

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240908

# 新型同送同受路径的多回直流系统交互影响及协调恢复分析

易建波<sup>1</sup>, 王泽宇<sup>2</sup>, 胡维昊<sup>1</sup>, 饶宇飞<sup>3</sup>, 李程昊<sup>3</sup>

(1. 低碳智慧电力能源系统四川省重点实验室(电子科技大学), 四川 成都 611731; 2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 青豫与天中特高压直流已形成近似同送同受路径的多回直流输电系统, 其送受端的网架结构和子系统间的交互特性更加复杂, 因此故障交互影响和协调恢复问题是目前系统稳定研究的焦点。量化分析了多回直流各子系统电压交互特性, 重新修订了适用于评价多回直流系统的交互因子和有效短路比, 推导出实用的多回直流协调恢复因子实用计算方法。在此基础上, 提出了由多回直流协调恢复因子指导恢复秩序、通过各子系统非线性低压限流环节控制配合的多回直流协调恢复策略。最后经过多回直流系统等值模型仿真测试, 表明所提协调恢复策略控制效果最优, 所推导的多回直流协调恢复因子工程实用性强。

**关键词:** 多回特高压直流输电系统; 电压交互特性; 协调恢复策略; 低压限流环节

## Analysis of the interaction impacts and coordinated recovery of new multi-UHVDC system with similar sending and receiving paths

YI Jianbo<sup>1</sup>, WANG Zeyu<sup>2</sup>, HU Weihao<sup>1</sup>, RAO Yufei<sup>3</sup>, LI Chenghao<sup>3</sup>

(1. The Low Carbon Intelligent Power and Energy System Key Laboratory of Sichuan Province (University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 611731, China; 2. Economic and Technical Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 3. Electric Power Scientific Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Qingyu and Tianzhong UHVDC systems have formed a multi-UHVDC transmission system with similar sending and receiving paths. This results in more complex network topologies and stronger interdependencies between subsystems at both ends. Consequently, the issues of fault interaction and coordinated recovery have become key focal points in current system stabilization research. This paper quantitatively analyzes the voltage interaction characteristics among the subsystems of multi-UHVDC systems and revises the multi-UHVDC voltage interaction factor (MDC\_VIF) and the multi-UHVDC effective short circuit ratio (MDC\_ESCR) to better suit the evaluation of such systems. Subsequently, a practical calculation method of multi-UHVDC coordinated recovery factor (MDC\_CRF) is derived. Then a multi-UHVDC coordinated recovery strategy is proposed with the recovery order guided by MDC\_CRF and fitted by the control of the nonlinear voltage dependent current order limiter of each subsystem. Finally, simulation tests based on an equivalent model of a multi-UHVDC show that the proposed coordinated recovery strategy has optimal control effect, and the derived multi-UHVDC coordinated recovery factor is highly practical for engineering applications.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52277083).

**Key words:** multi-UHVDC transmission systems; voltage interaction characteristics; coordinated recovery strategy; voltage dependent current order limiter

## 0 引言

近年来我国大容量特高压直流系统不断投运,

清洁能源消纳能力得到持续提升, 在加快推进电力供需矛盾协调解决的同时, 也促使电网“强直弱交”的系统特性日渐凸显<sup>[1-5]</sup>。特别是青豫±800 kV特高压直流工程投运后, 与原有的天中直流形成了新型多回直流(近似同送同受路径)输电结构。新型输电结构送、受端交流母线间电气耦合更加复杂, 受端

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目资助(52277083); 四川省科技厅重点研发计划项目资助(2021YFG0098)

线路故障后的恢复过程与其换流母线间的电压交互特性关系密切<sup>[6-7]</sup>。因此该多回直流系统一旦面临故障冲击, 其恢复秩序问题缺乏精细的理论支撑, 系统快速回稳存在策略性盲区。

为研究直流系统受端线路恢复秩序问题, 早期利用有效短路比(effective short circuit ratio, ESCR)作为故障后指导恢复的依据。对于多回直流系统, 受端联络阻抗及交互特性更为复杂, 计算 ESCR 未计及线路间的交互特性, 不适合指导故障后恢复秩序。文献[8]讨论强交互下受端近区弱支撑电网电压失稳风险, 提出基于受端交互特性的线路恢复秩序计算方法。针对多馈入系统交互作用, 国际大电网会议 B4 工作组(CIGRE-WG-B4)提出了多馈入交互因子(multi-infeed interaction factor, MIIF), 用于表征受端系统交互作用<sup>[9]</sup>, 文献[10-11]进一步结合直流控制方式推导出 MIIF 实用计算方法, 文献[12-15]利用 MIIF 推导了适合评估多馈入系统强度的多馈入有效短路比(multi-infeed effective short circuit ratio, MIESCR)。基于上述研究, 文献[16-17]综合分析了影响多馈入直流协调恢复的关键因素, 结合 MIIF 和 MIESCR 提出多馈入功率恢复因子和多馈入直流电压功率恢复强度作为衡量各直流恢复优先级量化指标, 提升了多馈入直流系统暂态稳定性。文献[18]提出一种多馈入直流系统的渐进式有序错峰恢复策略, 借助低压限流环节(voltage dependent current order limiter, VDCOL)实现多馈入直流电压与功率的快速恢复。文献[19-21]进一步从 VDCOL 参数、电压与电流指令关系等方面, 对 VDCOL 进行相应优化, 提升不同电压区间段内直流响应速度。对于送、受端交互特性更复杂的多回直流系统, 上述交互指标表征方法准确性不足, 故障后恢复秩序和控制策略配合策略难以制定。

因此, 针对天中-青豫新型多回直流系统受端强度评价、协调恢复秩序指导和 VDCOL 配合策略问题亟待深入研究。本文基于天中-青豫多回直流系统等值结构和运行特性, 详细分析因复杂电压交互导致的多回直流受端连锁换相失败风险, 推导可量化评价交互特性的新型多回直流交互因子, 并且重新修订适用于多回直流系统的有效短路比。其次, 讨论多回直流各子系统恢复秩序的基本原则, 基于新修订的交互特性指标计算表征各子系统协调恢复优先级多回直流协调恢复因子。根据各子系统恢复秩序和速度的需求, 分析各子系统非线性 VDCOL 控制器参数配合策略。最后, 利用天中-青豫多回直流等值系统对协调恢复策略的可行性和有效性进行验

证, 对比分析本文方法的先进性和工程实用价值。

## 1 多回直流系统交互特性分析

### 1.1 多回直流系统受端连锁换相失败风险

青豫±800 kV 特高压直流输电工程投运后, 西北电网交流近区 750 kV 联络网架和河南电网 500 kV 支撑网架通过青豫直流和已有的天中直流两回特高压直流输电线路联接, 形成近似同送同受路径的多回特高压直流输电系统。为分析该多回直流系统受到冲击后各子系统母线间的电压交互情况, 建立天中-青豫多回直流输电系统等值拓扑如图 1 所示。

