

UHVDC 系统换相失败故障过程分析及运行参数影响研究

韩平平¹, 童青洋¹, 杨 为², 陈 忠², 孙浩然¹, 张 炎³

(1. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009; 2. 国网安徽省电力有限公司
电力科学研究院, 安徽 合肥 230601; 3. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088)

摘要: 受端交流系统故障是诱发特高压直流系统换相失败的主要原因, 严重影响电网安全。为充分明晰交流系统故障下特高压直流系统换相失败期间阀组换相过程和控制响应, 通过故障过程的电磁暂态仿真, 基于换相面积理论对比阀组实际关断面积和最小关断面积, 分析换相失败的主要原因。对运行参数与换相失败和故障恢复的灵敏度展开研究, 发现低压限流环节参数和逆变侧控制的比例系数、积分系数对换相失败和故障恢复过程有明显影响, 可以在控制系统优化时重点考虑。该研究可为特高压直流换流站换相失败故障分析及稳定运行提供参考。

关键词: 特高压直流输电; 换相失败; 过程分析; 运行参数; 灵敏度

Analysis of the commutation failure process and a study on the influence of operation parameters on a UHVDC system

HAN Pingping¹, TONG Qingyang¹, YANG Wei², CHEN Zhong², SUN Haoran¹, ZHANG Yan³

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Company Limited Research Institute, Hefei 230601, China; 3. No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: An AC system fault at the receiving end is the main cause of commutation failure in an Ultra High Voltage Direct Current (UHVDC) system. This can seriously affect the security of the power grid. To fully clarify the commutation process and control response of a valve group during commutation failure of a UHVDC system under an AC system fault, the actual extinction area and the minimum extinction area of the valve group are compared, and the main reason for commutation failure is analyzed through the electromagnetic transient simulation of the fault process. Sensitivity of operational parameters and commutation failure and the fault recovery process is studied. It is found that the parameters of a Voltage Dependent Current Order Limiter (VDCOL), proportional coefficient and integral coefficient of inverter control have obvious effects on commutation failure and the fault recovery process. These aspects can be the first choice for optimizing of the control system. This paper can provide a reference for commutation failure analysis and stable operation of a UHVDC converter station.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: UHVDC; commutation failure; process analysis; operation parameters; sensitivity

0 引言

为增强西北等地区新能源电力消纳能力、调节我国能源与负荷分配不均等问题, 基于电网换相换流器的高压直流输电系统(Line Commutated Converters High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)已成为现阶段研究热点^[1-3]。LCC-HVDC 系统均采用无自关断

能力的晶闸管作为换流元件, 会受电网电压等因素影响发生换相失败^[4-5], 增加了华东和华南电网的多馈入直流输电系统级联换相失败的风险^[6-7]。部分 LCC-HVDC 系统采用分层接入方式, 可以提高受端系统电压支撑能力, 但也会造成非故障层受故障层耦合影响同时换相失败^[8], 因此, 抑制换相失败仍是现阶段高压直流输电工程的难点。

目前, 国内外学者针对换相失败产生机理和抑制措施展开了广泛研究。文献[9]从原理上指出换相

失败的根本原因是晶闸管关断角过小,不足以恢复正向阻断能力。文献[10]采用超前触发控制,根据故障强度快速减小晶闸管触发角,确保足够的换相裕度。文献[11]提出一种快速检测单相和三相故障下瞬时电压、电流特性的功率分量检测方法,并采用改进的 VDCOL 控制以快速降低直流电流,增加换相裕度。针对高压直流输电分层接入方式,文献[12]根据故障层关断角变化量提升非故障层关断角整定值,避免故障层和非故障层换流器同时换相失败。上述文献多以预防单次换相失败为主,对于多次换相失败故障分析,文献[13]设计了以 γ 作为触发判据的 AC/DC-VDCOL 转换协调控制器,可有效抑制连续换相失败并提升协调恢复速率。文献[14]考虑低压限流控制与电流偏差控制的配合,确保直流电流不超过恢复期间的最大值。

虽然当前对于换相失败研究较为重视,但从工程实际来看,换相失败故障现象仍时有发生^[15]。对于实际特高压直流工程,仅根据交流电压、交流电流、直流电流等录波数据,无法明晰换相失败期间阀组换相、控制响应过程以及换相失败原因,难以指导实际生产中的运行和维修工作^[16-17]。为此,需通过建模仿真,研究故障期间各阀组电压和电流、直流控制系统和逆变侧控制响应等主要状态量的变化特性,理清换相失败期间换相阀组的导通情况和换相失败原因,分析 VDCOL 环节和逆变侧控制等直流控制系统对故障过程的影响,提升换流站安全运行能力。

基于此,本文搭建了 ± 110 kV 分层接入特高压直流系统仿真模型,从受端换流站双极低端换流器换相失败故障入手,进行故障过程研究,分析阀组换相过程和控制响应,并根据仿真结果,计算和对比阀组实际关断面积和最小关断面积,以进行换相失败原因分析,并研究了直流控制环节相关参数与换相失败和故障恢复过程的灵敏度关系,这对换流站实际维护和安全运行具有积极意义。

1 换相失败机理分析

换流阀正常关断需要承受一定幅值、一定时间的换相电压作用,换相电压与时间的积分面积包括用于换相电感建立磁链的换相面积和阀组恢复正向阻断能力的关断面积。假设换相面积和关断面积的总量一定,则当阀组换相面积增加时,关断面积裕度减小,从而引起阀组换相失败^[18]。下文详细探究了换相失败机理。

逆变侧换流器采用三相全波桥式电路,拓扑结构如图 1 所示, e_a 、 e_b 、 e_c 分别为受端交流系统 A、B、C 三相瞬时电压, L_c 为等效换相电感,换流阀组 V_{T1} - V_{T6} 分别间隔 $\pi/3$ 依次触发导通^[19]。

