

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190895

# 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

张伟晨<sup>1</sup>, 熊永新<sup>1</sup>, 李程昊<sup>2</sup>, 姚伟<sup>1</sup>, 文劲宇<sup>1</sup>, 高东学<sup>3</sup>

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074;  
2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 3. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 为提高特高压直流多馈入系统连续换相失败抑制及恢复能力, 分析了直流控制系统模块中低压限流环节(Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)的交流电压和直流电压这两种输入方式对于不同系统故障的控制效果。针对两种不同输入方式的 VDCOL 各自的优势, 提出了一种改进的 VDCOL 模块。该模块通过设计合理的输入信号转换控制策略可有效抑制多馈入直流系统连续换相失败并提升其协调恢复速度。以某实际电网的特高压直流多馈入系统为例进行仿真研究, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 所提方法可有效减少逆变阀组的连续换相失败次数、缩短系统故障恢复时间。

**关键词:** 特高压直流输电; 直流多馈入系统; 换相失败; VDCOL; 协调恢复

## Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL

ZHANG Weichen<sup>1</sup>, XIONG Yongxin<sup>1</sup>, LI Chenghao<sup>2</sup>, YAO Wei<sup>1</sup>, WEN Jinyu<sup>1</sup>, GAO Dongxue<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;  
3. State Grid Hunan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to improve the continuous commutation failure suppression and recovery capability of a UHV DC multi-feed system, this paper analyzes the two input methods of AC voltage and DC voltage of Voltage Dependent Current Limit Order (VDCOL) in a DC control system module on the control effects for different system failures. Given the advantages of VDCOL with two different input modes, an improved VDCOL module is proposed. By designing a reasonable input signal conversion control strategy, the module effectively suppresses the continuous commutation failure of a multi-infeed DC system and improves its coordinated recovery speed. Taking the UHV DC multi-feed system of an actual power grid as an example, the simulation results in PSCAD/EMTDC show that the proposed method can effectively reduce the number of consecutive commutation failures and shorten the system failure recovery time of the inverter valve group.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577075) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Application Key Technologies and Demonstration of Electrochemical Energy Storage Power Station Group in UHV AC/DC Hybrid Receiving-end Power Grid".

**Key words:** UHVDC; DC multi-infeed system; commutation failure; VDCOL; coordinated recovery

## 0 引言

特高压直流输电具有传输容量大、传输距离长、

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51577075); 国家电网有限公司科技项目资助“电化学储能电站群在特高压交直流混联受端电网应用关键技术研究及示范”

线路损耗小等优点, 在远距离、大区域的电网互联及大容量输电等方面得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。为缓解我国东西部能源、负荷空间分布不平衡问题<sup>[3]</sup>, 特高压直流输电在我国得到了广泛应用, 特别是华东电网、华中电网、南方电网接入了多回大规模特高压直流输电线路, 已经成为典型的特高压直流多馈入系统。多回直流密集接入交流系统, 给电力系统的安

全稳定性带来了新的挑战。换相失败作为直流输电系统最常见的故障之一，将导致直流电压下降和直流电流增大，若采取的控制措施不正确，还会引发后继换相失败，严重时会导致直流系统闭锁，中断功率传输<sup>[4]</sup>。对于交直流混联系统而言，单次的换相失败的影响是有限的，连续多次的换相失败则会造成直流系统闭锁<sup>[5]</sup>，直流系统功率传输中断、交流系统功率传输剧烈变化甚至反向，对电网的安全稳定运行是严峻的考验<sup>[6]</sup>，因此，研究连续换相失败的抑制、改善系统故障恢复特性具有重要的意义。

现有的文献中对直流换相失败的机理进行研究。文献[7-8]分析了换相失败的机理，并研究了逆变侧不同的控制策略对换相失败的影响；文献[9]从换相电压时间面积出发，指出交流系统频谱特性对换相失败存在影响；文献[10]认为故障后换流母线电压的跌落程度决定了是否发生换相失败；文献[11]通过仿真发现即使故障后换流母线电压跌落程度相同，是否发生换相失败也是一个概率性问题；文献[12]分析了故障合闸角对换相失败的影响，指出这种概率性问题是受故障合闸角影响。针对换相失败的预防研究，文献[13-14]提出在 LCC-HVDC 逆变侧换流母线处接入静止无功补偿器，从而达到预防换相失败的目的；文献[15]通过检测换流母线的电压变化，当电压较低时提前触发晶闸管，保证逆变侧正常换相；文献[16]提出了换相失败预测控制 (Commutation Failure Prevention, CFPREV)；文献[17]指出换相失败预测控制在故障严重程度较轻时，具有明显效果；文献[18]对 CFPREV 进行优化，采用适当减小 VDCOL 电压上升常数等措施，能更有效地预防换相失败的发生；文献[19]提出了一种基于  $\sin\text{-}\cos$  分量检测的改进方法；文献[20]提出基于特征谐波分离的辅助判据的方法，躲避交流系统励磁涌流造成的换相失败预测控制频繁动作，避免直流功率波动。

上述对换相失败的研究以分析和预防单次换相失败为主，对于连续换相失败的分析与抑制研究较少。文献[21]在常规的 PI 控制器中增加前馈回路来实现协调控制的方法；文献[22]在低压限流控制器基础上引入虚拟电抗环节，可有效抑制双馈入直流输电系统连续换相失败；文献[6]认为低压限流器启动电压  $U$  波动剧烈是造成系统连续换相失败的主要原因，提出了采用换流母线电压替换直流电压的方法，但忽略了直流故障时 VDCOL 应有的限流作用，并且未考虑多馈入系统中控制策略的适应性；文献[23]提出一种 DC-VDCOL 与 AC-VDCOL 切换的控制方法，该方法采用低电压延时的启动判据，在交

