

改善局部电网暂态电压稳定特性的 LCC-HVDC 控制策略优化

朱益华, 饶宏, 郭琦, 常东旭, 曹润彬, 陈雁

(直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广州 510663)

摘要: 随着广东电网负荷中心柔性互联工程的实施, 电网分区间的交流联系变弱, 大容量常规高压直流馈入的局部电网动态无功支撑能力下降, 在逆变站近区严重交流故障冲击下可能暂态电压失稳。结合穗东换流站近区的暂态电压稳定问题, 提出了优化直流低压限流控制(voltage dependent current order limiter, VDCOL)参数并附加限制直流功率上升速率的优化控制策略, 设计了基于逆变站交流母线电压特征的控制策略自适应切换逻辑, 有效减少了直流恢复过程中的无功消耗, 达到以最小的控制代价实现最优控制效果的目的; 基于实际电网运行方式和直流控制保护系统, 仿真验证了所设计方案能显著提升换流站近区的暂态电压稳定性, 并在一定程度上可减少交流系统故障后的直流换相失败。相关技术方案已在多个直流工程投入实际应用。

关键词: 高压直流输电; 暂态电压稳定; 动态无功支撑; 换相失败; 低压限流控制; 自适应切换

Optimization of LCC-HVDC Control Strategy for Improving Transient Voltage Stability Characteristics of Partial Power Grids

ZHU Yihua, RAO Hong, GUO Qi, CHANG Dongxu, CAO Runbin, CHEN Yan

(State Key Laboratory of HVDC, China Southern Power Grid Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the implementation of the flexible interconnection project of Guangdong Power Grid Load Center, the AC connection between power grid partitions has become weaker, and the dynamic reactive power support capacity of local power grids fed by large capacity line-commutated converter HVDC (LCC-HVDC) has decreased. Transient voltage instability may be caused by severe AC fault impact in the near area of the inverter station. Based on the transient voltage stability problem in the near area of the Sui-dong converter station, this paper proposes an optimized control strategy for optimizing the voltage dependent current order limiter (VDCOL) parameters and attaching restrictions to the HVDC power rise rate, and an adaptive switching logic based on the AC bus voltage characteristics of the inverter station is designed. The method is adopted to effectively reduce reactive power consumption during the HVDC recovery process, achieving the goal of achieving optimal control effect with the minimum control cost. Finally, based on the simulation of the actual operation mode of the power grid and the HVDC control and protection system, it is verified that the designed scheme can be adopted to significantly improve the transient voltage stability in the near area of the converter station and to reduce the HVDC commutation failure after AC faults. The relevant technical solutions have been put into practical application in multiple HVDC projects.

Key words: LCC-HVDC; transient voltage stability; dynamic reactive power support; commutation failure; VDCOL; adaptive switching

0 引言

广东电网是南方电网区域最大的受端系统, 2022 年供电负荷已超过 140 GW, 并有 11 回直流馈入大湾区电网, 在 200 km² 范围内落点直流的总容

量将达到 3720 万 kW, 交直流交互影响、短路电流超标等问题日益严峻。为了解决上述电网运行中的突出问题, 广东电网于 2022 年建成中通道背靠背柔性直流(以下简称“粤中直流”)和南通道背靠背柔性直流(以下简称“南粤直流”), 对珠三角负荷密集区进行了分割, 极大地缓解了东莞、深圳片区短路电流超标的问题, 有效降低大湾区电网多直流换相失败的概率^[1-2]。

基金资助项目: 国家重点研发计划(2021YFB2400900)。

Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2400900).

粤中、南粤直流工程投产后, 东莞片区与广东电网其它片区的交流联系变弱, 本地常规电源占比小, 直流投产初期区域内配套电源计划尚未到位, 局部电网的动态无功支撑能力不足, 抗故障扰动能力下降。 ± 800 kV 楚穗直流穗东换落点近区负荷密集, 片区内重要交流联络线相间或三相故障跳闸后, 直流系统试图快速恢复, 换流器消耗无功快速增大, 直流系统从交流系统吸收大量无功, 恶化电网的动态无功支撑能力, 易引发交流系统暂态电压稳定问题, 进而导致直流闭锁、系统失稳。

目前解决负荷中心暂态电压稳定的主要措施包括: (1) 加强电网网架, 提高受端电网的短路容量和抗扰动能力^[3]; (2) 受端电网加装同步调相机: 调相机既可以为系统提供短路容量, 也可以通过强励提供动态电压支撑, 适应大直流落点近区的无功支撑需求^[4-6]; (3) 在电压稳定问题突出的母线节点加装动态无功补偿装置 STATCOM, 在系统发生扰动时, STATCOM 能够快速进行动态无功功率支撑, 有效提升系统暂态电压稳定^[7]; (4) 紧急限制直流功率: 在减少交流系统的无功消耗同时有效利用还未被切除的交流滤波器组提供的无功容量, 支撑交流电压快速回升^[8-9]; (5) 切除受端部分负荷, 减少交流系统的无功消耗, 提升暂态电压稳定裕度, 从而提升故障时暂态稳定性^[10]。

结合东莞片区电网的实际情况评估, 方案(1)、(2)、(3)均存在投资成本高, 征地和设计制造周期长, 短期内无法快速实施的难题, 只能作为后期电网优化的补充手段; 方案(4)限制直流功率需要配套相应的稳定控制系统, 稳定控制判断延时与限制直流功率命令执行时间到限制指定值的耗时过长, 对暂态电压稳定的快速抑制能力有限; 而方案(5)稳定控制切负荷的控制代价和经济性较差。综上, 有必要从该问题产生的根源出发, 优化高压直流输电系统(line commutated converter HVDC, LCC-HVDC)控制保护自身的控制策略, 减少故障清除后直流系统的无功消耗, 灵活应对系统的暂态低电压稳定问题^[11]。

目前关于直流的低压限流控制(voltage dependent current order limiter, VDCOL)参数优化研究^[12-15]一般用于解决直流连续换相失败问题, 所提出的改进策略算法较为复杂, 多用 CIGRE HVDC 标准测试模型进行仿真验证, 实际工程应用难度较大; 文献^[16]提供了一种限制直流恢复速率以改善送端电网暂态稳定特性的控制策略, 但用于解决受

