

DOI: 10.7667/PSPC160087

宾金特高压直流换相失败保护的研究

许朋见, 黄金海, 许静静, 付艳, 范子强, 周晓风

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 随着特高压直流输送容量的增大, 换相失败所造成的功率波动越来越严重, 可能会引起交流电网失步的严重后果, 这已经成为换相失败保护动作的重要外部约束条件。通过对宾金直流换相失败进行分析, 得到交流系统对换相失败引起的直流功率跌落次数和故障持续时间的承受能力。之后分析了原有换相失败保护的原理、判据以及动作策略, 针对不满足交流系统承受能力的连续换相失败故障提出了增加双极换相失败加速段保护的优化方案, 并给出了保护判据、逻辑时序、定值延时及动作策略。最后, 对提出的双极换相失败加速段保护设计了相应软件程序, 在与实际工程一致的控制保护仿真试验平台上进行了仿真试验, 验证了新方案的可行性和可靠性。优化方案已成功应用于宾金特高压直流输电工程。

关键词: 特高压直流; 连续换相失败; 双极换相失败保护; 交流系统; 冲击

Study of Bin-Jin UHVDC project commutation failures protection

XU Pengjian, HUANG Jinhai, XU Jingjing, FU Yan, FAN Ziqiang, ZHOU Xiaofeng
(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: With the increase of the UHVDC capacity, the power fluctuations caused by commutation failures become more serious and probably induce out of step of AC grid which becomes an important external constraint condition of the commutation failure protection. This paper gets the ability of AC power grid to bear the number of DC power dropping and the fault duration time caused by commutation failures through DC commutation failure analysis firstly. Then the principle, criterion and action strategy of original commutation failure protection are introduced. Against the continuous commutation failures not meeting AC system tolerance capacity, an optimal scheme that adds double-pole commutation failure acceleration protection is proposed and the protection criterion, logic time sequence, setting values delay, and action strategy are given. Finally, the relevant software program of the proposed protection is written, and simulation experiments are done on the control and protection platform in line with real engineering which confirms the feasibility and reliability of the new scheme. The optimization scheme has been applied in the UHVDC transmission project from Yibin to Jinhua successfully.

Key words: UHVDC; continuous commutation failure; double pole commutation failure protection; AC system; shock

0 引言

换相失败是高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)输电系统逆变站最常见故障之一。换相失败发生时, 直流电压降低, 直流电流增大, 直流输送功率发生剧烈变化且减少, 换流阀寿命会缩短, 导致换流变压器直流偏磁及逆变侧弱交流系统过电压等后果^[1-8]。连续换相失败还可能引起直流保护闭锁直流系统, 并对交流系统产生冲击, 引起电网失步的严重后果。

目前, 国内学者对换相失败产生的原因及影响因素的研究较为深入, 对判断、预防和抑制换相失

败的研究也比较多^[9-14], 理论较为成熟, 但就直流输电系统发生换相失败后对交流电网的影响及应对策略的研究不多。文献[15-16]建立宁东直流仿真模型并分析了高压直流输电系统换相失败对交流线路保护的影响; 文献[17]分析了直流输电系统换相失败暂态恢复过程中对交流系统继电保护的影响。随着特高压直流输送容量的增大, 连续换相失败造成的功率波动越来越严重, 甚至会引起交流电网失步的严重后果, 交流电网系统对直流双极连续换相失败的承受能力已经成为换相失败保护动作的重要外部约束条件之一。

本文首先以宾金直流输电系统为例, 通过分析

连续换相失败后对交流电网的影响, 得出交流系统对连续换相失败承受能力的因素; 然后分析原换相失败的保护原理、判据及动作策略, 针对不满足交流系统承受能力的连续换相失败故障提出了双极换相失败加速段保护的优化方案; 最后对提出的优化方案设计了相应软件程序, 在与实际工程一致的控制保护系统仿真试验平台上进行仿真试验, 验证了方案的可行性和可靠性。

1 连续换相失败对交流系统的影响

1.1 换相失败原理

直流系统运行时, 当换流器的两个桥臂之间换相结束后, 退出导通的阀(V1)在反向电压作用期间没有完成换相过程, 则在阀电压变为正向时, 被换相的阀将向原来预定退出导通的阀倒换相, 最终导致同一桥臂上的两个阀(V1和V4)同时导通, 如图1所示, 即为换相失败。

