

特高压直流分层接入方式下抑制连续换相失败的 直流电流控制策略

何思行¹, 郝亮亮¹, 和敬涵¹, 陈争光²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044;

2. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031)

Continuous Commutation Failure Suppression Strategy Considering DC Current for UHVDC Transmission System Under Hierarchical Connection

HE Sihang¹, HAO Liangliang¹, HE Jinghan¹, CHEN Zhengguang²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China;

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

ABSTRACT: Due to the coupling of the ultra-high voltage direct current (UHVDC) hierarchical connection system, continuous commutation failure at an inverter can easily lead to cascading faults in the power grid. This article analyzes the difference in control response of high-end and low-end inverters and their dynamic reactive power characteristics based on the inter-layer interaction mechanism. Analysis shows that an increase in reactive power exchange during the fault recovery will lead to a voltage drop of the non-fault layer, and directly causes a decrease in the extinction angle, leading to continuous commutation failure of the non-fault layer. Based on this, a current control strategy is proposed to suppress continuous commutation failure. The strategy suppresses continuous commutation failure by calculating the current command in real-time through reactive power exchange and voltage fluctuation characteristics. An electromagnetic transient model is established, and the strategy's effectiveness is verified by comparing multiple operating conditions. The proposed strategy can reduce the probability of continuous commutation failure while improving the voltage recovery characteristics of the hierarchical connection system, which is conducive to the safe and stable operation of the system.

KEY WORDS: UHVDC; hierarchical connection mode; continuous commutation failure; suppression strategy

摘要: 特高压直流分层接入系统逆变侧交流间均存在耦合, 单一换流站发生连续换相失败容易导致电网发生连锁故障。针对这一问题, 从层间交互作用机理出发, 深入分析了高低端换流器控制响应差异及其动态无功特性。分析表明: 故

障恢复阶段的无功交互量增加会导致非故障层换流母线电压的跌落, 并直接引起该层换流器关断角的减小, 从而引发连续换相失败。在此基础上, 提出一种抑制连续换相失败的直流电流控制策略。该策略综合考虑无功交换量与换流母线电压的波动特征, 通过系统实际运行状态实时计算直流电流指令来实现对高低端换流器的连续换相失败抑制。最后, 建立了分层接入系统电磁暂态模型, 通过多工况对比验证了策略的有效性。所提策略能够降低分层接入系统发生连续换相失败的概率, 同时改善两层交流系统电压恢复特性, 有利于系统安全稳定运行。

关键词: 特高压直流输电; 分层接入; 连续换相失败; 抑制策略

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1034

0 引言

基于电网换相换流器的特高压直流(line commutated converter based ultra-high voltage direct current, LCC-UHVDC)输电系统凭借线路损耗低、输送功率大、经济性高等优势在远距离大容量输电中得到了广泛应用^[1-2]。LCC-UHVDC 采用的晶闸管换流阀无自主关断能力, 系统存在换相失败风险。通常首次换相失败对电网造成的冲击较小, 且在直流控制系统作用下可以自主恢复^[3]; 而连续换相失败可能会造成换流站闭锁、大规模脱网等严重后果, 其中, 单个换流站发生多次连续换相失败甚至会引发相邻换流站的连锁故障, 从而危害整个电网安全稳定运行^[4]。因此, 研究连续换相失败抑制策略对于提高直流系统的安全可靠性极为重要。

目前, 针对常规直流输电系统的连续换相失败

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2066210)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U2066210).

问题，国内外学者已展开了深入的讨论。通过换流器拓扑改造和无功配置优化等方式可以降低连续换相失败概率，但是存在建设成本和控制复杂性增加等问题^[5]。为此相关研究从控制层面着手，探讨了直流控制系统的优化策略。主要通过改进低压限流环节提高控制器的协调配合能力^[6]、基于虚拟换相面积的直流电流限制控制^[7]、基于戴维南参数实时计算或临界换相电压的直流功率限制^[8-9]等方法实现对连续换相失败的抑制。

随着电网馈入的直流输电线路增加，受端交流系统支撑能力减弱，电压稳定性等问题尤为突出^[10]，而 LCC-UHVDC 受端采用分层接入方式可以有效缓解直流密集接入对交流系统的不利影响^[11]。因此，特高压直流分层接入输电工程在国内已得到广泛投入，包括锡泰、昭沂和吉泉等。

相比于常规的端对端直流输电系统，特高压直流分层接入系统除了本层交流系统与直流系统的耦合外，逆变侧的高低端换流器以及对应的交流系统之间也存在耦合路径^[12-14]，因此对于连续换相失败抑制策略的研究更为复杂。不少文献围绕对特高压直流分层接入系统的控制优化问题进行了研究，但是多数研究关注于系统的首次换相失败，而对连续换相失败的研究较少。文献[15-16]提出了分层接入系统的协调抑制策略，通过对非故障层提前触发以抑制其首次换相失败，同时能根据交流系统故障程度自适应调节触发角，在一定程度上降低故障层连续换相失败的概率。但忽略了故障期间系统的暂态响应特性，缺乏对连续换相失败的深入分析。文献[17]指出严重故障下容易导致连续换相失败发生，并改进了现有工程的自动再启动控制，提出能实现快速移相的分层接入系统连续换相失败抑制策略。文献[18-19]则指出故障期间直流电流的上升是连续换相失败产生的主要原因，提出了基于电流变化量的触发角补偿策略，但逆变站触发角减小会导致无功损耗增加，加剧层间无功交互波动。以上研究提出的抑制策略没有充分考虑层间耦合对连续换相失败的影响，且缺乏对高低端控制器响应差异的分析。

为此，本文从层间交互作用机理出发，分析交直流系统控制响应特性，通过推导逆变侧无功功率表达式解析层间无功电压耦合关系，并结合独立控制器作用下高端和低端换流器的电气量变化差异揭示了连续换相失败的特征及影响因素。在此基础上，提出了一种抑制连续换相失败的直流电流控制策略，并在 PSCAD/EMTDC 中建立了分层接入系

统仿真模型进行对比验证。仿真结果表明，在逆变侧某一交流系统故障期间，所提抑制策略依据层间无功交换量实时调节直流电流指令，能有效减小系统层间无功波动，同时降低高端和低端换流器的连续换相失败风险，改善系统故障恢复特性。

