

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210871

特高压直流分层接入方式下预防换相失败的协调控制策略

王渝红, 陈立维, 曾琦, 寇然, 廖建权

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 分层接入的特高压直流输电系统中, 非故障层换相失败预测控制的启动时刻存在延时, 无法及时反应故障严重程度以输出合适的触发角提前量, 可能导致高低端换流器同时发生换相失败的风险增加。对此, 提出一种基于故障层触发角提前量前馈的高低端换流器换相失败预测控制协调策略。利用故障层换流器可更灵敏反应故障严重程度的特点, 所提策略将故障层换相失败预测控制触发角提前量引入非故障层换相失败预测控制, 实现非故障层换相失败预测控制启动时刻提前。此外, 还引入直流电流协调系数以得到更合适的触发角提前量。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了仿真模型, 对不同工况下所提控制策略进行了验证。结果表明, 该策略能快速应对逆变侧交流系统故障, 减小高低端换流器同时发生换相失败的风险, 对预防分层接入系统高低端换流器同时发生换相失败有一定借鉴意义。

关键词: 特高压直流输电; 分层接入系统; 换相失败预测控制; 协调控制策略; 换相失败

Coordinated control strategy for preventing commutation failure in a UHVDC system hierarchically connected to an AC grid

WANG Yuhong, CHEN Liwei, ZENG Qi, KOU Ran, LIAO Jianquan

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In a hierarchically connected UHVDC system, there is a delay in the start time of the non-fault layer commutation failure prevention (CFPREV). This makes it unable to respond to the severity of the fault in time to output an appropriate trigger angle advance. This may lead to an increased risk of commutation failure of the high and low converters at the same time. Thus a CFPREV coordination strategy for high and low converters based on the feedforward of the trigger angle advance of the fault layer is proposed. This strategy uses the characteristics of fault converters that can more sensitively respond to the severity of faults, and it introduces the trigger angle advance of the CFPREV of the faulty layer into the CFPREV of the non-faulty layer, so that the start time of the CFPREV of the non-faulty layer is advanced. In addition, the strategy also introduces a DC current coordination coefficient to obtain a more appropriate trigger angle advance. A simulation model is built in PSCAD/EMTDC to verify the proposed control strategy under different working conditions. The results show that this strategy can quickly respond to inverter-side AC system faults, and reduce the risk of simultaneous commutation failures of high and low converters. The proposed control strategy plays a role in solving the problem of simultaneous commutation failure of high and low converters in the hierarchically connected system.

This work is supported by the Science and Technology Program of Sichuan Province (No. 2021YFG0026).

Key words: UHVDC; hierarchical connection system; CFPREV; coordinated control strategy; commutation failure

0 引言

为促进能源转型、减少碳排放, 我国提出了2030年前碳达峰、2060年前碳中和的“双碳”目标。“双碳”目标的提出, 将使以风电和光伏为主

的新能源装机容量不断提高。我国能源基地与负荷中心存在明显的地理分布差异, 如何提高新能源的利用率和消纳能力是能源转型中的热点议题^[1-2]。特高压直流输电凭借输电容量大、距离远以及控制方式灵活等优点成为解决新能源消纳问题的重要手段, 近些年得到了快速发展^[3-10]。随着直流输电工程的不断建设投运, 我国某些地区同时馈入多条直

基金项目: 四川省科技计划资助(2021YFG0026)

流输电工程,使这些地区的网架结构变得更加密集,加重了当地电网的潮流和短路电流水平,同时也严重威胁着受端交流系统的电压稳定^[11-13]。为提高受端交流系统电压支撑和潮流疏散能力,文献[14]从调整电网结构着手,提出了特高压直流分层接入受端交流系统的方式,即每一极的高低端换流器以分层形式接入受端交流系统的不同电压等级电网。

专家学者对分层接入系统进行了许多研究。在控制保护与运行特性方面:文献[15]对比分析了多回特高压直流单层接入特高压交流电网、单层接入超高压交流电网及分层接入特高压和超高压交流电网三种模式下,交直流混联系统的稳态特性。文献[16]分析了特高压直流分层接入交流系统后直流系统的故障特征,为继电保护的配置提供了一定参考。文献[17]以昌吉-古泉 UHVDC 工程为例,对常规自动再启动控制进行改进,提出了一种基于实时故障检测判定的换相失败控制和恢复策略,该策略可准确判定故障状态、故障发生的电压层级和故障的持续时间,提高了系统的输电可靠性。文献[18]建立了特高压直流分层接入系统的小信号模型,在此基础上,定量分析了系统的稳定性。文献[19]分析了高低端换流器中点分压器可能出现的故障类型,并提出了中点分压器应对各种故障情况的控制保护动作策略。文献[20]对直流分层接入方式下层间交互影响因子的不同计算方法进行了对比分析,并指出了不同计算方法产生差异的原因。文献[21]提出了一种分层接入方式下交直流系统中长期电压稳定协调控制方法,提高系统电压稳定性的同时减少了切负荷损失,充分体现了分层接入系统功率快速可调的特点。文献[22]完善了分层接入短路比的定义,并以此为基础分析了分层接入方式下受端交流系统的接纳能力。文献[23]设计了分层接入系统逆变侧各换流器的附加功率-电压控制,实现了对各换流器输送功率的独立调节,充分体现了分层接入方式下潮流分布可控的优势。文献[24]对传统单馈入电压稳定指标进行了推广,提出了多馈入电压稳定指标,并结合分层接入方式的特点,对换流母线静态电压稳定性的影响因素进行了分析。文献[25]分析了分层接入方式下换流母线电压相互作用因子和短路比,进一步研究了受端潮流重新分布对换相失败的影响。在分层接入系统换相失败方面也有一些研究成果,文献[26]提出了基于逆变侧关断角的分层接入系统高低端换流器间的协调控制策略,从而降低高低端换流器同时发生换相失败的风险。文献[27]

分析了分层接入系统高低端换流器同时发生换相失败的机理,指出非故障层换相失败预测控制(Commutation Failure Prevention, CFPREV)的启动滞后于故障层 CFPREV,导致高低端换流器同时发生换相失败。为解决此问题,文献[28]引入了换相电流时间面积指标使非故障层 CFPREV 提前启动,降低了高低端换流器同时发生换相失败的风险,但所提策略没有综合考虑故障时各电气量的故障特性,在一定程度上削弱了预防换相失败的能力。文献[29]基于分层接入相互作用因子提出了高低端 CFPREV 的协调控制策略,降低了高低端换流器同时发生换相失败的风险,但存在协调系数无法根据故障严重程度自适应调整的问题,制约了协调控制策略充分发挥抑制换相失败的作用。为降低高低端换流器同时发生换相失败的风险,提高分层接入系统对故障的免疫能力,研究分层接入系统预防换相失败的控制策略具有重要意义。