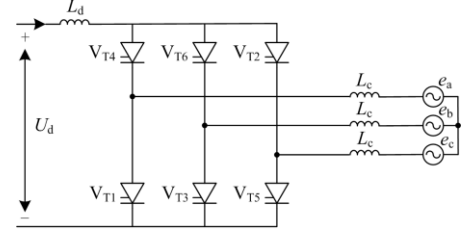


图 1 逆变侧换流器电路结构图

Fig. 1 Circuit structure diagram of inverter side

换相过程起始于触发延迟角 α , 终止于熄弧延迟角 δ , 叠弧角 μ 为电流从一相转移到另一相所需的角度, 关断角 γ 为阀组恢复正向阻断能力所需角度^[20]。当 $0^\circ < \mu < 60^\circ$ 时, 换相过程中有三个阀同时导通。以阀 V_{T1} 向 V_{T3} 换相为例, 如图 2 所示, 在换相过程中, V_{T1} 、 V_{T2} 和 V_{T3} 同时导通, 对于阀 V_{T1} 和 V_{T3} 的回路, 满足关系式(1)。

$$e_a + L_c \frac{di_1}{dt} = e_b + L_c \frac{di_3}{dt} \quad (1)$$

由于 $i_d = i_1 + i_3$, 式(1)可表示为

$$e_a - e_b = \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) = 2L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_d}{dt} \quad (2)$$

式中, U_L 为线电压有效值。

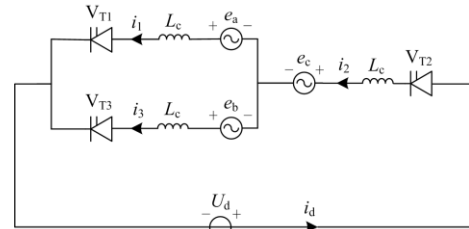


图 2 换相过程等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of commutation process

在叠弧过程中, i_1 逐渐减小至 0, i_3 逐渐增大至 i_d , 对式(2)等式两边进行积分, 可得

$$\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\delta}{\omega}} \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) dt = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\delta}{\omega}} (2L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_d}{dt}) dt \quad (3)$$

受端换流器发生换相失败时, 不能理想化认为直流电流 i_d 保持不变^[20], 则式(3)化简为

$$\frac{\sqrt{2}U_L}{\omega} (\cos \alpha - \cos \delta) = L_c \left[i_d \left(\frac{\delta}{\omega} \right) + i_d \left(\frac{\alpha}{\omega} \right) \right] \quad (4)$$

式(4)左边为换相电压提供的换相电压-时间积分面积, 用 S_μ 表示, 与换相电压和阀运行角度有关。式(4)右边为正常换相需求量, 用 $S_{\mu\text{-need}}$ 表示, 与换相电感 L_c 和直流电流 i_d 有关。

换相积分面积 S_μ 与关断积分面积 S_γ 之和称为换相总面积 $S_{\mu+\gamma}$, 假设换相总面积保持一定, 则关断面积 S_γ 为

$$S_\gamma = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) dt - L_c \left[i_d \left(\frac{\delta}{\omega} \right) + i_d \left(\frac{\alpha}{\omega} \right) \right] \quad (5)$$

由式(5)可知, 换相电压、触发延迟角、换相电感和直流电流都能影响换流阀的正常关断。

由图 3(a)可知, 换相电压幅值因交流侧故障而下降, 为保证换流阀正常换相, 换相积分面积 S_μ 向右推移, 即叠弧角 μ 增大, 关断积分面积 S_γ 减小, 即关断角 γ 减小, 易小于阀组恢复正向阻断能力所需的临界关断角 $\gamma_{\min}$, 从而发生换相失败^[21]。因此, 为保证换相成功, 应使阀组的实际关断面积 S_γ 不小于最小关断面积, 即

$$S_\gamma \geq \int_{\frac{\pi-\gamma_{\min}}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) dt = \frac{\sqrt{2}U_L}{\omega} (1 - \cos \gamma_{\min}) \quad (6)$$

考虑到换相电压因发生不对称故障产生畸变时, 如图 3(b)所示, 同样造成叠弧角 μ 增大, 关断角 γ 裕度减小, 引发换相失败^[22]。

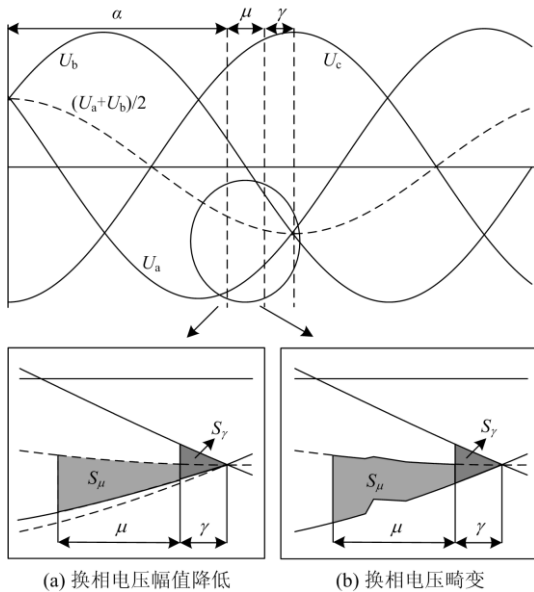


图 3 逆变器运行角度

Fig. 3 Operation angle of inverter

因此, 当受端交流系统发生故障时, 会引起交流电压幅值下降和波形畸变, 即使有较强的无功支

撑, 提高电压幅值, 也会因波形畸变导致换相失败。对于直流输电工程而言, 交流侧故障是换相失败的主要原因^[23]。

2 换相失败故障过程分析

为研究换相失败期间故障层阀组运行状况及控制系统响应, 分析相关参数对换相失败和故障恢复的影响, 使用 PSCAD/EMTDC 搭建 $\pm 1\,100\text{ kV}$ 分层接入 UHVDC 系统模型进行仿真分析, 双极低端换流器接入 $1\,000\text{ kV}$ 交流母线, 双极高端换流器接入 500 kV 交流母线。系统稳态运行参数如表 1 所示。故障前直流系统采用全极半流运行, 如图 4 所示, 稳态直流电流是全功率运行下直流电流的一半。设置受端 $1\,000\text{ kV}$ 交流母线在 3.497 s 时刻发生 C 相接地故障, 故障时间持续 49 ms 。故障时的简化拓扑结构如图 5 所示。

2.1 极 I 低端换流器换相失败过程分析

极 I、极 II 低端阀组运行状态对称, 以极 I 低端阀组为例, 其 D 桥和 Y 桥阀组故障仿真波形如图 6 所示。由图 6 可知, 受 $1\,000\text{ kV}$ 交流系统 C 相接