1 特高压直流分层接入系统

1.1 拓扑结构

本文研究的特高压直流分层接入系统采用双极两端中性点接地的接线方式，拓扑结构如图 1 所示。送端同极换流器接入同一交流系统，受端同极换流器则分别接入不同交流系统。其中，将受端距离中性点较近，直流电压等级较低的称为低端换流器(换流器II和III)；距离中性点较远，直流电压等级较高的称为高端换流器(换流器I和IV)。由于分层接入系统正负极结构对称，本文研究均以正极为例进行分析。

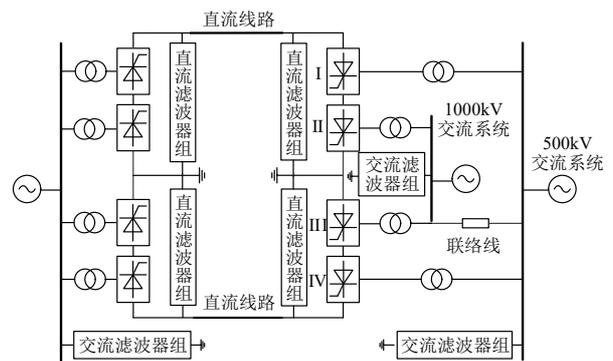


图 1 特高压直流分层接入系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of UHVDC hierarchical system

1.2 数学模型

由图 1 可知，特高压直流分层接入系统送端结构与常规直流输电系统结构相同，由双 12 脉动换流器串联组成；受端的高端和低端换流器交流侧分层接入不同电网，直流侧采用串联结构。特高压直流分层接入系统单极等值电路如图 2 所示。

结合图 2，整流侧和逆变侧高低端换流器的直流电压可表示为

$$\begin{cases} U_{dr} = U_{dr0} \cos \alpha_r - \frac{3}{\pi} n_r X_{cr} I_d \\ U_{dx} = U_{dx0} \cos \beta_x + \frac{3}{\pi} n_x X_{cx} I_d \\ U_{dx0} \cos \gamma_x - \frac{3}{\pi} n_x X_{cx} I_d \end{cases} \quad (1)$$

式中： $x=1,2$ 分别代表高低端换流器相应电气量； U_{dr} 和 U_{dx} 分别为整流侧与逆变侧换流器的单极对地直流电压； U_{dr0} 和 U_{dx0} 分别为整流侧与逆变侧换流器的理想空载直流电压； X_{cr} 和 X_{cx} 分别为整流侧

不仅有直流输电系统结构参数，而且还包括本层换流母线电压 U_L 、逆变器超前触发角 β 以及直流电流 I_d 。保持 n 、 k 和 X_c 不变， Q_i 随 U_L 、 I_d 以及 β 的变化规律如图 5 所示。根据图 5 可知，逆变器消耗的无功功率与直流电流、超前触发角以及换流母线电压呈正相关。因此，故障后控制系统响应特性引发的超前触发角以及直流电流等电气量的变化，将导致逆变器无功消耗量的变化，从而对系统层间无功交互产生影响。

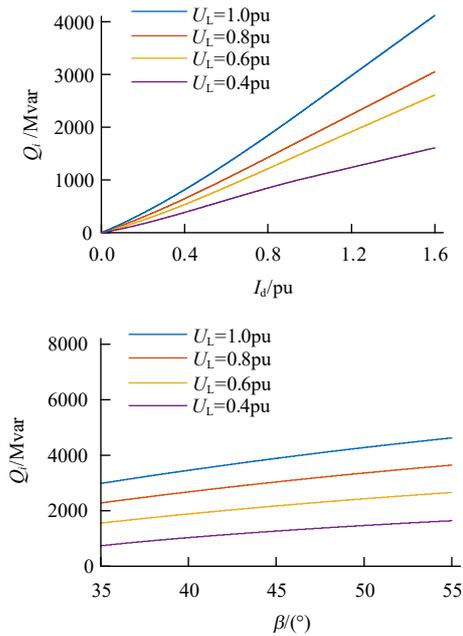


图 5 逆变器无功特性

Fig. 5 Reactive power characteristics of the inverter

2.1.2 发生连续换相失败时不同阶段的特征

本节基于特高压直流分层接入模型，对高低端换流器同时发生换相失败后的电气量变化规律进行分析。并结合换相失败演化过程，研究逆变侧某一交流系统发生故障后高低端换流器控制系统的复杂响应特性对逆变器无功功率的影响。

特高压直流分层接入模型采用中国某实际工程参数搭建，具体参数如表 1 所示。

表 1 特高压直流分层接入输电系统参数
Table 1 Parameters of UHVDC hierarchical system

系统参数	数值
直流电压/kV	±800
直流电流/kA	6.25
额定容量/MW	10000
整流侧交流电网等值阻抗/ Ω	3.03+j34.62
逆变侧 500kV 交流电网等值阻抗/ Ω	1.31+j14.95
逆变侧 1000kV 交流电网等值阻抗/ Ω	4.40+j50.30
联络变压器变比	520/1050
高低端交流电网等值阻抗/ Ω	20.5+j123

考虑到两层换流母线电压变化相同时，结构对称的高低端换流器由于控制器参数相同，响应也趋

于一致。因此本文统一将故障设置在高端换流站，图 6 给出了高端换流站的交流系统发生三相对称故障后，逆变侧交直流系统电气量变化过程。其中，高端和低端换流器的关断角控制输出分别为 β_{cea1} 和 β_{cea2} ，定电流控制器输出相同，简记为 β_{cc} 。以控制器方式发生切换为划分节点，高低端换流器控制响应过程可以大致分为 3 个阶段。为叙述方便，将高端换流器所在层称为故障层，低端换流器层称为非故障层。