流故障时从 DC-VDCOL 控制切换为 AC-VDCOL 控制，该研究未考虑低压限值及延时时间对方法性能的影响。

针对上述研究中存在的不足，本文首先分析了直流系统控制中 VDCOL 基本原理及不同输入方式的 VDCOL 对直流系统阀组控制性能的影响，提出了一种基于关断角  $\gamma$  作为判据的输入信号自动切换的改进 VDCOL 模块，该模块通过设计合理的输入信号转换控制策略可有效抑制多馈入直流系统连续换相失败并提升其协调恢复速度，通过仿真算例验证所提控制策略的有效性。

## 1 特高压直流多馈入系统

### 1.1 多馈入系统模型

河南电网规划建设青海-河南特高压直流输电线路，已建成投运的天中直流，河南电网将逐步形成多直流馈入的格局。青海-河南直流、天中直流皆为  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路，其中青海-河南直流采用特高压直流多端单层馈入结构，天中直流采用常规的特高压直流单端馈入结构。河南电网特高压直流多馈入系统的等效模型如图 1 所示。

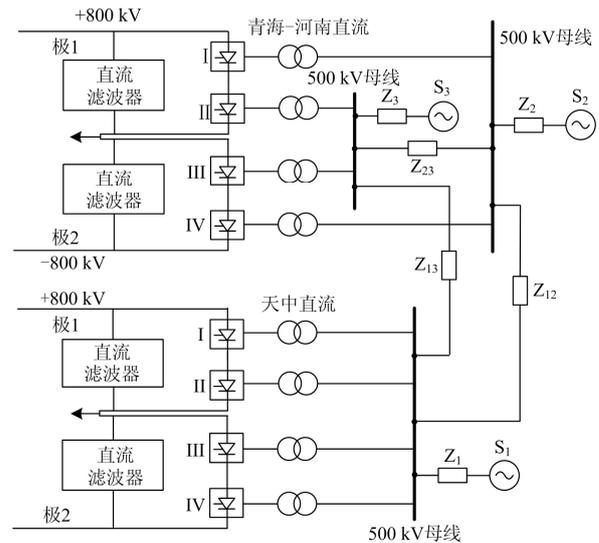


图 1 河南电网特高压直流多馈入结构

Fig. 1 UHVDC multi-infeed structure in Henan Power Grid

图 1 中，天中直流馈入中州换流站，青海-河南直流阀组 I、II、III、IV 为 12 脉波逆变阀组，其中高压阀组 I、IV 馈入驻马店换流站，低压阀组 II、III 馈入驻马店 500 kV 母线。Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>、Z<sub>3</sub> 为等效交流系统模型的系统阻抗，Z<sub>12</sub>、Z<sub>13</sub>、Z<sub>23</sub> 为各馈入点之间的联系阻抗。为表述方便，将图 1 中天中直流简称为直流系统 1，青海-河南直流的高压阀组为逆

变阀组 2, 低压阀组为逆变阀组 3。

## 1.2 逆变侧控制策略

青海-河南直流与天中直流均采用 CIGRE HVDC 标准测试模型的控制策略, 逆变侧配置有定电流控制、定关断角控制。其结构框图如图 2 所示。

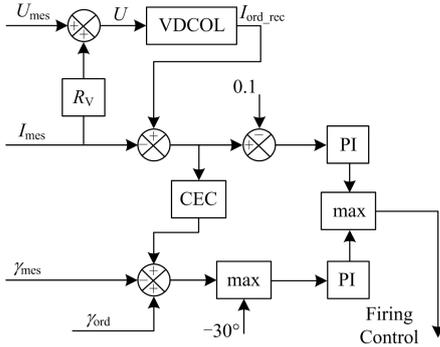


图 2 逆变阀组控制策略

Fig. 2 Diagram of inverter control of UHVDC

图 2 中  $I_{mes}$ 、 $U_{mes}$ 、 $\gamma_{mes}$  为取自阀组测量系统的直流电流测量值、直流电压测量值以及熄弧角测量值;  $R_V$  为补偿电阻;  $\gamma_{ord}$  为熄弧角额定值;  $I_{ord\_rec}$  为 VDCOL 输出值。逆变侧还配备有低压限流控制器(VDCOL)和电流偏差控制器(CEC)。

## 2 低压限流环节对多馈入系统暂态特性影响

### 2.1 低压限流环节基本原理

低压限流器(VDCOL)是指在某些故障情况下, 当直流电压或交流电压低于某一值时, 自动降低定电流控制的整定值, 而在直流电压或交流电压恢复后, 又自动恢复整定值的控制功能<sup>[24]</sup>。该环节有利于促进电压跌落过程中系统的换相过程, 一定程度上减少换相失败概率<sup>[25]</sup>。CIGRE HVDC 标准测试模型中 VDCOL 的电压-电流( $U$ - $I$ )特性曲线如图 3 所示。

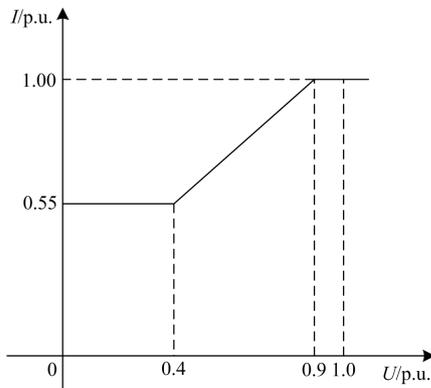


图 3 低压限流器特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of VDCOL

如图 3 所示,  $U$  为 VDCOL 输入电压;  $I$  为 VDCOL 输出的直流指令值。由此可得, VDCOL 的  $U$ 、 $I$  间关系式为

$$I = f(U) = \begin{cases} 0.55, & U \leq 0.4 \\ 0.9U + 0.19, & 0.4 < U \leq 0.9 \\ 1, & 0.9 \leq U \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 AC/DC-VDCOL 输入对逆变侧控制影响

VDCOL 控制器根据输入信号的不同, 可分为交流电压输入的 VDCOL(AC-VDCOL)和直流电压输入的 VDCOL(DC-VDCOL)<sup>[20]</sup>。我国多数的直流输电工程采用常规的 DC-VDCOL 控制, 该类型控制  $I_{dc}$  的指令值跟随  $U_{dc}$  动态变化; AC-VDCOL 控制较少使用在实际工程中, 该控制是根据实际检测到的交流换相电压  $U_L$  的动态变化反应于  $I_{dc}$  的指令值中。