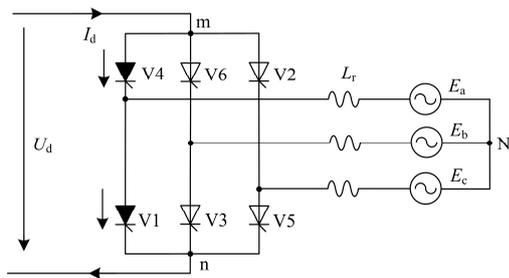


图1 换相失败示意图(V1 and V4 直通)

Fig. 1 Schematic of commutation failures (V1 and V4 direction connection)

对于短时的换相失败, 在故障清除后, 换流阀通常都能恢复正常换相。若引发换相失败的故障无法及时清除, 造成连续换相失败, 则可能引起直流保护闭锁直流系统, 并对交流系统产生冲击, 引起电网失步的严重后果。

通常能够引起直流输电系统发生连续换相失败现象的原因主要有以下几种:

- 1) 交流系统相继出现故障扰动, 如交流系统三相短路、单相接地以及断线等。
- 2) 交流系统出现故障扰动后长时间未切除, 如短路故障后开关拒动、后备保护动作等。
- 3) 直流输电的保护系统或阀控系统存在缺陷。

1.2 连续换相失败对交流系统的冲击

换相失败发生后直流系统向受端交流系统输送的有功功率会降低, 逆变侧无功补偿装置和交流滤波器产生的大量无功将瞬时倒送进交流系统, 此时相当于一个时变谐波电流源, 向交流系统注入很多

的暂态间谐波成分, 从而导致邻近交流线路的电压电流波形发生不同程度的畸变, 严重时可能导致交流电网失步。

2014年6月27日, 华东电网500 kV双兰5427线A相发生故障, 之后交流单相重合闸成功。故障期间宾金直流双极4个阀组在60 ms内连续发生5次换相失败, 对交流系统造成1次有功和无功功率的冲击, 持续时间约为160 ms, 之后故障消除, 系统恢复稳定运行。因为引起换相失败的故障产生后快速消失, 所以直流系统最终能够恢复正常运行, 没有造成严重后果, 但是本次故障还是对交流系统造成一次功率冲击。

2013年8月19日练塘站1000 kV #2主变空充产生励磁涌流, 最大峰值达4680 A, 持续时间超过10 s。故障后林枫直流枫泾站的换流母线电压发生畸变, 造成直流双极连续发生11次双6脉动换流器换相失败, 同时交流系统也受到十多次有功和无功功率的冲击。故障后2.6 s, 枫泾站保护系统满足直流双极换相失败保护动作条件, 林枫直流双极闭锁。由于引起换相失败的故障一直存在, 导致直流系统发生连续换相失败, 最后造成直流系统闭锁, 并对交流系统产生十多次功率冲击, 造成严重后果。

由此可见, 换相失败一旦发生, 就可能对交流系统造成功率冲击, 而连续换相失败对交流系统的影响尤为严重。

1.3 交流系统对连续换相失败的承受能力

图2为四川、华北、华中以及华东四个区域的主要交直流电网分布。如果宾金直流发生连续换相失败, 则会对特高压交流系统长-南-荆通道与川-渝-鄂通道造成有功和无功的冲击(图中虚线箭头所示), 导致交流电网功率波动过大, 甚至可能引起华北-华中电网、华中电网失步。

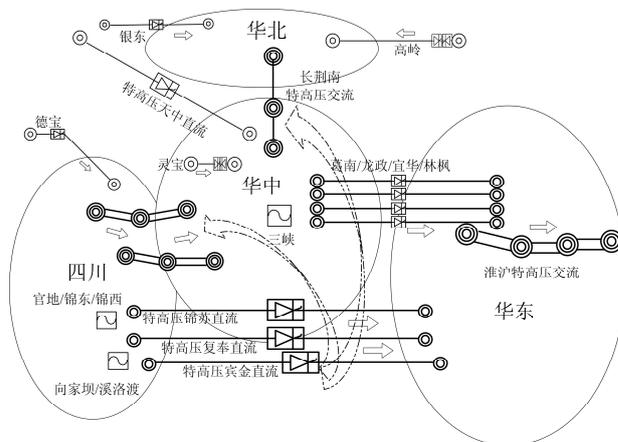


图2 国内主要交直流电网分布图

Fig. 2 Distribution of main AC/DC power grid in China

因此, 交流系统对宾金直流持续换相失败的承受能力(即宾金直流换相失败时没有造成华北-华中或川渝-华中东四省交流电网失步)已经成为换相失败保护动作的重要外部约束条件之一。