端电网电压稳定问题研究较少。

本文首先分析穗东换流站近区暂态低电压问题的形成原因和主导因素, 在此基础上提出直流控制优化的主要方法和自动切换逻辑, 实现以最小的控制代价实现最优的控制效果; 最后结合实际电网运行方式和直流控制保护系统, 仿真验证了所提出的控制方案能对局部电网暂态电压稳定和直流恢复特性的改善作用。

1 穗东换流站近区暂态电压稳定问题及影响因素分析

本文参照 GB/T 40615—2021 暂态电压稳定的评价标准^[17]: 在电力系统受到大扰动后的暂态过程中, 负荷母线电压标幺值应在 10 s 内恢复到 0.8 以上, 在暂态过程结束后母线电压标幺值应恢复到 0.9 以上。

粤中、南粤直流工程投产后穗东换流站近区的 500 kV 网架如图 1 所示, 区域内工业负荷密集, 感应电动机负荷占比较高。该片区与粤西电网的交流联络线由原来的 6 回变成 2 回(另外 4 回线路分别由粤中、南粤直流替代), 交流系统联系大为削弱; 区域内仅有 500 kV XM 电厂, 从 220 kV 上网的电厂也以装机容量较小的燃气电厂机组为主。根据仿真结果表明, 在系统部分运行方式下, 发生 HL—BL 等双回线路 N-2 三相故障跳闸时, 500 kV HL 等站点暂态电压失稳, 楚穗直流闭锁, 如图 2 所示, 其中 U_s 为各厂站交流母线电压有效值。

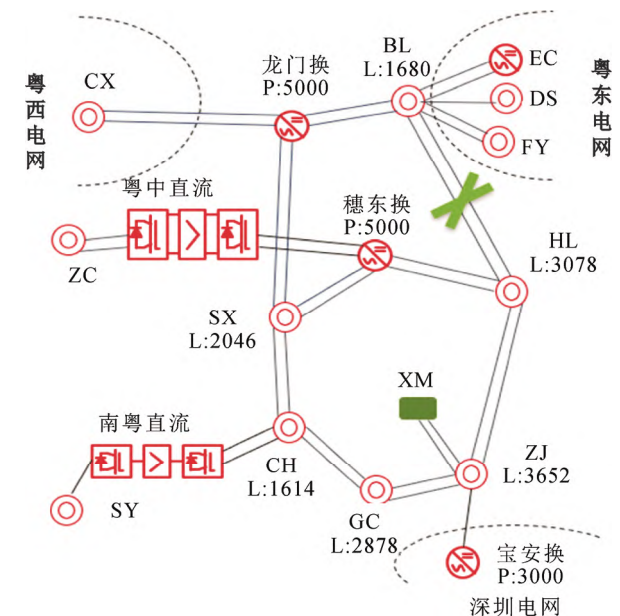


图 1 穗东换流站近区电网 500 kV 网架示意图

Fig.1 Diagram of 500 kV grid structure in the vicinity of Suidong converter station

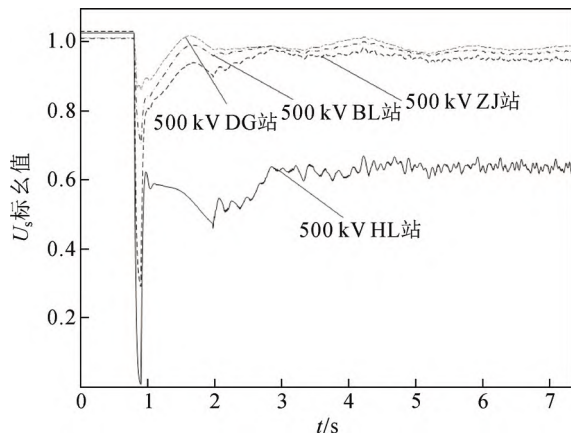


图2 BL—HL 双回故障跳闸电压失稳仿真

Fig.2 Simulation of transient voltage instability caused by BL—HL double circuit line fault tripping

交流系统暂态电压失稳本质上是由于系统无功支撑能力不足造成的^[3,11], 造成系统无功支撑能力不足的主要原因包括:

1) 传统发电机提供的无功支撑能力不足。大多数传统发电机组励磁系统均具有短时强励能力, 能够在 1~2 min 内保持 2.5~3.5 倍的额定励磁电压^[13]。而穗东换近区常规机组配置较少, HL—BL 等双回 N-2 跳闸后, 粤东电网机群提供的无功支撑通道也被断开, 进一步恶化了电网的动态无功支撑能力。

2) 东莞片区工业负荷密集, 感应电动机负荷占比较高。大量研究文献^[18-20]表明, 负荷中感应电动机占比越高, 故障发生后感应电动机滑差恢复至正常水平的速率越慢, 相应的从系统吸收的无功功率越多。在故障发生后, 系统最薄弱处的感应电动机滑差最先越过不稳定平衡点, 导致电动机堵转并且吸收大量无功功率, 使受端系统近区电压下降; 进一步导致其他感应电动机堵转, 感应电动机群将产生无功需求激增效应, 电压持续下降, 最终出现受端系统暂态电压失稳现象。

3) 常规直流系统在故障恢复过程中的无功消耗。在交流故障及故障恢复过程中, 直流系统需要从交流系统吸收大量无功功率。当交流系统不能提供直流所需的动态无功支撑时, 会导致电压恢复缓慢, 进而使得直流发生多次换相失败, 多次循环往复, 最终导致电压失稳。

由于影响因素 1)、2) 需要系统网架的加强和运行方式优化, 短期内无法有效实施, 由此需结合 3) 深入分析交流故障及故障恢复过程中交直流系统的相互影响因素, 揭示穗东换近区电压失稳的主导

因素。

直流系统稳态运行时, 以逆变侧定熄弧角 γ 控制为例, γ 的表达式可写为:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2}kI_d X_c}{U_s} + \cos \beta \right) \quad (1)$$