两种 VDCOL 控制方式都能够快速反应电压波动, 进而调整直流系统运行特性, 但由于电压采样点的不同, 对系统暂态特性恢复也有着显著差异。

本小节分别从直流系统故障和交流系统故障两方面对 AC-VDCOL、DC-VDCOL 的控制特性进行分析。

2.2.1 直流线路故障下不同输入 VDCOL 控制特性分析  
图 1 所示的多馈入系统中, 设置两组对照试验: 方式一各回直流逆变侧阀控制均采用常规的 DC-VDCOL 控制; 方式二仅在直流系统 1 的逆变侧阀控制采用 AC-VDCOL 控制, 逆变阀组 2、逆变阀组 3 仍采用常规的 DC-VDCOL 控制。

在直流系统 1 中设置逆变侧直流侧 1 s 时正极发生极对地故障, 金属性接地, 接地电阻为 0, 故障时长 0.2 s。直流系统 1 正负极  $U_{dc}$ 、 $I_{dc}$  及逆变侧阀无功吸收特性如图 4 所示, 逆变侧交流换相电压  $U_L$  及交流母线电压变化特性如图 5 所示。

图 4(a)中, 故障点位于直流正极, 故障发生后  $U_{dc}$  出现大幅跌落,  $I_{dc}$  瞬时跌落而后逐渐恢复稳定。方式一中, 故障期间  $U_{dc}$  维持在极低水平, 受 DC-VDCOL 作用  $I_{dc}$  在短路冲击后稳定在 0.5 p.u.; 方式二中, 虽然  $U_{dc}$  故障期间极低, 但受交流系统支撑作用,  $U_L$  维持在较高水平, 如图 5(a)所示。受 AC-VDCOL 作用,  $I_{dc}$  在短路冲击后稳定在 0.9 p.u. 以上, 过高的  $I_{dc}$  使得正极逆变侧阀组从交流系统相吸收更多的无功。图 4(b)中, 直流负极为非故障直流, 正极故障对负极造成了一定程度的冲击,  $U_{dc}$  在小幅波动后都能够恢复至 0.9 p.u. 以上, 受交流系统电压波动影响, 方式二  $U_{dc}$  低于方式一中  $U_{dc}$ 。在 VDCOL 作用下, 两种运行方式  $I_{dc}$  皆可恢复至额定水平。

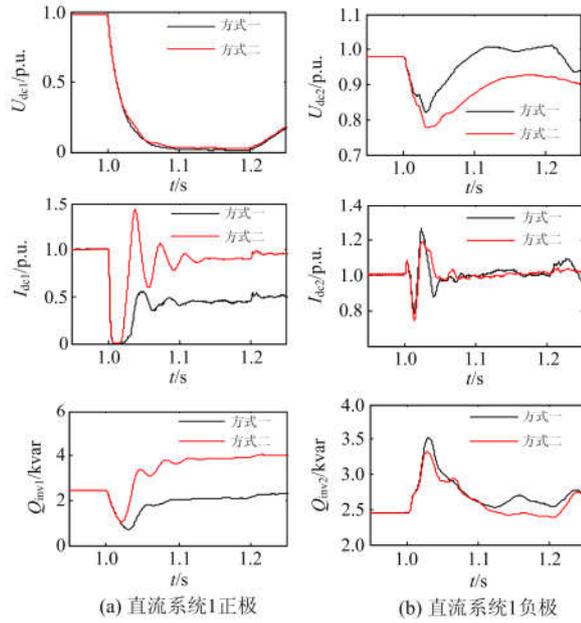


图 4 直流系统 1 正负极系统运行特性  
Fig. 4 Positive and negative system operating characteristics in DC system 1

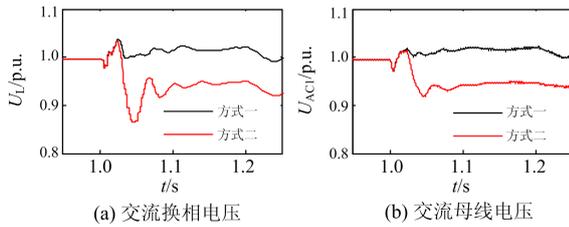


图 5 直流系统 1 逆变侧电压  
Fig. 5 Inverter side voltage in DC system 1

采用 AC-VDCOL 控制的逆变阀组, 在发生直流故障时,  $U_{dc}$  大幅跌落, 受交流系统支撑作用, 交流换相电压  $U_L$  依然维持在较高运行状态, 使得  $I_{dc}$  在  $U_{dc}$  恢复之前提升至较高水平, 逆变阀组向系统吸收更多的无功, 造成交流系统低压运行。而采用 DC-VDCOL 控制的逆变阀组可有效改善上述问题, 暂态过程中  $I_{dc}$  受  $U_{dc}$  作用, 在  $U_{dc}$  恢复之前限制  $I_{dc}$  抬升, 减少逆变阀组吸收的无功, 避免交流系统的电压跌落。

### 2.2.2 交流系统故障下不同输入 VDCOL 控制特性分析

在距离直流系统 1 换流母线电气距离 0.1 H 处设置三相接地故障, 1 s 时发生, 故障时长 0.1 s。直流系统 1 关断角变化特性如图 6 所示。

图 6 中, 方式一运行方式下, 直流系统 1 发生 3 次换相失败。方式二运行方式下, 直流系统 1 发生 2 次换相失败。AC-VDCOL 控制相对 DC-VDCOL 控制, 有效提升了系统的暂态恢复特性, 降低了直