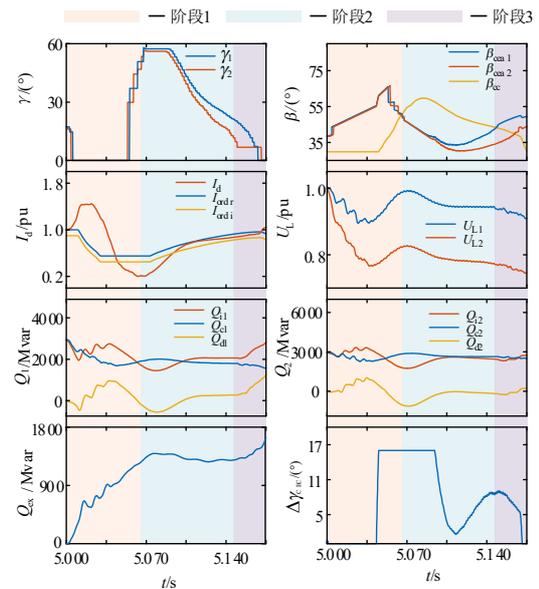


图 6 高低端换流器电气量

Fig. 6 Electrical quantities of high-end and low-end inverters

阶段 1：在故障层发生首次换相失败阶段，换流器吸收无功功率 Q_{i1} 降低，其降低程度大于补偿器无功供给 Q_{c1} 的降低程度。因此，故障层无功需求 Q_{d1} 逐渐降低且小于 0。对于非故障层，由于交流耦合导致换流母线电压 U_{L2} 减小，同时直流耦合导致直流电流 I_d 突增，该层换流器也发生换相失败，换流器吸收无功功率 Q_{i2} 降低，无功需求 Q_{d2} 相比故障层换流器降低不多。两层换流母线间的压差使得非故障层向故障层提供无功， Q_{d2} 随之增大， U_{L2} 持续降低且发生波动。

阶段 2：故障层和非故障层恢复换流能力后，CEA 输出的超前触发角指令值快速减小，加之 I_d 受整流侧定电流限制， Q_{i1} 和 Q_{i2} 将减小。在该过程中， β_{cc} 随 I_d 的减小同步增大，当 β_{ceax} 跌落至低于 β_{cc} 时，逆变侧换流器的控制模式将发生切换，两层换流器控制方式先后转至定电流模式， β_{cc} 随电流偏差变化呈先增大后减小的变化趋势。在阶段二后期 I_d 增加与 β_{cc} 减小的双重作用下，两层换流器的关断角逐渐减小。若 I_d 增大对换流器无功消耗 Q_{ix} 的增

加作用大于 β_{cc} 下降对 Q_{ix} 的减小作用, 则 Q_{ix} 增大, 使得逆变侧无功需求 Q_{dx} 增大。

阶段 3: 逆变侧控制系统的调节特性决定了其趋于将控制模式转换至正常运行状态下的控制模式, 即 CEA 模式。由公式(5)可知, 当两层换流器同时处于定电流控制时, 故障层关断角小于非故障层关断角, 故障层 CEA 输出大于非故障层 CEA 输出的超前触发角指令, 其控制模式将先恢复至定关断角模式。此时 I_d 在整流、逆变两侧直流电流指令之间波动, $\Delta\gamma_{CEC}$ 几乎不变, 因此故障 CEA 能够及时响应, 通过增大 β_{cea1} 限制关断角降低。

在该阶段, 故障层 β_{cea1} 与 I_d 持续上升导致换流器无功需求 Q_{d1} 进一步增大, 非故障层向故障层提供的无功 Q_{ex} 有所增加。对仍处于定电流模式的非故障层, β_{cc} 在上述过程中持续减小。此外, 层间支援无功 Q_{ex} 的增加将导致 U_{L2} 下降, 其与增大的 I_d 和减小的 β_{cc} 共同作用, 将使非故障层关断角迅速下降直至换相失败。

由此可知, 在故障层控制器方式切换至 CEA 模式后, 层间无功交互量显著上升。层间无功交互将恶化非故障层换流母线电压, 与此同时, 随着故障层定电流控制器的退出, 直流电流不断上升。非故障层定电流控制器在此期间输出的超前触发角指令不断降低, 非故障层关断角在这一阶段跌落至较低水平, 换流器将存在连续换相失败风险。

2.2 连续换相失败影响因素分析

层间无功交换量的增加是分层接入系统连续换相失败产生的重要原因, 而无功交换量与直流电流、超前触发角和换流变参数等因素相关。因此本节对无功交换量的主要影响因素进行定量分析。

高端换流站交流系统发生故障后, 在故障恢复期间, 假设此时两层换流器均已恢复换流能力, 故障层换流母线电压降为 U'_{L1} , 结合图 4 可得受端电网故障后的故障层换流器无功消耗量 Q'_{i1} :

$$Q'_{i1} = Q'_{ac1} + Q'_{c1} + Q'_{ex} \quad (7)$$

式中: Q'_{ac1} 为故障层交流系统提供的无功功率; Q'_{c1} 为补偿器提供的无功; Q'_{ex} 为故障后两层换流站间的无功交换量。

Q'_{c1} 取决于故障后的换流母线电压幅值和补偿装置等效电容的大小。 Q'_{ac1} 则与系统短路容量和换流母线电压跌落幅值有关。因此将式(7)进行变换可得两层换流站的无功交换量 Q'_{ex} :

$$Q'_{ex} = Q'_{i1} - \omega C_1 U_{L1}'^2 - \frac{\Delta U_{L1} S_{ac1}}{U_{LN1}} \quad (8)$$

式中: $\Delta U'_{L1}$ 为故障层换流母线电压跌落幅值; C_1 为补偿装置等效电容; S_{ac1} 为系统短路容量; U_{LN1} 为故障层换流母线电压额定值; ω 为系统角频率。

在受端交流电网故障后, 换流器各电气量因控制系统调节响应而持续变化, 故障层换流器超前触发角变为 β'_1 , 直流电流变为 I'_d , 将式(6)代入式(8)可得考虑控制系统作用下的无功交换量表达式:

$$Q'_{ex} = \left[-\frac{9n_1^2 X_{c1}^2}{\pi^2} I_d'^4 - \frac{18\sqrt{2}n_1^2 k_1 X_{c1}}{\pi^2} \cos \beta'_1 U_{L1}' I_d'^3 + \frac{18n_1^2 k_1^2}{\pi^2} \sin^2 \beta'_1 U_{L1}'^2 I_d'^2 \right] \frac{1}{2} - \omega C_1 U_{L1}'^2 - \frac{\Delta U_{L1} S_{ac1}}{U_{LN1}} \quad (9)$$