通过国家电力调度中心收集的数据以及在宾金直流仿真试验平台上模拟双极连续换相失败, 建立了不同输送功率下发生时间间隔不同的双极连续换相失败时, 交流系统能够承受的直流功率跌落次数及持续换相失败的时间, 如表 1 所示, 可以看出:

1) 宾金直流输送功率一定时, 发生连续换相失败的时间间隔越长, 交流系统能够承受的功率跌落次数越多, 同时能够承受的换相失败持续时间也越长; 当连续换相失败时间间隔达到一定阈值时, 功率跌落次数和连续换相失败持续时间将达到程序设定上限, 此时交流系统能够恢复稳定, 不会发生失步现象。即连续换相失败对交流系统的影响随着连续换相失败时间间隔的缩短而逐渐增强。

2) 当换相失败的时间间隔一定时, 随着直流输送功率的增大, 交流系统能够承受的功率跌落次数会减少, 同时能够承受的换相失败持续时间会变短; 当直流输送功率小于一定阈值时, 即使换相失败时间间隔变短, 交流系统也能够恢复稳定, 不会发生失步现象。即连续换相失败对交流系统的影响随着输送功率的增大而逐渐增强。

表 1 交流电网对宾金直流换相失败的承受能力

Table 1 Tolerance of power grid to commutation failures

时间间隔/ms	功率 4 000 MW		功率 6 000 MW		功率 8 000 MW	
	功率跌落次数	换相失败持续时间/s	功率跌落次数	换相失败持续时间/s	功率跌落次数	换相失败持续时间/s
200	7	1.8	4	1.2	2	0.4
300	9	2.7	5	1.5	3	0.9
350	12	4.2	5	1.8	4	1.4
400	12	4.8	7	2.8	6	2.4
500	12	6.0	12	6.0	12	6.0

综上所述, 交流系统对连续换相失败的承受能力受换相失败时间间隔和直流输送功率的影响。直流输送功率越高, 连续换相失败的时间间隔越短, 则交流系统能够承受的功率跌落次数就越少, 且能够承受的持续换相失败的时间也越短。

2 换相失败保护策略

2.1 换相失败保护原理

交流系统扰动或其他异常条件(如直流电流突增或触发脉冲丢失等)会造成逆变侧换流器应截止的阀持续导通, 导致同一换流器的上、下桥臂同时

导通, 形成类似于直流线路末端短路、交流开路的故障形态, 此时直流侧电流将会大于交流侧电流。换相失败保护就是针对这种故障而设立, 它根据交流侧电流与直流侧电流的大小来判断换流器是否发生了换相失败。

换相失败保护所用模拟量包括: 换流变阀侧 Y 绕组电流 I_{VY} , 换流变阀侧 D 绕组电流 I_{VD} , 换流阀高/低压侧出口电流 I_{DCP} 与 I_{DCN} 的最大值 I_{D_MAX} , 各模拟量在一次侧的测点如图 3 所示(仅列出极 1 的主回路及相应测点)。

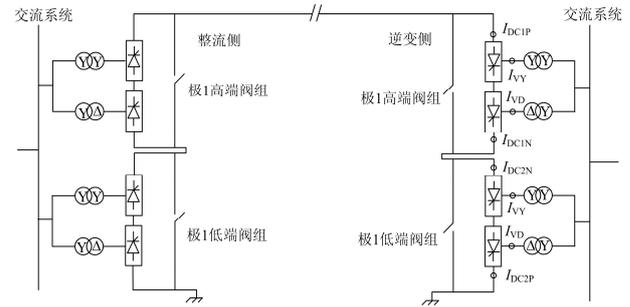


图 3 极 1 特高压直流系统的主回路及测点示意图

Fig. 3 Main loop and measure point of pole 1 UHVDC system

宾金特高压直流输电系统分为双极四个阀组, 其中每个阀组的换流器由两个 6 脉动换流器串联而成, 它们的换流变分别按照星(Y)型接法和三角(D)型接法, 换相失败保护分别对其进行判断, 即 Y 桥换相失败和 D 桥换相失败。