表 1 UHVDC 稳态运行参数

Table 1 Steady state operation parameters of UHVDC

稳态运行参数	额定值	
直流电压	$\pm 1\,100\text{ kV}$	
直流电流	$2\,800\text{ A}$	
输送功率	$6\,000\text{ MW}$	
送端触发延迟角	15°	
受端关断角	17°	
送端 750 kV 交流系统短路比	4.656	
受端 500 kV 交流系统短路比	5.691	
受端 $1\,000\text{ kV}$ 交流系统短路比	7.037	
送端 750 kV 交流系统等值阻抗	$0.512\ \Omega$	$0.036\ 465\ 58\ \text{H}$
受端 500 kV 交流系统等值阻抗	$0.385\ 875\ \Omega$	$0.022\ 46\ \text{H}$
受端 $1\,000\text{ kV}$ 交流系统等值阻抗	$0.551\ 25\ \Omega$	$0.074\ 4\ \text{H}$
受端交流系统联系等值阻抗	$47.297\ \Omega$	$2.215\ \text{H}$

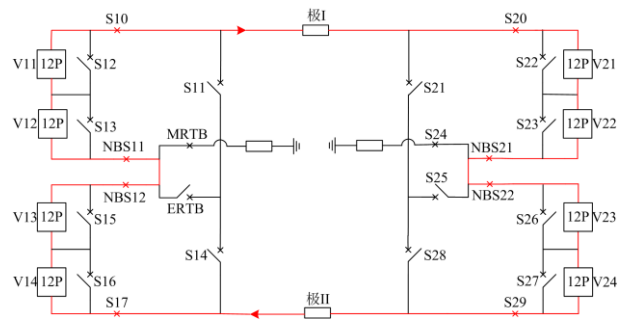


图 4 UHVDC 系统双极对称运行方式

Fig. 4 UHVDC system bipolar symmetrical operation mode

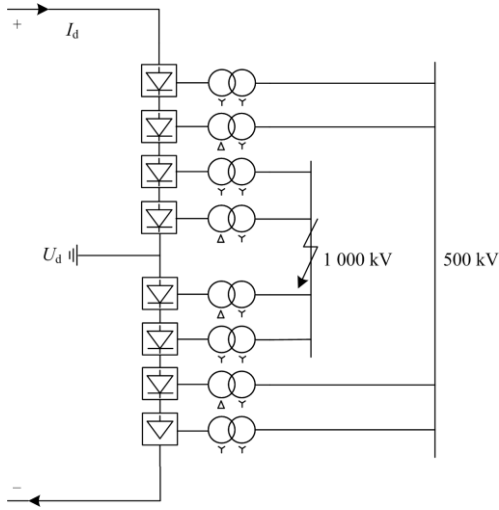


图5 换流站简化拓扑结构

Fig. 5 Simplified topological structure of converter station

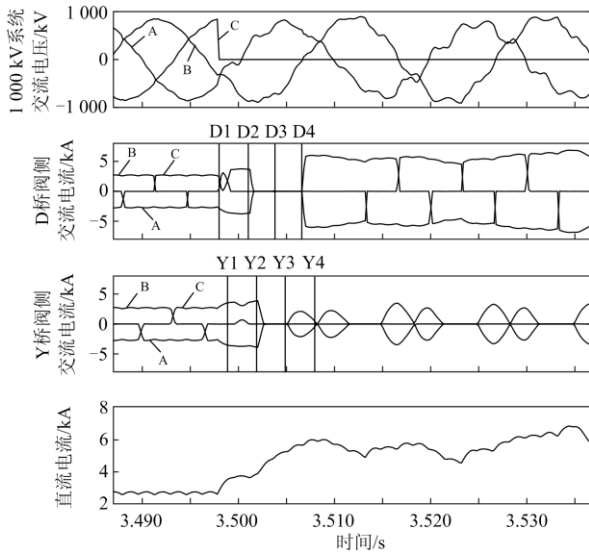


图6 逆变侧极I低端换流器换相失败过程仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of commutation failure process of inverter side pole I low converter

地故障影响，极I低端D桥和Y桥换流器发生不同程度换相失败，造成直流电流增加，远大于稳态电流，直流电压减小，送端功率无法正常传输，易对设备造成能量冲击。

换流器相邻桥臂连接不同相，以流入交流系统为正向，利用图6中D桥和Y桥阀侧交流电流仿真图，可理清换流器各阀组通断情况。

现取故障刚开始时D桥换流器D1、D2、D3、D4四个阀组脉冲触发时刻进行分析，各时刻阀组导通情况如图7所示，蓝线表示应该正常导通支路，红线表示实际导通支路。

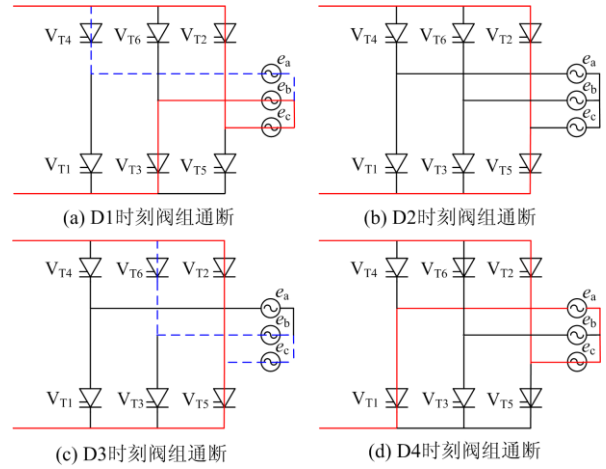


图7 换相失败期间极I低端D桥换流器阀组导通图

Fig. 7 Conduction diagram of valve group of pole I low D-bridge converter during commutation failure

脉冲时刻D1发生前，极I低端D桥换流器处于 V_{T2} 、 V_{T3} 导通状态，阀 V_{T4} 导通信号在D1时刻到来，在 V_{T2} 、 V_{T3} 导通状态下， V_{T4} 阳极电压为 e_c ，阴极电压为 e_a 。由于D1时刻 $e_c > e_a$ ， V_{T4} 正常导通。 V_{T2} 阳极电压为 e_a ，阴极电压为 e_c ，开始承受反压，由于1000 kV交流系统故障， V_{T2} 关断失败， V_{T4} 向 V_{T2} 倒换相，发生电气意义上D桥的第一次换相失败。