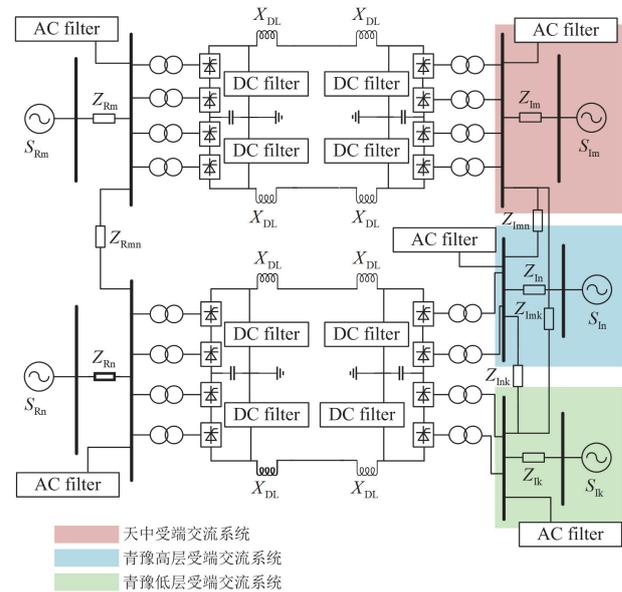


图 1 天中-青豫多回直流输电系统等值拓扑图

Fig. 1 Equivalent topology of Tianzhong-Qingyu multi-UHVDC transmission system

图 1 中下标 R/I 分别表示整流侧/逆变侧电气量, 上端表示天中直流线路, 下端表示青豫直流线路。由于青豫受端分层接入 500 kV 交流电网, 对受端系统进行电气量分析时, m 表示天中系统受端换流站, n 表示青豫系统受端高层换流站, k 表示青豫系统受端低层换流站。送端交流母线联系阻抗为  $Z_{Rmn}$ , 受端天中系统与青豫高层和青豫低层交流系统通过  $Z_{Lmn}$  和  $Z_{Lmk}$  连接, 青豫高层和青豫低层交流系统间通过阻抗  $Z_{Lnk}$  连接。天中-青豫典型多回直流输电系统部分参数见附录 A 表 A1。

对于上述复杂的多回直流系统而言, 受端交流侧子系统电压交互情况相较于多馈入系统更加复杂。并且文献[22-23]研究指出, 复杂多回直流系统

故障干扰下的送端过电压同样会加剧受端换相失败风险。因此,针对图1运行系统,利用送、受端强行解耦条件计算的MIIF和MIESCR指标评价故障和交互效应引发的换相失败风险是不准确的。

根据直流输电系统稳态运行方程,计及交流侧及直流系统各个电气量间存在相互耦合关系,推导出逆变阀组关断角 $\gamma$ 与整流侧、逆变侧交流电压间的函数表达式。具体推导过程见附录B。

$$\gamma = \arccos \left( K_1(\alpha) \frac{U_{acR}}{U_{acI}} + K_2(\beta) \right) \quad (1)$$

式中: $U_{acR}$ 、 $U_{acI}$ 分别为整流侧、逆变侧交流电压; $K_1(\alpha)$ 、 $K_2(\beta)$ 分别可视作仅以触发角 $\alpha$ 和超前触发角 $\beta$ 为变量的函数。基于整流站控制环节PI控制器的延时特性,假设故障发生时 $\alpha$ 和 $\beta$ 不发生改变,函数 $K_1(\alpha)$ 、 $K_2(\beta)$ 为定值,逆变侧交流电压跌落、整流侧交流过电压均会增加换相失败风险。

结合多回直流受端及送端交流子系统间的电气耦合特性,图1中受端子系统可能发生受端某逆变器换相失败以及不同逆变器间的连锁换相失败问题。特别是某交流子系统故障,母线电压跌落后,旁路子系统受端近区电网通过联络阻抗向故障子系统进行无功支援,导致非故障子系统电压跌落,从而增加连锁换相失败风险。

另外,如果考虑送、受端交互影响,故障系统电压跌落会直接减小直流系统无功需求,导致送端出现无功盈余,送端交流换流母线电压升高,送端交流子系统间盈余无功相互流动,促使非故障送端交流子系统母线电压升高,也会增加受端逆变器连锁换相失败风险。

因此,针对图1系统的各交流母线电压交互特性需要细致的量化解耦,修正适合该系统的MIIF和MIESCR指标评价方法,为换相失败问题的故障恢复策略提供理论依据,避免连锁换相失败和盈余无功无序流动问题。

## 1.2 多回直流系统交互特性量化分析

假设图1中天中直流受端逆变侧交流母线发生故障导致电压跌落,跌落值为 $\Delta U_{Im}$ 。交互作用导致的青豫高层受端电压跌落值为 $\Delta U_{In}$ ,故障发生后青豫高层系统的换流母线电压 $U_{In}$ 为

$$U_{In} = U_{In0} + \Delta U_{In} = U_{In0} + \sum \Delta U_{Im} + \sum \Delta U_{IRn} \quad (2)$$

式中: $U_{In0}$ 表示故障前青豫高层系统的电压; $\sum \Delta U_{Im}$ 表示仅考虑受端逆变侧电压交互特性导致的电压变化量之和; $\sum \Delta U_{IRn}$ 表示因故障系统电压跌落后送端运行受扰,送端又通过系统逻辑控制、参

数传递等传导影响受端运行情况下的电压变化量。

1)  $\sum \Delta U_{Im}$  计算(连锁换相失败受端间接成因)

$\sum \Delta U_{Im}$ 仅考虑受端交互情况,因此可使用MIIF表征。即

$$\sum \Delta U_{Im} = \Delta U_{Im} \cdot H_{MIIF-nm} \quad (3)$$

其中:

$$H_{MIIF-nm} = \frac{\Delta U_{In}}{1\%U_{Im0}} = \left| \frac{Z_{Imn}}{Z_{Imm}} \right| \quad (4)$$

$H_{MIIF}$ 是CIGRE WG B4工作组提出的多馈入交互因子<sup>[24-25]</sup>,可以通过受端换流站间电气结构参数求得。其中: $Z_{Imn}$ 为阻抗矩阵中受端节点m与节点n间的互阻抗; $Z_{Imm}$ 为节点m的自阻抗。

2)  $\sum \Delta U_{IRn}$  计算(连锁换相失败多端间接成因)

$\sum \Delta U_{IRn}$ 的计算需考虑直流输电线路对电压漂移的影响及送端交互作用影响。主要体现在传导方式上的不同,且传导构造较为繁琐。

$$\sum \Delta U_{IRn} = \Delta U_{IRmn} + \Delta U_{IRmkn} + O(\Delta U_{IRmn}, \Delta U_{IRmkn}) \approx \Delta U_{IRmn} + \Delta U_{IRmkn} \quad (5)$$

式中: $\Delta U_{IRmn}$ 表示经一次电压传导(即由天中系统受端电压跌落后送端运行受扰,再由送端通过参数传递等影响天中受端运行)的电压偏差量; $\Delta U_{IRmkn}$ 表示经二次传导的电压偏差量(二次传导分两种传导情况,即送端运行受扰后在送端经过两次电压传导反馈至受端,或送端受扰后引起受端发生两次电压传导)。至于多次传导特性,基于受端稳定强度考量,一般认为非故障层换相过程所受扰动微乎其微,以一次传导及二次传导变化量高阶无穷小 $O(\Delta U_{IRmn}, \Delta U_{IRmkn})$ 表示。

