DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190258

受端分层 UHVDC 换相失败控制和恢复策略

王思超[1]，文 俊[1]，贺冬珊[1]，耿晓红[1]，谈 萌[2]，韩民晓[1]

(1.华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206;
2.全球能源互联网研究院先进输电技术国家重点实验室，北京 102209)

摘要：受端分层的特高压直流输电工程在交流系统单一电压等级发生故障时，不仅会导致本层阀组发生换相失败，而且可能引发另外一层阀组换相失败。在故障恢复过程中，层间交直流系统的相互影响还会引发连续多次换相失败。提出基于实时故障检测判定的换相失败控制和恢复策略，可准确判定故障状态、故障发生的电压层级、故障的持续时间。针对交流系统瞬时性故障，仅在发生严重故障时启动控制策略，并防止恢复过程中提前再启动，减少自动再启动次数。当单层交流系统永久性严重故障时，隔离故障层，转为双极半压运行方式。根据昌吉-古泉特高压直流输电工程搭建 PSCAD/EMTDC 仿真模型，设置多种故障情况，结果表明所提策略能有效降低连续换相失败次数，加快故障恢复，提高输电可靠性。

关键词：受端分层；特高压直流；换相失败；自动再启动；故障实时检测；故障恢复；分层隔离

Commutation failure control and recovery strategy of UHVDC with hierarchical connection mode

WANG Sichao[1], WEN Jun[1], HE Dongshan[1], GENG Xiaohong[1], TAN Meng[2], HAN Minxiao[1]
(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The commutation failure of the valve group will happen in the hierarchy where the single voltage level of Alternative Current (AC) system fails. It will also happen in another hierarchy in Ultra-High Voltage Direct Current (UHVDC) transmission project with hierarchical connection. The interaction between hierarchies of AC and DC system will also lead to successive and multiple commutation failures in the process of fault recovery. A commutation failure control and recovery strategy based on real-time fault detection and determination is presented, which can judge the fault state, the voltage level when fault occurs, and the duration of the fault. Start control strategy only when the instantaneous fault of AC system is serious. The times of automatic restart can be reduced by preventing early restart in the recovery process. The hierarchy is changed to bipolar half-voltage operation mode when serious failure occurs permanently in a single-hierarchy AC system. Based on Changji-Guquan UHVDC transmission project, a simulation model of UHVDC transmission with hierarchical connection is established in PSCAD/EMTDC. Meantime, various fault situations are set up. The results show that the proposed strategy can effectively reduce the number of successive commutation failures, accelerate fault recovery and improve transmission reliability.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904700).

Key words: receiving-end with hierarchical connection; ultra-high voltage direct current (UHVDC); commutation failure; automatic restart; real-time fault detection; fault recovery; hierarchical isolation

0 引言

随着高压直流输电技术的发展和广泛应用，直流电压等级和输送容量不断提升。为提高受端系统潮流疏散和电压支撑能力，受端采用分层接入交流系统方式的特高压直流(Ultra-high Voltage Direct Current, UHVDC)工程逐渐发展起来[1-7]。由于 UHVDC 特有的双 12 脉动换流器串联结构，受端电

基金项目：国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904700)

网单一电压等级的故障将导致与其相连的 12 脉动换流器发生换相失败[8-9]。故障消除后的 UHVDC 恢复过程中，由于控制系统调节产生的电流大幅度变化，可能使两组 12 脉动换流器同时发生多次换相失败，对直流系统造成冲击甚至使其停运[10-11]。如果受端不同电压等级的交流系统电气距离较近，则换相失败的影响更加严重。因此，针对受端分层的 UHVDC，某一层 12 脉动换流器发生换相失败后，如何在其恢复过程中减少换相失败的次数，同时降低对另外一层 12 脉动换流器的影响，避免直流系统停运是一个亟待解决的问题。

目前对单层直流系统、多馈入直流系统换相失败的研究居多[12-15]，对结构更加复杂的受端分层直流系统的研究较少。多数研究仅关注一次换相失败的抑制[16-19]，而对故障期间及其恢复过程中引发的多次换相失败的研究偏少[20]。

当受端电网故障引发直流线路的电流陡增时，12 脉动换流器发生换相失败故障。现有直流工程常采用自动再启动控制以迅速降低直流故障电流，并使直流系统逐渐恢复正常运行。该控制达到预设再启动次数后，发出停运信号使直流系统停运。然而，该控制通常采用固定时间间隔重启[21-22]，可能在故障恢复过程中引发连续多次换相失败对交直流系统造成冲击。

世界上电压等级最高、输送容量最大的昌吉-古泉 UHVDC 工程于 2019 年 1 月建成投运，该工程额定参数为±1 100 kV、5.455 kA、12 000 MW，由新疆 750 kV 的昌吉换流站出发，途经六省，落点安徽皖南地区，全长 3 284 km，受端分层接入不同电压等级。