式中: U_s 为逆变站交流电压有效值; I_d 为直流电流; X_c 为等效换相电抗; k 为逆变侧换流变压器变比; β 为超前触发角。

直流站控系统根据已投入滤波器的组数及各类型滤波器的无功实际输出计算得到全站交流滤波器输出无功。换流站与交流系统的交换无功计算式^[21]如下:

$$\begin{cases} \varphi = \arccos \frac{U_d}{U_{d10}} = \arccos \frac{\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu)}{2} \\ Q_c = U_d I_d \tan \varphi \\ Q_f = Q_{f0} \left(\frac{U_s}{U_n} \right)^2 \\ Q_{\text{exp}} = Q_c - Q_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_d 为直流电压; U_{d10} 为换流阀空载电压; μ 为换相叠弧角; φ 为换流站功率因数; U_n 为交流电压额定值; Q_{exp} 为换流站从交流系统吸收的无功; Q_c 为换流阀消耗无功; Q_f 为交流滤波器补偿无功; Q_{f0} 为交流滤波器的稳态运行时的投入容量。

结合式(2), 典型的直流近区交流故障后交直流系统的恢复特性如图 3 所示, 可分为 4 个阶段:

阶段①: 在直流近区交流线路相间或者三相短路故障发生的瞬间, 交流电压下降速度非常快, 根据式(1), 逆变站熄弧角 γ 迅速变小, 直流控制系统来不及响应, 当熄弧角 γ 小于临界熄弧角 γ_{min} (一般取为 7°) 时, 直流发生第一次换相失败; 这时逆变侧直流电压降低较多, 直流电流远大于稳态值; 交流系统的电压跌落主要是由交流故障引起的, 与直流关联不大;

阶段②: 受端电网短路故障清除后, 在直流控制系统的作用下, 直流电压快速回升, 而直流电流因 VDCOL 的作用, 被限制在较小的值, 消耗的无功量不大, 交流电压迅速回升;

阶段③: 直流电压恢复到一定值后, VDCOL 功能退出, 直流电流快速恢复到额定值, 此时逆变器所消耗的无功功率 Q_c 也快速恢复到至故障前的水平, 但如果交流系统电压回升缓慢, 交流滤波器发出的无功功率 Q_f 较小, 逆变站仍需要从交流系统吸收大量无功, 进一步减缓交流电压的回升速度;

如果系统电压支撑能力较强, 交流电压能够恢复到额定值附近, 系统恢复到稳定运行, 如阶段④; 若系统电压支撑能力不足, 再与感应电动机负荷暂态失稳等问题相互作用, 使得交流电压缓慢下降, 换流器熄弧角 γ 仍可能减小至 $\gamma < \gamma_{\min}$, 导致多次换相失败的发生, 最终导致直流闭锁甚至系统失稳。

由以上分析可知, 对交流系统而言, 故障清除后系统恢复的过程中, 直流系统向交流系统吸收大量的无功功率, 对系统造成二次冲击, 增加了交流系统电压失稳的风险。需要说明的是, 穗东站近区的粤中直流为柔性直流, 具备一定的暂态无功支撑能力(设计最大为 900 MVar)^[22-23], 但对于与粤中换流站电气距离较远的 ZJ、HL 等重负荷站点, 支撑能力有限, 无法根本解决局部电网的暂态电压稳定问题。因此, 优化常规直流在受端交流电网短路故障下的恢复特性, 即在交流侧发生短路故障时快速降低直流电流、在交流故障切除后合理缓慢恢复直流电流, 将有利于系统的暂态电压稳定性。

2 LCC-HVDC 控制策略优化

根据图 3, 通过降低直流系统在①②③过程中的无功消耗, 快速提升交流电压 U_s , 保持交直流系统稳定运行。以此为目, 提出了直流控制系统的优化控制策略。

2.1 直流 VDCOL 控制策略优化

低压限流控制是直流控制系统的重要环节, VDCOL 可以根据受端交流故障后的电压跌落程度对激增的直流电流进行限制, 减少换流站无功需求, 改善换相条件。传统直流 VDCOL 参数设置依据投产年电网运行特性或者直接取工程经验值, 当系统运行特性变化时, 合理调整参数设计将对直流系统的动态性能和整个交直流系统的电压稳定性起到有利的效果, 解决电网存在的实际问题。

VDCOL 策略通常有 4 个可调节的参数: 其中 U_H 、 U_L 为逆变侧 VDCOL 中直流电压上限值与下限值; I_H 、 I_L 为逆变侧 VDCOL 中直流电流指令上限值与下限值; 整流侧和逆变侧均设置 VDCOL 控制, 整流侧的电流整定值比逆变侧侧高 10%。如图 4 所示, 实线代表直流 VDCOL 原始 $U-I$ 曲线, 虚线代表本文提出的优化方案对应直流 VDCOL 的 $U-I$ 曲线, 下标 r、i 分别表示整流侧和逆变侧。

直流 VDCOL 策略动作时的直流电流指令 I_{ord} 与直流电压 U_d 之间的关系为:

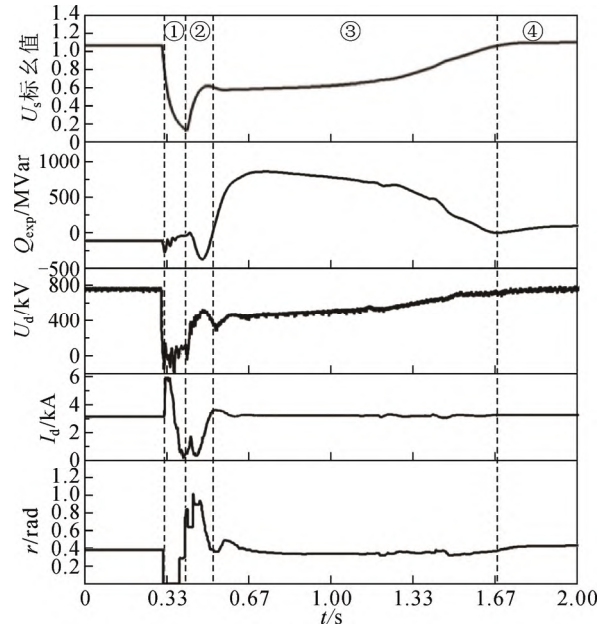


图 3 交流故障后交直流系统的恢复特性示意图
Fig.3 Schematic diagram of recovery characteristics of AC/HVDC system after AC fault