$\Delta U_{IRmn}$ 可通过整流侧及逆变侧交流电压 $U_R$ 、 $U_I$ 的函数关系和多馈出交互因子 $H_{MOVIF}$ 表示。

$$\begin{cases} \Delta U_{IRmn} = \Delta U_{Im} \cdot \frac{\Delta U_{Rm}}{\Delta U_{Im}} \cdot H_{MOVIF-nm} \cdot \frac{\Delta U_{In}}{\Delta U_{Rn}} \\ H_{MOVIF-nm} = \frac{\Delta U_{Rn}}{1\%U_{Rm0}} = \left| \frac{Z_{Rmn}}{Z_{Rmm}} \right| \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta U_{Rm}$ 表示故障发生后天中送端电压偏移量; $\Delta U_{Rn}$ 表示故障发生后青豫高层送端电压偏移量; $U_{Rm0}$ 表示故障前天中送端系统的电压; $Z_{Rmn}$ 为送端天中与青豫交流母线间的互阻抗; $Z_{Rmm}$ 为送端天中交流母线自阻抗。由于故障发生瞬间电压跌落时间极短,因此可通过送受端电压运行方程,利用极限与增量的关系和复合函数求导法则快速求取。

$$\Delta U_{lm} \cdot \frac{\Delta U_{Rm}}{\Delta U_{lm}} \approx \Delta U_{lm} \cdot \lim \frac{\Delta U_{Rm}}{\Delta U_{lm}} \approx \Delta U_{lm} \cdot \frac{\partial U_{acRm}}{\partial U_{acIm}} \quad (7)$$

式中:  $U_{acRm}$ 、 $U_{acIm}$  分别表示天中送端和受端交流母线电压的有效值。整流侧及逆变侧换流母线电压方程为

$$\begin{cases} U_{acR} = \frac{U_{dR} + \frac{3}{\pi} X_{cR} I_d N_1}{1.35 N_1 \cos \alpha} \\ U_{acI} = \frac{U_{dI} + \frac{3}{\pi} X_{cI} I_d N_2}{1.35 N_2 \cos \gamma} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U_{acR}$ 、 $U_{acI}$  分别为直流系统送、受端母线电压有效值;  $X_{cR}$ 、 $X_{cI}$  分别为整流站和逆变站等效换相电抗;  $N_1$ 、 $N_2$  分别为整流站和逆变站中 6 脉动换流器数目;  $\gamma$  为逆变站关断角;  $U_{dR}$ 、 $U_{dI}$  分别为整流站、逆变站直流电压, 与直流输电线路电流  $I_d$  成正相关, 且  $U_{dR}$ 、 $U_{dI}$  均可用直流电压  $U_d$  (输电线路中点电压值) 表示, 即

$$U_{dR} = U_d + \frac{R_d I_d}{2}, \quad U_{dI} = U_d - \frac{R_d I_d}{2} \quad (9)$$

式中:  $R_d$  表示单级直流回路阻抗。结合直流输电系统直流电压和直流电流关系, 将整流侧和逆变侧换流母线电压代入式(9), 求得

$$\frac{\partial U_{acR}}{\partial U_{acI}} = \frac{\left( \frac{1+0.45R_d}{0.9} + \frac{3}{\pi} X_{cR} N_1 \right) N_2 \cos \gamma}{\left( \frac{1-0.45R_d}{0.9} + \frac{3}{\pi} X_{cI} N_2 \right) N_1 \cos \alpha} \quad (10)$$

将式(10)代入式(6)即可得出经一次传导的电压偏差量  $\Delta U_{IRmn}$  的快速计算公式。

$$\Delta U_{IRmn} = \frac{\partial U_{Rm}}{\partial U_{lm}} \cdot H_{MOVIF-mn} \cdot \frac{\partial U_{ln}}{\partial U_{Rn}} \cdot \Delta U_{lm} \quad (11)$$

经二次传导的电压偏差量  $\Delta U_{IRmnk}$  需考虑多种传导方式, 参考一次传导计算过程, 分别计算两种传导类型下系统受端电压偏差为

$$\begin{cases} \Delta U_{IRmnk} = \Delta U_{lm-Rmkn-ln} + \Delta U_{lm-Rmk-lkn} \\ \Delta U_{lm-Rmkn-ln} = \Delta U_{lm} \cdot \frac{\partial U_{Rm}}{\partial U_{lm}} \cdot H_{MOVIF-km} \cdot H_{MOVIF-nk} \cdot \frac{\partial U_{ln}}{\partial U_{Rn}} \\ \Delta U_{lm-Rmk-lkn} = \Delta U_{lm} \cdot \frac{\partial U_{Rm}}{\partial U_{lm}} \cdot H_{MOVIF-km} \cdot \frac{\partial U_{lk}}{\partial U_{Rk}} \cdot H_{MIIF-nk} \end{cases} \quad (12)$$

### 3) 修订 MDC\_VIF

结合一次、二次传导电压偏差及交互作用定义, 推导出多回直流交互因子(multi-UHVDC voltage interaction factor, MDC\_VIF)表达式。

$$H_{MDC\_VIF-nm} = \frac{\Delta U_{ln}}{1\% \Delta U_{lm}} = H_{MIIF-nm} + \Delta H_{VIF-nm}$$

$$\begin{cases} \Delta H_{VIF-nm} = H_{VIF-1} + H_{VIF-2} + H_{VIF-3} \\ H_{VIF-1} = \frac{\partial U_{Rm}}{\partial U_{lm}} \cdot H_{MOVIF-nm} \cdot \frac{\partial U_{ln}}{\partial U_{Rn}} \\ H_{VIF-2} = \frac{\partial U_{Rm}}{\partial U_{lm}} \cdot H_{MOVIF-km} \cdot H_{MOVIF-nk} \cdot \frac{\partial U_{ln}}{\partial U_{Rn}} \\ H_{VIF-3} = \frac{\partial U_{Rm}}{\partial U_{lm}} \cdot H_{MOVIF-km} \cdot H_{MIIF-nk} \cdot \frac{\partial U_{lk}}{\partial U_{Rk}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $H_{MDC\_VIF-nm}$  表示多回直流系统中天中和青豫高层之间的交互因子;  $\Delta H_{VIF-nm}$  表示天中和青豫高层之间的电压交互因子变化量, 由天中、青豫高层、青豫低层三者之间的电压交互变化量  $H_{VIF-1}$ 、 $H_{VIF-2}$ 、 $H_{VIF-3}$  共同影响。

MDC\_VIF 指标结合多回直流连锁换相失败成因量化推演受端电压交互情况, 考虑了整流侧和逆变侧母线电压的交互情况, 结果更加准确地反映交流系统复杂的电压交互特性。具体验证见附录 C。

### 4) 修订 MDC\_ESCR

针对图 1 新型多回直流系统复杂的运行工况, 受端系统电压受到扰动后, 各子系统间无功交互情况异常复杂, 容易导致关联系统的电压跌落程度加重。目前仅有针对多馈入直流系统的 MIESCR 指标用于评价受端交流系统对直流系统的电压支撑能力, 如式(14)所示。

$$\begin{cases} H_{MIESCR-i} = \frac{S_{aci} - Q_{ci}}{P_{dc-eqNi}} \\ P_{dc-eqNi} = P_{dNi} + \sum_{j=1, j \neq i}^n H_{MIIF-ji} \cdot P_{dNj} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $H_{MIESCR-i}$  为多馈入直流系统  $i$  的 MIESCR 指标;  $S_{aci}$  为系统  $i$  逆变侧交流母线处短路容量;  $Q_{ci}$  为无功补偿装置容量;  $P_{dc-eqNi}$  为考虑交互特性对直流子系统功率影响的多馈入等效直流功率;  $H_{MIIF-ji}$  为多馈入直流系统  $j$  对系统  $i$  的 MIIF 指标。

