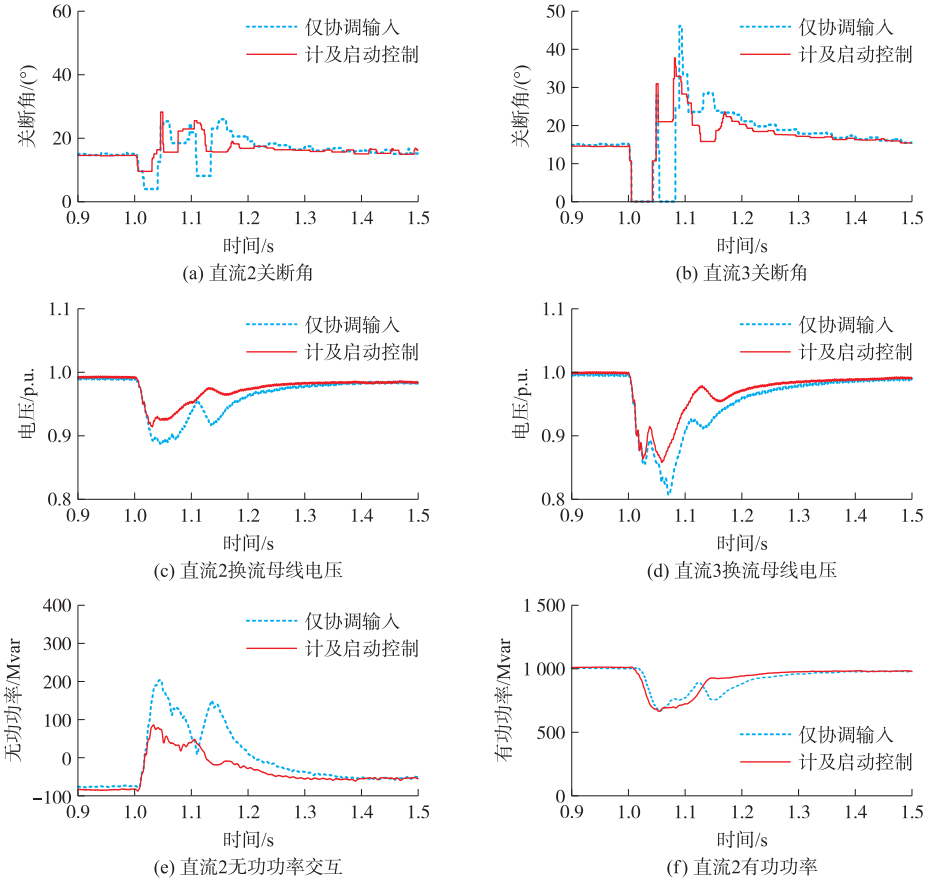
图 7 接地电感 0.29 H 下的控制效果对比

进一步对比同时计及启动控制策略与仅协调输入电压信号的控制效果。在直流系统 3 逆变侧换流母线处设置三相对称故障,1.0 s 开始,1.05 s 清除,接地电感为 0.40 H。图 8(a)和图 8(b)中关断角曲线显示,仅协调输入控制下直流系统 2 比原有控制的换相失败次数减少了 2 次但仍发生了首次换相失败,直流系统 3 则仍会发生 2 次换相失败;而计及启动策略的协同控制避免了直流系统 2 的首次换相失败,同时直流 3 仅发生了 1 次换相失败。由图 8(c)和图 8(d)可知,协同控制策略对于换相电压的提升效果较好,直流系统 2 的换流母线电压可保持在 0.9 p.u.以上。如图 8(e)和图 8(f)所示,由于式(10)的取小环节,直流系统 2 中电流指令的恢复速度在一定程度上有所下降,消耗的无功功率减少,从而抑制了直流系统 3 中的后续换相失败。

在直流系统 3 逆变侧换流母线处设置单相不对称故障,1.006 s 开始,0.05 s 后清除,接地电感为 0.18 H。由图 9 所示各直流电气量的响应曲线对比可知,原有 VDCOL 控制下直流系统 3 发生了 3 次连续换相失败,邻近的直流系统 2 受到交互影响发生了 1 次换相失败。采用协调输入控制后直流系统 3 减少了 2 次换相失败,但直流系统 2 未能抵御首次换相失败。而在计及启动控制策略的协同控制下,直流系统 2 避免了换相失败,直流系统 3 关断角最低值有所提升,直流电流被限制在较低水平,换流母线电压恢复特性得到进一步改善。