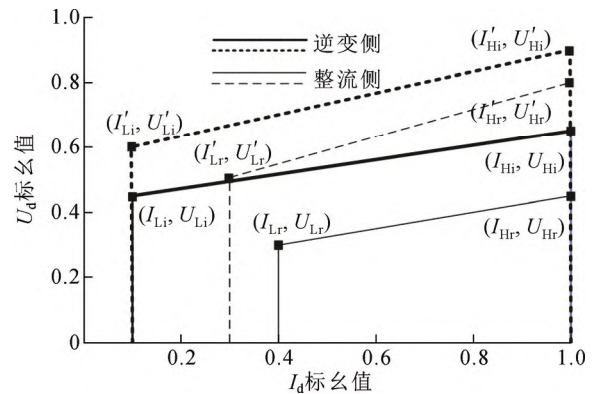


图 4 LCC-HVDC 的 VDCOL $U-I$ 特性
Fig.4 VDCOL $U-I$ characteristic of LCC-HVDC

$$I_{ord} = \begin{cases} I_H, & U_d \geq U_H \\ I_L + \frac{I_H - I_L}{U_H - U_L}(U_d - U_L), & U_L < U_d < U_H \\ I_L, & U_d \leq U_L \end{cases} \quad (3)$$

由式(3), 增大 U_H 、 U_L 和减小 I_H 、 I_L 可增加 VDCOL 的作用时间、限制或减缓直流电流指令 I_{ord} 的恢复速度, 从而直接减少故障过程中换流阀消耗无功 Q_c , 从而促进故障后交流系统电压的恢复。

基于以上原则, 针对表 1 所示的楚穗直流 VDCOL 原始参数进行了如下优化:

1) I_{Hr} 、 I_{Hi} 为恢复后的电流参考值, 无需调整; 逆变站 I_{Li} 标幺值为 0.1, 进一步调整意义不大, 本文主要针对 U_{Hr} 、 U_{Hi} 、 U_{Lr} 、 U_{Li} 、 I_{Lr} 开展优化。

表 1 楚穗直流 VDCOL 参数

Table 1 The VDCOL parameters of Chuxiong-suidong

LCC-HVDC					
方案	换流站	U_L	I_L	U_H	I_H
原始参数	整流站(r)	0.3	0.4	0.45	1
	逆变站(i)	0.45	0.1	0.65	1
优化后	整流站(r)	0.5	0.3	0.8	1
	逆变站(i)	0.6	0.1	0.9	1

2) 提升整流站 U_{Hr} 、逆变站 U_{Hi} , 实现故障后 VDCOL 功能快进慢退, 达到直流在故障期间快速降电流和故障后降低电流恢复速度的效果。

3) 提升整流站 U_{Lr} 、逆变站 U_{Li} , 使得在直流电压恢复的初始阶段保持最低电流限值为 I_{Lr} , 优先保证直流电压回升。

4) 降低整流站 I_{Lr} , 达到故障及故障清除后限制直流电流 I_{ord} 到较小值、减少无功消耗的效果。

基于对直流动态性能影响和提升直流近区电压稳定性的综合评估, 经多组参数比对和仿真研究, 优化后的 VDCOL 的 $U-I$ 曲线如表 1 的加黑字体所示, 可有效提升 VDCOL 功能的作用时间, 达到先升直流电压再升电流的控制效果, 减小直流恢复过程中无功消耗, 保障交流电压的快速回升。

2.2 附加直流功率上升速率限制策略

VDCOL 策略根据直流电压来限电流, 交流故障清除后直流电压恢复速度很快, 由此直流电流上升速度也较快, VDCOL 的作用时间较短, 相对于图 3 的第①②阶段。在图 3 的第③阶段恢复后期, 直流电压和直流电流恢复到额定值附近, 此时交流电压尚未完全恢复, 叠加大量感应电动机负荷的无功激增效应, 可能造成动态无功不平衡, 再次导致换相失败, 由此考虑在优化 VDCOL 参数的基础上, 附加功率上升速率限制措施, 进一步减缓直流电流的恢复速度。

从理论上考虑, 直流功率上升速率越慢, 故障过程中从交流吸收的无功越小; 但实际上, 考虑楚穗直流送电功率较大, 直流功率上升速率太慢可能导致送受端系统频率的大幅波动。根据工程经验, 一般选择限制直流功率上升速率在 0.8(标么值)/s, 对于三相永久故障, 从故障清除到恢复额定功率约 1 s, 远超出 VDCOL 的动作时间。

附加直流功率上升速率限制环节后, 限直流功率上升速率与优化后的 VDCOL 参数配合如式(4):

$$\begin{cases} I_{lim}(t) = \frac{P_0 + \frac{(P_n - P_0)t}{P_{lim}}}{U_d} \\ I'_{ord} = \min(I_{ord}, I_{lim}(t)) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_{lim}(t)$ 为限直流功率上升速率对应的电流指令; P_0 为限直流功率上升功能使能时刻直流功率; P_n 为直流额定功率; P_{lim} 为直流功率上升速率限制设定值; t 从限制直流功率上升功能激活时刻开始计时; I'_{ord} 为原始电流指令 I_{ord} 及 $I_{lim}(t)$ 的较小值。

由式(3)、(4), 在直流电压 $U_d < U_{Lr}$ 时, 由于 I_{Lr} 的数值较小, VDCOL 起主导作用, I'_{ord} 可近似为 I_{Lr} ; $U_d > U_{Lr}$ 时, 由于直流功率上升速率限制将直流电流限制在更小的数值, I'_{ord} 基本按照电流上升速率限制曲线 $I_{lim}(t)$ 线性给定。由此可知, 附加限直流功率上升速率策略后, 直流电流的恢复速度进一步变缓, 有利于故障恢复过程中的无功平衡和多次换相失败抑制。

2.3 控制策略优化逻辑自动切换策略

VDCOL 参数等控制逻辑对直流的动态性能至关重要, 本文设计的 VDCOL 策略优化并附加限制直流功率控制策略, 主要目的是为了解决受端严重故障(主要是三相及相间故障)时的暂态低电压问题, 其他故障工况如整流侧交流故障、直流线路故障以及逆变侧交流单相接地短路故障等, 仍应保持直流自身原有的暂态恢复特性。由此, 需设计有效的自适应切换逻辑, 自动区分故障类型。