流系统 1 连续换相失败次数, 缩短了换相失败恢复时间。

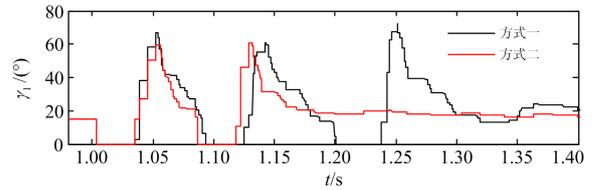


图 6 直流系统 1 换流阀关断角  
Fig. 6 Converter valve arc extinction angle in DC system 1

图 7 为直流系统 1 各电气量暂态响应曲线。在第一次换相失败恢复期间, 两种运行方式直流电压恢复特性相近。图 7(c)为 VDCOL 输出的  $I_{ord}$  指令值, 故障发生后, 在首次换相失败恢复期间方式二 VDCOL 输出值大于方式一, 受 VDCOL 控制作用,

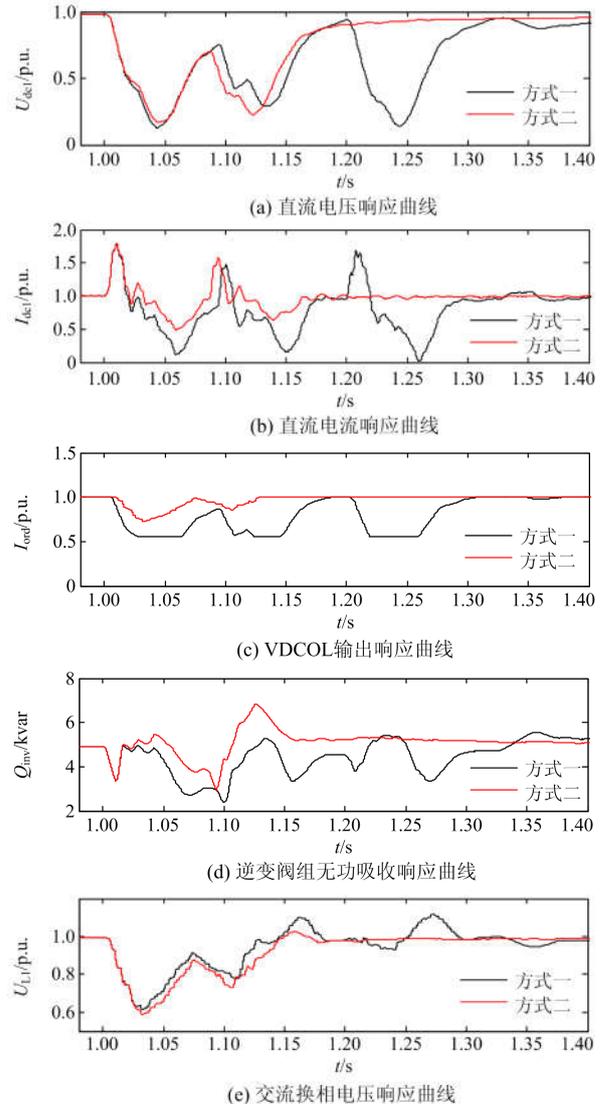


图 7 直流系统 1 暂态运行特性

Fig. 7 DC system 1 transient characteristics

方式二直流电流相对方式一得到较快提升。由于直流电流的抬升, 方式二的换流阀从系统吸收更多的无功, 如图 7(d)、图 7(e)中, 故障期间, 方式二换流阀从系统吸收的无功明显多于方式一, 更多的无功吸收也使得交流系统电压的降低。

表 1 为方式二发生第二次换相失败时, 方式一同时刻换相数据对比。在 1.081 s 时, 方式一的直流电流比方式二降低了 21.54%, 稳态运行时换相电压时间积分面积为 0.696 kVs, 方式一的换相电压时间积分面积比方式二降低了 10.59%, 所以直流电流的快速抬升是造成 AC-VDCOL 控制后续换相失败早于 DC-VDCOL 的主要原因。

表 1 直流系统 1 第二次换相失败相关数据对比

Table 1 Comparison of the data of the first commutation failure inverter valve in DC system 1

VDCOL 输入方式	换相起始时间/s	换相前直流电流/p.u.	换相电压时间积分面积/kVs
DC-VDCOL	1.081 8	0.721 6	0.599 2
AC-VDCOL	1.081 4	0.937	0.672 9

式(1)中, 当 VDCOL 输入量  $U$  小于下限值时,  $I$  始终输出定值。对于 DC-VDCOL 与 AC-VDCOL 控制方式, 在交流系统发生故障后, 输入量  $U_{dc}$  与  $U_L$  都能通过自身运行特性变化快速反应系统换相失败与换相成功的动态过程。但是, 在换相失败后电压水平逐步抬升的过程中,  $U_{dc}$  跌落幅度较大, 低于 VDCOL 输入  $U$  的下限值, 使得 VDCOL 环节持续保持在 0.55 p.u., 直到  $U_{dc}$  高于下限值 0.4 p.u., 输出  $I$  才能动态反应  $U$  的变化; 对于  $U_L$  而言, 受交流系统支撑作用,  $U_L$  在故障过程中维持在较高电压等级,  $U_L$  的波动能更有效地通过 VDCOL 控制传递到直流控制中, 提高后续的换相成功率。

综上所述: 当发生直流故障时, DC-VDCOL 可有效限制直流电流上升; AC-VDCOL 则未能有效控制直流电流上升, 换流阀从系统吸收更多无功, 导致交流系统电压跌落。当交流系统故障时, DC-VDCOL 与 AC-VDCOL 都能起到限制电流上升的作用, AC-VDCOL 具有更好的暂态恢复效果, 但是直流电流的快速抬升则可能导致后续换相失败提前。

### 3 AC/DC-VDCOL 转换控制器设计

通过上文分析的 DC-VDCOL 及 AC-VDCOL 在不同故障情况下各自控制性能的优劣性, 发挥 DC-VDCOL 在直流故障下的限流优势及 AC-VDCOL 在交流系统故障下的交流电压跟踪、快速恢复的优势, 提出了基于关断角  $\gamma$  判别的 AC/DC-VDCOL 转换控制器。AC/DC-VDCOL 转换控制器如图 8 所示。