D2时刻发生前， V_{T2} 、 V_{T3} 处于导通状态， V_{T5} 导通信号在D2时刻到来，此时 V_{T5} 阳极电压为 e_c ，阴极电压为 e_b ，且 $e_c > e_b$ ， V_{T5} 正常导通， V_{T3} 因阳极电压小于阴极电压而逐渐关断。此时 V_{T2} 处于导通状态，与同一桥臂导通的 V_{T5} 形成旁通对，造成D桥换流器短路，阀侧三相电流为零。

D3时刻发生前， V_{T2} 、 V_{T5} 处于导通状态， V_{T6} 导通信号在D3时刻到来，此时 V_{T6} 的阳极电压为 e_c ，阴极电压为 e_b ，且 $e_c > e_b$ ， V_{T6} 正常导通， V_{T2} 开始关断，但同样由于交流系统故障， V_{T2} 关断失败， V_{T2} 和 V_{T5} 旁通对依旧存在，阀侧三相电流仍为零。

D4时刻 V_{T1} 的导通信号到来， V_{T5} 向 V_{T1} 换相。 V_{T1} 阳极电压为 e_a ，阴极电压为 e_c ，且 $e_a > e_c$ ， V_{T1} 正常导通， V_{T5} 承受反压正常关断，此时 V_{T1} 、 V_{T2} 导通。D桥换流器故障期间换相情况如表2所示，换相阀组实际导通状况用下划线标出。之后 V_{T2} 触发信号到来， V_{T6} 向 V_{T2} 换相，仍是 V_{T1} 、 V_{T2} 导通，D桥换流器按照触发脉冲依次正常导通 $V_{T1}V_{T2}$ — $V_{T2}V_{T3}$ — $V_{T3}V_{T4}$ — $V_{T4}V_{T5}$ — $V_{T5}V_{T6}$ — $V_{T6}V_{T1}$ — $V_{T1}V_{T2}$ 。

同样取故障刚开始时Y桥换流器Y1、Y2、Y3、

Y4 四个阀组脉冲触发时刻进行分析, 各时刻阀组导通情况如图 8 所示。

表 2 极 I 低端 D 桥换流器故障期间换相情况

Table 2 Commutation of pole I low D-bridge converter during failure

故障时刻	上桥臂			下桥臂			换相失败
	V _{T4}	V _{T6}	V _{T2}	V _{T1}	V _{T3}	V _{T5}	
D1	断	断	通	断	通	断	是
D2	断	断	通	断	断	通	否
D3	断	断	通	断	断	通	是
D4	断	断	通	通	断	断	否

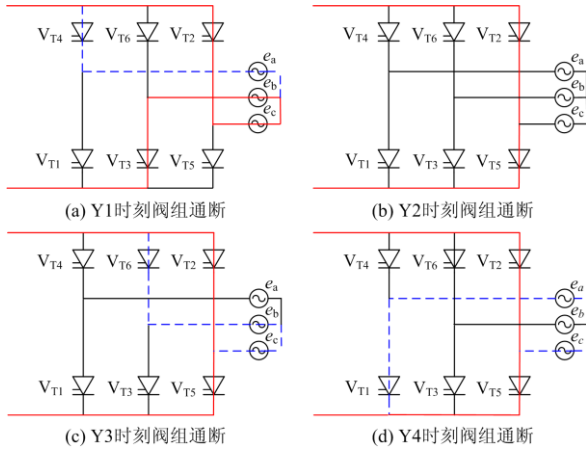


图 8 换相失败期间极 I 低端 Y 桥换流器阀组导通图

Fig. 8 Conduction diagram of valve group of pole I low Y-bridge converter during commutation failure

Y 桥换流器在故障 Y1、Y2、Y3 时刻的换相过程与 D 桥换流器 D1、D2、D3 时刻相似。Y4 时刻前 V_{T2}、V_{T5} 处于导通状态, V_{T1} 导通信号在 Y4 时刻到来, V_{T5} 向 V_{T1} 换相, V_{T1} 阳极电压为 e_a , 阴极电压为 e_c , 且 $e_a > e_c$, V_{T1} 逐渐导通。V_{T5} 承受反压, 但由于交流侧故障, V_{T5} 关断失败, V_{T2}、V_{T5} 旁通对仍然存在。

Y 桥换流器故障期间换相情况如表 3 所示。交流系统故障的持续使阀 V_{T1}、V_{T3}、V_{T4}、V_{T6} 触发脉冲到来时, V_{T2} 或 V_{T5} 均无法正常关断, 导致 Y 桥换流器后续又发生类似于故障 Y1、Y2、Y3、Y4 时刻的换相失败。故障清除后, 交流电压恢复, V_{T2}、V_{T5} 正常关断, Y 桥换流阀按照触发脉冲依次正常导通 V_{T5}V_{T6}-V_{T6}V_{T1}-V_{T1}V_{T2}-V_{T2}V_{T3}-V_{T3}V_{T4}-V_{T4}V_{T5}-V_{T5}V_{T6}。

2.2 低端阀组控制响应分析

UHVDC 系统采用 CIGRE 控制系统, 以极 I 低端 Y 桥换流器为例, 其换相失败和故障恢复过程仿真如图 9 所示。

表 3 极 I 低端 Y 桥换流器故障期间换相情况

Table 3 Commutation of pole I low Y-bridge converter during failure

故障时刻	上桥臂			下桥臂			换相失败
	V _{T4}	V _{T6}	V _{T2}	V _{T1}	V _{T3}	V _{T5}	
Y1	断	断	通	断	通	断	是
Y2	断	断	通	断	断	通	否
Y3	断	断	通	断	断	通	是
Y4	断	断	通	断	断	通	是

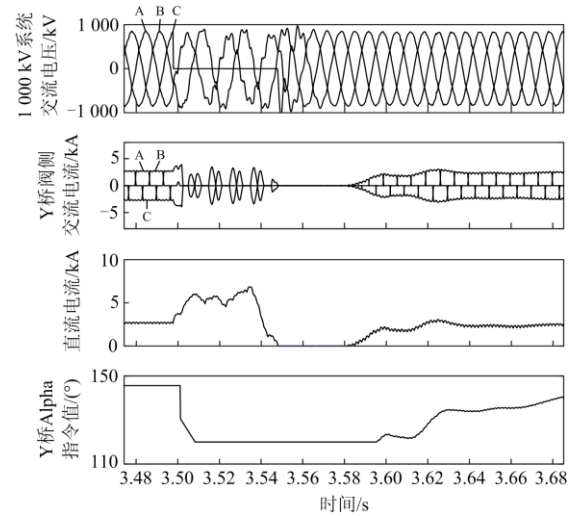


图 9 极 I 低端 Y 桥换流器换相失败和故障恢复过程仿真图

Fig. 9 Simulation diagram of commutation failure and fault recovery process of pole I low Y-bridge converter