本文通过识别穗东换流站母线电压幅值对优化控制策略的有效范围进行区分。根据大量仿真表明, 在穗东换、HL、ZJ、SX、BL、GC 和 CH 等穗东换流站近区的变电站母线出口处发生三相永久故障及部分相间接地故障, 穗东换交流母线正序电压 U_s 最低值会满足小于 0.5(标么值), 如表 2, 而其他电气距离更远的厂站母线出口处发生三永、相间及单瞬故障时, 穗东换流站母线电压均超过了 0.5(标么值), 应不激活控制策略优化逻辑, 从而将本文提出的优化策略对直流动态性能的影响可靠限制在较小的可控范围内。

同时考虑到暂态低电压的评判标准为交流电压长期低于 0.8(标么值), 由此可利用交流电压回升到 0.85(标么值)以上并延时一定时间后自动退出优化策略。直流优化控制逻辑自动切换方法详细设计如下:

1) 同时满足以下条件投入参数切换使能:

①条件 1: 优化控制策略功能投入;

②条件 2: 逆变站交流正序电压标幺值 $U_s < 0.5$, 持续 10 ms。

在满足逻辑使能后, 将 VDCOL 参数切换为优化参数, 并在功率恢复阶段对功率上升速率加以限制, 不限制功率下降速率。折算到电流控制, 在直流全压运行时, 电流速率限制在 1.6(标幺值)/s (单极运行) 或 0.8(标幺值)/s (双极运行)。

2) 满足以下任一条件复归参数切换逻辑复归, 将 VDCOL 参数切换回原始参数, 并退出限功率上升速率的功能:

条件①: 逆变站交流正序电压标幺值 $U_s > 0.85$ 且持续 2 s;

条件②: 极闭锁;

条件③: 直流站间通信故障。

综合以上设计, 形成最终的直流优化总体逻辑如图 5 所示。

3 控制策略优化对直流系统的影响分析

基于图 5 所设计的 LCC-HVDC 控制优化策略, 当穗东换近区交流线路发生严重的三永及相间接地故障可能导致系统暂态电压失稳时, 直流控保可通过识别交流母线低电压自动切换到优化控制逻辑, 降低直流恢复过程中的无功消耗, 保障交流电压的快速恢复; 而其余常见的直流线路故障、直流设备本体故障、整流侧交流系统故障和逆变侧单相接地短路故障等, 直流控保仍可保持原始设计的控制逻辑, 维持故障后直流功率快速恢复的控制特性不变。

为了校核所设计的优化策略逻辑对直流动态性能的影响, 基于实时仿真器(real-time digital simulation, RTDS)构建仿真试验系统, 接入楚穗直流的实际控制保护控制装置, 在楚穗直流双极全压 5000 MW 运行时, 投入优化控制策略功能, 模拟直流多类型工况下的多类型故障。部分典型故障的动作比对如表 3 所示, 仿真波形如图 6 所示。

1) 直流线路故障: 在各种直流线路的多类型故障下, 参数切换逻辑均未使能, 直流功率恢复到 90%的时间与优化前基本一致, 测试结果差异在误差范围内, 如图 6(a)。

2) 整流侧交流故障: 整流侧各种类型故障过程和恢复过程参数切换逻辑未使能, 受交流故障仿真触发时刻的影响, 优化前后直流功率恢复到 90%的时间差值在 20 ms(一个周波)以内, 对直流功率恢复特性影响较小, 如图 6(b)。

表 2 穗东换近区厂站交流故障时穗东换母线最小电压

Table 2 The minimum voltage of the bus in the vicinity of Sui-dong convert station during AC faults

站点	相间接地故障	三相接地故障
穗东换	0.47(标幺值)	0.05(标幺值)
HL	0.49(标幺值)	0.36(标幺值)
BL	0.60(标幺值)	0.19(标幺值)
SX	0.48(标幺值)	0.18(标幺值)
ZJ	0.56(标幺值)	0.32(标幺值)
GC	0.58(标幺值)	0.48(标幺值)
CH	0.47(标幺值)	0.34(标幺值)
宝安换	0.88(标幺值)	0.84(标幺值)
龙门换	0.73(标幺值)	0.57(标幺值)
FY	0.89(标幺值)	0.72(标幺值)

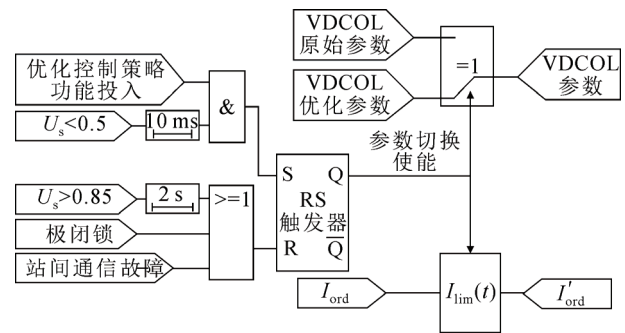


图 5 LCC-HVDC 的控制策略优化逻辑图

Fig.5 Logic diagram for optimizing control strategy of LCC-HVDC

表 3 典型故障下的楚穗直流恢复特性比对

Table 3 Comparison of Chuxiong-suidong HVDC project recovery characteristics under typical faults

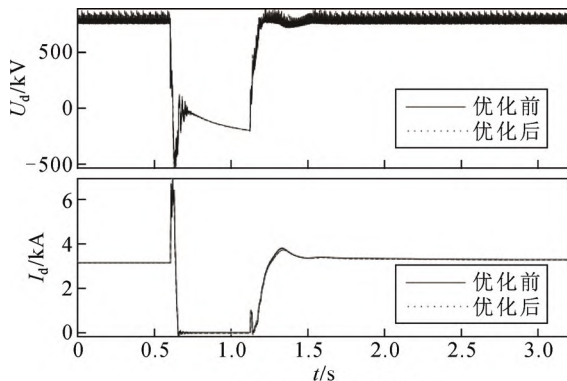
序号	典型故障	优化策略功能投退	直流恢复到 90%额定功率时间/ms	参数切换逻辑使能
1	极 1 线路中点发生金属性接地短路故障, 持续 100 ms	退出	611	—
		投入	609	否
2	整流站交流侧三相金属性接地故障, 持续 100 ms	退出	176	—
		投入	192	否
3	逆变站交流侧单相瞬时接地故障, 持续 100 ms	退出	289	—
		投入	289	否
4	逆变站交流侧 AB 相间接地故障, 持续 100 ms	退出	270	—
		投入	900	是
5	逆变站交流侧三相金属性接地故障, 持续 100 ms	退出	323	—
		投入	966	是

