华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化

李新年^{1,2},陈树勇^{1,2},庞广恒²,雷 霄²,刘 耀²,王晶芳² (1.北京交通大学电气工程学院,北京市 100044; 2.中国电力科学研究院,北京市 100192)

摘要:根据华东电网 2013 年夏季大负荷方式 BPA 动态等值数据,在电磁暂态程序中采用了与直流工程控制保护一致的详细模型建立华东电网多直流馈入输电系统研究模型,实现了南瑞集团公司、许继集团有限公司以及 ABB 集团多种技术路线直流控制保护详细模型的有效结合。对华东地区六回直流工程中采用的换相失败预测方法和低压限流参数进行对比分析,给出各工程间参数的差异。在此基础上,研究了优化换相失败预测参数、增加定关断面积法、增大额定关断角对抵御换相失败的作用。最后,通过对低压限流环节参数和瞬时电流限制的研究,提出了直流换相失败后的恢复策略,研究结果可为直流系统运行提供技术参考。

关键词:多直流馈入系统;换相失败;定关断面积;直流控制保护

0 引言

换相失败^[1-2] 是采用半控元件——晶闸管处于 逆变工作状态的一种常见的瞬时故障过程。随着锦 屏—苏州(以下简称锦苏)特高压直流的投产, 2012 年落点华东地区的直流已有六回,全年共计发 生 54 次换相失败。2013 年 8 月 19 日,进行练塘站 特高压主变压器充电试验时,导致团林—枫泾(以下 简称林枫)直流发生连续换相失败,直流双极闭锁, 换相失败预测和直流低压限流(VDCL)参数设置不 当是其中的一个原因。

多直流馈入系统换相失败问题是近年来研究的 热点问题,不过大多研究主要侧重于对多直流馈入 系统换相失败机理进行研究^[3-13],文献[14-16]开展 过单回直流换相失败预防策略研究,但针对实际工 程开展多直流馈入系统直流控制保护换相失败预防 及提高自动恢复能力等方面的研究较少。

本文对华东地区六回直流工程中采用的换相失 败预测方法和 VDCL 参数进行对比分析,给出了各 工程间的差异。在此基础上,根据华东 2013 年夏季 大负荷方式 BPA 动态等值数据,在电磁暂态程序建 立华东电网多直流馈入输电系统研究模型,研究提 出了直流输电系统换相失败预防和自动恢复能力的 优化措施,研究结果可为直流系统运行提供技术 参考。

1 仿真建模

本文采用 PSD-BPA 对华东电网 2013 年夏季 大负荷数据进行动态等值,等值网节点 80 个,其中 等值机 19 台、保留机组 4 台、保留线路约 110 条。 等值网保留宜都一华新(以下简称宜华)、葛洲坝一 南桥(以下简称葛南)、林枫、复龙一奉贤(以下简称 复奉)、锦苏、龙泉一政平(以下简称龙政)六回直流; 保留上海电网的 500 kV 双环网及上海一江苏、上 海一安徽的 500 kV 省际联络线。

根据等值网在电磁暂态程序^[11]上建立华东多 直流馈入系统模型,锦苏、复奉、葛南、林枫均采用与 实际工程一致的直流控制保护模型,首次实现了南 瑞集团公司、许继集团有限公司以及 ABB 集团多种 技术路线直流控制保护详细模型的有效结合,可以 进行换相失败过程的详细研究。为验证模型的有效 性,选取 2013 年 7 月 5 日 500 kV 泗泾一新余线路 故障导致上海四回直流同时换相失败的案例,在仿 真模型中进行故障再现,图 1 给出了仿真和现场的 对比波形。可以看出,仿真与现场实际录波基本一 致,模型可精确反映换相失败及其恢复的动态过程。 图中:U_{AC}为 500 kV 换流母线电压;I_D 为直流电流; α 为触发角。

2 换相失败预防措施优化研究

当两个阀之间进行换相时,刚退出导通的阀在 反向电压作用的一段时间内,如果未能恢复阻断能 力,原来预定退出导通的阀在其电压转变为正向时, 不用控制,立即重新导通,与刚导通的阀倒换相,这

收稿日期: 2014-03-05;修回日期: 2014-08-24。

国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG001-2012)。



图 1 泗泾—新余 B 相故障时复奉特高压直流 现场和仿真对比波形 Fig.1 Comparison between Fulong-Fengxian ultra-high voltage project and simulation waveforms when Sijing-Xinyu phase B AC line fault happens