本文以此工程为例，在常规自动再启动控制的基础上加以改进，提出基于实时故障检测判定的换相失败控制和恢复策略。并搭建该 UHVDC 工程 PSCAD/EMTDC 仿真模型，以单层、两层电压等级的瞬时性故障和单层电压等级永久性故障为例进行仿真分析，验证本文所提策略可有效减少连续多次换相失败，加快故障恢复，提高了输电可靠性。

1　受端系统介绍

1.1 受端交直流电网结构

受端古泉换流站位于安徽电网中部，如图 1 所示。该站高、低端阀组分别接入安徽电网的 500 kV 和 1 000 kV 交流系统。昌吉-古泉±1 100 kV 特高压直流输电容量的一半在安徽省内消纳，剩余一半容量转送至江苏、浙江两省。该方式有助于均衡潮流、引导功率流向、使大容量直流功率合理分散消纳。

为了平衡换流变两侧绕组绝缘配合水平，减少其制造难度和成本，每组 12 脉动换流单元(包含阀组 C 及换流变 T)的交直流两侧不应同为高压(或低压)。因此，由图 2 所示，高端阀组 C_H 及低端阀组 C_L 分别接入额定电压等级为 500 kV 及 1 000 kV 的电网。图中各变量下标 1、2 分别指正、负极。交流滤波器 ACF 和无功补偿装置 Q_c 也分别并联在 500 kV 和 1 000 kV 换流母线上，C_H、C_L 均配置高速旁路开关 S，可将单个 12 脉动换流单元从直流系统中隔离，但要确保整流站、逆变站的阀组数目始终一致。每极直流线路均配有平抗 L_d 和直流滤波器 DCF。U_H、U_L 分别为高、低端换流母线电压。为实现对单个 12 脉动换流单元的灵活控制，需要对其配置独立的控制器。

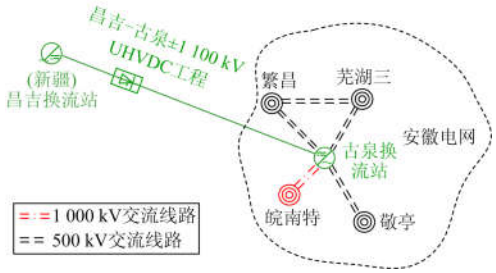

图 1　昌吉-古泉 UHVDC 工程及安徽受端电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Changji-Guquan UHVDC transmission project receiver power grid in Anhui

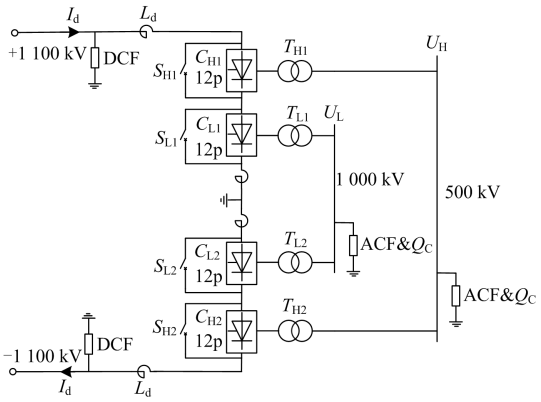

图 2　古泉站分层接入结构示意图

Fig. 2 Structural sketch of Guquan station with hierarchical connection mode

1.2 受端不同电压等级间的相互作用

分层接入方式下，当受端交流系统层间有电气联系时，可以等效为高、低端换流母线通过联络阻抗 Z_{HL} 和联络变 T_{HL} 串联的支路，如图 3 所示。图 3 中，Z_H、Z_L 分别为高、低端交流系统等值阻抗；E_H、E_L 为接入高、低端的交流系统等值电压源。

由图 3 可见：当两层电压等级间存在电气联系时，一层交流系统发生故障，另外一层交流系统必然受影响。当受端两层电压等级间无电气联系或联系极弱时，可等效为无 T_{HL} 和 Z_{HL}，即开关 S 断开。

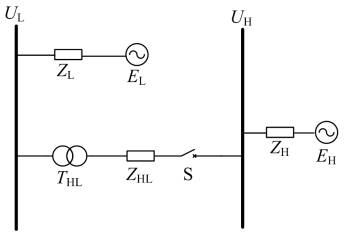

图 3 分层 UHVDC 受端不同电压等级间电气联系等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of electrical connection between different voltage levels of UHVDC receiver with hierarchical connection

2　换相失败及常规自动再启动控制

2.1 换相失败

昌吉-古泉 UHVDC 工程采用半控型电力电子器件—晶闸管，其关断需要足够时间：欲关断的晶闸管在反向电压下，少数载流子需要经过迁移、扩散和复合过程，才能重新建立起电势壁垒，恢复正向电压阻断能力，该时长可用固有极限关断角 γ_{min} 来表示。若直流系统受到扰动后，逆变侧换流阀承受反压时间少于 γ_{min}，当加在该换流阀上的电压为正时，该换流阀将重新导通，向刚导通的换流阀倒换相，此过程称为换相失败。