3) 逆变侧交流单相接地故障: 逆变侧单相接地故障过程和恢复过程和优化前比对差别较小, 参数切换逻辑因 $U_s > 0.5$ (标幺值)未使能。

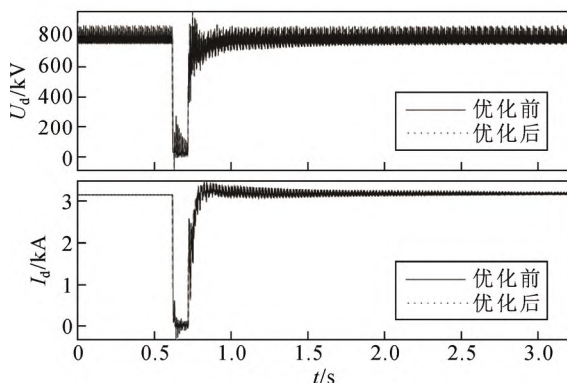
4) 逆变侧相间、相间接地和三相永久性故障

时, 直流控制系统能按照图 5 的设计切换 VDCOL 参数并限直流电流上升速率, 故障后有功率恢复会受到影, 约比优化前慢 700~1000 ms, 如图 6(c)。

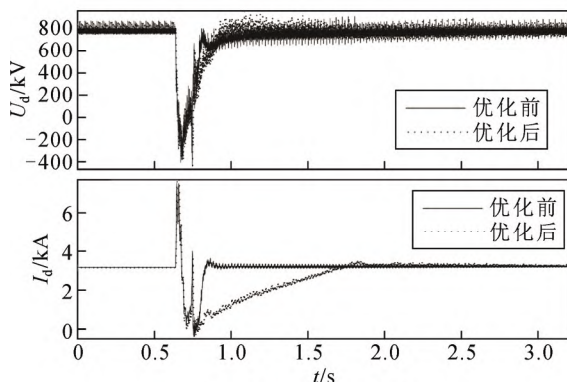
综上, 所设计的控制自动切换逻辑能有效保证直流优化控制策略的动作范围, 仅在故障发生概率较低的换流站近区交流线路三永或相间接地故障时使能, 从而在对直流动态性能影响有限的情况下, 可针对性地解决受端局部电网的暂态低电压问题, 兼顾了系统稳定与直流的动态性能; 同时, 由于优化控制策略未对原有控制保护逻辑做根本性调整, 不需要对直流控制保护的动态性能重新开展全面测



(a) 试验1仿真波形



(b) 试验2仿真波形



(c) 试验5仿真波形

图 6 优化策略对直流的动态性能影响对比图

Fig.6 Comparison of the impact of optimization strategies on the dynamic characteristics of HVDC

试, 就能够快速在现场应用实施。

4 综合仿真验证

为综合评估所设计的优化控制策略对交直流系统恢复特性的影响, 基于南方电网 2023 年年方式数据和 RTDS 实时仿真系统, 构建了含图 1 的广东电网 220 kV 及以上系统详细模型, 接入东莞片区近区的楚穗直流、新东直流、昆柳龙直流、兴安直流、粤中直流和南粤直流共 6 回直流实际控制保护装置, 粤东的东莞、惠州及深圳地区负荷均参照 BPA 计算数据的“50%感应电动机+50%恒阻抗”配置。根据图 5 所示的楚穗直流控制策略优化方案, 对楚穗直流控制保护软件进行了升级, 优化策略可根据“优化策略功能投退”的控制字进行投退。

4.1 穗东换暂态电压稳定特性仿真

遍历扫描穗东换近区各站点同一送电方向其中一回线路三相永久故障导致的双回线路同时跳闸(以下简称“双回三永 N-2”, 因 ZJ—宝安换仅单回运行, 故障模拟为单回三永跳闸), 计算和比对优化控制策略退出和投入状态下交直流系统的恢复特性, 部分典型仿真结果(如表 4)表明: 楚穗直流优化控制策略可有效提升穗东换近区的暂态电压稳定特性, 且明显改善故障后楚穗直流的恢复特性。

HL—BL 双回三永 N-2 算例如图 7 所示, 优化前在故障恢复过程中直流从交流系统吸收了大量无功功率, 导致交流系统电压一直不能恢复, 直流连续换相失败, 直流功率大幅波动, 如图 7(a)实线; 在此过程中粤中直流因交流系统电压比较低, 不能按照设计能力提供无功支撑^[24], 提供的无功功率支

Table 4 Comparison of system recovery characteristics after dual-line N-2 tripping in the vicinity of Suidong convert station

算例	优化前		优化后	
	电压标幺值低于 0.8 时间	直流恢复过程中换相失败	电压标幺值低于 0.8 时间	直流恢复过程中换相失败
HL—BL 双回三永 N-2	不恢复	连续换相失败后直流闭锁	0.49 s	无
穗东换—HL 双回三永 N-2	0.51 s	多次换相失败后恢复	0.18 s	无
穗东换—SX 双回三永 N-2	0.45 s	多次换相失败后恢复	0.22 s	无
ZJ—HL 双回三永 N-2	0.66 s	多次换相失败后恢复	0.29 s	无
ZJ—宝安换单回三永跳闸	1.53 s	多次换相失败后恢复	0.38 s	无