考虑到分层接入系统逆变侧高低端换流器复杂的耦合关系,本文分析了受端交流系统故障时高低端换流器换相失败特性,指出分层接入系统 CFPREV 的不足。非故障层 CFPREV 的启动时刻存在延时,可能导致高低端换流器同时发生换相失败。针对该问题,本文提出了一种基于故障层触发电角提前量前馈的高低端换流器 CFPREV 协调策略,并分析了该策略对系统运行特性的影响。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建了分层接入系统仿真模型,验证了所提协调控制策略的有效性。

1 特高压直流分层接入系统介绍

1.1 分层接入系统结构

分层接入系统结构如图 1 所示,系统采用双极两端中性点直接接地的运行方式,每极由 2 组在直流侧串联、交流侧并联的 12 脉动换流器构成。每极中距离接地点较近、电位较低的换流器称为低端换流器,低端换流器接入 1 000 kV 交流电网;距离接地点较远、电位较高的换流器称为高端换流器,高端换流器接入 500 kV 交流电网。交流滤波器和无功补偿设备在两种电压等级电网中分层独立配置。

图 1 中, U_{dr} 和 U_{di} 分别为整流站和逆变站正极对地直流电压; I_d 为流过输电线路的直流电流, I_{dH} 、 I_{dL} 分别为流过高、低端换流器的直流电流; U_H 、 U_L 分别为高低端换流母线的线电压有效值; R_d 和 L_d 分别为输电线路电阻和电感; Z_n 为交流系统等值阻抗; Z_{23} 为逆变侧高低端换流母线间的等值联系阻抗, $n=1,2,3$ 。

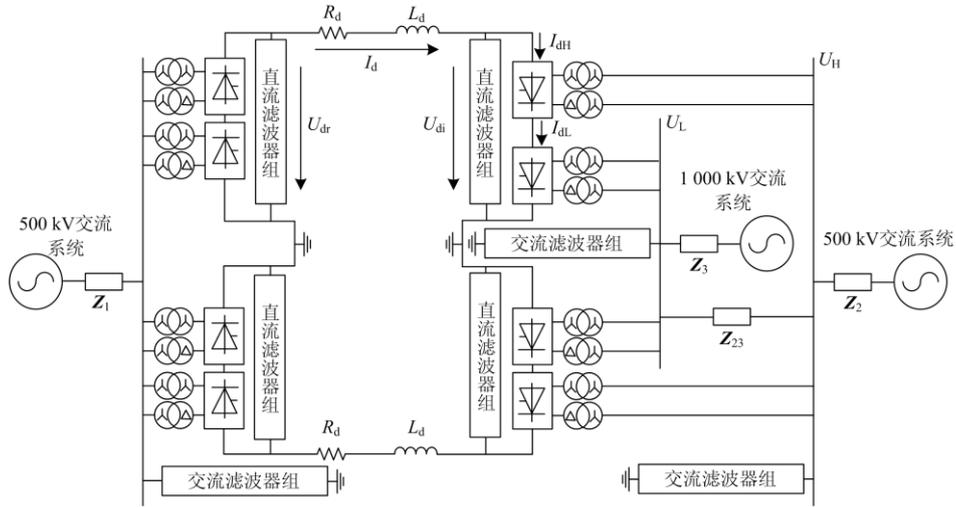


图1 分层接入系统结构

Fig. 1 Hierarchical connection system structure

1.2 分层接入系统基本控制策略

分层接入系统中，整流侧换流器接入交流系统同一电压等级电网，配置有定电流控制和最小触发角控制；逆变侧高低端换流器分别接入交流系统的不同电压等级电网，定关断角控制、定电流控制、电流偏差控制(Current Error Controller, CEC)以及低压限流控制 (Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)需独立配置在各换流阀组控制层。正常运行时，整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定关断角控制，控制策略如图2所示。

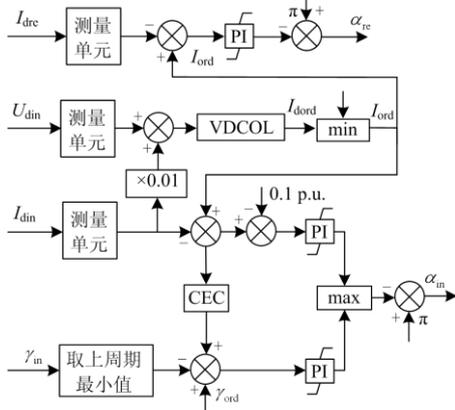


图2 分层接入系统基本控制策略

Fig. 2 Basic control strategy of hierarchical connection system

图2中， I_{dre} 为整流侧直流电流； U_{din} 、 I_{din} 和 γ_{in} 分别为逆变侧直流电压、直流电流和关断角； I_{dord} 和 I_{ord} 分别为主控制极和实际输出的直流电流指令值； γ_{ord} 为逆变侧关断角指令值； α_{re} 和 α_{in} 分别为整流侧和逆变侧触发角指令值。

1.3 分层接入系统换相失败特性

分层接入系统逆变侧高低端换流器存在复杂的电气耦合关系，受端交流系统发生故障时，可能导致高低端换流器同时发生换相失败，其换相失败特性更加复杂。将500 kV换流母线等效为节点1，1000 kV换流母线等效为节点2，则受端交流系统等效结构如图3所示。

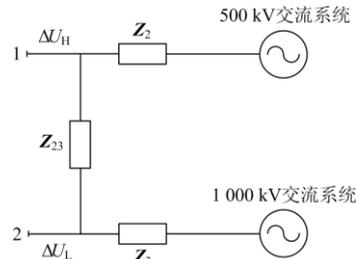


图3 受端交流系统等效结构

Fig. 3 Equivalent structure of receiving AC system

假设500 kV交流电网发生对称故障后，其换流母线电压跌落量记为 ΔU_H ，此时，若1000 kV换流母线电压跌落量记为 ΔU_L ，则两者存在如下关系：

$$\frac{\Delta U_L}{\Delta U_H} = \left| \frac{Z_3}{Z_3 + Z_{23}} \right| \quad (1)$$