换相失败的判断逻辑如图 4 所示。

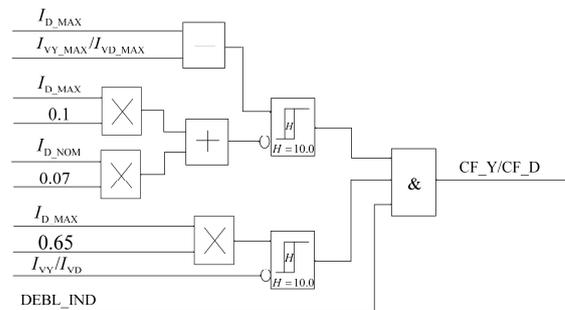


图 4 Y/D 桥换相失败判据框图

Fig. 4 Criterion logic of Y/D bridge commutation failures

图中 DBEL_IND 信号为本阀组解锁信号, 从图中可以得到 Y 桥和 D 桥的换相失败保护判据, 其中 Y 桥换相失败保护判据为

$$I_{D_MAX} - I_{VY} > 0.1 \times I_{D_MAX} + 0.07 \times I_{D_NOM}$$

$$\text{and } 0.65 \times I_{D_MAX} > I_{VY}$$

D 桥换相失败保护判据为

$$I_{D_MAX} - I_{VD} > 0.1 \times I_{D_MAX} + 0.07 \times I_{D_NOM}$$

$$\text{and } 0.65 \times I_{D_MAX} > I_{VD}$$

上述判据一旦满足则说明有换相失败发生, 为了提高系统的可靠性, 保护进行分段处理, 不同延时和条件采用不同的动作策略。

2.2 原换相失败保护动作策略

单个六脉动桥发生换相失败一般是由于换流阀的不正常触发造成的, 需要尽快停运直流; 而两个六脉动桥相继发生换相失败则可能是由于交流系统故障造成的, 保护逻辑和延时主要考虑同交流系统故障清除的最长时间进行配合。

换相失败动作后原有的保护动作结果如图 5 所示, 共分为三段。

单桥换相失败保护: 当检测到 Y 桥或 D 桥中一个发生换相失败而另一个没有动作, 展宽 150 ms (即 150 ms 内发生一次换相失败持续计算延时), 延时 650 ms 后快速停运直流, 如果有交流低电压信号则闭锁此段保护。