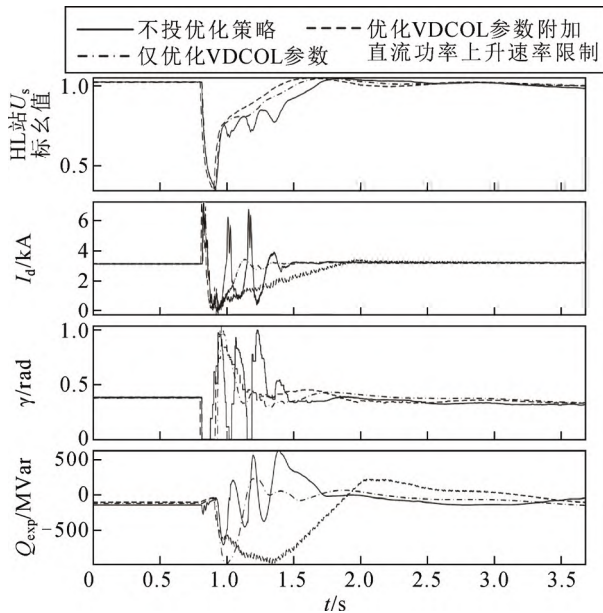


图9 穗东换—HL 双回三永 $N-2$ 时直流恢复特性对比
Fig.9 Comparison of HVDC recovery characteristics for Sui-dong convert station—HL dual-line $N-2$ tripping

送电容量占比较高, 直流外送功率的波动幅度和持续时间对云南电网的频率影响较大。投入本文所提出的优化控制措施后, 直流落点近区严重故障后直流功率恢复速度变慢(如图6所示慢700~1000 ms), 外送功率较长时间的盈余不利于送端电网的频率稳定, 可能造成云南电网频率短时升高。

为了定量评估本文所提出控制策略对送端电网频率稳定的影响, 本文选取最为严苛的2023年夏小方式作为研究基准, 其中云南送主网直流的总直流频率限制控制(frequency limit controller, FLC)向上调节能力设置为最小(1000 MW), 云南高周第一轮切机动作定值为50.8 Hz(延时定值0.2 s)。在楚穗直流满功率送电5000 MW时模拟穗东换近区多回交流线路(BL—HL、穗东—HL、SX—穗东以及HL—ZJ等)三永故障触发优化控制策略, 在故障及系统恢复过程中云南电网频率的峰值均不超过50.30 Hz, 如图11所示, 不会导致云南频率越限, 从而说明了直流控制策略优化对送端电网的频率稳定影响有限。

基于本文构建的多回直流硬件在环的电网实时仿真系统, 对楚穗直流优化控制策略开展了大量的遍历仿真试验, 全面充分验证了优化控制策略的有效性和可行性, 经专家论证后于2023年初完成现场实施; 采用类似技术路线的新东直流、兴安直流控制策略优化也于2022年完成现场实施^[25]。三回

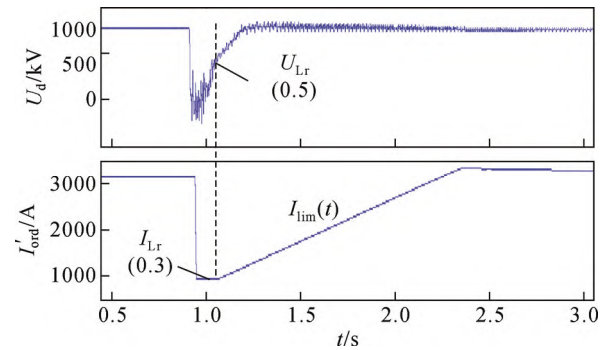


图10 工况③直流电压与电流指令曲线
Fig.10 DC voltage and current reference curve of working conditions ③

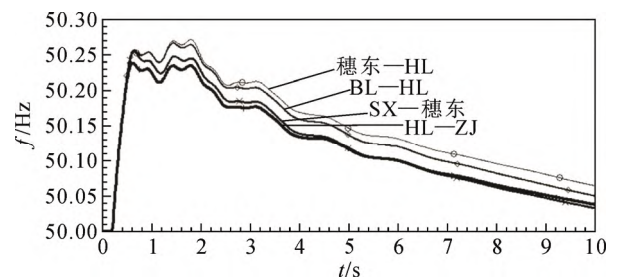


图11 穗东换近区线路三永 $N-2$ 故障云南频率响应
Fig.11 Frequency response of Yunnan power grid caused by the dual-line $N-2$ tripping in near area of Sui-dong convert station

大容量直流控制保护升级完成后, 经历了直流近区多个故障的冲击, 均能够按照设计的控制策略正确响应, 保障了莞深负荷中心电网的安全稳定运行。

5 结论

本文针对穗东换流站近区可能存在的严重暂态低电压问题, 分析了影响局部电网电压稳定的主要因素, 提出限制故障清除后直流电流恢复速度、减少从交流系统中吸收无功功率的直流控制逻辑优化策略, 通过理论分析及大量仿真验证, 结论如下:

1) 根据受端交流一次系统的变化, 针对性地优化直流VDCOL参数, 实现VDCOL功能快进慢退, 先升电压再升电流的控制效果, 可减小直流恢复过程中无功消耗, 快速提升交流系统电压;

2) 在可能导致受端电网暂态电压失稳的相间或三相接地故障中, 通过限制直流功率上升速率、牺牲部分直流动态性能的控制代价进一步支撑受端交流系统电压的快速恢复, 在一定程度上改善故障恢复过程中直流功率大幅波动、多次换相失败的问题。

题,同时不会导致直流送端频率失稳;

3) 所提出的相关控制策略优化措施已在楚穗直流工程现场实施,类似的技术方案也在新东直流、兴安直流应用,作为交流一次网架及配套电源完善前的保底措施,确保了大湾区负荷中心的可靠供电。