受首次换相失败影响, 受端直流电压 U_d 下降, 送受端电压差增大, 直流电流 i_d 开始上升。自首次换相失败约 3.3 ms 后, 定 γ 角控制器作用, 开始降低 α , 由 146° 降低至 120° 以提升关断角, 避免换相失败。C 相接地故障结束后, 恢复的第一个周波仍有较大畸变。

控制系统自首次换相失败 3.3 ms 后将 α 角下调至 120° , 该作用并未因换相失败不再发生而结束作用。故障恢复后, α 角仍然在较低位置, 随着交流电压恢复正常, α 角逐渐恢复。整个故障和恢复过程可简述为: 随着交流电压下降, 换流器发生换相失败, 受端直流电压下降, 直流电流先急剧上升, 后受 VDCOL 控制影响, 直流电流随着直流电压的下降而下降, 直流电压可能会出现反压, 直流电流降为零, 随着交流电压恢复, 直流电压上升, 直流电流也上升, 直流输电系统开始进行重建电流恢复功率传输, 直流电流最终回升至 2 800 A。

2.3 换相失败后高低端系统配合

UHVDC 系统采用分层接入结构, 低端阀组故

障会影响高端阀组运行状况。极 I 高端 Y 桥换流器换相失败和故障恢复过程仿真如图 10 所示。

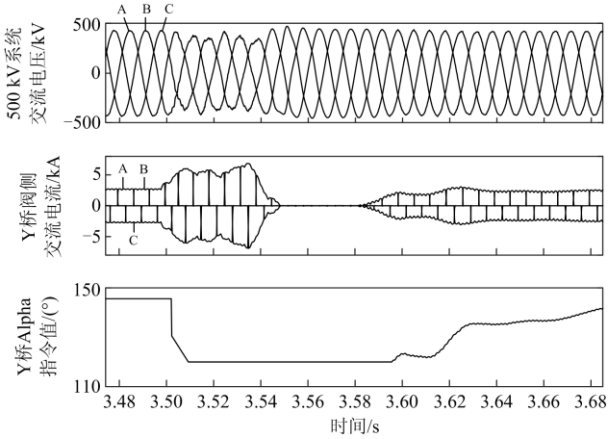


图 10 极 I 高端 Y 桥换流器换相失败和故障恢复过程仿真图

Fig. 10 Simulation diagram of commutation failure and fault recovery process of pole I high Y-bridge converter

由图 10 可知, 500 kV 交流场在低端阀组换相失败期间出现了三相电压下降和畸变的情况, 这一方面与换流站 500 kV 场和 1 000 kV 场在站外远端存在一定程度的耦合有关。同时在换相失败发生时, 由下式可知, 高端阀组也会消耗大量的无功功率。

$$P_i = 2U_{di}I_d \quad (7)$$

$$Q_i = P_i \tan \varphi_i - U_i^2 B_i \quad (8)$$

式中: U_{di} 、 I_d 和 φ_i 分别为逆变侧直流电压、电流和功率因数角; U_i 、 B_i 分别为换流母线电压和滤波电纳; P_i 、 Q_i 分别为直流有功功率和交直流系统交换无功功率。

500 kV 交流场发生故障时, U_{di} 仍可以维持在大于 0 的水平, 换相失败期间 I_d 迅速增大, 考虑到高低端阀组串联, 非故障阀组同样会消耗大量无功功率(式(7)中 $U_{di} > 0$, I_d 稳态值, 使得 $P_i \tan \varphi_i$ 很大), 大于 500 kV 场交流滤波器所提供的无功支撑, 因此阀组将从交流系统吸收大量无功功率, 造成 500 kV 交流系统电压降低。

500 kV 交流电压降低以及畸变会造成阀组叠弧角 μ 增大, 换相电压过零点前移, 使得关断角 γ 减小。同时, 高端阀组与低端阀组串联, 低端阀组发生换相失败时, 受端直流电流增大, 导致非故障层阀组正常换相所需面积增大。这都易引起高端阀组换相失败。因此为避免非故障层阀组发生换相失败, 高端阀组控制模块迅速动作, 检测到电流实际值与电流指令值相差较大后, 其控制系统同样需要降低 α , 配合低端阀组提高 γ 以避免换相失败。

因此, 高端阀组的角度变化时刻应接近于低端阀组变化。极 I 高低端阀组控制系统干预时间如表 4 所示。由表 4 可知, 高端阀组的控制系统响应速度比低端阀组略慢, 但都较为迅速, 符合分层接入控制要求。

表 4 极 I 高低端阀组控制系统干预时间

Table 4 Intervention time of the control system of the pole I

换流阀组	首次换相失败开始距控制动作时间/ms
低端 Y 桥	3.3
低端 D 桥	3.3
高端 Y 桥	4.3
高端 D 桥	4.3

3 换相面积和运行参数分析

3.1 换相面积分析

由前文换相失败机理分析可知, 当阀组实际关断面积 S_γ 小于最小关断面积时, 会发生换相失败。实际工程中, $\gamma_{\min}$ 约为 10° [24], 实际换相电感 $L_c \approx 0.1034$ H, 且通过仿真, 可得各时刻换相电压和叠弧始末时刻直流电流。由式(6)计算得出的阀组最小关断面积约为 0.0700 kV s。当换相总面积一定时, 阀组实际关断面积 S_γ 由叠弧面积决定。因此, 对于极 I 低端 D 桥换流器 D1 时刻, 由于 1 000 kV 交流系统故障, 由式(5)可得, 换相电压提供给 V_{T2} 的关断面积约为 -0.2332 kV s, 这表明在换相期间, V_{T2} 未完成叠弧过程, 明显小于最小关断面积 0.0700 kV s, V_{T2} 向 V_{T4} 换相失败。对于 D3 脉冲时刻, 换相电压提供给 V_{T2} 的关断面积约为 -0.3523 kV s, 表示 V_{T2} 仍未完成叠弧过程, 关断失败。同理, 对于 Y 桥换流器, Y1、Y3、Y4 时刻均是阀组未完成叠弧过程, 造成换相失败。