MIESCR 指标并未计及受端交流子系统的无功影响, 但实际上多馈入系统受端存在无功补偿装置, 以及因受端交流侧间电压交互带来的无功转移。即便无功补偿装置的容量可认定为固定参数, 受端交流侧电压真实交互情况也对交流母线电压支撑能力影响较大。

由于 MIESCR 指标在进行等效功率折算时借助 MIIF 指标实现, 附录 C 详细验证了 MIIF 在多回直流场景下的局限性。因此, 结合前文交互因子定义,

重新推导多回等效直流功率表达式如式(15)所示。

$$P_{dc-eqNi} = P_{dNi} + \sum_{j=1, j \neq i}^n H_{MDC\_VIF-ji} \cdot P_{dNj} \quad (15)$$

解耦并修正多回等效直流功率后进一步得出多回直流有效短路比(multi-UHVDC effective short circuit ratio, MDC\_ESCR), 则多回直流子系统  $i$  的 MDC\_ESCR 指标  $H_{MDC\_ESCR-i}$  表达式为

$$H_{MDC\_ESCR-i} = \frac{S_{aci} - Q_{ci}}{P_{dc-eqNi}} = \frac{S_{aci} - Q_{ci}}{P_{dNi} + \sum_{j=1, j \neq i}^n H_{MDC\_VIF-ji} \cdot P_{dNj}} \quad (16)$$

$H_{MDC\_ESCR}$  更精细地考虑多回场景下各受端复杂的交互作用带来的无功影响, 交互作用强度由  $H_{MDC\_VIF}$  依据多回直流输电结构参数计算给出, 为新型场景下受端交流电网强度表征及交直流系统间交互耦合特性描述提供了新的思路, 也为多回直流系统受端协调恢复秩序的制定奠定了理论基础。

## 2 多回直流协调恢复秩序建立

经过上述多回直流系统交互特性的详细分析, 可以确定多回直流系统的有序恢复受多方面因素的影响。故障后的稳定恢复时序主要受系统电压稳定性冲击影响最大的直流子系统制约, 实质上直流子系统抵抗换相失败能力越弱、自动恢复能力越弱。因此恢复秩序遵循基本原则应为: ①要降低受故障影响换流站的无功消耗从而提升电压恢复速度; ②恢复过程对其他子系统影响小的优先恢复。

目前仅利用 MIESCR 或多馈入功率恢复因子和多馈入直流电压功率恢复强度评价和指导多回直流系统恢复, 这偏离了多回场景实际运行工况。因此综合考虑多回受端强度及电压恢复情况建立恢复秩序, 结合修正后的 MDC\_VIF 及 MDC\_ESCR 指标, 提出多回直流协调恢复因子(multi-UHVDC coordinate recovery factor, MDC\_CRF)。

$$H_{MDC\_CRF-i} = H_{MDC\_ESCR-i} \cdot (K_1 + K_2)$$

$$\begin{cases} K_1 = \frac{P_{dmaxN}}{P_{dNi}} \\ K_2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n H_{MDC\_VIF-ji} \cdot P_{dNj}}{\sum_{j=1, j \neq i}^n P_{dNj}} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $H_{MDC\_CRF-i}$  表示直流受端子系统  $i$  的协调恢复因子;  $H_{MDC\_ESCR-i} \cdot K_1$  经直流功率折算, 表示自身系统无功功率需求情况,  $K_1$  为直流功率折算比;  $P_{dmaxN}$

表示所有直流系统中的最大额定直流功率。系统直流输送功率的变化影响系统无功支撑量并直接影响交流电压稳定性, 电压跌落幅度较大时, 系统无功支撑量水平低, 直流系统故障恢复失败及系统失稳风险更高。

$H_{MDC\_ESCR-i} \cdot K_2$  为考虑交互特性的功率折算部分,  $K_2$  为交互功率折算比。该部分表示多回直流系统某一子系统对其余子系统无功及电压关联影响力(即受端交流系统无功动态交换情况)。多回直流系统各个子系统恢复过程中总是期望对尚未恢复的系统提供更多的无功支撑, 从而提高整体系统中各子系统的共同恢复速度。

直流受端子系统的  $H_{MDC\_CRF}$  越大, 说明系统恢复时无功支撑需求较其余直流子系统更小, 对整体系统稳定性影响较小, 恢复优先级越高, 如图 2 所示。同时,  $H_{MDC\_CRF}$  值较大的系统优先恢复有助于提升其他关联系统无功支撑量, 有效促进整体多回直流系统稳步循序建立无功电压支撑。而对于  $H_{MDC\_CRF}$  值较小的子系统来说, 应该限制受端交流系统功率恢复速度, 其恢复优先级较低, 以防止因多个交流系统无功需求量同时剧增所导致的电压快速崩溃现象。

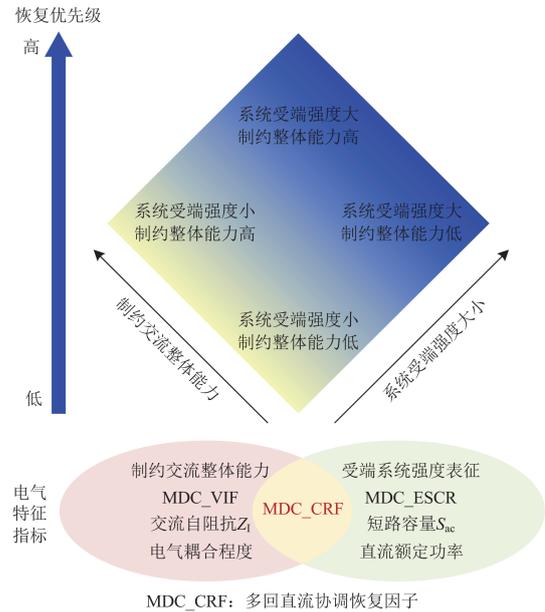


图 2 多回直流系统恢复的优先级确定标准

Fig. 2 Prioritization criteria for multi-UHVDC system recovery

## 3 基于 VDCOL 的协调恢复配合策略

在多馈入直流工程中, 普遍采用 VDCOL 控制环节串联延时模块以配合子系统恢复过程, 而对于多回直流系统, 在交流电压处于不同阶段时, VDCOL

延时模块复杂程度及直流电流指令值响应速度紊乱问题极大地增加了控制失效风险, 因此本节结合协调恢复优先级制定非线性 VDCOL 配合策略, 在降低工程实现难度的同时提升控制器性能, 实现系统协调有序、平稳恢复。