式(9)表明系统层间无功交换量与故障层换流母线电压、超前触发角、直流电流等因素有关。为此采用灵敏度来衡量上述因素对系统层间无功交互的影响程度, 灵敏度表达式为

$$S_{\beta} = \frac{\sqrt{2}n_1 k_1 U_{L1}' I_d' \sin \beta'_1 (6k_1 U_{L1}' \cos \beta'_1 + \sqrt{2}X_{c1} I_d')}{\pi \sqrt{2k_1^2 \sin^2 \beta'_1 U_{L1}'^2 - X_{c1}^2 I_d'^2 - 2\sqrt{2}k_1 X_{c1} \cos \beta'_1 U_{L1}' I_d'}} \quad (10)$$

$$S_I = \frac{6n_1 k_1^2 \sin^2 \beta'_1 U_{L1}'^2 - 6n_1 X_{c1}^2 I_d'^2 - 9\sqrt{2}n_1 k_1 X_{c1} \cos \beta'_1 U_{L1}' I_d'}{\pi \sqrt{2k_1^2 \sin^2 \beta'_1 U_{L1}'^2 - X_{c1}^2 I_d'^2 - 2\sqrt{2}k_1 X_{c1} \cos \beta'_1 U_{L1}' I_d'}} \quad (11)$$

将分层接入系统模型参数分别代入式(10)(11), 可得灵敏度随 β 、 I_d 和 U_L 的变化规律如图 7 所示。直流系统稳定运行时换流器超前触发角 β 为 38° , 考虑控制系统调节影响, 当 β 在 $35^\circ \sim 55^\circ$, I_d 在 $0.5 \sim 1.1$ pu 的范围内变化时, S_I 和 S_{β} 随 U_L 的跌落而降低, 但始终大于 0。这表明, 无功交换量与 U_L 呈正相关。在 U_L 不变的情况下, I_d 和 β 增加均会导致无功交换量上升, 由于 β 的灵敏度更大, 其变化更容易引起无功交换量的波动。

2.2 节已经提到, 在阶段 3 非故障层 β_{cc} 持续下降、 I_d 逐渐恢复的过程中, 该层换流器关断角将大幅降低; 此时故障层换流器由于处于 CEA 控制, 其输出的 β_{cea1} 也将不断增大。再结合上述影响因素分析可知, 直流电流和超前触发角的增大都将引起层间无功交换量上升, 这将导致非故障层换流母线电压跌落, 进一步恶化换相条件, 增大非故障层连续换相失败的风险。

3 抑制连续换相失败的直流电流控制策略

改变直流电流和故障层超前触发角指令可降低系统连续换相失败风险。然而, 超前触发角指令的降低将导致故障层换相失败抵御能力减弱, 不利于该层换流站故障恢复。为此, 本文提出一种抑制

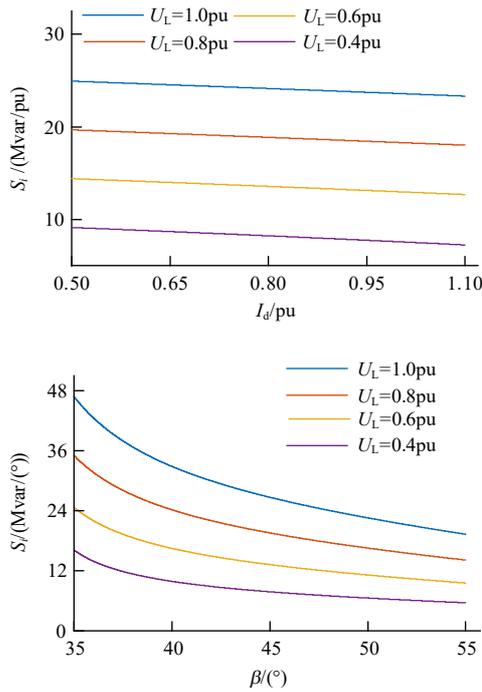


图7 I_d 和 β 对 Q_{ex} 的灵敏度
Fig. 7 Sensitivity of I_d and β to Q_{ex}

连续换相失败的直流电流控制策略，充分考虑非故障层和故障层的无功交互作用，通过调节直流电流来改善系统恢复特性，从而降低系统发生连续换相失败的概率。

3.1 直流电流指令计算方法

由于逆变侧串联的换流器流经的直流电流相同，因此通过无功交换量与非故障层换流站电气量的内在联系计算出的直流电流指令，可以调节整个系统的直流电流。结合图4，非故障层换流站的无功平衡表达式为

$$Q_{ex}' = Q_{ac2}' + Q_{c2}' - Q_{l2}' \quad (12)$$

根据式(1)(2)和(12)，可得 Q_{ex}' 和非故障换流站中 I_d 、 U_{L2} 、 γ_2 的耦合关系：

$$Q_{ex}' = \frac{\Delta U_{L2} S_{ac2}}{U_{LN2}} + \omega C_2 U_{L2}^2 - \left[\frac{18n_2^2 k_2^2}{\pi^2} \sin^2 \gamma_2 U_{L2}^2 I_d^2 - \frac{9n_2^2 X_{c2}^2}{\pi^2} I_d^4 + \frac{18\sqrt{2}n_2^2 k_2 X_{c2}}{\pi^2} \cos \gamma_2 U_{L2} I_d^3 \right] \quad (13)$$

式中： ΔU_{L2} 为非故障层换流母线电压跌落幅值； C_2 为补偿装置等效电容； S_{ac2} 为非故障层系统短路容量； U_{LN2} 为非故障层换流母线电压额定值。