换相失败分为一次换相失败及连续多次换相失败。一次换相失败指直流系统只发生一次换相失败即恢复稳定运行，包括仅单层直流系统发生的一次换相失败及两层同时发生的一次换相失败；连续多次换相失败指某一层直流系统发生的两次及以上次换相失败，及其引发的另一层直流系统发生两次及以上次换相失败。

2.2 自动再启动控制

交流系统严重故障导致换流阀发生连续多次换相失败时，现有直流工程的控制保护系统会启动自动再启动控制，该控制包括快速移相和再启动两个顺序控制指令。

1) 快速移相：使整流器的触发角由额定值 15º 迅速增大至 120º~150º，变为逆变器运行。逆变器触发角由约 135º 迅速变为大于 160º。因此，储存在直流线路中的能量迅速馈入两端交流系统，促使直流电流在 20~40 ms 内迅速降为零。

2) 再启动：当直流电流为零后，经 100~500 ms 弧道去游离时间，快速恢复整流器触发角至 15º，按正常启动方式建立额定直流电压和电流，即全压再启动。若故障点的绝缘未能及时恢复，第一次全压再启动失败，则第二次再启动时可加长去游离时间，或降低直流电压。若第二次再启动失败，还可进行第三次降压(0.7 p.u.)再启动，如三—常直流工程。当达到预设再启动次数(一般设定最多 4 次)但均未成功时，则发出停运信号，闭锁换流器，使直流系统停运。

由此可知，现有自动再启动控制依靠经验设定启动时间及次数，若故障未消除而再启动，将加剧换相失败的程度，对交直流系统造成多次冲击。

3　换相失败控制和恢复策略

当交流系统故障时，换流母线电压随之发生变化。据此检测并判断故障的类型、状态及位置，结合 γ_{min} 发出相应操作信号。实时故障检测判定环节如图 4 所示，由两部分组成——实时故障检测、快速移相/再启动判定，该环节在受端每一层均配置。

3.1 实时故障检测

当受端交流系统发生单相接地故障时，换流母线电压中会出现零序电压分量 u_0：

$$u_0 = u_a + u_b + u_c \tag{1}$$

式中，u_a、u_b、u_c 为换流母线三相电压实测值。

当受端交流系统发生三相接地故障时，利用式(2)所示的 abc-$\alpha\beta$ 坐标变换求取 α、β 轴上换流母线电压旋转矢量 u_α、u_β

$$\begin{cases} u_\alpha = \dfrac{2}{3}u_a - \dfrac{1}{3}(u_b + u_c) \\ u_\beta = \dfrac{\sqrt{3}}{3}(u_b - u_c) \end{cases} \tag{2}$$

旋转矢量 u_{rot} 为

$$u_{rot} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \tag{3}$$

如图 4 可见：

1) 交流系统发生单相故障时，换流母线电压的零序分量将迅速增大，若 u_0 的绝对值 u_{0_ABS} 大于设定值，则输出角度 θ 反映故障及换相失败严重程度。

2) 交流系统发生三相故障时，u_{rot} 将迅速增大，若与故障前该量的差值 u_{rot_diff} 大于设定值，则输出角度 θ 反映故障及换相失败严重程度。

3) 在此故障检测环节中，θ 限定在[0°, 25.8°]，作为快速移相/再启动判定环节的输入值。

3.2 快速移相/再启动判定

在以下内容中，轻微故障指：该故障程度下，仅依靠现有控制系统的自动调节，就能避免发生连续多次换相失败；严重故障指：该故障程度下，仅依靠现有控制系统将无法避免连续多次换相失败。