分层接入系统受端高低端换流器在直流侧为串联连接关系，流过相同的直流电流。

$$I_{dH} = I_{dL} = I_d = \frac{U_{dr} - U_{di}}{R_d} \quad (2)$$

逆变侧高低端换流器的关断角分别记为 γ_H 和 γ_L ，则 γ_H 和 γ_L 可用式(3)、式(4)计算。

$$\gamma_H = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}k_H I_{dH} X_{CH}}{U_H} + \cos \beta_H\right) \quad (3)$$

$$\gamma_L = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}k_L I_{dL} X_{CL}}{U_L} + \cos \beta_L\right) \quad (4)$$

式中: k 为换流变压器变比; X_C 为等值换相电抗; β 为超前触发电角; 高低端参数分别用下标 H、L 表示。

500 kV 交流电网发生对称故障时, 其换流母线电压会降低, 根据式(3), 高端换流器的关断角会减小, 根据式(2), 直流电流会迅速上升, 高端换流器的关断角会进一步减小, 严重时会导致高端换流器发生换相失败。与此同时, 1 000 kV 换流母线电压也会受到影响而降低, 再加上直流电流的增加, 低端换流器的关断角会迅速减小, 也存在发生换相失败的风险。高低端换流器发生换相失败的时间间隔极短, 可认为同时发生换相失败。特高压直流输电系统容量大, 结构复杂, 一旦发生换相失败, 会对交直流混联系统造成巨大冲击。

2 协调控制策略

2.1 CFPREV 特性分析

CFPREV 的基本原理是: 检测到交流系统发生故障后, 减小换流器触发角, 对换流器进行提前触发控制, 其结构如图 4 所示^[6]。CFPREV 的故障检测功能由不对称故障检测和对称故障检测两部分构成, 当交流系统故障严重程度达到任一故障检测的阈值时, CFPREV 将输出触发角提前量, 对换流器进行提前触发控制, 从而预防换流器换相失败。

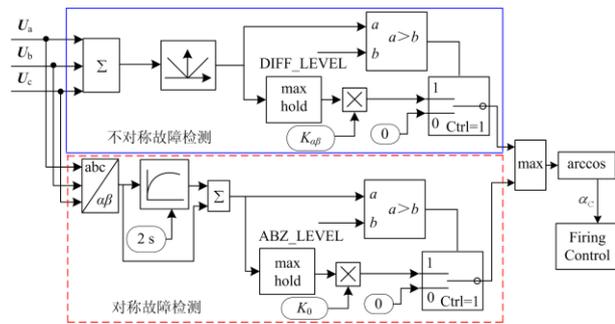


图 4 CFPREV 结构

Fig. 4 Structure of CFPREV

图 4 中: U_a 、 U_b 、 U_c 为换流母线三相交流电压瞬时值; ABZ_LEVEL 和 $DIFF_LEVEL$ 分别为对称和不对称故障检测的阈值, 一般取为 0.15 和 0.14; K_{ab} 和 K_0 分别为对称和不对称故障检测对应的角度增益; α_c 为输出的触发角提前量, 其大小与换流母线电压跌落量正相关。

分层接入系统中, CFPREV 在每一极高低端换流器控制系统中均独立配置, CFPREV_H 输入 500 kV 换流母线电压, CFPREV_L 输入 1 000 kV 换流母线电压。当 500 kV 交流系统发生故障时, 高低端换流器电压跌落程度的关系如式(1)所示, 由于联系阻抗的存在, 500 kV 换流母线电压跌落程度较 1 000 kV 换流母线更严重, 而 CFPREV_H 和 CFPREV_L 的故障检测阈值相同, 因此 500 kV 换流母线电压跌落先达到故障检测阈值, 使 CFPREV_H 先启动, 随后 1 000 kV 换流母线电压跌落达到故障检测阈值启动 CFPREV_L, CFPREV_L 的启动时刻滞后于 CFPREV_H, 故障较严重时可能晚于对应换流器换相失败发生的时刻, 无法发挥减小换相失败风险的作用, 如图 5 所示。

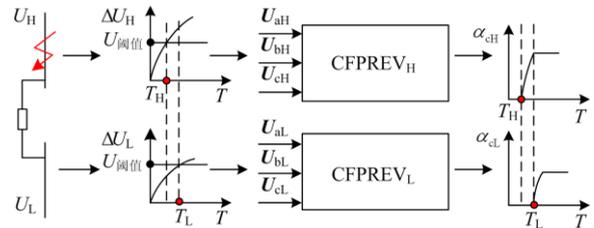


图 5 分层接入系统 CFPREV 效果

Fig. 5 CFPREV effect of hierarchical connection system

2.2 CFPREV 的协调控制策略

为解决上述问题, 本文提出了一种基于故障层触发角提前量前馈的高低端换流器 CFPREV 协调控制策略。故障层换流器可更灵敏反应故障严重程度, 利用该特点, 所提策略将故障层 CFPREV 触发角提前量引入非故障层 CFPREV, 实现非故障层 CFPREV 启动时刻提前, 并利用能反应故障严重程度的直流电流设计协调系数, 使协调系数能根据直流电流的变化作出调整, 从而使非故障层 CFPREV 输出合适的触发角提前量, 减小高低端换流器同时发生换相失败的风险, 其结构如图 6 所示。其原理是将另外一层 CFPREV 的输出与协调系数的乘积引入到本层, 并与本层 CFPREV 的输出进行比较, 两者中的较大值为本层最终输出的触发角提前量, 协调控制策略下两层 CFPREV 输出的触发角提前量分别为式(5)和式(6)。为限制另一层引入到本层的触发角提前量过大, 加入了限幅环节。