依照图1多回直流系统结构及协调恢复过程中系统电流指令速率需求, 对受端 VDCOL 控制环节进行优化。VDCOL 控制环节数学表达式如式(18)所示。

$$I_{\text{ord}} = \begin{cases} I_{\text{max}}, U_d \geq U_{\text{max}} \\ I_{\text{min}} + \frac{(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \cdot (U_d - U_{\text{min}})}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}, \text{其他} \\ I_{\text{min}}, U_d < U_{\text{min}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $I_{\text{ord}}$  为 VDCOL 控制环节输出的电流指令值;  $I_{\text{max}}$ 、 $I_{\text{min}}$  为电流指令幅值;  $U_{\text{max}}$ 、 $U_{\text{min}}$  为电压幅值。当直流电压较高时, 控制环节将快速降低无功需求以提高系统恢复速度。当直流电压较低时, 抑制直流电流增长以保证系统不因故障而发生电压崩溃。原有 VDCOL 控制环节曲线电压幅值、电流指令幅值及控制速率是固定的, 实质上对于上述系统恢复期望的实现能力极为有限, 因此提出一种新型非线性 VDCOL 多回直流协调恢复策略。

1) 电流指令跟随速率随场景不同而变化(VDCOL 非线性化): 当系统处于故障发生场景时, 直流电压快速跌落, VDCOL 快速限制直流电流; 当系统处于故障恢复场景时, 直流电压较低时, 系统只能提供较少的无功功率, 直流电流应缓慢增加; 当直流电压较高时, 系统可以提高较多的无功功率, 直流电流应较快增加, 进而促进直流系统传输功率的恢复。

2) 不同受端系统在处于同一电压等级下, VDCOL 输出的电流指令值大小及电流指令跟随速率大小要与该子系统  $H_{\text{MDC\_CRF}}$  的大小一致, 即  $H_{\text{MDC\_CRF}}$  越大的系统逆变侧配置的 VDCOL 输出值与输出速率也越大, 以实现在无需添加延时模块下, 根据控制器输出值大小差异即可确定不同系统的协调恢复优先级, 从而降低工程实现难度。

根据上述对 VDCOL 输出的直流电流指令跟随速率期望的分析, 结合控制环节输出速率需求, 选取式(19)的非线性 VDCOL 模型, 确保控制环节输出趋势不变的前提下输出速度与系统需求相匹配。非线性 VDCOL 控制曲线选择依据见附录 D。

$$I_{\text{ord}} = \begin{cases} I_{\text{max}}, U_d \geq U_{\text{max}} \\ A \cdot e^{U_d} + k \cdot U_d + c, U_{\text{min}} \leq U_d \leq U_{\text{max}} \\ I_{\text{min}}, U_d < U_{\text{min}} \end{cases} \quad (19)$$

非线性 VDCOL 模型是以指数函数为基的复合

函数,  $c$  为任意常数。为动态调节控制环节输出范围,  $A$ 、 $k$  满足的约束条件为:  $A > 0$ ,  $k > 0$ 。VDCOL 控制性能验证见附录 E。

图 1 中天中-青豫多回直流受端由天中(m)、青豫高层(n)、青豫低层(k)共 3 个馈入系统组成。由前文中 MDC\_CRF 快速计算方法, 依据实际运行参数, 计算出各个受端馈入子系统的  $H_{\text{MDC\_CRF}}$  分别为: 天中系统  $H_{\text{MDC\_CRF-m}} = 3.95$ , 青豫高层系统  $H_{\text{MDC\_CRF-n}} = 3.61$ , 青豫低层系统  $H_{\text{MDC\_CRF-k}} = 5.9$ 。显然  $H_{\text{MDC\_CRF-k}} > H_{\text{MDC\_CRF-m}} > H_{\text{MDC\_CRF-n}}$ , 因此天中-青豫多回直流输电系统受端恢复顺序依次为: 青豫低层-天中-青豫高层。设置不同系统的非线性 VDCOL 控制参数如表 1 所示, 不同类型 VDCOL 控制特性输出分析如图 3 所示。

表 1 多回直流系统 VDCOL 非线性控制环节参数设置

Table 1 Parameterization of VDCOL nonlinear control link for multi-UHVDC system

参数	天中直流 VDCOL	青豫直流 VDCOL
$U_{\text{min}}$	0.38	高层 0.40/低层 0.37
$U_{\text{max}}$	0.85	高层 0.92/低层 0.82
$I_{\text{min}}$	0.58	高层 0.54/低层 0.60
$I_{\text{max}}$	1.00	高层 1.00/低层 1.00
$A$	0.303	高层 0.264/低层 0.317
$k$	0.397	高层 0.397/低层 0.408
$c$	0.004	高层 0.003/低层 0.002

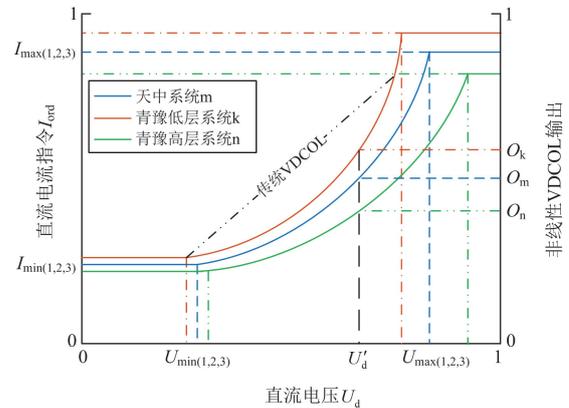


图 3 VDCOL 非线性控制环节输出特性对比

Fig. 3 Comparison of output characteristics of VDCOL nonlinear control links

由图 3 可知, 当各个系统直流电压均跌落  $U_d'$  时, 3 个系统 VDCOL 控制环节输出值大小为:  $O_k > O_m > O_n$ , 且在此电压状态下, 输出值越大曲线在该点的斜率越大, VDCOL 电流指令输出速度也越快。因此当系统受到冲击使得受端系统电压跌

落至同一等级下时, 优先恢复青豫低层受端交流系统使其提前实现稳态运行, 并将多余的无功通过交流电网间的联系阻抗向尚未恢复的子系统注入, 提供无功补偿, 之后恢复天中受端交流系统, 最后将对整体影响最小的青豫高层系统进行恢复, 以提升多回直流系统整体恢复速度。

#### 4 验证分析

##### 4.1 MDC\_CRF 指导多回直流协调恢复可行性验证

本节依据附录 A 表 A1 天中-青豫特高压多回直流输电系统等值参数在 PSCAD/EMTDC 中搭建电磁暂态模型, 首先验证基于 MDC\_CRF 秩序指导的多回直流系统故障协调恢复可行性和有效性。天中直流逆变侧换流母线处设置三相短路接地故障, 故障发生时刻为  $t=1\text{ s}$ , 故障切除时刻为  $t=1.05\text{ s}$ 。在故障直接冲击下, 天中受端交流母线电压大幅跌落。由于线路间联络阻抗的存在, 受端电压交互情况较为复杂, 青豫高层、低层交流母线受到间接冲击, 交流电压同样出现一定程度跌落。故障后协调恢复采用 MDC\_CRF 指导的青豫低层-天中-青豫高层顺序, 控制器配合策略采用非线性 VDCOL(参数见表 1), 受端交流母线电压的变化曲线如图 4 所示。

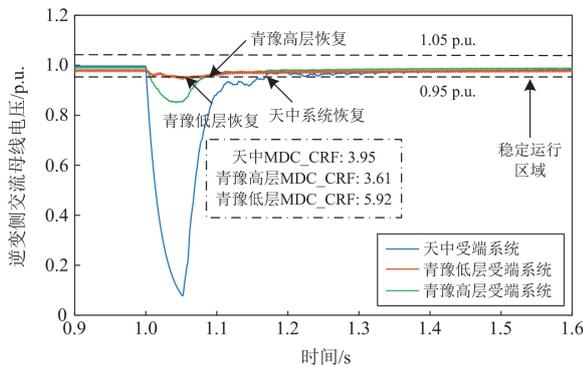


图 4 MDC\_CRF 指导多回直流系统协调恢复控制效果  
Fig. 4 Control effects of MDC\_CRF-directed coordinated recovery of multi-UHVDC system