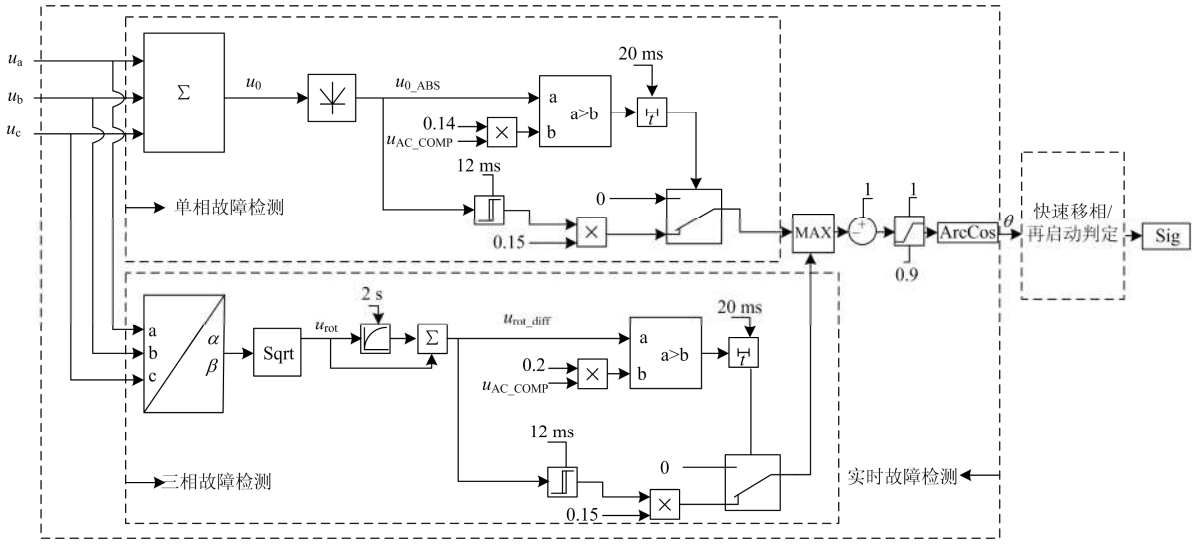

图 4 实时故障检测判定环节示意图

Fig. 4 Schematic diagram of real-time fault detection and decision controller

图 5 为实现快速移相/再启动判定(以下称为判定)的控制环节示意图。该判定的作用是发出快速移相、再启动信号，使直流系统仅在交流系统发生严重故障时才启动快速移相，并防止严重故障恢复过程中提前触发再启动控制。图 5 中逻辑判定信号包含 Ctrl、R、Sig_R、Sig_{t-1}、Sig_t 共五个。

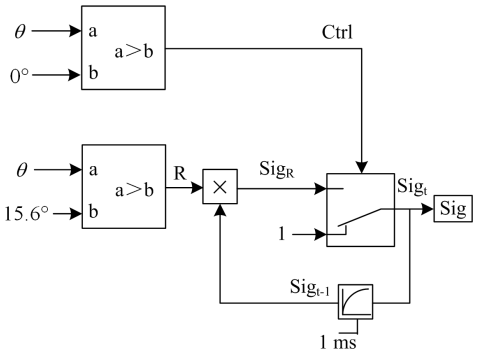

图 5 快速移相/再启动判定示意图

Fig. 5 Schematic diagram for the determination of fast phase shifting/restart

Ctrl 为判断是否发生故障的信号，如式(4)所示：当故障检测输出角度 θ=0º 时，Ctrl=1，表示交流系统无故障，继续正常运行。或表示故障消除去游离过程完成，可以再启动。θ>0º 表示交流系统有故障，Ctrl=0。

$$\mathrm{Ctrl}=\begin{cases}0, & \theta>0^\circ\\ 1, & \theta=0^\circ\end{cases} \tag{4}$$

R 为区别交流系统是否发生严重故障的信号，如式(5)所示。由于 $\theta\in[0^\circ,25.8^\circ]$，大功率晶闸管关断约需 400 μs，$\gamma_{\min}$ 为 7.2°(50 Hz 条件下)。结合大量仿真实验，设定 θ 大于阈值 θ_{val} (15.6°)时，判定为严重故障，R=0。否则判定为轻微故障及其恢复期；或为严重故障恢复期，R=1。

$$\mathrm{R}=\begin{cases}0\ , & \theta>15.6^\circ\\ 1\ , & \theta\le 15.6^\circ\end{cases} \tag{5}$$

Sig_{t-1} 为 1 ms 之前的判定结果。如式(6)所示。Sig_R 的主要作用是区别严重故障恢复期和轻微故障。以上两种情况下，均有 $\mathrm{R}=1$，但轻微故障及其恢复期时有 $\mathrm{Sig}_{t-1}=1$，$\mathrm{Sig}_R=1$。严重故障恢复期时有 $\mathrm{Sig}_{t-1}=0$。而严重故障时 $\mathrm{R}=0$，则一定有 $\mathrm{Sig}_R=0$。

$$\mathrm{Sig}_R=\mathrm{R}\times\mathrm{Sig}_{t-1}=\begin{cases}0\ , & (\mathrm{R}=0,\mathrm{Sig}_{t-1}=0\text{或}1)\\ 0\ , & (\mathrm{R}=1,\mathrm{Sig}_{t-1}=0)\\ 1\ , & (\mathrm{R}=1,\mathrm{Sig}_{t-1}=1)\end{cases} \tag{6}$$

Sig_t 为当前时刻的判定结果，即为 Sig 的输出值。如式(7)所示，未发生故障或需要再启动时 Sig=1，发生故障时输出值与 Sig_R 一致。

$$\mathrm{Sig}=\mathrm{Sig}_t=\begin{cases}1\ , & \mathrm{Ctrl}=1\\ \mathrm{Sig}_R\ , & \mathrm{Ctrl}=0\end{cases} \tag{7}$$