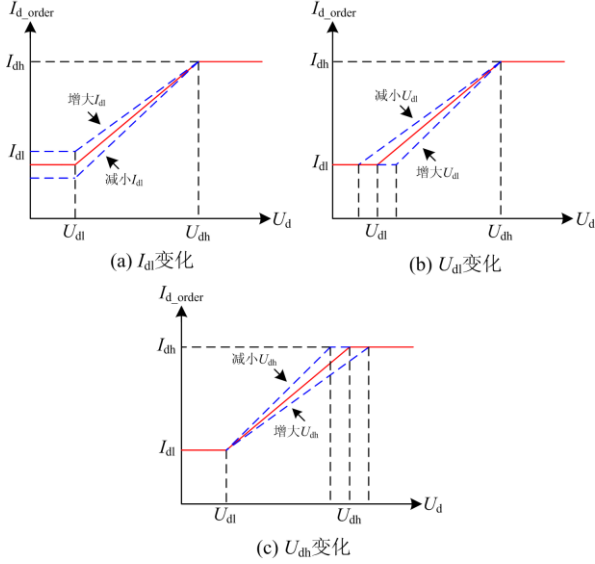
3.2 运行参数灵敏度分析

换相失败故障过程分为换相失败过程和故障恢复过程。换相失败发生后, 直流电流突增, 直流电压下降, 故障清除后直流系统的快速恢复将有助于缓解交流系统的功率不平衡。本文将从影响换相失败和故障恢复的主要控制环节(VDCOL 和逆变侧控制)分析故障过程可能的优化措施。

3.2.1 VDCOL 环节参数的影响

VDCOL 环节输入量取自逆变站直流出口处电压和电流实测值, 经标幺化、滤波处理和电压补偿后, 在低电压条件下, 通过电流限制降低直流电流指令, 可以减少换流器无功消耗, 降低系统换相失败和电压不稳定的风险, VDCOL 环节 $U-I$ 曲线如图 11 所示, 对应关系为

$$I_{d_order} = \begin{cases} 0.345, & U_d \leq 0.2 \\ \frac{31}{110} U_d + \frac{127}{440}, & 0.2 < U_d < 0.75 \\ 0.5, & U_d \geq 0.75 \end{cases} \quad (9)$$

图 11 VDCOL 环节 U - I 曲线图Fig. 11 U - I curve of VDCOL

VDCOL 环节中的最小限流电流 I_{dl} 、电压下限 U_{dl} 和电压上限 U_{dh} 参数会影响 VDCOL 的输出特性, 从而影响换相失败期间直流电流特性和故障清除后直流电流恢复情况。通过改变 I_{dl} 、 U_{dl} 和 U_{dh} , 观察这些参数对直流电流的影响, 仿真结果如图 12 所示。由图 12 可知, I_{dl} 对换相失败后的故障恢复

过程有明显影响, I_{dl} 越大, 直流电流重建过程越快, 有利于交直流系统的快速恢复。 U_{dl} 和 U_{dh} 对故障恢复过程影响很小, 不需要对其进行参数优化。

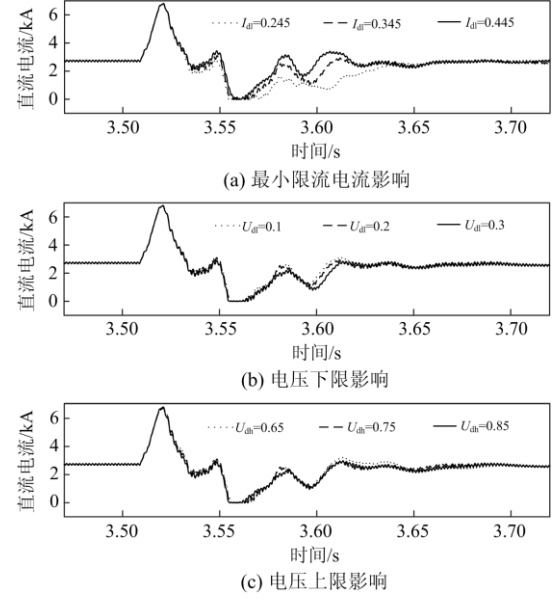


图 12 VDCOL 环节参数对故障恢复过程的影响

Fig. 12 Effect of parameters of VDCOL

on fault recovery process

3.2.2 逆变侧控制参数的影响

对于受端分层接入 UHVDC 系统, 采用 CIGRE 双极标准测试模型中的选择型控制, 控制框图如图 13 所示。逆变侧控制包含定电流控制和定关断角控制, 通过检测电流偏差 Δi_d 和关断角偏差 $\Delta \gamma$, 取经 PI 调节器输出后的 β_{max} , 从而得到逆变侧控制角。