图 8 中,  $\gamma$  为逆变阀组关断角实时测量值;  $\gamma_{min}$  为晶闸管恢复阻断能力所需最小关断角;  $tri$  为触发判据输出值。当  $\gamma < \gamma_{min}$  时, 认为换流阀发生了换相失败<sup>[18]</sup>。由于交流电压波动, 交流系统故障往往会导致逆变阀组发生换相失败, 而直流系统故障通常不会触发逆变阀组发生换相失败, 故换相失败判据可有效反应交流系统故障, 避开直流故障。将换相失败信号持续作用 100 ms, 并与正常换相信号共同作用作为  $tri$  的值, 表示在该次换相失败恢复后, 触发信号  $tri$  有效。

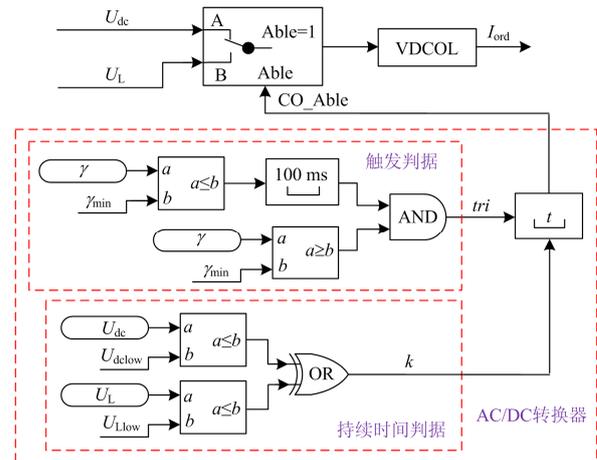


图 8 AC/DC-VDCOL 转换控制器结构图

Fig. 8 AC/DC-VDCOL conversion controller structure

$U_{dc}$ 、 $U_L$  分别为直流电压和交流换相电压;  $U_{dc\text{low}}$ 、 $U_{L\text{low}}$  分别为直流电压、交流电压恢复下限值;  $k$  为持续时间判据环节输出值。CO\_Able 为 AC/DC 转换器输出信号。稳态时, 各换流阀 VDCOL 工作在 DC-VDCOL 控制。当  $U_{dc}$ 、 $U_L$  中任何一个处于低压状态时, 即  $U_{dc} \leq U_{dc\text{low}}$  或  $U_L \leq U_{L\text{low}}$  时,  $k$  输出有效, 且当  $tri$  输出同时有效时, AC/DC 转换器调至 AC-VDCOL 控制; 当  $U_{dc}$ 、 $U_L$  都恢复至下限值以上时,  $k$  输出无效, AC/DC 转换器调回 DC-VDCOL 控制。采用直流电压、交流电压双重信号控制, 避免了单一信号的抖动使控制器出现连续启停状态。

## 4 仿真实验

### 4.1 仿真模型参数

为验证所提多馈入系统换相失败协调恢复控制策略的有效性及其可行性, 采用 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 搭建如图 1 所示特高压直流多馈入系统。等效交流系统模型的系统阻抗和馈入点之间的联系阻抗参数及 AC/DC-VDCOL 转换控制器参数分别如表 2、表 3 所示。

表 2 多馈入系统交流等效模型参数

Table 2 AC equivalent model of multi-infeed system

$Z_1/\Omega$	$Z_2/\Omega$	$Z_3/\Omega$
0.5992+j6.8484	0.7977+j9.1169	0.5864+j0.02133
$Z_{12}/\Omega$	$Z_{13}/\Omega$	$Z_{23}/\Omega$
3.3994+j38.8554	3.86436+j44.1699	1.39404+j15.9340

表 3 AC/DC-VDCOL 转换控制器参数

Table 3 AC/DC-VDCOL converter parameters

$\gamma_{min}$	$U_{demin}$	$U_{Llow}$
9°	0.70 p.u.	0.85 p.u.

4.2 算例分析

分别对以下 4 种控制方式在不同逆变侧交流系统故障案例下的响应进行仿真分析：

方式一，各直流换流阀采用常规的 DC-VDCOL 控制环节；

方式二，各直流换流阀采用文献[19]所述控制方法，即：当交流系统电压低于阈值  $U_{low}$  的时间超过  $t$  时，则启动 AC-VDCOL 替代 DC-VDCOL，取  $U_{low}=0.85$  p.u.,  $t=0.1$  s；

方式三，与方式二控制方法相同， $U_{low}=0.85$  p.u.,  $t=0$ ，即满足低压条件立即切换控制；

方式四 各直流换流阀采用本文所述 AC/DC-VDCOL 转换控制器。

利用方式一、方式二、方式三与本文所述方法方式四进行对比，验证 AC/DC-VDCOL 转换协调控制器在多馈入系统换相失败恢复中的应用效果，及控制器启动时刻对控制效果的影响。

案例：在距离直流系统 1 换流母线 1 s 时发生三相接地故障，接地阻抗  $L_f=0.14$  H，故障时长 0.1 s。该故障条件下，AC/DC-VDCOL 切换时刻如表 4 所示，各直流逆变阀组关断角如图 9 所示。

表 4 AC/DC-VDCOL 切换时刻

Table 4 AC/DC-VDCOL switching moment

	直流系统 1	逆变阀组 2	逆变阀组 3
方式二	1.134 s	1.117 s	1.125 s
方式三	1.034 s	1.017 5 s	1.025 s
方式四	1.035 s	1.037 s	1.035 s

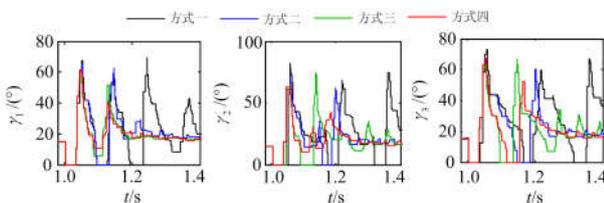


图 9 三相接地故障  $L_f=0.14$  H 时关断角运行特性

Fig. 9 Arc extinction angles response curve under three phase fault with  $L_f=0.14$  H