任一桥换相失败快速段: Y 桥或 D 桥发生换相失败, 动作时间考虑交流系统故障的最长切除时间并与之配合, 展宽 500 ms, 延时 2.6 s 后停运直流。

任一桥换相失败慢速段: Y 桥或 D 桥发生换相失败, 动作时间是考虑直流设备的耐受能力, 展宽 2 s, 延时 10 s 后停运直流。

从原有换相失败的保护范围可以看出, 三段保护都没有考虑交流系统对连续换相失败的承受能力, 所以原有保护仍有不足之处, 存在隐患, 需对其进行优化。

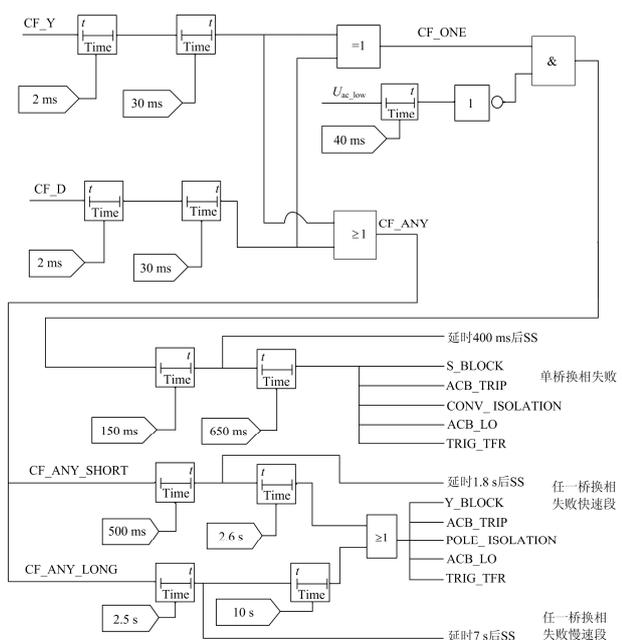


图 5 原有换相失败保护动作结果逻辑框图

Fig. 5 Action consequence logic of original commutation failures protection

2.3 换相失败保护动作策略优化

随着直流输电系统传输的功率越来越大以及交直流电网的日趋密集, 当发生连续换相失败时, 可能会对交流电网造成功率冲击, 甚至引起交流电网失步的严重后果。

为了能够快速、准确地判断故障, 实现投运状态双极的快速闭锁, 减少对交流电网系统的功率冲击, 提高交流电网系统运行的安全性与可靠性, 现对原换相失败保护动作策略进行了优化, 新的换相失败保护动作出口逻辑如图 6 所示 (虚线框内部分), 可以看出, 原单桥换相失败保护和任一桥换相失败慢速段保护的的动作结果保持不变, 对任一桥换相失败慢速段保护的时间定值进行了优化, 并增加了双极换相失败加速段, 具体优化包括以下几个方面。

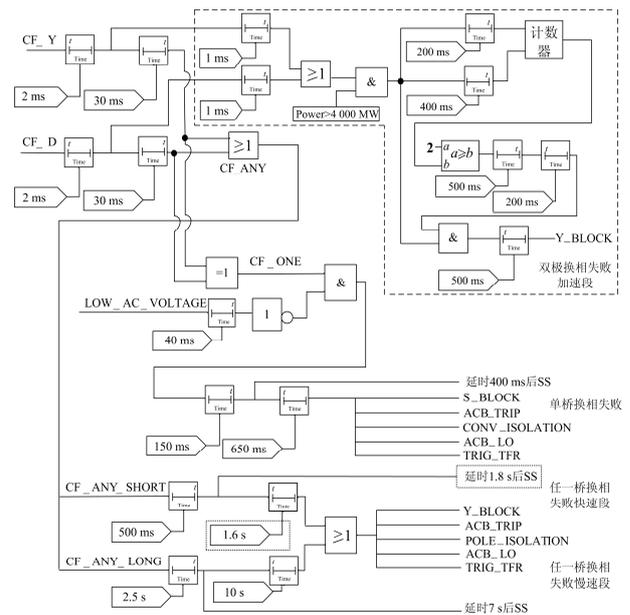


图 6 换相失败保护优化逻辑

Fig. 6 Optimized logic of commutation failures protection

1) 考虑与切换极控系统的延时 1.8 s 配合, 将原任一桥换相失败快速段保护的闭锁延时由 2.6 s 改为 1.6 s。

2) 新增双极换相失败加速段, 该段保护结合交流系统耐受连续换相失败的时间, 通过检测 Y 桥与 D 桥发生换相失败的时间间隔来判断是否停运直流, 且仅在双极功率大于 4 000 MW 时有效。

双极换相失败加速段采用计数原理: 一旦检测到任一桥换相失败(0 时刻), 计数器计 1 并保持; 之后在 200 ms 到 400 ms 的时间窗口内如果再次检测到任一桥换相失败, 计数器计 2 并自保持(在 200 ms 到 400 ms 时刻未检测到第二次任一桥换相失败则计数清 0 并重新计数); 计数器计 2 后 200 ms 到 500 ms 的时间窗口内再次检测到任一桥换相失败, 保护

发闭锁信号，信号出口脉宽为 500 ms。保护动作条件时序如图 7 所示。

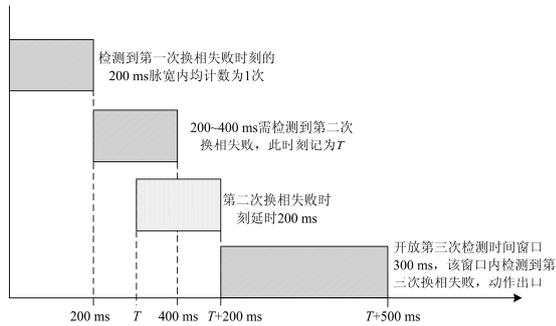


图 7 双极换相失败加速段动作条件时序图

Fig. 7 Action condition time sequence of double-pole commutation failures acceleration protection