图 6(a)为故障过程示意图，3.1 s 发生轻微故障，3.4 s 发生严重故障并持续 0.1 s。图 6(b)为针对图 6 图(a)故障的判定的逻辑信号响应情况。

3.3 换相失败控制和恢复策略

判定环节发出信号 Sig_i(i=H、L，分别表示高端、低端)后，换相失败控制和恢复策略流程如图 7 所示。两层不同电压等级的交流系统均发生永久性严重故障的情况不在本文讨论范围内。

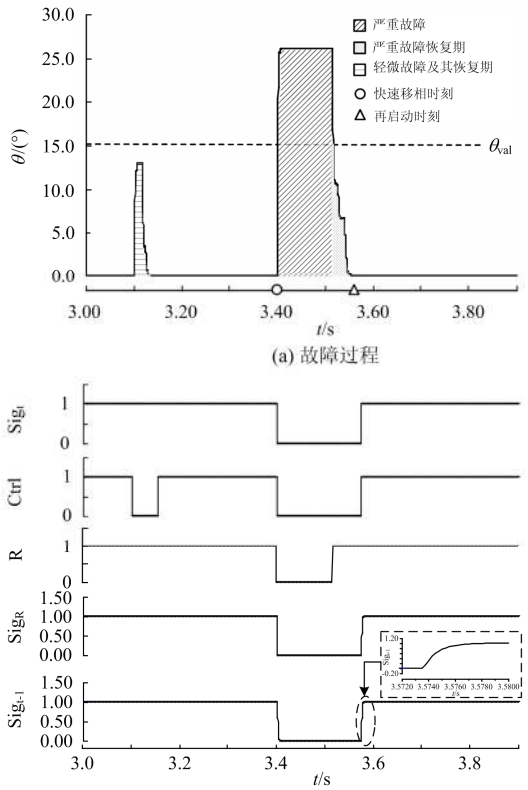

图 6 故障过程分析

Fig. 6 Analysis of fault process

3.3.1 单层故障控制流程

1) i 层交流系统发生瞬时性严重故障，判定环节输出 Sig_i=0，使功率指令 P_{ref} 、直流电压指令 U_{dref} 为 0，整流侧控制指令 RECT 取反变为逆变指令，进行快速移相，减小故障应力(换流器不闭锁)：直流功率通过整流站、逆变站快速疏散，直流电流很快降到零。检测到故障清除去游离完成后，$\mathrm{Sig_H}$=1 且 $\mathrm{Sig_L}$=1，使 P_{ref} 、U_{dref} 为 1.0 p.u.，整流侧换流器变回整流状态，系统再启动，实现自动再启动。

2) 本文设定故障发生 1 s 后，若检测到 i 层故障仍未清除，则判定为 i 层交流系统永久性故障，i 层直流系统需停运，如图 6 中右侧所示：两站 i 层换流单元对应旁通开关闭合，先闭锁 i 层整流侧换流单元，再闭锁逆变侧 i 层换流单元，使故障单元被隔离。控制系统切换为双极半压方式后再启动，使整流侧触发角、逆变侧关断角、直流电流仍为额定值，而 P_{ref} 、U_{dref} 变为 0.5 p.u.。

3.3.2 层间恢复策略协调配合

无论是交流系统不同电压等级间有电气联系时单层电压等级发生严重故障，还是交流系统间无电气联系双层交流系统均发生严重故障，都会引起两层直流系统的换相失败，因此还需兼顾层间的恢复策略协调配合。