种现象称之为"换相失败"。一次换相失败之后,流 经逆变器的直流电流一般会增加,若控制不当,后续 的阀不能恢复正常换相,持续发生换相失败,称为 "连续的换相失败"。换相失败是逆变器最常见的故 障^[17-24],从对华东电网历年换相失败调研分析 看^[14],绝大多数的换相失败都是由于交流故障引 起,首次换相失败一般很难避免,但在直流输电系统 设计和运行中采取适当的措施可以避免发生连续换 相失败,因此对换相失败的处理,主要的措施是如何 避免连续换相失败及故障后的恢复。通常采用以下 两种方法:①增大正常运行时的额定关断角γ;②检 测到将要发生换相失败时,将触发角减去一定角度 使越前触发角β增大,增加换相裕度。

2.1 换相失败预测优化措施

2.1.1 宜华、龙政、葛南、复奉、锦苏直流工程

直流工程在换相失败预测控制功能(CFPREV) 中^[15-16]采用零序检测法和 α/β 转换法判别交流故 障,宜华、龙政、葛南、复奉、锦苏直流工程中的相关 参数存在一定差异,下面通过对影响 CFPREV 重要 参数的差异进行比较分析,并给出优化建议。 1)零序检测和 α/β 转换法的启动值

CFPREV 的效果与故障发生的时刻存在密切 关系,表 1 分别给出交流系统发生单相故障, CFPREV 启动值为 0.08,0.11,0.14 下的仿真计算 结果。严重程度相同的交流故障如果发生在不同的 时刻,其结果会存在较大的差异。表中: I_{dm} 为直流 电流最大值;CF 为换相失败指示,1 表示发生换相 失败; T_{ad} 为 CFPREV 的启动时间。

表 1 单相故障时换相失败预测启动值对换相失败的影响 Table 1 Impact of starting value of commutation failure prediction on commutation failure when single-phase AC fault happens

l.L. trèr	CFPREV 启动值									
政障 时刻/	0.08				0.11			0.14		
ms	$I_{ m dm}/$	CF	$T_{ m qd}/$	$I_{\rm dm}/$	CF	$T_{ m qd}/$	$I_{\rm dm}/$	CF	$T_{ m qd}/$	
me	kА	Cr	ms	kA	Cr	ms	kA	Cr	ms	
0	3.59	0	1.7	3.59	0	2.1	4.89	1	5.1	
1	3.64	0	1.0	3.64	0	1.3	3.84	0	1.6	
2	3.82	0	1.0	3.82	0	1.0	3.81	0	1.2	
3	3.97	0	1.0	3.97	0	1.0	3.97	0	1.0	
4	4.07	0	1.0	4.07	0	1.0	4.07	0	1.0	
5	5.21	1	1.0	5.21	1	1.0	5.21	1	1.0	
6	4.00	0	1.0	4.00	0	1.0	3.98	0	1.2	
7	4.06	0	1.0	4.04	0	1.3	3.93	0	6.3	
8	3.75	0	3.0	3.75	0	3.2	4.10	0	6.2	
9	3.60	0	2.6	3.60	0	3.0	4.89	1	5.9	

适当降低启动值可加快 CFPREV 启动速度,若在 0 s 发生交流单相接地故障,当启动值由 0.08 增大为 0.14 时,CFPREV 启动时间由 1.7 ms 增加为 5.1 ms;启动值增大后,换相失败的次数由半个周期 内发生 1 次增加为 3 次;但启动值不宜设置过低,以避免 CFPREV 频繁启动给系统造成不必要的冲击。结合各直流工程的实际运行参数,龙政、葛南、复奉、锦苏直流工程的启动值设置较为合适(零序检测法 为 0.14, α/β 转换法为 0.15),宜华直流工程启动值 设置过大,建议宜华直流工程的启动值与其他直流 工程一致。

CFPREV补偿角度比例系数由 0.15 改为 0.2 (增大单位电压跌落提前触发的角度),虽然 CFPREV启动速度不变,但提前触发的角度增大, 也能减少发生换相失败的几率。但 CFPREV 补偿 角度比例系数的增加会导致逆变站直流电压瞬时下 降的幅度增加,引起直流电流增大,如参数配合不 好,反而可能导致发生换相失败,因此建议工程实施 前需经过仿真验证。