$$\alpha_{CH1} = \max(\alpha_{CH}, K_H \times \alpha_{CL}) \quad (5)$$

$$\alpha_{CL1} = \max(K_L \times \alpha_{CH}, \alpha_{CL}) \quad (6)$$

式中: α_{CH1} 和 α_{CL1} 分别为 CFPREV_H 和 CFPREV_L 的最终输出值; K_H 和 K_L 分别为高、低端协调系数。

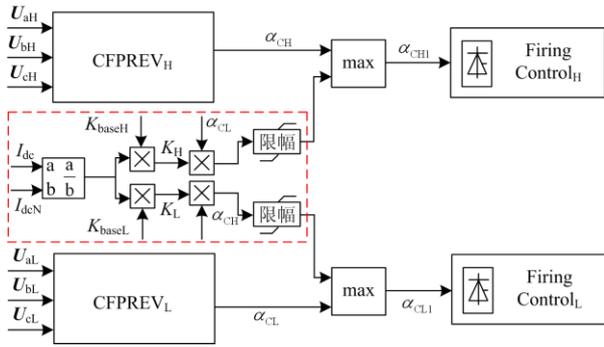


图 6 CFPREV 协调控制策略

Fig. 6 Coordinated control strategy of CFPREV

由图 6 和式(5)、式(6)可知，无论哪一层交流系统发生故障，在协调控制策略的作用下，非故障层 CFPREV 不仅启动时刻提前而且输出的触发角提前量能根据协调系数动态变化。触发角提前量与换流器是否发生换相失败直接相关，为使协调控制策略输出合适的触发角提前量，本文利用直流电流来设计协调系数，如式(7)所示。协调系数为直流电流标幺值与基础协调系数的乘积，基础协调系数的作用是使非故障层 CFPREV 输出合适的触发角提前量，在降低非故障层换流器换相失败风险的同时尽可能地减小有功功率的下降幅度。

$$\begin{cases} K_H = \frac{I_d}{I_{dN}} \times K_{baseH} \\ K_L = \frac{I_d}{I_{dN}} \times K_{baseL} \end{cases} \quad (7)$$

式中： I_d 与 I_{dN} 分别为直流电流实际值和额定值； K_{baseH} 、 K_{baseL} 分别为高低端基础协调系数，其选取遵循以下原则。

1) 提前触发会增加逆变站无功消耗，逆变站无功消耗需受端交流系统提供，当故障造成受端交流系统无功不足时，触发角提前量过大反而会使交直流混联系统运行状况进一步恶化，因此，基础协调系数的选取必须考虑受端交流系统的强度，对于受端较强的系统，基础协调系数应适当取大一些。

2) 基础协调系数的选择以输出合适的触发角提前量为约束。取值过小会使触发角提前量偏小，无法有效降低发生换相失败的概率；取值过大会使触发角提前量偏大，降低直流输电系统的经济性，使交直流混联系统运行状况进一步恶化。经大量仿真，基础协调系数的取值为 0.5~1。

当高低端协调系数 K_H 和 K_L 均取 1 时，得到协调控制策略的一种特殊情况如图 7 所示，其原理是将另外一层 CFPREV 的输出直接引入到本层，并与

本层 CFPREV 的输出进行比较，使本层最终输出的触发角提前量为两层 CFPREV 输出中的较大者。因此，无论受端哪一层交流系统发生故障，两层 CFPREV 输出的触发角提前量相同，且均为两层 CFPREV 输出触发角提前量中的较大者。

$$\alpha_{CH2} = \alpha_{CL2} = \max(\alpha_{CH}, \alpha_{CL}) \quad (8)$$

式中， α_{CH2} 和 α_{CL2} 分别为 K_H 和 K_L 均为 1 时 CFPREV_H 和 CFPREV_L 的最终输出值。

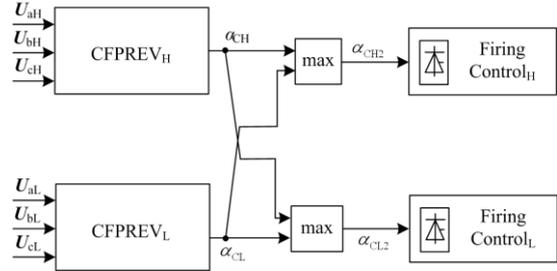


图 7 $K_H=K_L=1$ 时 CFPREV 协调控制策略

Fig. 7 Coordinated control strategy of CFPREV under $K_H=K_L=1$

对非故障层 CFPREV 而言，启动时刻提前且输出的触发角提前量增加，可以有效减小非故障层换流器换相失败风险，但由于非故障层换流母线电压的跌落程度弱于故障层，直接将故障层触发角提前量引入到非故障层，会使非故障层触发角提前量过大，从而使关断角过大，直流传输功率会更低。因此，在该特殊情况下，虽然降低了非故障层换流器发生换相失败的风险，但可能使非故障层换流器输送的功率更小。

3 仿真实验

为验证本文所提协调控制策略的有效性，在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建了如图 1 所示的 1000kV 高压直流分层接入系统模型，主要参数如表 1 所示。

表 1 分层接入系统主要参数

Table 1 Main parameters of hierarchical connection system

参数	数值
直流电压/kV	±800
直流电流/kA	6.25
输送功率/MW	10 000
整流侧换流变变比	525/172.8
逆变侧 1 000 kV 系统换流变变比	1 050/165.8
逆变侧 500 kV 系统换流变变比	525/165.8
逆变侧 1 000 kV 系统分层短路比	5.15
逆变侧 500 kV 系统分层短路比	3.27

3.1 基础协调系数的选取

按照基础协调系数的选取原则, 在搭建的分层接入系统上进行大量仿真, 寻找效果较优的一组基础协调系数。本文搭建的系统中, 逆变侧 1 000 kV 交流电网短路比大于 500 kV 交流电网, 所以 K_{baseL} 应大于 K_{baseH} , 让 K_{baseL} 从 0.55 开始以 0.05 为步长取到 1, K_{baseH} 从 0.5 开始以 0.05 为步长取到 0.95, 设置以下 10 组系数, 如表 2 所示。以 500 kV 换流母线处发生三相接地故障和 1 000 kV 换流母线处发生单相接地故障为例进行分析, 分别在 500 kV 换流

母线处设置三相接地故障和 1 000 kV 换流母线处设置单相接地故障, 故障 1 s 时开始, 持续 0.1 s, 接地电感为 0.1~0.7 H, 步长为 0.1 H, 记录非故障层换流母线电压最小值、关断角最小值以及系统输送有功功率最小值, 仿真结果如表 3—表 6 所示。其中, 非故障层换流母线电压最小值为标么值(p.u.), 关断角最小值和系统输送有功功率最小值单位分别为度和 MW。仿真结果的评价指标: (1) 尽可能保证系统不发生换相失败; (2) 在不发生换相失败的前提下输送的功率尽可能多。

表 2 基础协调系数分组

Table 2 Grouping of base coordinated factors

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_{baseH}	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
K_{baseL}	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00

表 3 500 kV 换流母线三相接地故障仿真结果 1

Table 3 Simulation results 1 of converter bus after a three-phase grounding fault in 500 kV AC grid