若为瞬时性故障，当两层换流母线电压均降低时，$\mathrm{Sig}_i=0$ 依然成立，根据图 7 流程仍可正常运行。

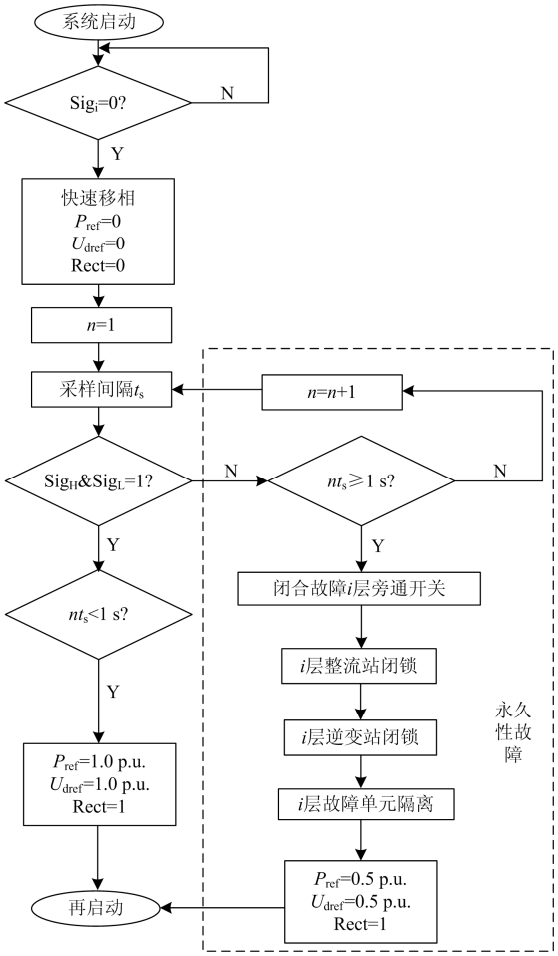

图 7 换相失败控制和恢复策略流程

Fig. 7 Flow chart of commutation failure control and recovery strategy

4 仿真验证

根据昌吉-古泉 UHVDC 工程参数在电磁暂态仿真平台 PSCAD/EMTDC 中搭建模型，并在其实际控制系统中加入本文提出的基于实时故障检测判定的换相失败控制和恢复策略。

以下仿真结果中，“恢复策略控制”表示使用基于实时故障检测判定的换相失败控制和恢复策略，“常规控制”表示未采取本文所提恢复策略。图中，Sig_i 为高、低端交直流系统的快速移相/再启动判定输出的控制信号；α_{H1m} 、α_{L1m} 分别为整流侧正极高端、低端触发角测量值；γ_{H1m} 、γ_{L1m} 分别为逆变侧正极高端、低端关断角测量值；I_{d} 、U_{d} 、P_{d} 分别

为正极直流电流、电压和功率。

4.1 低端交流系统瞬时性故障

4.1.1 受端两层电压等级间无电气联系

设置古泉换流站低端 1 050 kV 换流母线 3 s 时发生三相接地故障，持续 0.1 s。故障时，U_L 最低降为 0，U_H 保持 1.0 p.u.。单层交流系统瞬时故障下的控制策略及直流系统响应如图 8 所示。为便于观察换相失败程度，将关断角可视范围调整 0~100º。

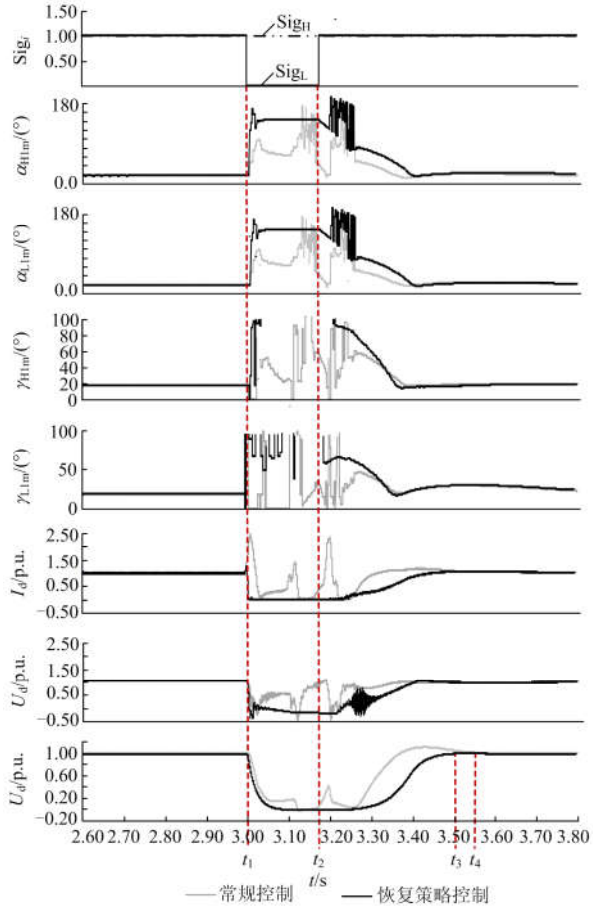

图 8 瞬时故障时控制策略及直流系统响应

Fig. 8 Response of control strategy and DC system under instantaneous fault

由 α_{H1m}、α_{L1m}、Sig_i 可知，常规控制下，t_4 时刻恢复稳定。恢复策略控制下，t_1 时刻之后 Sig_L=0，使整理侧移相，与逆变侧配合使 I_d 快速降为 0。t_2 时刻故障消除去游离完成，Sig_L=1 且 Sig_H=1，直流系统再启动，t_3 时刻恢复额定运行状态。

由 γ_{H1m}、γ_{L1m} 可知，在故障发生之初 t_1 时刻，无论有无采用恢复策略控制，都不能使系统避免一次换相失败。常规控制下 C_L 共发生 4 次换相失败，C_H 发生 3 次换相失败。恢复策略控制下，C_L、C_H 仅发生 1 次换相失败。

在常规控制下，I_d 对系统产生多次冲击，峰值高达 2.5 p.u.；U_d、I_d 恢复过程不稳定。而恢复策略控制下 U_d、I_d 以合适速率回升。由 P_d 曲线看出，恢复策略控制达到稳态时间略快于常规控制。