2)交直流电流差判据法

通过比较换流变压器阀侧交流电流与直流电流 来检测是否发生换相失败,差值大于设定值后输出 固定补偿角。可在零序检测法或 α/β 转换法未动作 情况下,启动 CFPREV,避免发生连续换相失败。 交直流电流差判据法逻辑图如图 2 所示。图中: *I*_{VYDD}和 *I*_{VDDD}分别为星形-星形或星形-三角形换流 变压器阀侧交流与直流电流的差流。



图 2 交直流电流差判据法逻辑图 Fig.2 Logic diagram of AC and DC differential criterion

交直流电流差判据法在各个工程设置不同,宜 华直流工程中设置补偿角为 5°,复奉和锦苏直流工 程中设置补偿角为 15°,龙政、葛南直流工程中未配 置该功能。结合零序检测和 α/β 转换法所对应的换 相失败预测角度输出值,补偿角设定为 10°~15°较 为合适,建议龙政、葛南直流工程中增加该功能,设 置补偿角为 15°。

2.1.2 林枫直流工程

1)定关断面积法

林枫直流工程根据当前时刻的换相电压和直流 电流计算保持额定关断角时所需的触发角α。当换 流母线电压下降时,换相角增大,为使关断角γ恒 定,需减小α。关断面积为换相电压在γ对应时刻 包围的面积,如图3中阴影区域所示。



根据换相电压可求出关断面积 A:

$$A = \int_{\pi-\gamma}^{\pi} U_{ac} \sin \theta d\theta = \sqrt{3} \int_{\pi-\gamma}^{\pi} U_{ac} \sin \theta d\theta = \sqrt{3} U(1 - \cos \gamma)$$
(1)

式中:Uac为换相电压幅值;U为相电压幅值。

定关断面积功能要求在换相电压波动的情况下 关断面积等于额定关断面积,可用式(2)表示:

$$\frac{A}{A_{\rm N}} = \frac{\sqrt{3}U(1 - \cos\gamma_{\rm ref})}{\sqrt{3}U_{\rm N}(1 - \cos\gamma_{\rm refN})} = 1$$
(2)

式中:A_N 为额定关断面积;γ_{ref} 为关断角参考值; γ_{refN}为额定的关断角参考值;U_N 为额定相电压幅 值。

根据式(2)得出关断角参考值 γ_{ref}为:

$$\gamma_{\rm ref} = \arccos\left(1 - \frac{1 - \cos\gamma_{\rm refN}}{\frac{U}{U_{\rm N}}}\right) \tag{3}$$

将 γ_{ref}作为定关断角控制的参考值,求出当前 时刻所需的 α。当换相电压下降时,定关断面积功 能增大 γ_{ref},表 2 给出了仿真结果。当换流母线电压 幅值下降量不大于 9.5%时,直流系统未发生换相失 败。当电压下降量大于 10%时,未采用定关断面积 法的直流系统发生换相失败。但当电压下降量不小 于 11%时,即使采用定关断面积法,直流系统仍发 生换相失败。定关断面积法在一定程度上提高了直 流系统抵御换相失败的能力,但在换流母线电压幅 值下降较多时,仍无法避免换相失败。

表 2 定关断面积法对预防换相失败作用 Table 2 Effect of extinction area method on commutation failure prediction

▲达丹光山口下陈县/则	是否换相失败			
·沃加 母线电压 Γ 阵 里/ /0	未采取	采取		
9.5	否	否		
10.0	是	否		
10.5	是	否		
11.0	是	是		

2) 增加零序检测及 α/β 转换法

林枫直流工程中换相失败预测数字信号处理器 (DSP)执行周期为 625 μs,其他直流工程 DSP 执行 周期在 80 μs 左右,林枫直流 DSP 执行周期比其他 工程慢。针对林枫直流工程,仿真比较了零序检测 和 α/β 转换法、电压跌落法以及定关断面积在单相、 三相交流故障以及换流母线电压畸变几种情况下的 启动时间,如表 3 所示。

表 3 几种不同原理的换相失败预防方法的启动时间比较 Table 3 Comparison of starting time of different principles of commutation failure prediction methods