接地 电感/H	1			2			3			4			5		
	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}
0.1	0.6016	0	2779	0.6028	4.83	3166	0.6051	10.93	3199	0.6056	12.20	3184	0.6054	11.68	3177
0.2	0.6828	0	3311	0.6821	4.32	3637	0.6832	8.03	3720	0.6838	7.88	3735	0.6843	10.46	3745
0.3	0.7183	11.07	4918	0.7121	0	3938	0.7146	6.36	4386	0.7157	9.49	4472	0.7160	10.76	4504
0.4	0.7462	12.22	5147	0.7458	12.21	5121	0.7453	12.18	5120	0.7447	12.14	5092	0.7440	11.90	5065
0.5	0.7558	10.27	4859	0.7560	12.45	4896	0.7559	12.60	4885	0.7553	12.74	4896	0.7553	12.75	4893
0.6	0.8724	13.70	8178	0.8724	13.70	8178	0.8724	13.70	8178	0.8724	13.70	8178	0.8724	13.70	8178
0.7	0.8934	14.85	8462	0.8934	14.85	8462	0.8934	14.85	8462	0.8934	14.85	8462	0.8934	14.85	8462

表 4 500 kV 换流母线三相接地故障仿真结果 2

Table 4 Simulation results 2 of converter bus after a three-phase grounding fault in 500 kV AC grid

接地 电感/H	6			7			8			9			10		
	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}
0.1	0.6054	12.15	3173	0.6052	11.74	3172	0.6051	12.02	3164	0.6050	12.21	3159	0.6052	12.61	3156
0.2	0.6861	10.63	3750	0.6851	10.80	3752	0.6853	10.74	3737	0.6855	10.53	3727	0.6856	10.58	3720
0.3	0.7160	10.82	4512	0.7156	10.79	4516	0.7151	10.77	4500	0.7151	10.72	4497	0.7151	10.59	4495
0.4	0.7434	12.06	5047	0.7431	12.02	5031	0.7431	11.99	5021	0.7426	11.99	4981	0.7402	11.96	4679
0.5	0.7546	12.87	4877	0.7540	12.84	4860	0.7539	12.82	4847	0.7538	12.82	4837	0.7537	12.82	4831
0.6	0.8724	13.70	8178	0.8724	13.70	8178	0.8724	13.70	8178	0.8724	13.70	8178	0.8724	13.70	8178
0.7	0.8934	14.85	8462	0.8934	14.85	8462	0.8934	14.85	8462	0.8934	14.85	8462	0.8934	14.85	8462

表 5 1 000 kV 换流母线单相接地故障仿真结果 1

Table 5 Simulation results 1 of converter bus after a single-phase grounding fault in 1 000 kV AC grid

接地 电感/H	1			2			3			4			5		
	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}												
0.1	0.7241	0	1657	0.7241	0	2103	0.7244	0	2097	0.7244	0	2092	0.7246	0	2087
0.2	0.7430	0	2400	0.7415	0	2343	0.7418	0	2335	0.7419	0	2322	0.7417	0	2615
0.3	0.7670	0	2611	0.7449	0	3057	0.7455	0	3102	0.7458	0	3117	0.7458	0	3082
0.4	0.7710	0	2828	0.7710	0	2860	0.7648	8.07	3650	0.7663	12.86	3742	0.7674	15.99	3797
0.5	0.7820	15.10	4975	0.7870	16.34	5573	0.7864	16.51	5579	0.7856	16.43	5553	0.7848	14.51	5598
0.6	0.8201	8.34	6354	0.8201	9.36	6365	0.8200	10.84	6381	0.8197	12.34	6387	0.8194	13.65	6387
0.7	0.8333	8.29	6600	0.8331	8.79	6601	0.8329	9.60	6606	0.8328	10.80	6618	0.8326	12.00	6628

表 6 1 000 kV 换流母线单相接地故障仿真结果 2

Table 6 Simulation results 2 of converter bus after a single-phase grounding fault in 1 000 kV AC grid

接地 电感/H	6			7			8			9			10		
	U_{Hmin}	γ_{min}	P_{min}												
0.1	0.7247	0	2085	0.7250	0	2085	0.7246	0	2083	0.7261	0	2374	0.7262	0	2369
0.2	0.7416	0	2587	0.7417	0	2550	0.7424	0	2307	0.7422	0	2880	0.7418	0	2522
0.3	0.7573	8.76	3654	0.7569	7.9	3610	0.7532	2.39	3672	0.7536	0	3253	0.7538	0	3258
0.4	0.7682	16.59	3821	0.7685	16.55	3820	0.7687	16.54	3812	0.7689	16.50	3800	0.7661	16.12	3834
0.5	0.7796	14.89	3919	0.7804	16.24	3941	0.7808	16.17	3945	0.7809	16.09	3941	0.7810	16.05	3934
0.6	0.8190	15.18	6384	0.8182	16.59	6378	0.8175	16.63	6364	0.8164	16.57	6345	0.8150	16.52	6318
0.7	0.8324	13.06	6634	0.8322	14.12	6637	0.8318	15.38	6633	0.8314	16.52	6629	0.8309	17.03	6615

由表 3、表 4 可知，500 kV 换流母线处发生三相接地故障时，第 1—4 组在接地电感为 0.1~0.3 H 时均发生 2 或 3 次换相失败，第 5—10 组在接地电感为 0.1~0.7 H 时均没有发生换相失败，另外，在第 5—10 组中，第 5 组不仅具有足够的换相裕度而且输送的有功功率也较多。由表 5、表 6 可知，1 000 kV 换流母线处发生单相接地故障时，第 1—3 组在接地电感为 0.1~0.4 H 时均发生 4 次换相失败，第 4—10 组在接地电感为 0.1~0.3 H 时均发生 3 次换相失败、在接地电感为 0.4~0.7 H 时均没有发生换相失败，另外，在第 4—10 组中，第 5 组不仅具有足够的换相裕度而且输送的有功功率也较多。根据上

述评价指标，第 5 组基础协调系数在 10 组中具有最优的控制效果，所以本文最终选择第 5 组，即 K_{baseH} 设置为 0.7、 K_{baseL} 设置为 0.75。