图 9 中，直流系统 1 中，四组控制方式分别发生 3 次、2 次、2 次、1 次换相失败；逆变阀组 2 中，四种控制方式分别发生 3 次、2 次、2 次、1 次换相失败；逆变阀组 3 中，四种控制方式分别发生 3 次、2 次、2 次、2 次换相失败。方式二、方式三、方式四相对于方式一换相失败次数减少，换相失败恢复时间缩短。从单次换相失败来看，方式二、方式三 AC-VDCOL 信号接入后，逆变阀组第二次换相失败的时间提前，方式四避免了第二次换相失败。

图 10 为故障恢复过程中系统各电气量暂态响应曲线。图 10(a)、图 10(b)分别为各直流的直流电流、直流电压恢复特性，方式二、方式三、方式四的 AC/DC-VDCOL 的切换方案相对于方式一的常规 DC-VDCOL 控制的整体恢复速度都得到提升。

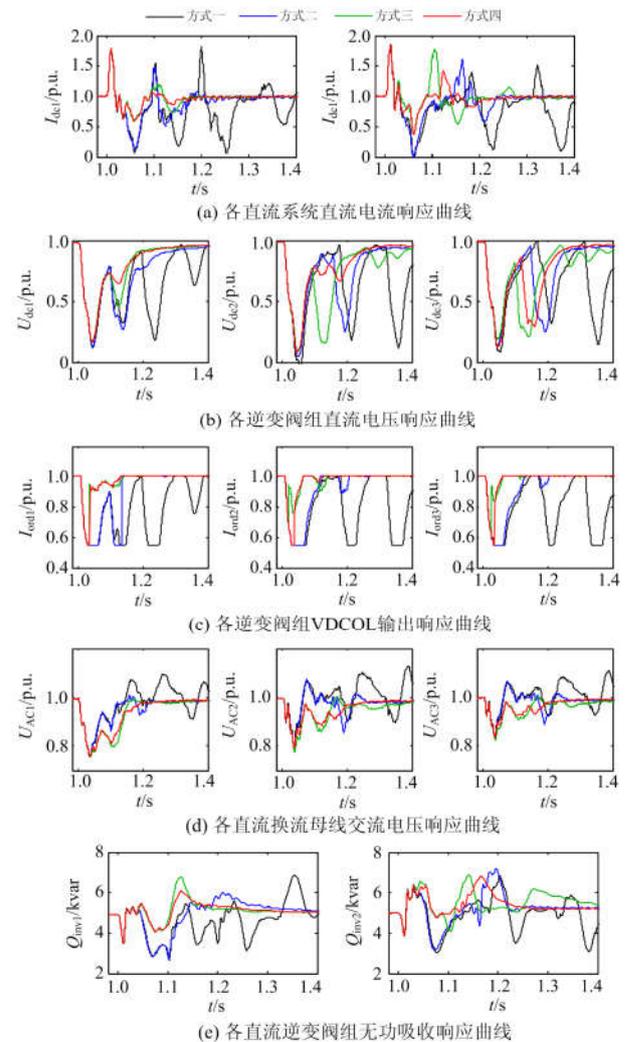


图 10 三相接地故障  $L_f=0.14$  H 时系统运行特性

Fig. 10 DC system operation performance under three phase fault with  $L_f=0.14$  H

图 10(c)为各逆变阀组 VDCOL 输出响应曲线, 图中方式二、方式三、方式四的输出信号在表 4 中对应的时刻发生了跳变。方式二转换信号加了延时后, AC/DC-VDCOL 在第一个换相失败周期内切换; 方式三无延时, AC/DC-VDCOL 在第一个换相失败周期内随机切换, 其中直流系统 1 在换相成功后电压上升的过程中切换, 逆变阀组 2、逆变阀组 3 在换相失败期间, 电压跌落的过程中进行切换; 方式四都是在换相成功后的电压上升阶段进行切换。

图 10(d)为各直流换流母线交流电压响应曲线, 三张图中方式三、方式四对应的  $U_{AC}$  在 1.2 s 内都显著低于方式一、方式二, 这主要由于在故障发生后, 方式三、方式四率先切换为 AC-VDCOL 控制, VDCOL 输出的  $I_{ord}$  指令值增大, 直流电流迅速抬升, 同时逆变阀组也将吸收更多无功, 图 10(e)中, 1.05~1.15 s 内方式三、方式四相对方式一、方式二逆变阀组吸收更多无功, 由于此刻系统电压较低, 逆变侧加装的交流滤波器无法提供足够的无功, 额外的无功需求将通过交流系统补充, 进而造成系统电压的进一步跌落, 这也是造成 AC-VDCOL 控制方法第二次换相失败提前发生的重要因素。

通过图 9 和图 10 各图中不同启动方式的对比可知, 当 VDCOL 控制的输入环节在首次换相失败电压下降过程中切换时, 如方式三, 逆变阀组在系统低电压时吸收更多无功, 造成系统电压进一步跌落; 当 VDCOL 控制的输入环节在第二次换相失败过程中切换时, 如方式二, 对于系统暂态恢复也有一定的提升效果, 但是由于其转换信号切换滞后, 控制效果不如方式三、方式四; 当 VDCOL 控制的输入环节在首次换相失败的电压恢复期进行切换时, 如方式四, 相比方式三一定程度上降低了逆变阀组从系统吸收的无功, 交流电压跌落幅度更小, 同时又提升了系统的故障恢复能力。

为进一步验证本文所提的 AC/DC-VDCOL 转换方法的适用性, 通过大量仿真, 比较分析在不同严重程度的逆变侧交流系统故障该方法对换相失败的恢复作用。对方式一和方式四两组控制方式, 分别设置单相和三相不同严重程度的电感接地故障, 故障时刻 1 s, 故障时长 0.1 s。