3) 双极换相失败加速段动作后，会将动作信号传输至极控，极控若检测到本极在运阀组均动作后将结果发送到对极。极控检测到本极动作信号和对极动作信号同时满足，闭锁该极。

3 RTDS 仿真试验验证

将本文以上介绍的换相失败优化措施在宾金直流控制保护系统中进行相应的软件设计，使用与实际工程控制保护系统一致的宾金特高压直流工程仿真控制保护设备，通过 RTDS 仿真模型模拟丢脉冲故障和交流系统故障，使换相失败保护动作，从而验证优化逻辑本身的正确性。

3.1 RTDS建模及试验方案

RTDS为实时数字仿真仪，是一种专门设计用于研究电力系统中电磁暂态现象的装置。RTDS仿真装置通过功率放大器等接口设备与直流控制保护系统的主要设备连接，构成闭环的测试系统，可以全面测试直流控制保护系统的整体功能和性能。

通过RTDS搭建的仿真试验模型包括交流系统等值系统、换流变压器、双12脉动阀组、交流滤波器、直流滤波器、平波电抗器、阻波器、中性母线电容器、直流线路、接地极等元件。仿真试验中，交流场开关和直流场开关通过Profisim来模拟，其状态在RTDS、Profisim和控制保护系统间相互传输；RTDS模型的输出信号经D/A转换后，部分信号直接输出至控制保护设备，部分信号通过功率放大器实时地输出模拟量并连接至控制保护设备；控制保护系统输出控制信号或保护动作信号至RTDS，构成一个闭环系统，能够真实地反映直流输电系统的特性。图8为RTDS仿真模型的结构示意图。

3.2 仿真试验

在搭建好的 RTDS 仿真试验平台上，针对本文

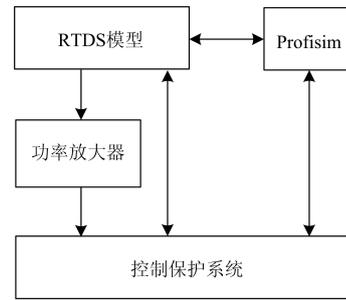


图 8 RTDS 仿真模型结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of RTDS simulation model

提到的换相失败保护优化方案进行了仿真试验，试验项目共计 11 项，主要针对新增双极换相失败加速段保护动作时序中的 4 个临近点而设定故障，即：

- 1) 第一次发生换相失败后 200 ms 时刻；
- 2) 第一次发生换相失败后 400 ms 时刻；
- 3) 第二次换相失败延时后 200 ms 时刻；
- 4) 第二次换相失败后 400 ms 时刻。

在 4 个临界点前后时刻模拟双极换相失败加速段动作，从而验证方案的可行性与可靠性，试验项目及结果见表 2。试验结果表明本文所提出的换相失败优化措施能够正确实现。

表 2 控制保护系统测试结果

Table 2 Test results of control and protection system

试验项目	试验数量	试验结果
任一桥换相失败快速段动作时间试验验证	2	正确
双极换相失败加速段试验验证	8	正确

图 9 是双极换相失败加速段保护正确动作的波形，系统双极双阀组解锁，全压运行，功率 4 200 MW，此时在 RTDS 上连续 3 次模拟逆变侧交流系统单相接地故障，从而产生任一桥换相失败，故障时刻分别为 $T_1=0$ 、 $T_2=220$ ms、 $T_3=T_2+220$ ms，每次故障持续时间 20 ms。

波形中所用到的模拟量和开关量说明如下：

- $U_{AC_L1/L2/L3}$: 金华站网侧三相电压；
- I_{D_MAX} : 阀高/低压侧出口电流的最大值；
- I_{VY_MAX} : Y 桥阀侧三相电流最大值；
- I_{VD_MAX} : D 桥阀侧三相电流最大值；
- CFP_Y: Y 桥发生换相失败；
- CFP_D: D 桥发生换相失败；
- BCFP_YBlock: 双极换相失败加速段动作信号。