協相生動於测士法	执行周	启动时间/ms				
换相大败位例刀法	期/ μs	单相故障	三相故障	电压畸变		
零序检测及 α/β 转换	80	0.1	0.1	0.5		
零序检测及 α/β 转换	625	0.6	0.6	0.9		
电压跌落	625	1.4	0.8	12.2		
电压跌落	1 000	2.1	1.1	12.2		
定关断面积	625	2.0	1.0	4.1		

由表 3 可见, DSP 执行周期越快, CFPREV 的

启动速度越快,抵御换相失败的能力越强;在相同执 行周期下,零序检测及 α/β 转换法比电压跌落法和 定关断面积法启动速度更快;对于逆变站附近变压 器充电导致换流母线电压畸变的情况,零序分量法 更为灵敏,启动速度更快。

建议林枫直流工程 CFPREV 中取消电压跌落

法,增加零序检测法及 α/β 转换法和定关断面积法,将 CFPREV 增加关断角由 6°改为 10°。避免增大的关断角返回过快引发连续换相失败,将其返回时间常数 T 由 100 ms 改为 300 ms,优化后的逻辑见图 4。硬件方面,建议在后续工程改造时,采用更快的 DSP。



图 4 林枫直流工程换相失败预测改进措施 Fig.4 Commutation failure prediction improvement measures in Tuanlin-Fengjing HVDC project

2.1.3 换相失败预测优化措施的仿真验证

在仿真模型中,按照上述建议的措施对换相失 败预测参数和逻辑进行了优化。选取华东地区 500 kV线路故障进行仿真校核。表4给出宜华直 流在逆变站出口和远端故障时换相失败预测优化前 后的计算结果,图5 和图6给出对应的仿真对比波 形。图中: I_{VY} , I_{VD} 分别为星形-星形和星形-三角 形换流变压器阀侧三相电流; U_D 为直流电压; P_D 为直流功率; σ 为换相失败预测输出的角度。

表 4 宜华直流工程换相失败预测优化后计算结果 Table 4 Results of Yidu-Huaxin HVDC project after commutation failure prediction optimization

故障 位置	优化 前后	换相失败情况	直流电 流最大 值	直流恢 复时间/ ms	换相失败预 测输出的 角度/(°)
黄渡一	优化前	Y桥多次,D桥2次	2.03	110	25.8
华新	优化后	Y桥多次,D桥2次	1.97	110	25.8
茅山—	优化前	Y桥2次,D桥1次	2.00	145	5.0
斗山	优化后	Y桥1,D桥0次	2.00	100	15.0

宜华、龙政、葛南直流工程采用 Mach2 平台, CFPREV 执行周期为 80 μs,采用优化措施后,对首 次换相失败改善不大,在一定程度上可以减少逆变 侧远端故障导致直流连续换相失败的几率,对于逆 变侧出口附近的交流故障,几乎没有效果。林枫直 流工程采用 SIMADYD 平台,CFPREV 执行周期为 625 μs 预防换相失败的效果不理想,增加零序检测 及 α/β转换法、定关断面积后可避免发生周期性换 相失败。

2.2 增加额定关断角

表 5 给出华东六回直流工程逆变侧额定关断角 γ_{ref}由 17°增加为 22°时逆变器消耗无功功率的情况,







γ_{ref}增大后换流器消耗无功功率随之增加,若要保持 逆变站与交流系统交换无功功率不变,奉贤站需增 加 2 组交流滤波器,华新、枫泾、政平和南桥站需增 加 1 组交流滤波器,苏州站未运行在额定功率,暂不 需要增加。当γ_{ref}增加到 22°时,若逆变站不增加交 流滤波器,奉贤站换流母线电压下降 5 kV,分接开 关上调 3 挡,其他直流换流母线电压下降 3~4 kV, 分接开关上调 2~3 挡。

表 5 额定关断角增加为 22°时各逆变器 消耗无功功率的情况统计

Table 5 Reactive power consumption statistics in inverters when rated extinction angle is increased to 22°

直流	换流母线电	换流器消耗无功	与 γ=17°时相比换流器
工程	压有效值	功率/Mvar	消耗无功增量/Mvar
复奉	0.969	3 816	435
林枫	0.966	1 835	211
葛南	0.986	642	79
宜华	0.960	1 843	264
锦苏	0.951	1 434	226
龙政	0.975	1 727	246