分层接入系统正常运行时，非故障层换流器的准稳态方程有：

$$Q_{ex}^0 = f(I_d, U_{L2}, \gamma_2) = 0 \quad (14)$$

式中 Q_{ex}^0 为稳态运行时的层间无功交换量，稳态运行状态下分层接入系统得层间无功交互为0。

当高端换流站的交流系统发生故障时，考虑故

障后的两层换流站间实际无功交换量 Q_{ex}' 与分层接入系统正常运行时的差值 ΔQ_{ex} ：

$$\Delta Q_{ex} = Q_{ex}' - Q_{ex}^0 \quad (15)$$

为抑制故障期间高低端换流站的无功交换波动，通过在控制环节引入无功偏差量 ΔQ_{ex} 构成闭环结构，实现负反馈调节。该控制结构能随着实测无功功率 Q_{ex}' 动态调节分层接入系统的无功交互波动，改善系统的故障恢复特性。令式(13)中左值 Q_{ex} 为系统稳态运行 Q_{ex}^0 与实测值 Q_{ex}' 的差 $-\Delta Q_{ex}$ ， γ_2 取额定值 17° ，将分层接入系统模型参数代入表达式可得关于 I_d 的4次多项式。其中，每项的系数由系统参数、换流母线电压实测值 U_{L2} 和无功偏差量 ΔQ_{ex} 组成：

$$f_1 I_d^4 + f_2 I_d^3 + f_3 I_d^2 + f_4 = 0 \quad (16)$$

$$f_1 = \frac{9n_2^2 X_{c2}^2}{\pi^2} \quad (17)$$

$$f_2 = -\frac{18\sqrt{2}n_2^2 k_2 X_{c2} \cos \gamma_{\min} U_{L2}}{\pi^2} \quad (18)$$

$$f_4 = (\omega C_2 U_{L2} + \Delta Q_{ex} + \frac{\Delta U_{L2} S_{ac2}}{U_{LN2}^2})^2 \quad (19)$$

利用式(16)可得不同换流母线电压 U_{L2} 和无功偏差量 ΔQ_{ex} 下控制环节输出的直流电流参考值 I_{dref} ，电流指令计算过程如图8所示。计算环节采用 Newton-Raphson 迭代法求解直流电流参考值 I_{dref} 。最终的直流电流指令 I_{ord} 由式(16)求解得到的 I_{dref} 经直流电流限幅环节获得。图8中 I_{dVDCOL} 为低压限流控制输出的直流电流指令， I_{dmin} 取值为0.1pu，以防止出现电流断续。

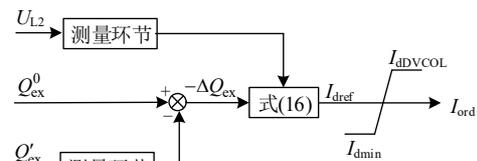


图8 直流电流指令计算环节
Fig. 8 DC current command calculation link

3.2 连续换相失败抑制策略的实现过程

抑制连续换相失败的直流电流控制策略将实时采集两层交直流系统的电气量，通过对故障层与非故障层进行判断，经电流指令计算环节向直流控制系统传输新的直流电流指令。逆变侧整体控制结构如图9所示。图中， U_{1_comp} 和 U_{3_comp} 为不对称故障和对称故障的电压判据阈值； F_{fault1} 和 F_{fault2} 为高端和低端换流器的电压比较输出；IC 为控制启动信号；CE 为控制切除信号；Flag 为故障判别输出，当 $Flag=1$ 代表高端换流站为故障层， $Flag=0$ 则代

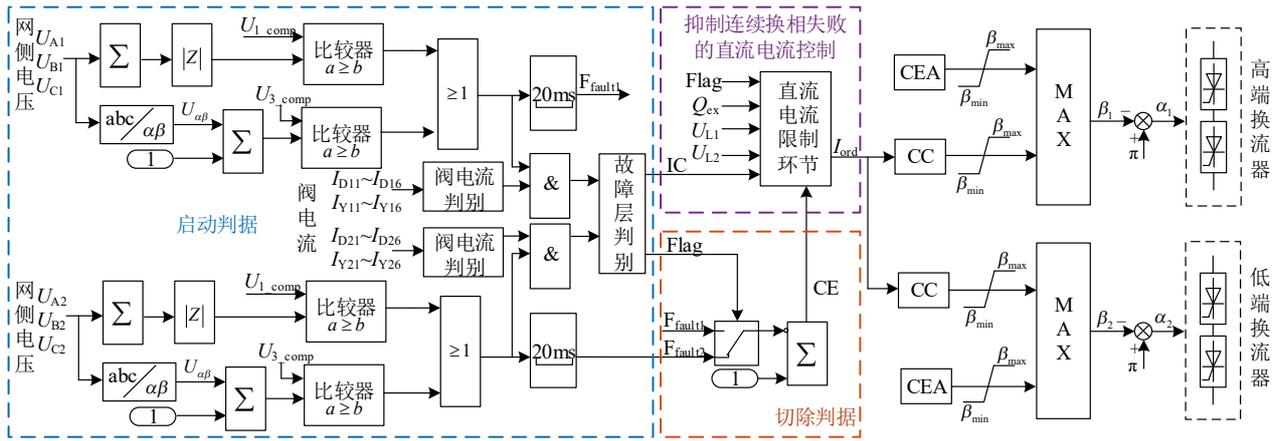


图 9 逆变侧整体控制框图

Fig. 9 Overall control diagram of inverter side

表低端换流器为故障层。

为确保分层接入系统的稳定运行，上述控制环节只在受端交流电网故障期间生效，而在其他状况下需退出运行，具体流程为：

1) 启动判据：基于阀电流检测换相失败，判别故障层与非故障层，当检测到非故障层发生换相失败时，投入电流限制控制器。判别方式基于实时监测分层接入系统的两层换流母线电压，当电压测量值小于阈值，且阀电流连续时间超过一个换流阀正常导通时间^[20]，该层判为故障层，另一层则为非故障层，与此同时关闭判别控制器。

2) 切除判据：若换流母线电压一经恢复就立即切除控制器，直流电流将在短时间内回升，导致换流器消耗的无功功率大幅增加，反而会引发换流母线电压的波动，不利于换相过程。因此在监测到故障层换流母线电压大于阈值时，令控制器延时 20ms 再退出，直至回归原控制。