图 4 表明: 受故障直接冲击的天中受端交流电压跌落最严重, 青豫高层、青豫低层出现交流电压跌落程度较小。故障后, 由于所配置非线性 VDCOL 动态调整了电流指令输出速度, 按照 MDC\_CRF 的指导, 受端系统无功调配合理, 因此受端交流系统均能够恢复至稳态运行, 并且不再出现电压后续失稳情况(关于这一现象的对比在 4.2 节中详细阐述)。

由于故障发生在天中受端系统, 因此天中系统受冲击影响最大, 直至 1.629 s 恢复至稳定, 用时最久。青豫低层受端系统 MDC\_CRF 值较大, 因此青豫低层

交流电压恢复速度最快, 最先达到稳态运行。青豫高层受端交流电压恢复至稳态运行速度次之, 通过仿真测试的系统实际恢复效果完全符合前文提出的基于 MDC\_CRF 恢复秩序理论分析, 证明利用 MDC\_CRF 指导多回直流系统工程实际应用是可行有效的。

##### 4.2 非线性 VDCOL 配合 MDC\_CRF 的先进性分析

为充分验证和分析本文所提出的非线性 VDCOL 配合 MDC\_CRF 协调恢复策略的先进性, 本节对比分析多馈入直流系统中已应用的恢复策略, 讨论针对复杂的多回直流系统, 各自的控制效果、应用局限性和适用性等问题。

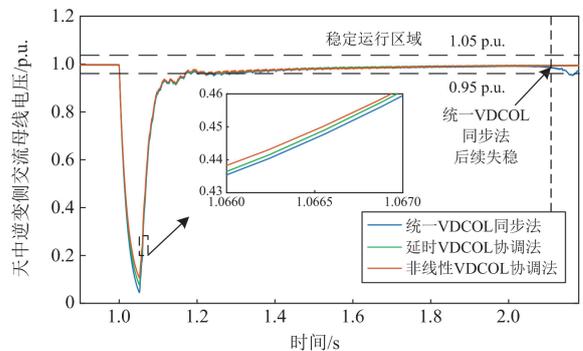
首先, 在与 4.1 节同样故障条件下, 对图 1 多回直流系统分别采用以下 3 种恢复方法:

- 1) 线性 VDCOL 固化控制参数统一恢复策略(统一 VDCOL 同步法)。
- 2) 线性 VDCOL 固化控制参数配合 MDC\_CRF 延时恢复策略(线性 VDCOL 延时法)。VDCOL 延时启动按照 MDC\_CRF 大小依次向右平移 0.2 p.u. 完成。
- 3) 非线性 VDCOL 优化配合 MDC\_CRF 的协调恢复策略(非线性 VDCOL 协调法)。

###### 4.2.1 故障直接冲击受端交流系统的恢复分析

故障后不同恢复策略下, 故障直接冲击下的天中受端系统交流母线电压和逆变阀组关断角变化情况分别如图 5(a)、图 5(b)所示。

由图 5 可知, 天中受端系统面对短路故障冲击, 换流母线电压大幅跌落, 逆变阀组均发生换相失败。故障后受端系统开始恢复期间, 对比 3 种控制恢复方法对于天中交流母线电压控制效果, 采用非线性 VDCOL 协调法控制下的受端系统母线电压跌落幅值最小, 电压恢复时间和恢复速率均优于延时 VDCOL 协调法。采用统一 VDCOL 同步法电压跌落最大, 恢复时间最长, 且后续稳定过程出现二次电压失稳和连续换相失败问题, 而延时 VDCOL 协调法和非线性 VDCOL 协调法下系统均持续稳态运行。天中系统恢复稳定相关评价指标如表 2 所示。



(a) 交流母线电压

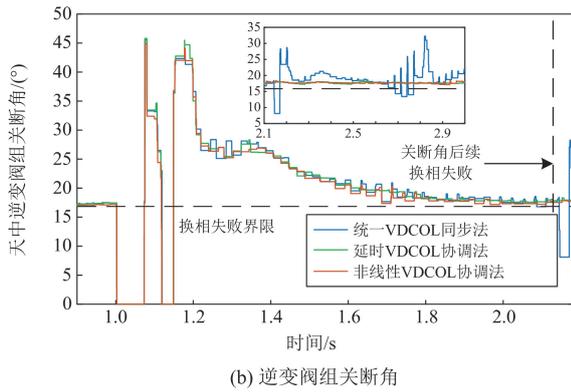


图5 天中受端交流母线电压和关断角变化曲线

Fig. 5 Variation curves of AC bus voltage and extinction angle at Tianzhong receiving end

表2 天中系统恢复稳定考评指标

Table 2 Stabilization assessment indicators for the recovery of Tianzhong system

控制恢复方法	稳定考评指标				
	电压恢复	最大电压失稳程度/p.u.	换相失败次数	二次失稳时间/s	后续换相失败
	时间/s	p.u.	次数	时间/s	失败
统一VDCOL同步法	1.246	0.983	2	2.098	是
延时VDCOL协调法	1.194	0.962	2	/	否
非线性VDCOL协调法	1.182	0.917	2	/	否

由于在MDC\_CRF指导下,系统按照无功紧迫性有序恢复,且非线性VDCOL电流指令输出速率根据电压失稳程度动态调整,因此非线性VDCOL协调法下,天中系统受端恢复速率最快,统一VDCOL同步法下恢复速率最慢。同时统一VDCOL同步法是系统通过直流自身控制策略调配无功支撑系统恢复至稳态运行的,天中系统才会出现二次失稳现象,并对交流电网造成连续冲击;且故障切除越晚,对电网连续冲击程度越严重。

因此,采用 $H_{MDC\_CRF}$ 因子指导系统先后恢复可以有效增强系统抵御冲击的能力,维持系统故障后稳定运行,有效抑制连续换相失败的发生。在MDC\_CRF指导恢复的前提下,非线性VDCOL控制环节电流指令输出速率更快,且其电流指令输出速度和受冲击程度动态匹配,可进一步缩短系统恢复至稳态运行的时间。

#### 4.2.2 故障间接冲击受端交流系统的恢复分析

以青豫高层受端为例,对于受故障交互作用间接冲击的非故障系统,交流子系统间的 $Z_{lm}$ 和 $Z_{lnk}$

等联系阻抗引起电压变化可传递至非故障系统。由图6换流母线电压曲线分析,虽然非故障系统母线电压跌落幅度不及故障直接冲击的系统,但同样能够引起青豫高层逆变阀组发生换相失败。