 γ_{ref} 增加得越多,抵御换相失败的能力越强,但 换流器需要吸收的无功功率越大,换流站需要增加 的无功补偿设备越多,经济性变差。研究表明,对于 逆变站远端交流故障,增加 γ_{ref} 对抵御换相失败的 能力明显提高,对于江苏地区的大部分交流故障,均 不会导致上海地区的四回直流工程发生换相失败, 但对逆变站出口附近故障,增加 γ_{ref} 对抵御换相失 败作用不大。

3 提高换相失败故障自动恢复能力的研究

发生换相失败后,直流电流突增,直流电压陡降,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;但有时过快的直流功率恢 复可能造成后续的换相失败。影响直流系统恢复的 主要控制环节为:VDCL 和故障后电流控制等。

3.1 VDCL 参数对直流恢复时间的影响分析

直流系统的功率恢复速度与 VDCL 的 $U_{\rm D}$ 上升 时间常数 $T_{\rm C}_{\rm UP}$ 存在密切关系, $T_{\rm C}_{\rm UP}$ 越小,直流恢复 越快。表 6 给出不同 VDCL 参数对直流系统恢复 的影响。表中: $U_{\rm D}_{\rm HIGH}$ 为 VDCL 的 $U_{\rm D}$ 高点值; $I_{\rm O}_{\rm LIM}$ 为直流指令限制值。 $T_{\rm C}_{\rm UP}$ 减小 20 ms,直流恢 复时间减小约 15 ms,减小 $U_{\rm D}_{\rm HIGH}$ 虽可缩短直流恢 复时间,但对换相失败期间抑制电流的作用减弱,不 建议修改。将 $I_{\rm O}_{\rm LIM}$ 减小到 0.1(标幺值),直流恢复 时间会明显增长。综合考虑,建议将宜华、复奉直流 工程的 $T_{\rm C}_{\rm UP}$ 由 40 ms 改为 20 ms,考虑到林枫直流 工程恢复过快易导致连续换相失败, $T_{\rm C}_{\rm UP}$ 由 40 ms 改为 60 ms。

表 6 VDCL 参数对换相失败后直流恢复的影响 Table 6 Influence of VDCL parameter on HVDC recovery after commutation failure

它旦	UDCL 会粉	直流恢复的时间 $T_{\rm pr}/{ m ms}$					
厅 5	VDCL 参数	复奉	林枫	葛南	宜华	锦苏	龙政
1	$T_{C_UP} = 40 \text{ ms}$	97	181	123	187	180	52
2	$T_{C_UP} = 20 ms$	76	167	107	171	147	40
3	$T_{\rm C_UP} = 20 {\rm ms}$, $U_{\rm D_HIGH} = 0.75$	74	152	119	156	153	39
4	$T_{\rm C_UP} = 20 {\rm ms}, I_{\rm O_LIM} = 0.1$	231	197	175	192	206	59
5	其余直流工程 T _{C_UP} =20 ms,林枫直流工程 T _{C_UP} =60 ms	76	203	107	171	147	40

3.2 瞬时电流限制

林枫直流在换相失败恢复过程中,整流站瞬时 电流控制功能将增加电流参考值,加快了直流系统 的恢复过程,但易造成电流过冲,引起连续换相失 败。为解决该问题,提出瞬时电流限制法:在换相失 败恢复过程中,整流站检测直流线路电流达到 80%,退出该功能。

表 7 为增加瞬时电流限制后,直流输送不同功 率水平下直流恢复过程电流最大值和直流恢复时间 的计算结果。表中:Pdm为直流功率最大值。

表 7 瞬时电流限制对直流输电系统恢复的影响 Table 7 Influence of instantaneous current limiting in HVDC system recovery

输送		原策略		增加瞬时电流限制			
功率	I dm	$P_{ m dm}$	$T_{\rm pr}/{ m ms}$	$I_{ m dm}$	$P_{ m dm}$	$T_{ m pr}/ m ms$	
1.0	1.45	1.36	184	1.31	1.16	185	
0.5	0.95	0.77	124	0.88	0.86	125	
0.1	0.28	0.26	172	0.16	0.14	188	