可见采用恢复控制策略的系统响应迅速，检测精确，有效减少连续换相失败次数，加快故障恢复。

4.1.2 受端两层电压等级间有电气联系

为模拟较强的电气联系，仿真在两层电压等级间加入 1 050 kV/510 kV 的联络变压器和 0.24+j12.18 Ω 的联络阻抗(相当于输电线路 30 km 短线[7])。故障设置与 4.1.1 节相同。

由表 1 可见：当两层电压等级有电气联系时，该故障下两层交流系统均受到影响，相比无电气联系，C_L、C_H 换相失败程度均变严重。但在加入恢复策略的控制方式下，换相失败次数明显减少，且恢复速度比常规控制略快。

表 1 交流侧电气联系较强时两种方式下的系统响应情况

Table 1 System response of two modes when AC side electrical connection is strong

变量	常规控制		恢复策略控制	
	故障时	恢复过程	故障时	恢复过程
U_L/p.u.	0	1	0	1
U_H/p.u.	0.677	1	0.677	1
C_L 换相失败次数	3	7	1	1
C_H 换相失败次数	1	4	1	0
故障恢复时间/s	—	0.46	—	0.4

4.2 低端交流系统永久性故障

设置古泉换流站低端 1 050 kV 换流母线 3 s 时发生三相接地故障，两层间无电气联系，U_L 最低降为 0，U_H 保持 1.0 p.u.。单层交流系统永久故障下的控制策略及直流系统响应如图 9 所示。

由 α_{H1m}、α_{L1m}、Sig_i 可知，常规控制下，由于故障始终存在，t_2 时刻调节失败，之后系统处于不正常运行状态。恢复策略控制下，t_1 时刻之后 Sig_L=0，快速移相。1 s 后检测到故障仍然存在，t_3 时刻隔离、闭锁故障单元，之后以双极半压运行方式再启动。

由 γ_{H1m}、γ_{L1m} 可知，两种控制方式都不能避免一次换相失败。常规控制下，C_L 发生换相失败后无法恢复，C_H 变为不正常状态。在恢复策略控制下，C_L 闭锁对系统不再产生影响；C_H 可正常运行。

在常规控制下，I_d 陡增，最高可达 2.5 p.u.，后在低压限流作用下稳定于 0.345 p.u.。t_5 时刻 P_d 稳定

在 0.17 p.u.。在恢复策略控制下，I_d 最高仅为 1.25 p.u.，随后立即降低至 0。t_3 时刻自动再启动，在低压限流的作用下，U_d 先启动达到 0.5 p.u.，t_4 时刻 I_d 启动，并于 t_6 时刻达到稳态值 1.0 p.u.，P_d 稳定于 0.5 p.u.。

可以看出，本文提出的控制策略在永久故障下不仅可以降低换相失败的风险，还可使非故障层的直流系统继续正常运行，输送 50%功率，仅故障层直流系统停运。

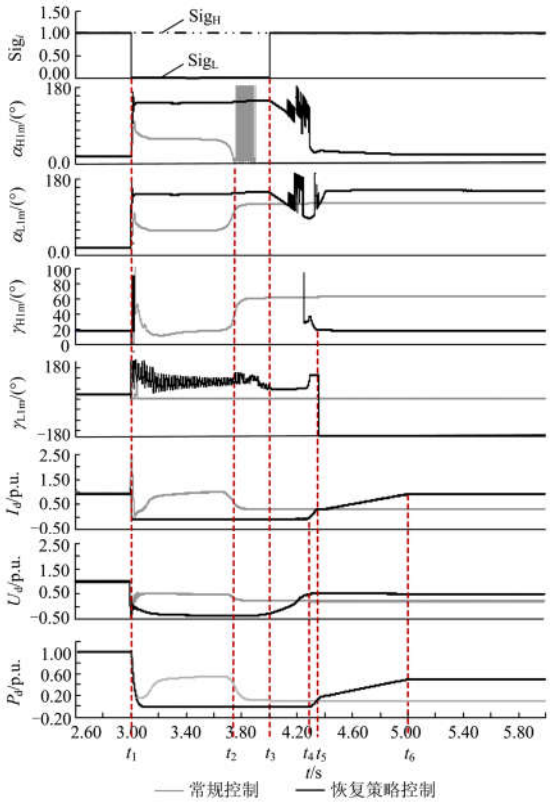

图 9 永久故障时控制策略及直流系统响应

Fig. 9 Response of control strategy and DC system under permanent fault

5 结论

本文提出了基于实时故障检测判定的换相失败控制和恢复策略，结合昌吉-古泉±1 100 kV 特高压直流输电工程实际参数搭建 PSCAD/EMTDC 模型，得出以下结论：