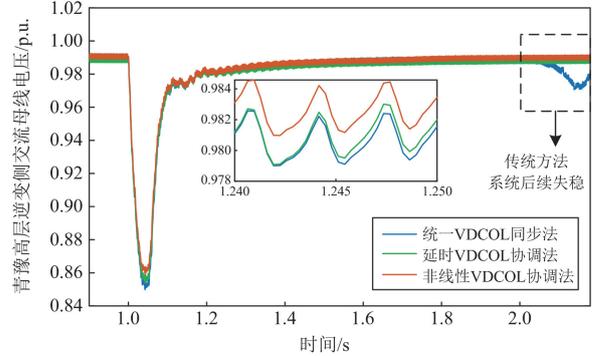


图6 青豫高层交流母线电压变化曲线

Fig. 6 Variation curves of AC bus voltage at Qingyu high-level system

与天中系统结果类似,故障发生后,非线性VDCOL协调法下青豫高层受端电压在1.352s时就已恢复至稳定运行,最大失稳程度为0.526 p.u.,恢复效果最好,且没有后续电压失稳及后续换相失败的情况发生。延时VDCOL协调法下电压最大跌落程度为0.503 p.u.,电压在1.385s恢复至稳定,且同样没有后续电压失稳及后续换相失败的情况发生。统一VDCOL同步法下,交流电压跌落程度最大,恢复时间最晚,且恢复过程出现电压二次失稳和后续换相失败,难以达到系统回稳要求。

故障发生后,由于天中受端系统受冲击影响最大,电压跌落幅值最大,无功缺额较多,应优先向该系统进行无功支援。在满足天中系统无功需求的前提下,借助MDC\_CRF恢复秩序指导,优先支撑青豫低层系统无功需求。因此,青豫低层系统在恢复阶段整体无功波动情况较小,电压优先恢复至稳定的速度最快。青豫高层无功波动情况介于青豫低层和天中系统之间,恢复速度次之,这与前文4.1节中图4描述的系统恢复秩序一致。

故障恢复期间各子系统间的无功分配情况统计在图7中分析。在同一受端交流系统中,3种恢复策略下无功波动大小和无功需求情况由大到小依次为:统一VDCOL同步法>延时VDCOL协调法>非线性VDCOL协调法。这表明:①VDCOL根据各个系统恢复紧迫性需求改变电流指令输出值从而减小无功功率波动程度;②相较于固化参数VDCOL,非线性VDCOL根据电压跌落程度动态改变电流指令输出速率以维持电压平稳运行。



瞬间, 此时由于直流系统迟滞特性存在整流站控制环节并未投入动作, 认为整流侧交流电压  $U_{acR}$  和触发角  $\alpha_R$  不变, 因此为维持  $I_d$  稳定, 逆变侧关断角  $\gamma_1$  开始降低, 当降低至临界关断角(工程中常取  $18^\circ$ )时认为逆变阀组发生换相失败。

联立式(B1)、式(B3)解耦出受端逆变阀组关断角与整流侧交流电压、逆变侧交流电压关系式为

$$\begin{cases} \gamma = \arccos\left(K_1(\alpha)\frac{U_{acR}}{U_{acI}} + K_2(\beta)\right) \\ K_1(\alpha) = \frac{\frac{6}{\pi}NX_1 \cos\alpha}{\frac{6}{\pi}NX_1 + \frac{3}{\pi}N(X_R - X_I) + R_d} \\ K_2(\beta) = \frac{\cos\beta[R_d + \frac{3N}{\pi}(X_R - X_I)]}{\frac{6}{\pi}NX_1 + \frac{3}{\pi}N(X_R - X_I) + R_d} \end{cases} \quad (B4)$$

### 附录 C

在天中直流输电系统受端换流母线处并联三相电抗器, 使得天中受端换流母线一次跌落 0.1 p.u.、0.2 p.u.、0.3 p.u., 观察青豫高层电压对应受扰波形, 对比时域仿真中天中、青豫高层换流母线实际电压跌落值(实测基准), 计算 MIIF、MDC\_VIF 推导的青豫高层换流母线电压相应跌落值, 验证 MDC\_VIF 的准确性, 结果如表 C1 所示。

表 C1 多回直流系统 MDC\_VIF 准确性对比

Table C1 Comparison of MDC\_VIF accuracy of multi-UHVDC system

评价因子	计算值	实测基值	误差/p.u.	误差/%
跌落 0.1 p.u. $H_{MIIF}$	0.131	0.157	0.026	16.8
跌落 0.1 p.u. $H_{MDC\_VIF}$	0.154	0.157	0.003	1.7
跌落 0.2 p.u. $H_{MIIF}$	0.131	0.158	0.027	17.2
跌落 0.2 p.u. $H_{MDC\_VIF}$	0.154	0.158	0.003	2.2
跌落 0.3 p.u. $H_{MIIF}$	0.131	0.159	0.028	17.9
跌落 0.3 p.u. $H_{MDC\_VIF}$	0.154	0.159	0.005	3.0

对比分析: 针对评价多回直流系统电压交互特性的准确性, MDC\_VIF 计算方法相较于 MIIF 计算方法精度大大提高, MDC\_VIF 更能准确地量化表征多直流系统交互特性。MDC\_VIF 对后续计算 MDC\_ESCR 和 MDC\_CRF 的准确性有重要作用。

### 附录 D

根据 VDCOL 对电压恢复速度需求和无功供给需求, VDCOL 函数曲线  $f(x)$  应具有如下基本特性:

$$\begin{cases} f'(x) \geq 0, \forall x \in [U_{\min}, U_{\max}] \\ f''(x) \geq 0, \forall x \in [U_{\min}, U_{\max}] \end{cases} \quad (D1)$$

符合式(D1)特性的基本函数包括: 多项式函数、反三角函数和指数函数。本文选取以指数函数为基础的复合函数(文中式(19)), 在保证函数的精度和增减性的同时, 不影响函数的凹凸性。该数学模型由指数函数和一次函数组合而成, 指数函数任意阶导数正负均相同, 确保增减性及凹凸性一致(参数  $A$  的作用), 而一次函数的作用为保证函数增减性不变的前提下改变函数的值域, 增大复合函数值域范围(参数  $k$  的作用),  $c$  为任意常数, 目的为动态调节控制输出范围。系统稳态运行时 VDCOL 并不启动, 当电压失稳时控制器发生作用, 此时控制器的函数增减性与凹凸性分别为

$$\begin{cases} f'(x) = Ae^x + k \\ f''(x) = Ae^x \end{cases} \quad (D2)$$

结合本文中对 VDCOL 控制器的优化需求, 参数满足的条件应为:  $A > 0$ ,  $k > 0$ 。

### 附录 E

利用 CIGRE-HVDC 模型测试非线性 VDCOL 相较于传统 VDCOL 性能提升(即电流指令提升速度)情况。在 PSCAD/EMTDC 中设置受端换流母线处发生三相接地短路故障, 故障发生时刻为 1.0 s, 故障切除时刻为 0.05 s, 参数设置与文中表 1 天中系统非线性 VDCOL 参数设置相同。两种 VDCOL 控制策略下直流电流在故障发生时刻均被抬升, 此时 VDCOL 启动工作维持输电系统稳定, 故障切除后直流电流均恢复平稳运行状态。两种 VDCOL 控制策略下直流电流变化情况如图 E1 所示。

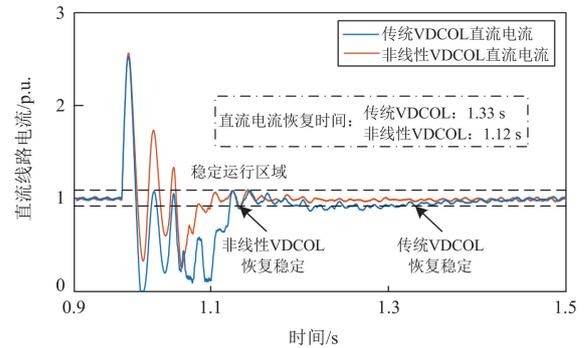


图 E1 非线性 VDCOL 可行性验证

Fig. E1 Feasibility verification of nonlinear VDCOL

对比分析: 由于非线性 VDCOL 可以根据电压状态动态调节电流指令输出值, 因此非线性

VDCOL 控制环节下, 直流电流实测值恢复至稳态的时间更短。因此非线性 VDCOL 控制策略下系统抵御故障冲击能力更强, 恢复稳态运行速度更快。

参考文献

[1] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.  
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.