在故障恢复过程中采用瞬时电流控制,可限制 直流电流的超调,避免发生连续换相失败,但在直流 小功率情况下,直流恢复时间略有延长。

4 结语

本文在对华东地区直流换相失败预防方法和 VDCL参数分析的基础上,提出直流控制预防换相 失败和直流自动恢复能力的优化措施,并在电磁暂 态模型中进行了验证。

采用适当降低换相失败预测启动值、增大换流 母线单位电压跌落提前触发的角度、增加逆变站额 定关断角等措施,在一定程度上可减少逆变侧远端 交流故障发生连续换相失败的几率,但对首次换相 失败改善不大。减小 VDCL 电压上升时间常数可 以加快换相失败后的直流恢复速度,但易导致直流 电流过冲引发后续换相失败,工程参数优化时需要 综合考虑。 通过对华东地区直流工程换相失败的调研发现,绝大多数为单次换相失败,对交流系统冲击不大。从交流故障到直流发生换相失败一般仅需要几 毫秒,预防首次换相失败较为困难,因此,建议在今 后侧重研究多直流馈入系统间的协调优化措施,避 免发生连续换相失败。

参考文献

- [1] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [2] HANSEN A, HAVEMANN H. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1022-1026.
- [3] 邵瑶,汤涌.采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J].中国电机工程学报,2012,32(4):108-114.
 SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-114.
- [4] 李新年,刘耀,朱艺颖,等.华北电网直流多馈入系统动态特性实时仿真[J].电网技术 2011,35(8):75-80.
 LI Xinnian, LIU Yao, ZHU Yiying, et al. Real-time simulation of dynamic performance of multi-infeed UHVDC transmission system to be connected to North China power grid before 2015
 [J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 75-80.
- [5] 王晶芳,王智冬,李新年,等.含特高压直流的多馈入交直流系统 动态特性仿真[J].电力系统自动化,2007,31(11):97-102.
 WANG Jingfang, WANG Zhidong, LI Xinnian, et al. Simulation to study the dynamic performance of multi-infeed AC/DC power systems including UHVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 97-102.
- [6] 李新年,李涛,王晶芳,等.云广 800 kV 特高压直流对南方电网 稳定性的影响[J].电网技术,2009,33(20):21-26.
 LI Xinnian, LI Tao, WANG Jingfang, et al. Impacts of 800 kV DC power transmission from Yunnan to Guangdong on stability of China Southern power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 21-26.
- [7] 汪隆君,王钢,李海锋,等.交流系统故障诱发多直流馈入系统换相失败风险评估[J].电力系统自动化.2011.35(3):9-14.
 WANG Longjun, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Risk evaluation of commutation failure in muti-infeed HVDC system under AC system fault conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 9-14.
- [8] 王钢,李志铿,黄敏,等.HVDC 输电系统换相失败的故障合闸角 影响机理[J].电力系统自动化,2010,34(4):49-54.
 WANG Gang, LI Zhikeng, HUANG Min, et al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54.
- [9] 何朝荣,李兴源.影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究

[J].中国电机工程学报,2008,28(7):51-57.

HE Chaorong, LI Xingyuan. Study on mutual admittance and commutation failure for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 51-57.

- [10] 孙志媛,梁小冰,孙艳.基于 EMTDC 的多馈入直流输电系统仿 真研究[J].电网技术,2006,30(增刊2):295-298.
 SUN Zhiyuan, LIANG Xiaobing, SUN Yan. Simulation study of multi-infeed HVDC system based on EMTDC[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement 2): 295-298.
- [11] 龙霏,蔡泽祥,李晓华,等.含多馈入直流的广东电网 EMTDC 仿真建模[J].电力系统自动化,2010,34(3):53-57.
 LONG Fei, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Modeling and simulation of Guangdong power grid with multi infeed DC using EMTDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 53-57.
- [12] 郑传材,黄立滨,管霖,等.±800 kV 特高压直流换相失败的 RTDS 仿真及后续控制保护特性研究[J].电网技术,2011, 35(4):14-20.

ZHENG Chuancai, HUANG Libin, GUAN Lin, et al. RTDSbased simulation of commutation failure in ± 800 kV DC power transmission and research on characteristics of subsequent control and protection[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 14-20.

[13] 刘耀,庞广恒,李新年.特高压直流输电工程调试换流阀低压加 压试验时直流电压异常跌落分析[J].高电压技术,2013, 39(3):623-629.

LIU Yao, PANG Guangheng, LI Xinnian. Analysis on abnormal fall of DC voltage in converter low voltage test for UHVDC transmission project commissioning [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 623-629.