3.2 CFPREV 输出效果对比

在无协调控制策略情况下，1 000 kV 换流母线处设置单相接地故障，以故障发生时刻为 0 时刻点，故障持续 0.1 s，接地电感为 0.1~0.7 H，步长为 0.1 H，记录 CFPREV_L 启动时刻 T_{L1} 、CFPREV_H 启动时刻 T_{H1} 、低端换流器换相失败时刻 T_{L2} 以及高端换流器换相失败时刻 T_{H2} ，进一步计算 T_{L1} 和 T_{H1} 的偏差 ΔT_1 以及 T_{L2} 和 T_{H2} 的偏差 ΔT_2 ，结果如表 7 所示。

表 7 无协调控制策略时 CFPREV 启动与换相失败发生时刻

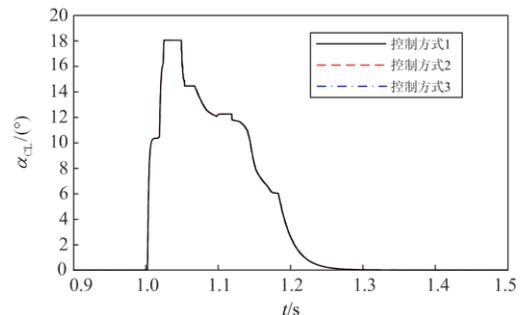
Table 7 Moment of CFPREV startup and commutation failure under no coordinated control strategy

时间	接地电感						
	0.1 H	0.2 H	0.3 H	0.4 H	0.5 H	0.6 H	0.7 H
T_{L1}/ms	0.7	1.2	1.5	1.7	1.9	2.5	3.0
T_{H1}/ms	10.5	11.8	16.5	16.5	29.0	29.2	29.8
$\Delta T_1/ms$	9.8	10.6	15.0	14.8	27.1	26.7	26.8
T_{L2}/ms	5.9	6.8	7.1	7.0	7.2	7.0	6.9
T_{H2}/ms	6.8	7.3	7.4	9.0	9.2	13.9	14.0
$\Delta T_2/ms$	0.9	0.5	0.3	2.0	2.0	6.9	7.1

无协调控制策略情况下，1 000 kV 换流母线处发生单相接地故障时，高低端换流器均发生换相失败，由表 7 可知， ΔT_2 均小于 ΔT_1 ，高端换流器发生换相失败的时刻均早于 CFPREV_H 的启动时刻，即无协调控制策略时，非故障层 CFPREV 启动时刻可能晚于其对应换流器发生换相失败的时刻，高低端换流器同时发生换相失败的风险较大。

为进一步对比有无协调控制策略对 CFPREV 输出的影响，在逆变侧 1 000 kV 换流母线处设置 1 s 时发生持续时间为 0.1 s 的单相接地故障，接地电感为 0.45 H，并在以下 3 种控制方式下进行仿真，记录 3 种控制方式下 CFPREV_H 和 CFPREV_L 的输出 α_{CH} 和 α_{CL} ，仿真结果如图 8 所示。

- 控制方式 1：无协调控制策略；
- 控制方式 2：本文所提协调控制策略；
- 控制方式 3： $K_H = K_L = 1$ 时协调控制策略。



(a) CFPREV_L 输出

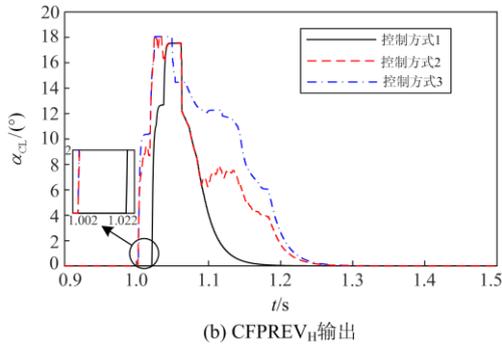


图 8 CFPREV 输出

Fig. 8 Output of CFPREV

由图 8(a)可知, 无论采用控制方式 1、2 还是 3, CFPREV_L 均在 1.002 s 时启动, 且输出的触发角提前量相同, 说明采用控制方式 2 和 3 不影响故障层 CFPREV 输出。由图 8(b)可知, 在 3 种不同的控制方式下, CFPREV_H 的输出有较大区别。采用控制方式 1 时, CFPREV_H 在 1.022 s 时启动, 比 CFPREV_L 滞后 0.02 s, 存在启动时刻晚于换相失败发生时刻的风险; 采用控制方式 2 时, CFPREV_H 在 1.002 s 时启动, 与 CFPREV_L 同步, 并迅速输出 9.3° 左右的触发角提前量, 保持约 0.018 s, 随后其输出随故障严重程度自适应地进行调整; 采用控制方式 3 时, CFPREV_H 与 CFPREV_L 输出相同, 虽能降低高端换流器换相失败风险, 但存在输出的触发角提前量过大的问题。协调控制策略能使非故障层 CFPREV 的启动时刻与故障层 CFPREV 同步, 有效降低了高低端换流器同时发生换相失败的风险。

3.3 换相失败预防效果对比

为验证本文所提协调控制策略降低高低端换流器同时发生换相失败风险的有效性, 在以下 2 种工况下分别采用上述 3 种控制方式进行仿真, 记录相关电气量的变化情况, 对比分析 3 种控制方式对系统运行特性的影响。

工况 1: 在逆变侧 500 kV 换流母线处, 设置 1 s 时发生持续时间为 0.1 s 的三相接地故障, 接地电感为 0.4 H, 在以上 3 种控制方式下进行仿真, 主要电气量变化情况如图 9 所示, 其中, 1 000 kV 换流母线线电压有效值 U_L 、1 000 kV 层有功功率 P_L 均为标幺值。

由图 9 可知, 采用控制方式 1、2 和 3 时, 故障层换流器均发生换相失败。采用控制方式 1 时, 非故障层换流器发生换相失败且关断角波动更剧烈; 换流母线电压和输送有功功率跌落较采用控制方式 2 和 3 时更严重。采用控制方式 2 和 3 时, 非故障