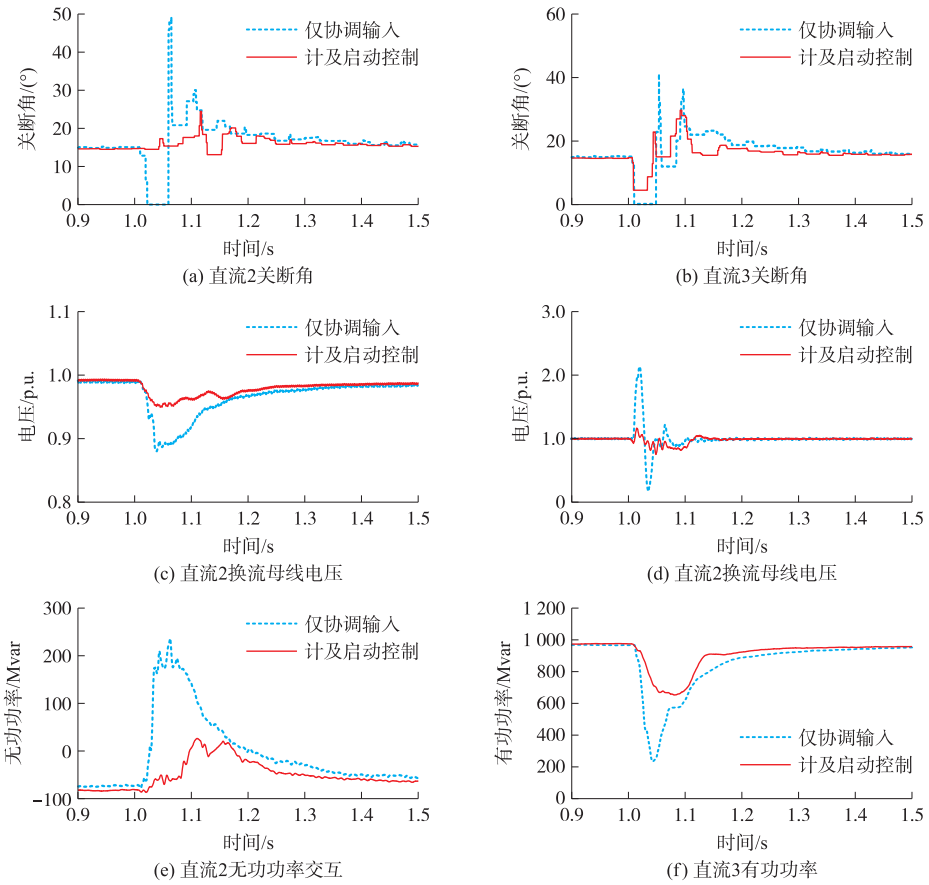
进一步考察直流系统 3 换流母线处不同接地电感时,三相接地故障下直流系统 2 和 3 的换相失败情况,分别如表 1 和表 2 所示。

由上述表格记录结果可知,在不同接地电感故障下,整体上采用 VDCOL 协同控制策略能够减小各回直流系统的换相失败风险,改善多直流系统的故障恢复特性。



(a) 直流2关断角　(b) 直流3关断角
(c) 直流2换流母线电压　(d) 直流3换流母线电压
(e) 直流2无功功率交互　(f) 直流2有功功率

图 8　接地电感 0.40 H 下的控制效果对比



(a) 直流2关断角　(b) 直流3关断角
(c) 直流2换流母线电压　(d) 直流2换流母线电压
(e) 直流2无功功率交互　(f) 直流3有功功率

图 9　接地电感 0.18 H 下的控制效果对比

表 1 不同故障下直流系统 2 的换相失败情况

接地电感/H	协同控制下	原有控制下
0.80	0	1
0.75	0	2
0.70	0	2
0.65	1	2
0.60	1	2
0.55	2	2
0.50	1	2
0.45	0	2
0.40	0	3

表 2 不同故障下直流系统 3 的换相失败情况

接地电感/H	协同控制下	原有控制下
0.80	0	1
0.75	1	2
0.70	1	2
0.65	1	2
0.60	2	2
0.55	2	2
0.50	1	2
0.45	1	2
0.40	1	2

4 结语

本文提出了考虑无功交互影响的多直流系统 VDCOL 协同控制策略,根据理论和仿真分析可得到以下结论:

①含“嵌入式”直流的省域电网中换流站间电气距离较近,较大的直流电流会增大直流系统无功消耗,进而引起多直流换相失败,故应考虑邻近直流系统的换相电压状态确定本回直流系统的电流指令;