根据电力系统运行要求, 稳态时系统电压运行在  $\pm 5\%$ , 当系统电压稳定在  $\pm 5\%$  以内时, 认为系统已恢复稳定, 从故障时刻至系统恢复稳定所需时间即为恢复时间  $t_r$ , 如式(2)所示。

$$t_r = t_{sc} - t_{st} \quad (2)$$

式中:  $t_{sc}$  为短路时刻, 即为故障发生时刻;  $t_{st}$  为电压恢复至  $\pm 5\%$  以内的时刻。

表 5、表 6 分别为三相故障和单相故障下, 特高压直流连续换相失败次数与故障恢复时间统计情况, 图 11 为不同故障情况下换相失败恢复时间对比曲线。其中换相失败次数“a-b-c”表示: 直流系统 1、逆变阀组 2、逆变阀组 3 分别发生 a、b、c 次换相失败, 恢复时间取直流系统 1 换流母线电压进行观测。

比较表 5、表 6 中常规方案和 AC/DC-VDCOL 转换法, 可知: AC/DC-VDCOL 转换法以换相失败作为启动判据, 若原控制策略不发生换相失败, 则转换法不会启动; 本方法只能实现系统换相失败的协调恢复, 并不能起到换相失败预防的作用, 故不会优化换相失败次数至 0; AC/DC-VDCOL 转换法对不同类型的故障都具有较强的适应性, 可以有效提升特高压直流多馈入系统的换相失败协调恢复能力, 降低换相失败次数。

为了考虑故障时刻对转换器控制器控制效果的影响, 将故障开始时间设置在 1~1.006 s, 将故障接地电抗分布在 0.1~0.5 H。图 12 为不同 VDCOL 控制方式时逆变阀组换相失败抑制效果对比。

表 5 三相故障特高压直流连续换相失败次数及恢复时间

Table 5 Number of continuous commutation failure and recovery time in HVDC in the case of three-phase faults

接地 阻抗/H	常规方案		AC/DC-VDCOL 转换法	
	换相失败	$t_r/s$	换相失败	$t_r/s$
0.04	5-6-5	0.493	2-1-2	0.134
0.06	4-4-2	0.359	2-1-2	0.133
0.08	3-2-1	0.363	1-2-2	0.143
0.1	3-2-1	0.291	1-2-2	0.137
0.15	2-3-3	0.257	1-1-1	0.129
0.2	2-3-3	0.323	1-1-1	0.127
0.25	2-2-3	0.239	2-1-1	0.142
0.3	2-2-3	0.23	1-1-1	0.109
0.35	2-3-4	0.366	1-2-1	0.106
0.4	1-1-1	0.08	1-1-1	0.066
0.45	1-1-1	0.081	1-1-1	0.064
0.5	1-1-1	0.084	1-1-1	0.065
0.7	1-1-1	0.091 2	1-1-1	0.065
0.9	0-0-0	0.07	0-0-0	0.07

表 6 单相故障时特高压直流连续换相失败次数及恢复时间  
Table 6 Number of continuous commutation failure and recovery time in HVDC in the case of single-phase faults

接地 阻抗/H	常规方案		AC/DC-VDCOL 转换法	
	换相失败	$t_r/s$	换相失败	$t_r/s$
0.04	3-4-2	0.382	1-1-1	0.065
0.06	3-2-2	0.178	1-2-2	0.136
0.08	2-1-1	0.061	1-1-1	0.061
0.1	3-1-1	0.267	2-1-1	0.131
0.15	2-1-2	0.083	1-1-1	0.081
0.2	2-3-3	0.212	1-1-1	0.084
0.25	1-2-1	0.093	1-1-1	0.087
0.3	1-1-1	0.094	1-1-1	0.093
0.35	1-2-2	0.202	1-1-1	0.193
0.4	1-2-2	0.092	1-2-1	0.084 3
0.45	1-2-1	0.094	1-1-2	0.084
0.5	1-2-1	0.097	1-1-2	0.086
0.7	1-0-0	0.068	1-0-0	0.068
0.9	0-0-0	0.065	0-0-0	0.065

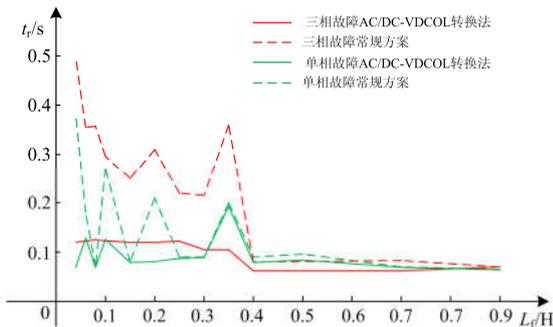


图 11 换相失败恢复时间对比曲线

Fig. 11 Comparison curve of commutation failure recovery time

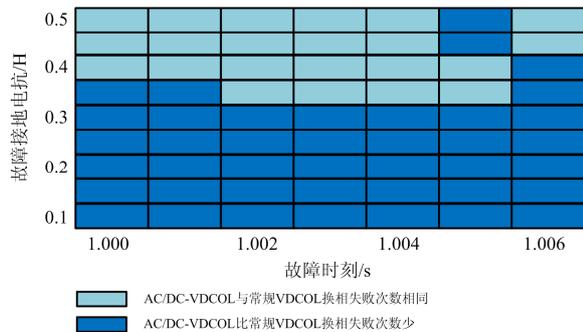


图 12 不同 VDCOL 控制方式下换相失败抑制效果对比

Fig. 12 Comparison of commutation failure mitigation effect with different VDCOL control modes

图 12 中淡蓝色方框表示在该故障情况下 AC/DC-VDCOL 控制与常规 DC-VDCOL 控制的换

相失败次数相同，深蓝色方框表示 AC/DC-VDCOL 控制比常规 DC-VDCOL 控制的换相失败次数少，及 AC/DC-VDCOL 控制效果更优。由图中可知，AC/DC-VDCOL 控制方法可有效提升不同工况下系统发生换相失败次数，即可降低系统发生换相失败的概率。

## 5 结论

本文在分析了 DC-VDCOL 与 AC-VDCOL 两种控制结构对直流控制系统控制性能影响的基础上，提出并设计了以  $\gamma$  作为触发判据的 AC/DC-VDCOL 转换协调控制器，得到以下结论：