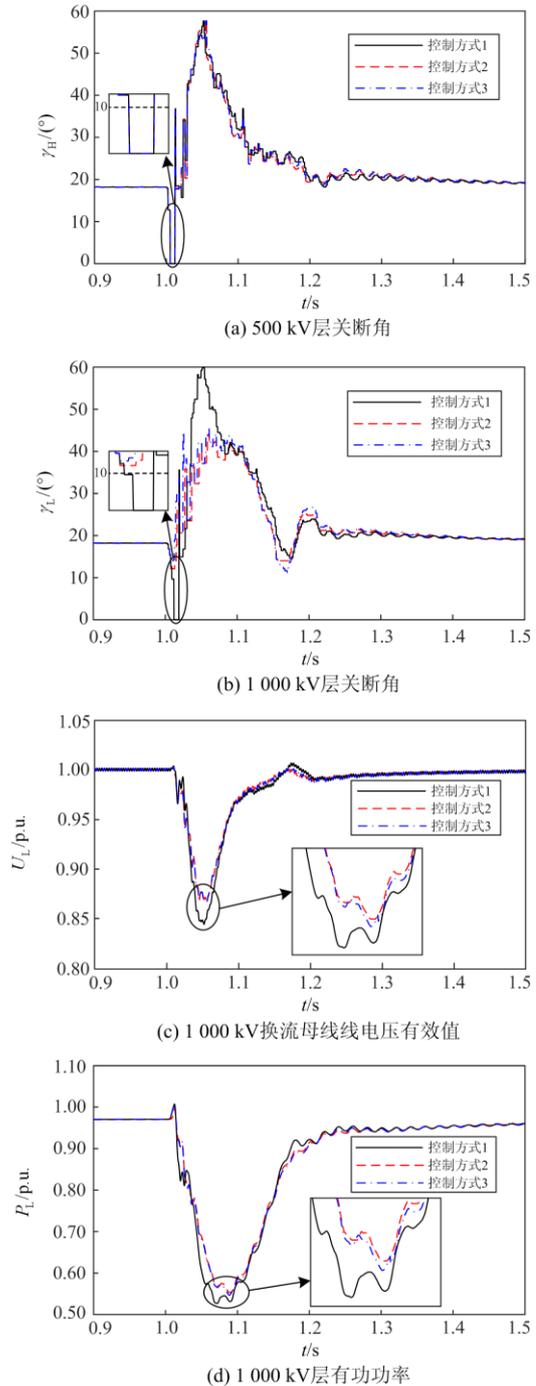


图 9 逆变侧 500 kV 换流母线三相接地故障仿真

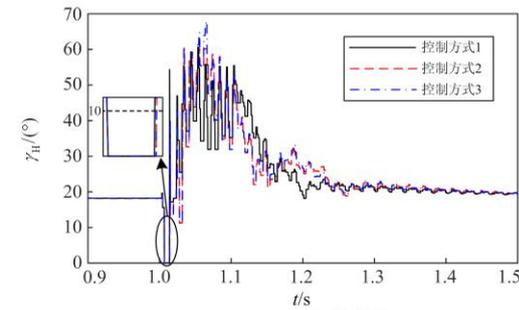
Fig. 9 Simulation of converter bus after a three-phase grounding fault in 500 kV AC grid of inverter side

层换流器没有发生换相失败且关断角的最小值分别为 12.11° 和 13.34°; 具有足够的换相裕度; 对比控制方式 2 和 3, 采用控制方式 3 时, 关断角具有更大的换相裕度, 但换流母线电压和非故障层换流器输送有功功率的跌落较控制方式 2 下更严重。因此,

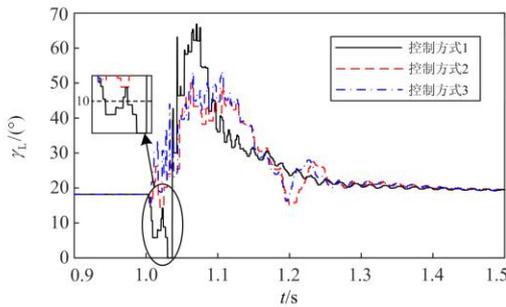
采用控制方式 2 和 3 均能有效避免对称故障下非故障层换流器发生换相失败，且控制方式 2 更有利于系统在对称故障下安全稳定运行。

工况 2：在逆变侧 1 000 kV 换流母线处，设置 1 s 时发生持续时间为 0.1 s 的单相接地故障，接地电感为 0.45 H，在以上 3 种控制方式下进行仿真，主要电气量变化情况如图 10 所示，其中，500 kV 换流母线路电压有效值 U_H 、500 kV 层有功功率 P_H 均为标么值。

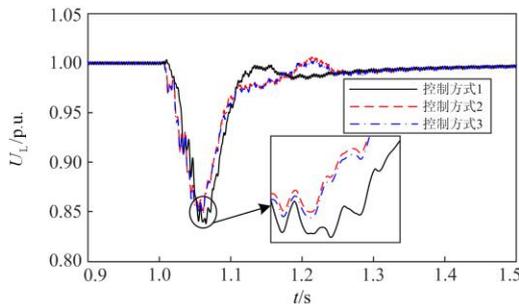
由图 10 可知，采用控制方式 1、2 和 3 时，故障层换流器均发生换相失败。采用控制方式 1 时，非故障层换流器发生换相失败且关断角波动更剧烈，换流母线电压和输送有功功率跌落较采用控制方式 2 和 3 时更严重；采用控制方式 2 和 3 时，非故障层换流器没有发生换相失败且具有足够的换相裕度；采用方式 2 更有利于改善故障后系统的运行性能，提高系统对故障的免疫能力。



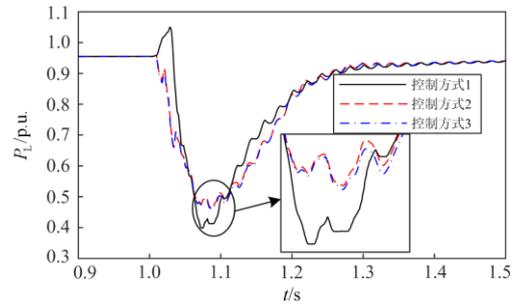
(a) 1 000 kV层关断角



(b) 500 kV层关断角



(c) 500 kV换流母线路电压有效值



(d) 500 kV层有功功率

图 10 逆变侧 1 000 kV 换流母线单相接地故障仿真

Fig. 10 Simulation of converter bus after a single-phase grounding fault in 1 000 kV AC grid of inverter side

4 结论

本文分析了分层接入系统高低端换流器同时发生换相失败的机理，并针对非故障层 CFPREV 的启动时刻存在延时，从而不利于降低高低端换流器同时发生换相失败风险的问题，提出了一种基于故障层触发角提前量前馈的高低端换流器 CFPREV 协调策略。基于理论和仿真分析得到以下结论。

1) 所提协调控制策略能使非故障层 CFPREV 的启动时刻与故障层 CFPREV 同步，从而降低非故障层换流器发生换相失败的风险。

2) 协调控制策略中协调系数能根据直流电流的变化作出调整，使非故障层 CFPREV 输出合适的触发角提前量，降低非故障层换流器换相失败风险的同时尽可能提高其输送功率。

3) 直接取高低端协调系数 K_H 和 K_L 为 1 时，协调控制策略虽牺牲了一定经济性，但能很好地预防高低端换流器同时发生换相失败，对实际工程具有一定参考价值。

参考文献

[1] 马实一, 衣传宝, 周泊宇, 等. 考虑储能对减小网架约束新能源弃电的影响研究[J]. 供用电, 2021, 38(12): 74-80.
 MA Shiyi, YI Chuanbao, ZHOU Boyu, et al. Research on energy storage configuration scheme for promoting renewable energy accommodation[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(12): 74-80.