- [14] 李新年,庞广恒,王晶芳,等.华东地区多条直流换相失败故障 案例调研分析[R].北京:中国电力科学研究院,2013.
- [15] 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 components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6.
- [16] LÜ Pengfei, LI Xinnian, CHEN Lingfang, et al. A new method of preventing commutation failure in HVDC based on sin-cos components detection[C]// International Conference on Electrical Engineering, July 9-12, 2006, Yongpyong, Korea: 2-11.
- [17] 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.
- [18] 陈建斌,周保荣,熊卿,等.溪洛渡直流工程换相失败特性及相
 关因素分析[J].南方电网技术,2013,7(6):48-52.
 CHEN Jianbin, ZHOU Baorong, XIONG Qing, et al. Analysis
 - http://www.aeps-info.com 139

on the characteristics of commutation failure and its related factors of Xiluodu-Guangdong HVDC project [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(6): 48-52.

- [19] 刘济豪,郭春义,刘文静,等.基于改进换相面积的直流输电换 相失败判别方法[J].华北电力大学学报,2014,41(1):15-21.
 LIU Jihao, GUO Chunyi, LIU Wenjing, et al. Commutation failure detective method based on improved commutation area in HVDC [J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(1): 15-21.
- [20] 巢睿祺,叶义新,王杰.多馈入直流输电系统换相失败影响因素的分析与仿真[J].电力科学与工程,2013,29(11):11-16.
 CHAO Ruiqi, YE Yixin, WANG Jie. Analysis and simulation on influencing factors of the commutation failures in multi-infeed DC system[J]. Power Science and Engineering, 2013, 29(11): 11-16.
- [21] 石信语,程汉湘,王刘拴,等.±800 kV 特高压直流输电系统换相失败分析[J].广东电力,2013,26(10):9-12.
 SHI Xinyu, CHENG Hanxiang, WANG Liushuan, et al. Analysis on commutation failure of ± 800 kV extra high voltage direct current power transmission system [J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(10): 9-12.
- [22] 徐松林,黄少先.基于小波能量谱和灰色综合关联度的 HVDC 换相失败故障诊断[J].继电器,2012,40(3):85-89.

XU Songlin, HUANG Shaoxian. Fault diagnosis of

commutation failures in the HVDC system based on the wavelet energy spectrum and grey comprehensive relationship degree[J]. Relay, 2012, 40(3): 85-89.

- [23] 朱韬析,王超.天广直流输电系统换相失败的分析及处理[J].高 电压技术,2008,34(8):1769-1773.
 ZHU Taoxi, WANG Chao. Analysis and recovery of commutation failure in Tian-Guang HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1769-1773.
- [24] 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.
 YANG Xiu, CHEN Hongyu. Simulation study of commutation failure of HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 247-250.

李新年(1977—),男,通信作者,博士研究生,主要研究 方向:电力系统分析与仿真、直流输电和电磁暂态分析。 E-mail: lixn@epri.sgcc.com.cn

陈树勇(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向: 电力系统分析与新能源规划。

庞广恒(1987—),男,硕士,主要研究方向:直流输电工 程控制保护系统分析与仿真。

(编辑 孔丽蓓)

Optimization of Commutation Failure Prevention and Automatic Recovery for East China Multi-infeed High-voltage Direct Current System

LI Xinnian^{1,2}, CHEN Shuyong^{1,2}, PANG Guangheng², LEI Xiao², LIU Yao², WANG Jingfang²

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

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: On the basis of the dynamical equivalent data of East China power system in big load mode in summer of 2013, a research model of AC/DC transmission system in East China is built in the electro-magnetic transient program. The multiinfeed DC transmission system identically based as the actual project is established, realizing the combination of NARI Group Corporation', XJ Group Corporation' and ABB Group's various detailed technical route models of high-voltage direct current (HVDC) control and protection. The commutation failure prediction methods and the low voltage current limiting parameters of the six HVDC projects in East China are at present compared and analyzed and the parameter differences among them are given. The effects on preventing the commutation failure of different methods, such as optimizing commutation failure parameters, increasing the constant extinction area, increasing the rated extinction angle, etc., are researched. Finally, according to research on the low voltage current limiting parameters and limits for the instantaneous current, the recovery strategy after HVDC commutation failure is presented. The research results are able to provide technical reference to the operation of the HVDC system.

This work is supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (No. SGCC-MPLG001-2012).

Key words: multi-infeed high-voltage direct current system; commutation failure; extinction area; DC control and protection