参考文献 References

- [1] 饶宏, 卢斯煜, 卓映君, 等. “双碳”目标下南方区域新型电力系统重点问题研究[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 74-83.
RAO Hong, LU Siyu, ZHUO Yingjun, et al. Key problems of new power systems in the southern region towards carbon peak and carbon neutrality[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 74-83.
- [2] 饶宏, 黄伟煌, 郭知非, 等. 柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3347-3355.
RAO Hong, HUANG Weihuang, GUO Zhifei, et al. Practical experience of VSC-HVDC transmission in large grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3347-3355.
- [3] 赵晋泉, 汤建军, 吴迪, 等. 直流馈入受端电网暂态电压与频率稳定紧急协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 45-53.
ZHAO Jinquan, TANG Jianjun, WU Di, et al. Emergency coordination control strategy for transient voltage and transient frequency stability in HVDC Infeed receiving-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 45-53.
- [4] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2095-2102.
JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [5] 简文, 周自强, 唐飞, 等. 抑制多馈入直流换相失败的同步调相机优化配置方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 169-177.
JIAN Wen, ZHOU Ziqiang, TANG Fei, et al. Optimal configuration of synchronous condensers for suppressing multi-infeed DC commutation failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 169-177.
- [6] 李兆伟, 吴雪莲, 曹路, 等. 抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 91-97.
LI Zhaowei, WU Xuelian, CAO Lu, et al. Emergency control of synchronous condenser to suppress DC continuous commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 91-97.
- [7] 周启文, 魏星, 王鹏飞, 等. 链式 STATCOM 并网电流直流分量间接闭环抑制[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3146-3154.
ZHOU Qiwen, WEI Xing, WANG Pengfei, et al. Indirect closed-loop DC current suppression for cascaded STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3146-3154.
- [8] 樊丽娟, 金小明. 云广直流系统应对交流低电压的直流功率限制功能参数整定[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 21-24.
FAN Lijuan, JIN Xiaoming. Parameter setting for Yunnan-Guangdong DC system's power limitation function responding to the ac low voltage[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 21-24.
- [9] 许涛, 吴雪莲, 李兆伟, 等. 改善系统频率稳定性的多直流功率紧急支援协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 69-77, 143.
XU Tao, WU Xuelian, LI Zhaowei, et al. Coordinated control strategy of multi-DC emergency power support to improve frequency stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 69-77, 143.
- [10] 孙大雁, 周海强, 熊浩清, 等. 基于灵敏度分析的直流受端系统紧急负荷控制优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7267-7275.
SUN Dayan, ZHOU Haiqiang, XIONG Haoqing, et al. A sensitivities analysis based emergency load shedding optimization method for the HVDC receiving end system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7267-7275.
- [11] 洪嘉乐, 秦亮. 馈入弱交流系统的直流输电控制参数优化分析[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 113-122.
HONG Jiale, QIN Liang. Optimization analysis of control parameters of HVDC transmission system fed into weak AC system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 113-122.
- [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.
ZHOU Hongyu, YAO Wei, LI Chenghao, et al. A predictive voltage dependent current order limiter with the ability to reduce the risk of first commutation failure of HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3179-3189.
- [13] 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): 2740-2748.
WANG Lishu, LIU Bo, QIAO Shuaxiang, et al. Design of precise variable slope VDCOL for changing the method of obtaining compensation voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2740-2748.
- [14] 刘勃, 陈中, 杨凯, 等. 基于定等效直流输入电阻的低压限流控制器优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 97-103.
LIU Bo, CHEN Zhong, YANG Kai, et al. Optimal control strategy of voltage dependent current order limiter based on constant equivalent DC input resistance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 97-103.
- [15] 李生虎, 李忆恺, 陶帝文, 等. UHVDC 分层接入方式下非故障层换相失败改进抑制措施研究[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4502-4511.
LI Shenghu, LI Yikai, TAO Diwen, et al. Improved suppression measure to commutation failure at non-fault layer of UHVDC under hierarchical connection mode[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4502-4511.
- [16] 王增平, 胡加伟, 王彤, 等. 大容量直流换相失败后功率恢复速率对送端系统暂态稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1815-1824.
WANG Zengping, HU Jiawei, WANG Tong, et al. Analysis of impact of power recovery speed on transient stability of sending-side system after large capacity HVDC commutation failure[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1815-1824.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统电压稳定评价导则: GB/T 40615—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guides of power system voltage stability evaluation: GB/T 40615—2021[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2021.
- [18] 雷兴, 薛禹胜, 薛峰, 等. 感应发电机暂态电压稳定性定量分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 1-6.
LEI Xing, XUE Yusheng, XUE Feng, et al. Quantitative analysis for transient voltage stability of induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 1-6.
- [19] 赵兵, 汤涌. 感应电动机负荷的动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 71-77.
ZHAO Bing, TANG Yong. Dynamic characteristics analysis of induction motor loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 71-77.
- [20] 林峰, 梅勇, 朱益华, 等. 网络攻击对电力系统典型场景全过

- 程影响综述[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 61-75.
- LIN Feng, MEI Yong, ZHU Yihua, et al. Overview of the entire process influence of cyber attack on typical scenarios of power systems[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 61-75.
- [21] 汤奕, 郑晨一, 王玉, 等. 考虑交直流无功交互特性的换相失败预测控制优化方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 50-57.
- TANG Yi, ZHENG Chenyi, WANG Yu, et al. Optimization method for commutation failure prevention control considering AC/DC Reactive power interaction characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 50-57.
- [22] 毛炽祖, 娄伟涛, 李清, 等. 混合多馈入直流输电系统交流故障下 VSC 暂态调压控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2905-2913.
- MAO Chizu, LOU Weitao, LI Qing, et al. VSC transient voltage regulation control strategy under AC faults in hybrid multi-infeed DC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2905-2913.
- [23] 杨燕, 金楚, 程鑫, 等. 基于大湾区外环的柔性直流互联方案[J]. 南方电网技术, 2021, 15(3): 15-21.
- YANG Yan, JIN Chu, CHENG Xin, et al. Flexible DC Interconnection scheme based on the outer ring of Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3): 15-21.
- [24] 孙鹏伟, 洪潮, 周保荣, 等. 大容量柔性直流分极接入电网方式及对控制保护系统的影响[J]. 南方电网技术, 2020, 14(10): 1-8.
- SUN Pengwei, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Large capacity VSC-HVDC split-pole feeding into power grid and its impact on control and protection systems[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(10): 1-8.
- [25] 谢惠藩, 常东旭, 刘涛, 等. 提升电网暂态电压稳定特性的直流自适应 VDCOL 切换策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 1-10.
- XIE Huifan, CHANG Dongxu, LIU Tao, et al. Adaptive HVDC VDCOL switching strategy to improve the stability characteristics of transient voltage in power grid[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 1-10.



ZHU Yihua
Senior engineer
Corresponding author

朱益华(通信作者)
1988—, 男, 硕士, 高工
主要从事电力系统稳定控制和直流控制保护仿真研究
E-mail: zhuyih@csg.cn



CHANG Dongxu
Professor

常东旭
1982—, 男, 硕士, 教授级高工
主要从事电力系统稳定控制分析与仿真研究
E-mail: changdx@csg.cn

收稿日期 2023-05-10 修回日期 2023-08-25 编辑 陈蔓