1) 采用 DC-VDCOL 控制，系统发生直流故障时可有效降低故障直流的直流电流，减少逆变阀组的无功需求，避免交流电压跌落；采用 AC-VDCOL 控制，系统发生直流故障后不能限制直流电流上升，直流电流在故障期间维持在较高运行状态，逆变阀组吸收大量无功，交流电压出现跌落。

2) 对于交流系统故障，DC-VDCOL 可起到快速限流的作用，逆变阀组向系统释放大量的无功，加快了交流电压恢复，但是对于交流系统的恢复不够灵敏，交流电压过调；AC-VDCOL 可灵敏地感知交流系统恢复状态，适时调整触发量，提高后续换相成功率，但是由于直流电流快速抬升，逆变阀组过多吸收无功，交流电压进一步降低，后续换相失败提前发生。

3) 本文通过不同启动方式的对比，验证了本转换法中  $\gamma$  作为触发判据启动的优越性。通过不同严重程度故障对比分析，本转换法具有较好的适应性，可有效应对不同严重程度故障。

## 参考文献

[1] 张烁, 李永丽, 李博通. 高压直流输电系统开路电压的研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 95-102.  
ZHANG Shuo, LI Yongli, LI Botong. Open line voltage of HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 95-102.

[2] 董希建, 罗剑波, 李雪明, 等. 交直流混联受端电网频率紧急协调控制技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 59-66.  
DONG Xijian, LUO Jianbo, LI Xueming, et al. Research and application of frequency emergency coordination and control technology in hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 59-66.

- [3] 张天, 龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 87-92.  
ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operation performance of UHV AC/DC power grid in China[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 87-92.
- [4] 周孝信. 我国电网技术的现状与未来[J]. 电网技术, 1995, 19(2): 1-4.  
ZHOU Xiaoxin. Current status and prospects of power system technology in China[J]. Power System Technology, 1995, 19(2): 1-4.
- [5] 王峰, 刘天琪, 周胜军, 等. 谐波对 HVDC 系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4888-4894.  
WANG Feng, LIU Tianqi, ZHOU Shengjun, et al. Mechanism and quantitative analysis method for HVDC commutation failure resulting from harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4888-4894.
- [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, 5300.  
LI Ruipeng, LI Yongli, CHEN Xiaolong. A control method for suppressing the continuous commutation failure of HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5029-5042, 5300.
- [7] 赵书强, 董沛毅, 蒲莹, 等. 逆变侧控制策略对换相失败影响的研究[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3840-3848.  
ZHAO Shuqiang, DONG Peiyi, PU Ying, et al. Research on influence of inverter side control strategy on commutation failure[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3840-3848.
- [8] 欧开健, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-8.  
OU Kaijian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 1: commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8.
- [9] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 378-384.
- [10] 肖浩, 李银红, 于芮枝, 等. 影响多馈入直流系统换相失败的电网薄弱区域快速识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1781-1789.  
XIAO Hao, LI Yinrong, YU Ruiji, et al. A rapid identification method of weak areas in power grid based on commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1781-1789.
- [11] 杨秀, 陈鸿煜. 高压直流输电系统换相失败的仿真研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 247-250, 270.  
YANG Xiu, CHEN Hongyu. Simulation study of commutation failure of HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 247-250, 270.
- [12] 李程昊, 刘畅, 张振安, 等. 计及换相失败预测控制和故障合闸角的 HVDC 换相失败分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 56-63, 76.  
LI Chenghao, LIU Chang, ZHANG Zhen'an, et al. Analysis of commutation failure in HVDC power transmission system considering prediction control of commutation failure and initial fault angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 42(3): 56-63, 76.
- [13] NAYAK O B, GOLE A M, CHAPMAN D G, et al. Dynamic performance of static and synchronous compensators at an HVDC inverter bus in a very weak AC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1350-1358.
- [14] OLIVEIRA M D, POLOUJADOFF M, DU A L, et al. Supply of an entirely passive AC system through an HVDC link[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1994, 16(16): 111-116.
- [15] HANSEN A, HAVEMANN H. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 1022-2026.
- [16] ZHANG L, DOFNAS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C] // 2002 International Conference on Power System Technology (POWERCON), October 13-17, 2002, Kunming, China: 51-56.
- [17] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 124-131.  
WANG Haijun, HUANG Yilong, ZHOU Quan. Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 124-131.
- [18] ANEDERSEN B R, XU L. Hybrid HVDC system for power transmission to island networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 19(4): 1884-1890.
- [19] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高

- 压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.
- CHEN Shuyong, LI Xinnian, YU Jun, et al. A method based on the sin-cos component detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6.
- [20] 李程昊, 刘遵义, 石光, 等. 换相失败预测控制对特高压直流运行影响分析及改进[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 618-625.
- LI Chenghao, LIU Zunyi, SHI Guang, et al. Analysis of influence and improvement of commutation failure prevention for UHVDC transmission systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 618-625.
- [21] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 多馈入直流输电系统的协调恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(11): 63-66.
- YANG Weidong, XU Zheng, HAN Zhenxiang. Coordinated recovery strategy for multi-infeed HVDC systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(11): 63-66.
- [22] 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.
- GUO Chunyi, LI Chunhua, LIU Yuchao, et al. A DC current limitation control method based on virtual resistance to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4930-4937.
- [23] 王珂, 杨卫东, 方勇杰, 等. 有利于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略研究[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(1): 1-4.
- WANG Ke, YANG Weidong, FANG Yongjie, et al. Study of VDCOL control strategies for coordinated recovery of multi-feed-in HVDC system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(1): 1-4.
- [24] 王玲, 文俊, 崔康生, 等. 多馈入直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(8): 56-65.
- WANG Ling, WEN Jun, CUI Kangsheng, et al. Research survey of commutation failure in MIDC transmission systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(8): 56-65.
- [25] 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.

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2019-09-18

作者简介:

张伟晨(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压交直流混联系统稳定分析; E-mail: m201771316@hust.edu.cn

熊永新(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为交直流混联电网稳定与控制; E-mail: yongxin\_xiong@foxmail.com

李程昊(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为直流输电控制建模及电网运行调度。E-mail: lichenghao\_cn@foxmail.com

(编辑 周金梅)