4 仿真验证

为验证所提控制策略对连续换相失败的抑制效果，分别对以下 3 种控制方案进行了对比验证：

- 方案 1: CIGRE HVDC 原有控制。
- 方案 2: 关断角补偿控制^[20]。
- 方案 3: 抑制连续换相失败的直流电流控制。

4.1 三相接地故障时系统暂态特性对比

5s 时高端换流站交流母线处发生三相接地故障，故障电感为 0.1H，持续时间 0.5s，采用 3 种控制方案的仿真结果如图 10 所示。

采用控制方案 1 的分层接入系统，其故障层换流器发生首次换相失败后，由于直流电流耦合以及交流侧电压耦合的影响导致另一层换流器关断角 γ_2 瞬间降至 0° 。故障期间两层换流器的各电气量剧烈

波动，直流电流 I_d 最高突增至 1.4ppu，故障层与非故障层之间的无功交换量 Q_{ex} 增至 1400Mvar。层间耦合路径引起的无功交互波动使非故障层换流母线 U_{L2} 在 5.1s 后持续跌落，引发非故障层换流器发生连续换相失败。直流电流的二次突增将影响到故障层换流器的换相过程，致使两层换流器均发生连续换相失败，对逆变侧交流系统产生多次冲击。

控制方案 2 引入关断角补偿控制器，故障期间两层换流器依据直流电流变化量分别对各自的触发角指令进行调节。由图 10 可以看到，该控制通过降低两层换流器的触发角 α_1 和 α_2 将关断角 γ_1 和 γ_2 在 5.1s 抬升至 15° 左右，成功抑制了两层系统连续换相失败的发生。同时观察到系统直流电流 I_d 和换流母线电压 U_{L1} 、 U_{L2} 的波动相比控制方案 1 都较小，说明采用控制方案 2 后的系统故障恢复特性也有了一定改善。

控制方案 3 为本文所提抑制连续换相失败的直流电流控制策略，该策略充分考虑分层接入系统的动态无功特性和换流母线电压的波动特征实时计算直流电流指令。在故障恢复期间控制方案 3 的直流电流指令 I_{ord} 相比控制方案 1 和控制方案 2 的 I_{ord} 有所降低，且控制方案 3 的 I_{ord} 在系统达到故障稳态时仍启到一定的限幅作用。采用控制方案 3 的无功交换量 Q_{ex} 在 5.1s 降至 1300Mvar，并在后续恢复过程中维持稳定，系统层间无功波动更小。此外，控制方案 3 较控制方案 2 和控制方案 1 的换流母线电压 U_{L1} 、 U_{L2} 故障稳态值有明显提高，动态电压恢复特性更好，且故障期间关断角的换相裕度更大。因此方案 3 对连续换相失败有更明显的抑制效果。

4.2 单相接地故障时系统暂态特性对比

5s 时高端换流站交流母线处发生单相(A 相)接地故障，故障电感为 0.1H，持续时间 0.5s，采用 3

种控制方案的仿真结果如图 11 所示。

不对称工况下，采用控制方案 1 的分层接入系统，其故障层和非故障层更容易发生多次连续换相失败。由图 11 可知，单相故障下两层换流母线电压 U_{L1} 、 U_{L2} 分别下降至 0.88pu 和 0.91pu，其故障程度较三相故障更轻，然而两层换流器在故障期间均发生了三次换相失败，换流母线电压、直流电流

以及无功波动剧烈，逆变侧交流系统非对称故障对分层接入系统的稳定运行产生了极大的影响。

相较控制方案 1，采用控制方案 2 的故障层与非故障层换流器均未发生连续换相失败，各电气量随故障恢复而逐步恢复，因此该方案在一定程度上可以改善分层接入系统的恢复特性，提升两层换流器的连续换相失败抵御能力。

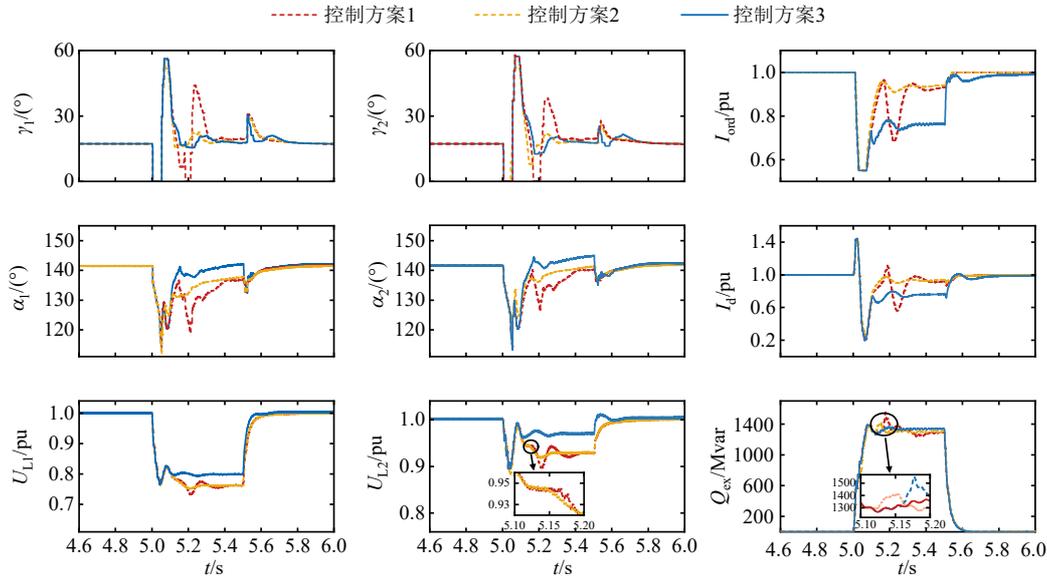


图 10 三相接地故障下不同控制策略对比

Fig. 10 Comparison of different control strategies under three-phase ground fault