[2] 汪娟娟, 郑睿娜, 傅闯, 等. 基于逆变站动态无功控制的后续换相失败抑制方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4672-4682.  
WANG Juanjuan, ZHENG Ruina, FU Chuang, et al. A method based on constant reactive power control of inverter to suppress the subsequent commutation failure in HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4672-4682.

[3] 史映萍, 尹纯亚, 李凤婷, 等. 送端交流系统故障引发逆变侧换相失败机理分析及抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 54-63.  
SHI Yingping, YIN Chunya, LI Fengting, et al. Mechanism analysis and prevention strategy of inverter side commutation failure caused by the sending end AC system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 54-63.

[4] 许凌, 张君黎, 张梦瑶, 等. 多直流馈入背景下江苏电网的直流换相失败问题评估及动态无功协调控制方法[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 113-122.  
XU Ling, ZHANG Junli, ZHANG Mengyao, et al. Evaluation of DC commutation failures and dynamic reactive power coordination control method in Jiangsu power grid with multi-infeed DC systems[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 113-122.

[5] 朱子民, 张锦芳, 常清, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑柔直系统的送端自适应 VSG 控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 211-221.  
ZHU Zimin, ZHANG Jinfang, CHANG Qing, et al. Adaptive VSG control strategy of sending end for large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized support VSC-HVDC system[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 211-221.

[6] 邓楠, 郝亮亮, 和敬涵, 等. 受端混联型多端直流输电系统逆变侧交流故障特性分析及协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 54-64.  
DENG Nan, HAO Liangliang, HE Jinghan, et al. AC fault characteristics analysis and coordinated control strategy on the inverter side of a receiving-end hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 54-64.

[7] 王渝红, 陈立维, 曾琦, 等. 特高压直流分层接入方式下预防换相失败的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 160-170.  
WANG Yuhong, CHEN Liwei, ZENG Qi, et al. Coordinated control strategy for preventing commutation failure in a UHVDC system hierarchically connected to an AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 160-170.

[8] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.  
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.

[9] CIGRE Working Group B4. 41. Systems with multiple DC infeed[R]. CIGRE, 2008.

[10] REHMAN B, LIU C, LI H, et al. Analysis on local and concurrent commutation failure of multi-infeed HVDC considering inter-converter interaction[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(4): 1050-1059.

[11] 欧阳金鑫, 叶俊君, 张真, 等. 电网故障下多馈入直流输电系统相继换相失败机理与特性[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 93-102.  
OUYANG Jinxin, YE Junjun, ZHANG Zhen, et al. Mechanism and characteristics of successive commutation failure of multi-infeed HVDC transmission system under power grid fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 93-102.

[12] 李辉, 王震, 周挺, 等. 含同步调相机的直流受端换流站全工况下多模式协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3678-3690.  
LI Hui, WANG Zhen, ZHOU Ting, et al. Multi-mode coordinated control strategy for DC receiving converter station with synchronous condenser under full operating conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3678-3690.

[13] OUYANG Jinxin, YE Junjun, YU Jianfeng, et al. Commutation failure suppression method considering chain reaction in multi-infeed LCC-HVDC systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2023, 146(2).

[14] BILAWAL R, UR A R, AHMAD W K, et al. Operation and challenges of multi-infeed LCC-HVDC system:

- commutation failure, AC/DC power flow, and voltage stability[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(18).
- [15] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3): 633-647.  
XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 633-647.
- [16] 王思超, 文俊, 贺冬珊, 等. 受端分层 UHVDC 换相失败控制和恢复策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(2): 172-179.  
WANG Sichao, WEN Jun, HE Dongshan, et al. Commutation failure control and recovery strategy of UHVDC with hierarchical connection mode[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(2): 172-179.
- [17] 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.  
XIA Chengjun, HUANG Haoyu, TU Liang, et al. Coordinated and progressive recovery strategy for failure at receiving end of multi-infeed DC systems[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(4): 47-54.
- [18] 孟庆强, 刘泽洪, 洪乐荣, 等. 一种抑制连续换相失败的非线性 VDCOL 控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 119-127.  
MENG Qingqiang, LIU Zehong, HONG Lerong, et al. A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 119-127.
- [19] 李杭泽, 戴志辉, 韩哲宇, 等. 混合多端直流输电系统限流控制策略配合及限流参数全局优化方法[J/OL]. *电工技术学报*: 1-15[2024-06-07]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230407>.  
LI Hangze, DAI Zhihui, HAN Zheyu, et al. Current limiting control strategy coordination and global optimization method of current limiting parameters for hybrid multi-terminal DC transmission system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*: 1-15[2024-06-07]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230407>.
- [20] XIAO Hao, LI Yinhong, DUAN Xianzhong. Enhanced commutation failure predictive detection method and control strategy in multi-infeed LCC-HVDC systems considering voltage harmonics[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(1): 81-96.
- [21] LI Guoqing, ZHANG Song, LI Shuguang, et al. Determining region boundaries of critical commutation failures in multi-infeed HVDC systems under unbalanced short circuit faults[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9.
- [22] 郑乐, 吴晶, 徐衍会, 等. HVDC 送端系统振荡引发受端换相失败的机理分析[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(9): 2743-2754.  
ZHENG Le, WU Jing, XU Yanhui, et al. Mechanism analysis of receiving end commutation failure caused by sending end oscillation in HVDC transmission system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(9): 2743-2754.
- [23] 俞翔, 鲁江, 董云龙, 等. 适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 174-180.  
YU Xiang, LU Jiang, DONG Yunlong, et al. A steady-state voltage control method for a multi-terminal hybrid UHVDC transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 174-180.
- [24] 林圣, 雷雨晴, 刘健, 等. HVDC 送端系统故障引发受端换相失败分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(5): 1669-1680.  
LIN Sheng, LEI Yuqing, LIU Jian, et al. Analysis of receiving-side commutation failure mechanism caused by HVDC sending-side system fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(5): 1669-1680.
- [25] 王羽丰, 李凤婷, 尹纯亚. 换相失败期间送端系统暂态有功建模及其支撑策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(17): 177-187.  
WANG Yufeng, LI Fengting, YIN Chunya. Transient active power modeling of a sending system and its support strategy during commutation failure[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(17): 177-187.

收稿日期: 2024-07-12; 修回日期: 2024-11-27

作者简介:

易建波(1981—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为广域电力系统分析与控制、智能电网大数据应用技术等; E-mail: jimbo\_yi@uestc.edu.cn

王泽宇(1999—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: wzyuestc1999@126.com

(编辑 魏小丽)