[2] 杨国清, 薛雨, 姚李孝, 等. 光热电站并网对新能源电网运行特性的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 134-139, 146.
 ANG Guoqing, XUE Yu, YAO Lixiao, et al. A study on the influence of the connected photo-thermal power station on the operation characteristics of the new energy grid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 134-139, 146.

- [3] 燕伯峰, 潘婷, 李静立, 等. 基于供需双侧互动的随机机组组合模型及经济调度优化研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 50-56, 93.
YAN Bofeng, PAN Ting, LI Jingli, et al. Study on economic dispatching optimization and stochastic unit combination model based on supply and demand bilateral interaction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 50-56, 93.
- [4] 印月, 刘天琪, 何川, 等. 风-光-水-火多能互补系统随机优化调度[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 51-58.
YIN Yue, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Stochastic optimal scheduling for hybrid thermal-hydro-wind-photovoltaic multi-energy complementary system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 51-58.
- [5] 蒋彦翎, 孙华东, 郭强, 等. 电力系统广域协调运行控制系统框架设计[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 1-6.
JIANG Yanhong, SUN Huadong, GUO Qiang, et al. Design of power system wide-area coordinated operation and control architecture[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 1-6.
- [6] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [7] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission-systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [8] 应益强, 王正风, 吴旭, 等. 计及新能源随机特性的电网深度调峰多目标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 34-42.
YING Yiqiang, WANG Zhengfeng, WU Xu, et al. Multi-objective strategy for deep peak shaving of power grid considering uncertainty of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 34-42.
- [9] 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.
- [10] 熊华强, 杨程祥, 马亮, 等. 含分层接入特高压直流的交直流混联电网机电-电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 145-153.
XIONG Huaqiang, YANG Chengxiang, MA Liang, et al. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation of an AC/DC hybrid power grid with UHVDC hierarchical connection mode[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 145-153.
- [11] 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. A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [12] WU Z, LI S. Reliability evaluation and sensitivity analysis to AC/UHVDC systems based on sequential Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3156-3167.
- [13] XIAO H, LI Y, ZHU J, et al. Efficient approach to quantify commutation failure immunity levels in multi-infeed HVDC systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 1032-1038.
- [14] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.
- [15] 赵腾, 张焰, 叶冠豪, 等. 多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 157-164.
ZHAO Teng, ZHANG Yan, YE Guanhao, et al. Steady-state characteristics analysis for AC-DC hybrid system in hierarchical-infeed mode of multi-loop UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 157-164.
- [16] DING Y, WANG F, WANG W, et al. Analysis of DC line fault characteristics with the UHVDC hierarchical integration into AC power grid[C] // 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), June 4-7, 2020, Chengdu, China: 1539-1543.
- [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): 173-179.
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): 173-179.
- [18] WANG X, YUAN J, CHEN Q, et al. Small signal stability of UHVDC hierarchical connection to AC grid[C] // TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference, October 28-31, 2018, Jeju, Korea: 2302-2307.
- [19] 熊凌飞, 蒲莹, 张进, 等. 受端分层接入特高压直流系

统中点分压器故障控制保护策略研究[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4006-4014.

XIONG Lingfei, PU Ying, ZHANG Jin, et al. Control and protection strategy study of midpoint DC voltage divider malfunction of UHVDC with hierarchical connection mode[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4006-4014.

[20] 管永高, 张诗滔, 许文超. 受特高压直流分层接入方式下层间交互影响研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 32-37.

GUAN Yonggao, ZHANG Shitao, XU Wenchao. Study on hierarchical interaction of UHVDC hierarchical connection mode[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 32-37.

[21] 谢季平, 张文, 杨浩. 特高压直流分层接入下交直流系统中长期电压稳定协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 37-44.

XIE Jiping, ZHANG Wen, YANG Hao. Coordinated control for medium- and long-term voltage stability of AC/DC power systems with hierarchical connection mode of UHVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 37-44.

[22] 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.

[23] 郭龙, 刘崇茹, 贡飞龙, 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.

[24] 刘天宇, 王渝红, 龚鸿, 等. 特高压直流分层接入方式下受端换流母线静态电压稳定性研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3231-3237.

LIU Tianyu, WANG Yuhong, GONG Hong, et al. Study on static voltage stability at receiving converter bus of UHVDC hierarchical connection system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3231-3237.

[25] 付蓉, 孙万钱, 汤奕, 等. 特高压直流分层接入方式下稳态特性研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 81-86.

FU Rong, SUN Wanqian, TANG Yi, et al. Steady-state characteristics of UHVDC hierarchical connection mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 81-86.

[26] 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): 4356-4362.

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): 4356-4362.

[27] TAN Y, YAO W, SHU Z, et al. Coordination control of commutation failure preventions for UHVDC hierarchical connection to AC grid[C] // 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), November 6-8, 2018, Guangzhou, China: 2069-2615.

[28] 王渝红, 寇然, 宋瑞华, 等. 基于多判据预测的特高压直流分层接入系统换相失败抑制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1304-1313.

WANG Yuhong, KOU Ran, SONG Ruihua, et al. Commutation failure suppression strategy based on multi-criteria prediction in UHVDC hierarchical connection system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1304-1313.

[29] 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): 6563-6572.

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): 6563-6572.

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-10-18

作者简介:

王渝红(1971—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制、新能源并网; E-mail: yuhongwang@scu.edu.cn

陈立维(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电; E-mail: 1184486695@qq.com

曾琦(1977—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为高压直流输电、柔性直流输电、电力系统稳定与控制。E-mail: zengqi-hk@163.com

(编辑 许威)