②依据换流母线间的无功电压交互影响程度确定各回直流系统换相电压的权重系数,构建虚拟换相电压并以其与本地电压的较小值作为 VDCOL 输入电压信号,能够有效抑制多直流系统换相失败;

③在协调各回直流系统 VDCOL 输入电压的同时,附加基于主控电流指令调节的启动控制,能够进一步提升对多直流系统的协同控制效果。

需要指出的是,送、受端换流母线电压间存在经交流电网耦合的交互影响,是“嵌入式”直流的重要特征。故在分析并抑制交流故障引起的换相失败时,应同时考虑送、受端换流母线电压的暂态特性,本文研究方法及依托的仿真模型尚未将整流侧换流母线电压特性纳入考虑,这将是后续研究的重要内容。

参考文献:

[1] Rahimi E,Gole A M,Denvies J B,et al. Commutation Failure Analysis in Multi-Infeed HVDC Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(1):378-384.

[2] 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.

[3] 薛峰,彭慧敏,王玉,等. 多馈入直流换相失败与同步电网交互影响机理研究评述[J]. 高电压技术,2024,50(7):2747-2759.

[4] 林圣,刘健,刘磊,等. 基于控制保护的高压直流输电系统换相失败抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(19):6045-6058.

[5] 雷霄,孙栩,李新年,等. 适应大容量直流接入弱受端的直流极控系统优化控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):205-209.

[6] 李瑞鹏,李永丽,陈晓龙. 一种抑制直流输电连续换相失败的控制方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(17):5029-5042.

[7] 何启皓,汪娟娟,关晓羽,等. 交流故障下高压直流系统无功特性分析及无功控制策略研究[J]. 电网技术,2024,48(7):3023-3032.

[8] 曹善康,魏繁荣,林湘宁,等. 一种基于自适应电压限值的换相失败抑制策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(1):165-175.

[9] 郭春义,李春华,刘羽超,等. 一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(18):4930-4937.

[10] Wang J,Huang M,Fu C,et al. A New Recovery Strategy of HVDC System During AC Faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(2):486-495.

[11] Liu L, Lin S, Liao K, et al. Extinction Angle Predictive Control Strategy for Commutation Failure Mitigation in HVDC Systems Considering Voltage Distortion[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2019,13(22):5171-5179.

[12] 周泓宇,姚伟,李程昊,等. 一种可降低首次换相失败风险的预测型低压限流控制[J]. 高电压技术,2022,48(8):3179-3189.

[13] 冯明,李兴源,李妮,等. 基于 Simplex 算法的高压直流输电分段变速率 VDCOL 研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2015,47(4):162-167.

[14] 孙其振,刘世超,丁苍璧,等. 基于 VDCOL 参数优化的直流传输系统换相失败抑制策略[J]. 广东电力,2023,36(6):58-66.

[15] Ouyang J X, Zhang Z, Pang M Y, et al. Current-Limit Control Method to Prevent Subsequent Commutation Failure of LCC-HVDC Based on Adaptive Trigger Voltage[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2020,122:106190.

[16] 王立舒,刘勃,乔帅翔,等. 改变获取补偿电压方法的精确变斜率 VDCOL 设计[J]. 高电压技术,2020,46

(8):2740-2750.
[17] 王立舒,宋鹤,李天舒,等. 抑制换相失败的变斜率 VDCOL 控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(7):80-87.
[18] 王之伟,黄俊辉,程亮,等. “嵌入式”直流技术在省级输电网中的规划及应用[J]. 电力工程技术,2022,41(6):65-74.
[19] 冯明,李兴源,洪潮,等. 基于多馈入功率恢复因子的南方电网多回直流分层协调控制策略[J]. 电网技术,2015,39(10):2822-2829.
[20] 夏成军,黄浩宇,涂亮,等. 多馈入直流系统受端故障的协调渐进恢复策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(4):47-54.
[21] 曾琦,李兴源,冯明,等. 基于广域测量系统的多馈入直流低压限流单元的协调控制方法[J]. 高电压技术,2017,43(4):1168-1174.
[22] 毛晓明,张妍. 交流故障后 MIDC 系统交错协调恢复研究[J]. 高电压技术,2019,45(2):571-578.
[23] 赵成勇,叶蕴霞,展瑞琦,等. 电压跌落影响换流阀晶闸管可靠关断的机理研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(12):4505-4515.
[24] 郑晨一,汤奕. 考虑多直流无功交互影响的换相失败预防协调控制方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(4):102-110.

蔡　晖(1984),男,博士,研究员级高级工程师,从事输电网规划、柔性输电技术在受端电网的应用、新能源接入与消纳等方面的研究工作。