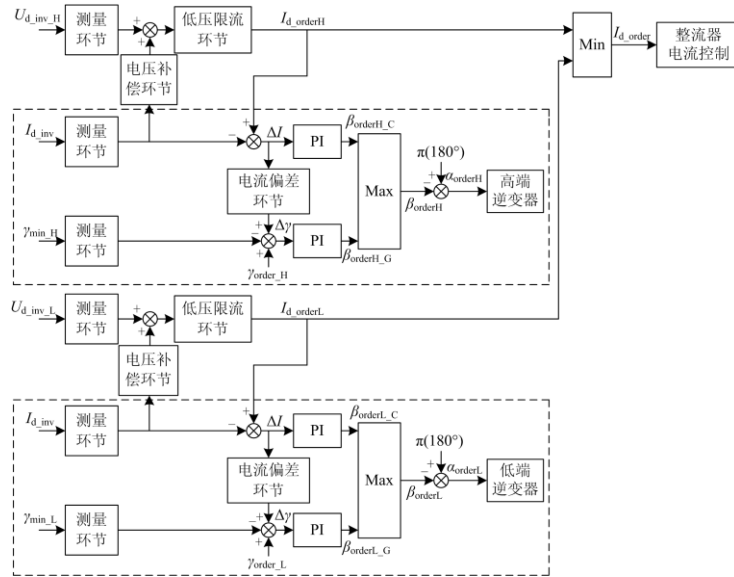


图 13 逆变侧控制框图

Fig. 13 Control block diagram of inverter side

逆变侧控制环节中的比例系数和积分系数是影响控制系统输出的重要因素,通过调整系数,可以改变控制角的反应速度,从而影响控制环节对换相失败故障的响应灵敏度。改变定关断角控制的比例系数 $K_{p-\gamma}$ 、定电流控制的比例系数 K_{p-cur} 和积分系数 K_{i-cur} ,观察控制系统参数对故障层阀侧电流的影响。D 桥阀侧电流变化如图 14—图 16 所示, Y 桥阀侧电流无明显变化,本文不予分析。由图 14 可知, $K_{p-\gamma}$ 较小时, D 桥换流器增加了一次换相失败,随着比例系数的增大, D 桥换相失败情况并没有得到明显改善,仍会发生一次换相失败。因此,定关断角控制的比例系数不宜较小。由图 15 可知,不同 K_{p-cur} 下的 D 桥阀侧电流曲线近似相同,定电流控制 K_{p-cur} 参数变化对换相过程无明显影响。结合图 16 给出的定电流控制 K_{i-cur} 对 D 桥阀侧电流的影响可知,积分系数较大时, D 桥换流器不会发生换相失败,可以明显改善换相情况,积分系数较小时, D 桥换流器仍会发生换相失败。因此,定电流控制的积分系数可以适当较大,但需要结合系统暂稳态特性进行合理选取。

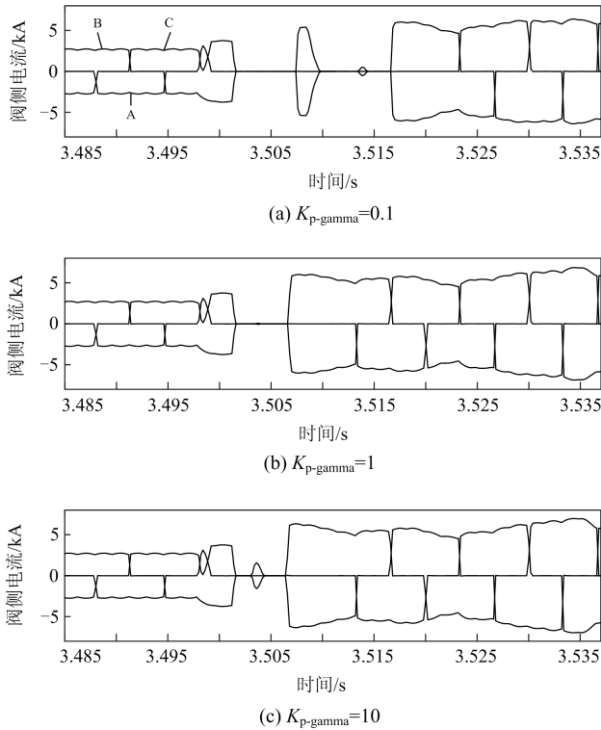


图 14 定关断角控制比例系数对 D 桥换流器换相失败的影响
Fig. 14 Effect of proportional coefficient of constant extinction angle control on commutation failure of D-bridge converter

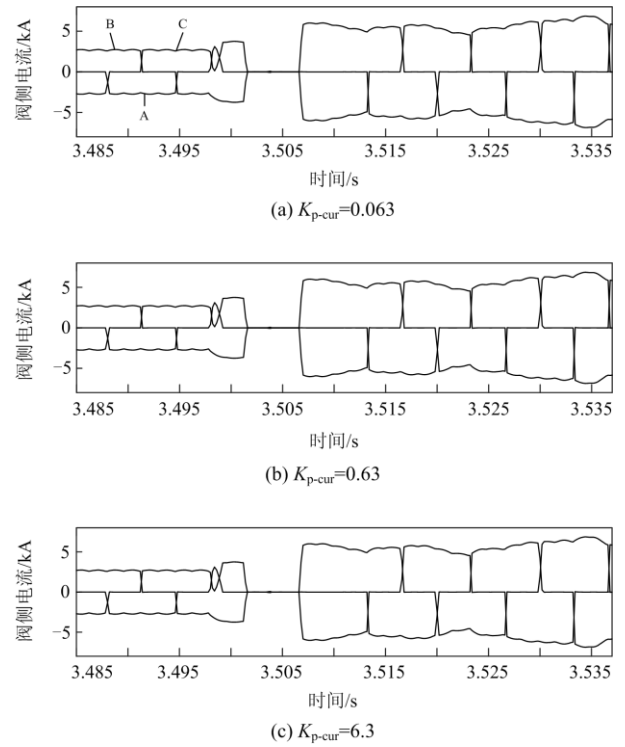


图 15 定电流控制比例系数对 D 桥换流器换相失败的影响
Fig. 15 Effect of proportional coefficient of constant current control on commutation failure of D-bridge converter

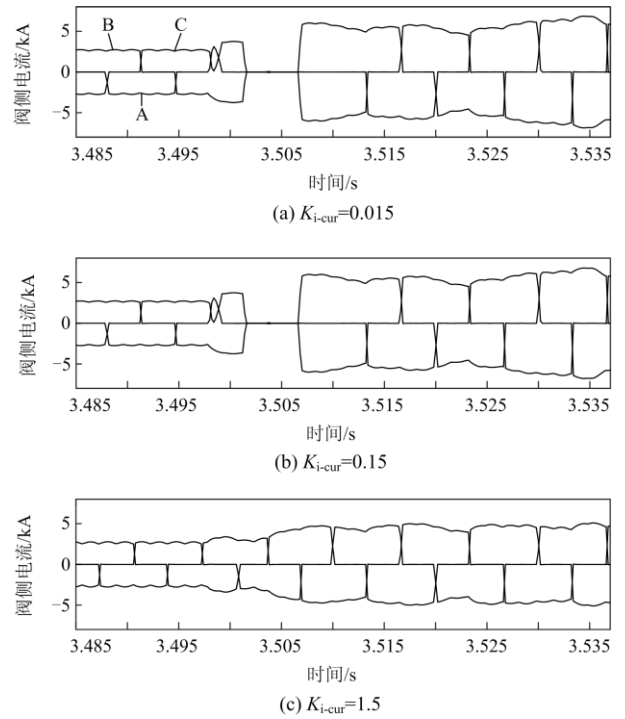


图 16 定电流控制积分系数对 D 桥换流器换相失败的影响
Fig. 16 Effect of integral coefficient of constant current control on commutation failure of D-bridge converter