1) 本文所提出的策略可准确区分轻微故障、严重故障及严重故障恢复期；可准确判定故障发生的电压层级；准确区分瞬时性、永久性故障。

2) 在交流系统发生瞬时性严重故障而必然连续多次换相失败时，使直流控制系统启动快速移相，并防止严重故障恢复过程中提前再启动，减少自动再启动的次数，降低发生连续多次换相失败的风险。

3) 单层交流系统发生永久性严重故障时，本文策略隔离故障层换流单元，避免整个直流输电系统停运，并防止非故障层换流单元发生连续多次换相失败，提高输电可靠性。

参考文献

[1] 徐式蕴, 樊明鉴, 林伟芳, 等. 准东-皖南±1 100 kV 特高压直流分层接入后受端电网稳定特性及控制措施[J/OL]. 电网技术: 1-8[2019-01-27]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2929.
XU Xieyun, FAN Mingjian, LIN Weifang, et al. Stability and control of receiving-end power system after the hierarchical connection of Zhundong-Wannan ±1 100 kV UHVDC[J/OL]. Power System Technology: 1-8[2019-01-27]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2929.

[2] 杨鹏, 吴娅妮, 马士聪, 等. ±1100 kV 特高压直流输电工程直流线路故障重启动过程非故障极换相失败研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 14-18.
YANG Peng, WU Yani, MA Shicong, et al. Analysis of commutation failure of healthy pole during restart of faulty line for ±1100 kV UHVDC project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 14-18.

[3] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.

[4] ZHANG Lidong, DOFNAS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C] // International Conference on Power System Technology, October 13-17, 2002, Kunming, China: 51-56.

[5] BIANCHI G, LUONI G, MORELLO A. High voltage DC cable for bulk power transmission[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(6): 2311-2317.

[6] 郭龙, 刘崇茹, 贠飞龙, 等. ±1100 kV 直流系统分层接入方式下的功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 24-30.
GUO Long, LIU Chongru, YUN Feilong, et al. Power coordination control of ±1100 kV UHVDC system with hierarchical connection mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 24-30.

[7] 王玲, 文俊, 司瑞华, 等. UHVDC 分极分层接入方式及其运行特性[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 730-738.
WANG Ling, WEN Jun, SI Ruihua, et al. The connection mode and operation characteristics of UHVDC with

hierarchical connection by pole[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 730-738.

[8] 艾红杰, 方扬, 陈大鹏, 等. 晋北-南京特高压直流输电工程安稳系统及其控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 118-125.
AI Hongjie, FANG Yang, CHEN Dapeng, et al. Study on stability system and control strategy in Jinbei-Nanjing HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 118-125.

[9] BALZER G, MULLER H. Capacitor commutated converters for high power HVDC transmission[C] // Seventh International Conference on AC and DC Power Transmission, November 28-30, 2001, London, UK: 60-65.

[10] LIU Zehong, YU Jun, GUO Xianshan, et al. Survey of technologies of line commutated converter based high voltage direct current transmission in China[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 1-8.

[11] 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.

[12] 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.

[13] LEE D H A, ANDERSSON G. An equivalent single-infeed model of multi-infeed HVDC systems for voltage and power stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 303-312.

[14] ZHANG Xiaohu, BAI Jialin, CAO Guoyun, et al. Optimizing HVDC control parameters in multi-infeed HVDC system based on electromagnetic transient analysis[J]. Electric Power Energy System, 2013, 49: 449-454.

[15] SON H I, KIM H M. An algorithm for effective mitigation of commutation failure in high-voltage direct-current systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1437-1446.

[16] 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.

[17] 王轩, 魏宏, 欧朱建, 等. 一种抑制HVDC换相失败的STATCOM 补偿方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 135-142.
WANG Xuan, WEI Hong, OU Zhujian, et al. A STATCOM compensation scheme for suppressing commutation failure in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 135-142.

[18] 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.

[19] 李新年, 陈树勇, 李凤祁, 等. 特高压直流分层接入方式下预防换相失败的优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6563-6573.
LI Xinnian, CHEN Shuyong, LI Fengqi, et al. Optimization measures for preventing commutation failure in UHVDC transmission with hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6563-6573.

[20] 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 to suppress the failure of continuous commutation in HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5029-5042, 5300.

[21] 赵畹君, 谢国恩, 曾南超, 等. 高压直流输电工程技术[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[22] HAMMONS T J, LESCALE V F, UECKER K, et al. State of the art in ultrahigh-voltage transmission[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(2): 360-390.

收稿日期：2019-03-10；　　修回日期：2019-04-28

作者简介：

王思超(1994—)，女，硕士研究生，研究方向为高压直流输电运行与控制；E-mail: wsc_ncepu@163.com

文　俊(1963—)，女，教授，硕士生导师，研究方向为高压直流输电运行与控制等。E-mail: hbdl_wenjun@126.com

(编辑　葛艳娜)