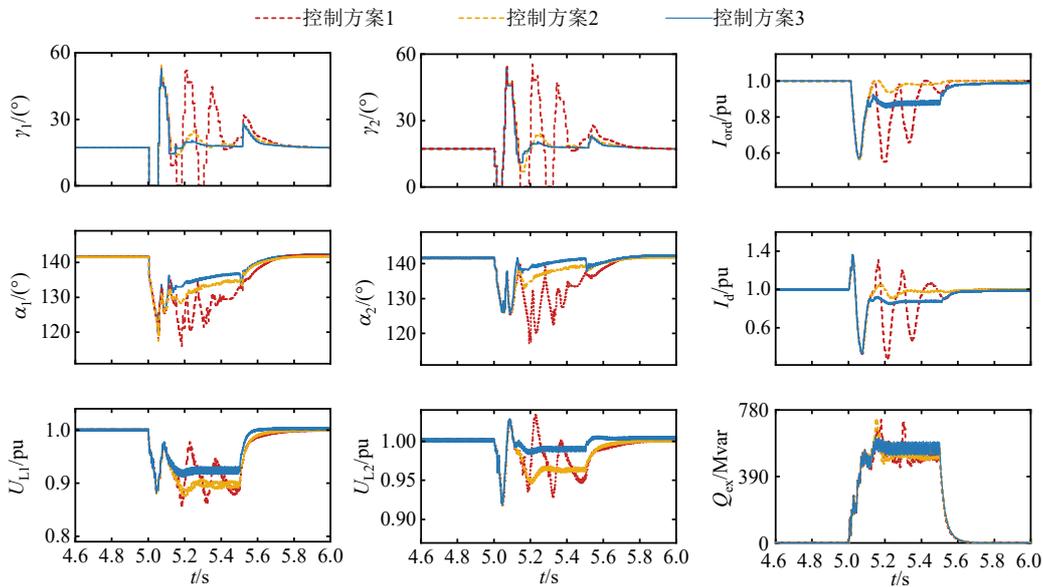


图 11 单相接地故障下不同控制策略对比

Fig. 11 Comparison of different control strategies under single-phase ground fault

控制方案 3 的故障层与非故障层仅发生首次换相失败，这说明相较控制方案 1，该策略能有效提升两层换流器的连续换相失败抵御能力。与控制方案 2 相比，控制方案 3 的系统换流母线电压 U_{L1} 、 U_{L2} 故障稳态幅值更高，且两层换流器关断角 γ_1 、 γ_2 在首次换相失败后的恢复过程中均大于 7° 。因此，

所提抑制策略在不对称工况下对分层接入系统的连续换相失败也有着更好的抑制效果。

4.3 不同工况下连续换相失败抑制策略效果

为进一步验证本文所提策略的抑制效果，在高端换流站的交流母线处设置不同严重程度故障进行遍历仿真。仿真中故障程度通常利用故障电感

L_f 的大小来模拟,基于此定义故障水平 f_L 作为衡量故障严重程度的指标^[18]:

$$f_L = \frac{U^2}{\omega L_f P} \times 100\% \quad (20)$$

式中: U 为交流母线额定电压; ω 为工频角频率; P 为系统直流额定功率。 f_L 值越大,代表故障越严重。

对比不同故障水平下,3种控制方案对分层接入系统连续换相失败的影响,在高端换流站的交流母线处设置单相和三相接地故障。以故障时间5s为基点,间隔1ms设置一次故障点,每次故障持续的时间为0.5s。考虑到分层接入结构下,单层换流器的换相失败往往会导致另一层换流器也发生换相失败,通过一层换流器的换相失败情况就可以判断抑制策略效果。因此为简化分析,仿真仅观察不同工况下非故障层换流器发生换相失败的次数,其中三相和单相接地故障仿真结果分别如图12和图13所示。

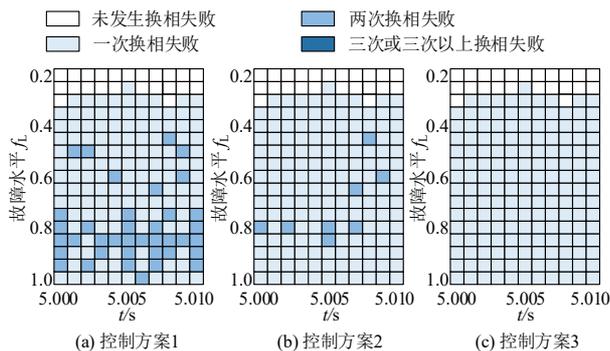


图12 三相接地故障换相失败次数统计

Fig. 12 Number of commutation failures under three-phase ground fault

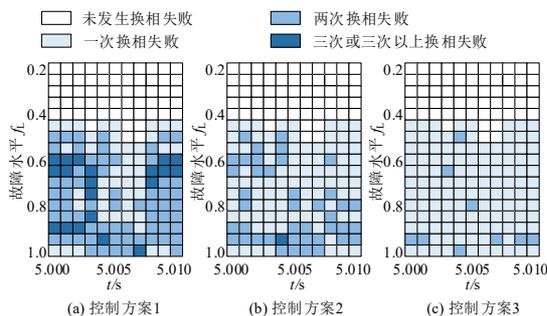


图13 单相接地故障换相失败次数统计

Fig. 13 Number of commutation failures under single-phase ground fault

通过图12和图13可知:若采用控制方案1的分层接入系统不发生连续换相失败,则在控制方案2和3下的系统亦不会发生连续换相失败;相较于控制方案1,控制方案2和3能在一定程度上抑制分层接入系统的连续换相失败,而在控制方法3下系统换相失败抵御能力的提升效果更为明显。考虑

到控制方法2基于直流电流对各换流器触发角进行独立补偿,本层触发角的减小不仅会导致该层换流母线电压跌落,还会通过分层接入系统的交流耦合路径使另一层电压跌落,所以控制方法2对连续换相失败的抑制效果有限。而控制方法3的直流电流指令主要取决于层间的无功交互与换流母线电压波动情况,该方法能实时限制直流电流以保证换流器存在一定的换相裕度,同时提高换流母线电压支撑能力,因此控制方法3相比控制方法2能更大范围地抑制连续换相失败的发生。

由上述分析可得,本文所提的控制策略在单相和三相故障下对分层接入系统的连续换相失败均起到抑制效果,且能改善交流电压稳定性以及直流动态恢复特性,为整个系统的安全稳定运行提供了保障。

5 结论

本文从分层接入系统的层间交互作用机理出发,分析了逆变侧的动态无功特性以及两层控制系统的响应差异,并在此基础上结合故障期间的无功交换量与换流母线电压的波动特征,提出了一种抑制连续换相失败的直流电流控制策略。通过理论分析与仿真验证,得出了如下结论:

1) 分层接入系统在故障期间,故障层切换至关断角控制后,其超前触发角增加引起层间无功交换量增加,使得非故障层在恢复过程中换流母线电压发生跌落,从而引发该层发生连续换相失败。

2) 层间无功交换量与直流电流、换流器的超前触发角以及换流母线电压有关。通过推导无功交换量与非故障层电气量的定量关系表达式,并利用直流侧的耦合特性,可以根据无功交换量的大小实时计算直流电流指令,能够实现对无功交换量的实时调节。

3) 对比不同故障程度与控制方案下的仿真结果表明,所提控制策略能依据分层接入系统的实际运行状态动态调节直流电流指令,降低故障期间无功交互波动,并同时提升故障期间高低端换流器的换相失败抵御能力,因此该策略能有效降低系统发生连续换相失败的概率。

参考文献

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 代书龙, 何启皓, 汪娟娟, 等. 单相接地时 LCC-HVDC 换相失败时序机理研究[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3770-3780.
DAI Shulong, HE Qihao, WANG Juanjuan, et al. Time Series Mechanism of LCC-HVDC Commutation Failure in Single Phase Grounding[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3770-3780(in Chinese).
- [3] 金璇, 杨万开, 徐永海. UHVDC 分层接入方式谐波对换相失败

- 影响的研究[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3763-3771.
JIN Xuan, YANG Wankai, XU Yonghai. Commutation failure impacted by harmonics in UHVDC split connection grid system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3763-3771(in Chinese).
- [4] 江叶峰, 鲍颜红, 张金龙, 等. 应对直流连续换相失败的动态无功备用评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 173-180.
JIANG Yefeng, BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, et al. Dynamic reactive power reserve evaluation for DC continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 173-180(in Chinese).
- [5] 宋金钊, 李永丽, 曾亮, 等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 2-13.
SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, et al. Review on commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 2-13(in Chinese).
- [6] 刘席洋, 王增平, 郑博文, 等. LCC-HVDC 故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3163-3171.
LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3163-3171(in Chinese).
- [7] 刘磊, 林圣, 何正友. 基于虚拟换相面积缺乏量的 HVDC 系统连续换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5361-5368.
LIU Lei, LIN Sheng, HE Zhengyou. A novel method based on virtual commutation area insufficient to mitigate the continuous commutation failure for HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5361-5368(in Chinese).
- [8] 彭龙, 汤涌, 程帆, 等. 基于实时戴维南等效参数估计的 LCC-HVDC 后续换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3151-3160.
PENG Long, TANG Yong, CHENG Fan, et al. A subsequent commutation failure suppression strategy for LCC-HVDC based on real-time Thevenin equivalent parameter estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3151-3160(in Chinese).
- [9] 汤奕, 郑晨一, 楼伯良, 等. 抑制连续换相失败的直流功率控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3514-3522.
TANG Yi, ZHENG Chenyi, LOU Boliang, et al. Research on DC power control strategy for mitigating continuous commutation failure [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3514-3522(in Chinese).
- [10] 李培平, 周泓宇, 姚伟, 等. 多馈入结构背景下的高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 834-850.
LI Peiping, ZHOU Hongyu, YAO Wei, et al. Review of commutation failure on HVDC transmission system under background of multi-infeed structure[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 834-850(in Chinese).
- [11] 周瑀涵, 辛焕海, 鞠平. 基于广义短路比的多馈入系统强度量化原理与方法: 回顾、探讨与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3794-3810.
ZHOU Yuhuan, XIN Huanhai, JU Ping. System strength quantification principle and method of multi-infeed systems based on generalized short-circuit ratio: reviews, discussions and outlooks[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3794-3810(in Chinese).
- [12] 汤奕, 陈斌, 皮景创, 等. 特高压直流分层接入方式下受端交流系统接纳能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1790-1800.
TANG Yi, CHEN Bin, PI Jingchuang, et al. Analysis on absorbing ability of receiving AC system for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1790-1800(in Chinese).
- [13] 汤奕, 陈斌, 王琦, 等. 特高压直流分层接入下混联系统无功电压耦合特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1005-1011.
TANG Yi, CHEN Bin, WANG Qi, et al. Analysis on reactive power and voltage coupling characteristics of hybrid system for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1005-1011(in Chinese).
- [14] 郑超, 李惠玲, 张鑫, 等. 特高压直流分层接入系统大扰动层间耦合特性及稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2670-2680.
ZHENG Chao, LI Huiling, ZHANG Xin, et al. Study on the dynamic coupling characteristics and stability control strategies for the hierarchical UHVDC and AC hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2670-2680(in Chinese).
- [15] 王顺亮, 谢洋, 马俊鹏, 等. 基于直流电流控制的特高压直流分层接入系统协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 167-178.
WANG Shunliang, XIE Yang, MA Junpeng, et al. Coordinated control strategy for a UHVDC hierarchical connection system based on DC current control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 167-178(in Chinese).
- [16] 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(in Chinese).
- [17] 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(in Chinese).
- [18] Cao Hong, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. An improved extinction angle control strategy to mitigate continuous commutation failure for HVDC system with hierarchical connection[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference. Beijing: IEEE, 2019: 806-811.
- [19] 袁博, 王颖, 邵华, 等. 特高压直流分层接入方式下抑制连续换相失败的优化控制策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(2): 47-55.
YUAN Bo, WANG Ying, SHAO Hua, et al. Optimization control strategy for mitigating the continuous commutation failure in UHVDC transmission system in hierarchical connection[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2020, 47(2): 47-55(in Chinese).
- [20] 邹亮, 刘涛, 赵彤, 等. 基于阀电压或阀电流的 HVDC 换相失败故障诊断[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3453-3458.
ZOU Liang, LIU Tao, ZHAO Tong, et al. Diagnosis of commutation failure in HVDC transmission systems based on voltage or current of converter valve[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3453-3458(in Chinese).



何思行

在线出版日期: 2024-02-27。

收稿日期: 2023-06-13。

作者简介:

何思行(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流输电控制与保护, E-mail: 21121424@bjtu.edu.cn;

郝明亮(1985), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统主设备故障分析及保护、直流输电控制与保护、励磁控制研究, E-mail: llhao@bjtu.edu.cn。

(编辑 李健一)