4 结论

本文针对±1 100 kV 换流站双极低端换流器换相失败故障, 研究了换相失败期间各阀组的换相过程和控制响应过程, 根据仿真结果, 进行换相面积分析, 并研究了低压限流环节和逆变侧控制参数与换相失败和故障恢复过程的影响, 得出以下结论:

1) 受 1 000 kV 交流侧接地故障影响, 换流站双极低端阀组因关断面积裕度值小于最小裕度值, 导致 D 桥和 Y 桥阀组发生不同程度的换相失败。

2) 受换相失败影响, 故障层控制系统迅速动作。非故障层系统受分层接入耦合影响造成直流电流升高和交流电压扰动, 为避免换相失败并配合低端阀组控制器动作, 高端阀组控制器同样需要降低触发延迟角, 但动作时间较故障层略缓慢。

3) 低压限流环节中的最小限流电流对故障恢复过程影响较为明显。最小限流电流越大, 越有利于直流系统传输恢复, 可以作为控制系统优化时优先考虑的参数。

4) 定关断角控制中的比例系数和定电流控制中的积分系数对换相失败过程影响较为明显。 $K_{p-\gamma}$ 越小, 控制响应越缓慢, 越容易造成 D 桥换流器换相失败; K_{i-cur} 较大时, 可以有效抑制 D 桥换流器换相失败。同时, 比例和积分系数的设定仍需要综合考虑交直流系统的稳态和暂态特性。

5) 下一步可以重点研究控制系统参数与故障过程之间关系的理论分析, 综合考虑系统暂态特性, 提出具体优化措施, 有效抑制换相失败, 提高恢复速度, 维持交直流系统稳定运行。

参考文献

- [1] WANG Qi, ZHANG Chaoming, WU Xingquan, et al. Commutation failure prediction method considering commutation voltage distortion and DC current variation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 96531-96539.
- [2] 韩平平, 陈凌琦, 丁明, 等. 一种适用于风电外送的混合高压直流输电系统[J]. 太阳能学报, 2019, 40(8): 2162-2169.
HAN Pingping, CHEN Lingqi, DING Ming, et al. A kind of hybrid HVDC transmission system suitable for wind power connection[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2019, 40(8): 2162-2169.
- [3] 陈佳浩, 王琦, 朱鑫要, 等. 谐波电压造成直流输电换相失败风险评估[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 196-202.
CHEN Jiahao, WANG Qi, ZHU Xinyao, et al. Risk assessment of commutation failure for HVDC transmission due to harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 196-202.
- [4] XUE Ying, ZHANG Xiaoping, YANG Conghuan. Commutation failure elimination of LCC HVDC systems using thyristor-based controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1448-1458.
- [5] 程艳, 张健, 管冀, 等. HVDC 换相失败时受端电网的电压与频率联合控制策略[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 241-245.
CHENG Yan, ZHANG Jian, GUAN Ti, et al. Coordinated control strategy of voltage and frequency support at receiving end of HVDC system under commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 241-245.
- [6] 王少辉, 唐飞, 向农. 华东电网多直流同时换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 16-21.
WANG Shaohui, TANG Fei, XIANG Nong. Commutation failure simulation analysis of East China power grid multiple HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 16-21.
- [7] SHAO Yao, TANG Yong. Fast evaluation of commutation failure risk in multi-Infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 646-653.
- [8] 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.
- [9] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [10] MIRSAEIDI S, DONG Xinzhou, TZELEPIS D, et al. A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 160-172.
- [11] GUO Chunyi, LIU Yuchao, ZHAO Chengyong, et al. Power component fault detection method and improved current order limiter control for commutation failure mitigation in HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1585-1593.
- [12] 杨硕, 郭春义, 王庆, 等. 分层接入特高压直流输电系统协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4356-4363.
YANG Shuo, GUO Chunyi, WANG Qing, et al. Coordinated control approach for UHVDC system under hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4356-4363.

- [13] 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.
- [14] 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): 3163-3172.
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): 3163-3172.
- [15] 阮思烨, 徐凯, 刘丹, 等. 直流输电系统换相失败统计分析及其抵御措施建议[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 13-17, 34.
RUAN Siye, XU Kai, LIU Dan, et al. Statistical analysis and suggestions on resistance measures for commutation failures of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 13-17, 34.
- [16] 余海翔, 陈立, 梁家豪. 天广直流广州换流站换相失败机理探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 151-156.
YU Haixiang, CHEN Li, LIANG Jiahao. Investigation of commutation failure in Guangzhou converter station of Tianguang HVDC project[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 151-156.
- [17] 李少森, 李浩, 孙豪. 基于机器视觉的特高压直流故障录波分析方法[J]. 电工技术, 2019(24): 82-83, 86.
LI Shaosen, LI Hao, SUN Hao. Analysis method of UHVDC transient fault recording based on machine vision[J]. Electric Engineering, 2019(24): 82-83, 86.
- [18] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80.
PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.
- [19] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 1-10.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 1-10.
- [20] 谭阳琛. 特高压直流输电系统换相失败协调预防与紧急功率控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
TAN Yangchen. Coordination prevention of commutation failure and emergency power control for ultra high voltage direct current transmission system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [21] WEI Zhinong, YUAN Yang, LEI Xiao, et al. Direct-current predictive control strategy for inhibiting commutation failure in HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2409-2417.
- [22] 饶宇飞, 张鹏辉, 李程昊, 等. 励磁涌流对高压直流输电系统换相失败的影响机理及评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 54-61.
RAO Yufei, ZHANG Penghui, LI Chenghao, et al. Mechanism and evaluating method for HVDC commutation failure caused by inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 54-61.
- [23] 王增平, 刘席洋, 李林泽, 等. 多馈入直流输电系统换相失败边界条件[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 12-19.
WANG Zengping, LIU Xiyang, LI Linze, et al. Boundary conditions of commutation failure in multi-infeed HVDC systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 12-19.
- [24] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.

收稿日期: 2020-12-03; 修回日期: 2021-02-15

作者简介:

韩平平(1981—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为可再生能源并网技术; E-mail: LH021211@163.com

童青洋(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电建模与控制。E-mail: tqyhfut0325@163.com

(编辑 姜新丽)