通过试验波形可知，三次交流系统单相接地故障分别导致换流器发生换相失败，故障满足双极换相失败加速段的计数条件，保护动作后发出 Y 闭锁指令，实现了系统双极闭锁，避免了对交流系统的功率冲击。

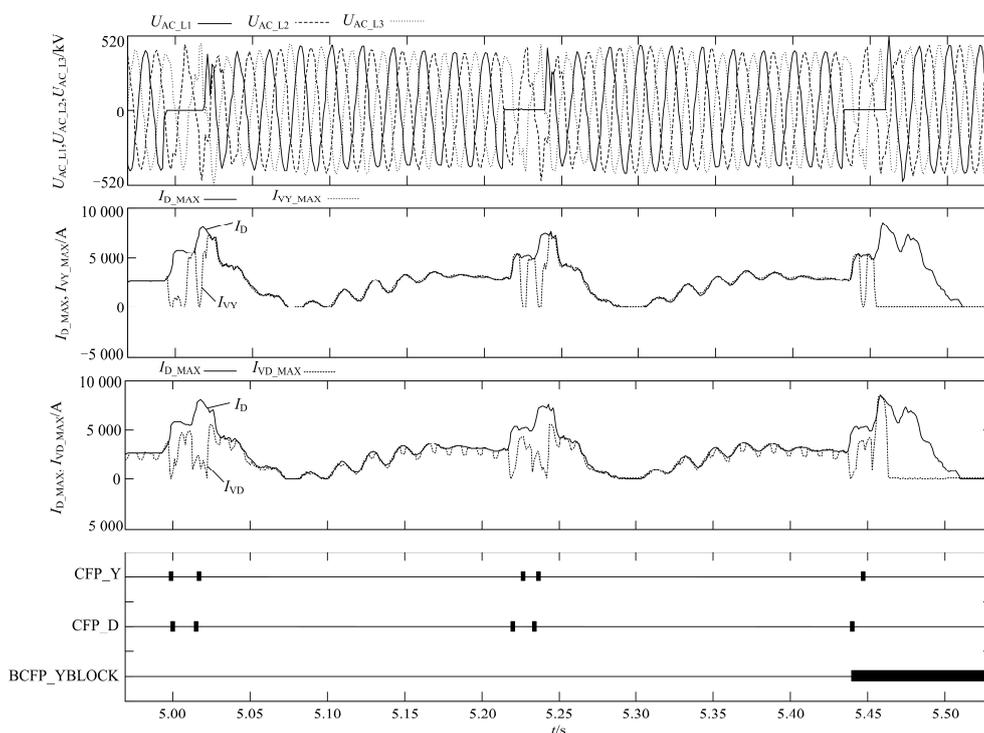


图9 双极换相失败加速段动作试验波形

Fig. 9 Action test waveform of double-pole commutation failures acceleration protection

4 总结

对于短时的换相失败, 故障清除后, 换流阀通常都能恢复正常换相。但是, 如果引发换相失败的故障无法及时清除, 造成长时间的连续换相失败, 则可能引起直流保护系统闭锁直流, 并对交流系统产生冲击, 引起电网失步的严重后果, 因此交流电网对换相失败的承受能力已经成为换相失败保护动作的重要外部约束条件之一。实验表明: 直流输电系统运行功率越高, 连续换相失败的时间间隔越短, 则交流系统能够承受的由连续换相失败引起的直流功率跌落次数就越少, 且能够承受的持续换相失败的时间间隔也越短。

原换相失败的三段保护分别针对触发脉冲故障、交流系统故障和设备的耐受能力而设置, 没有考虑交流系统对连续换相失败的承受能力, 所以存在一定的隐患, 需对其进行优化。为此本文提出了双极换相失败加速段的保护策略以避免连续换相失败对交流系统产生较大的功率冲击。实验证明, 新增换相失败保护策略能够在连续的双极换相失败发生时快速、准确地判断故障, 实现双极的快速闭锁, 减少对交流电网系统的功率冲击, 从而提高交流电网系统运行的安全性与可靠性。目前本段保护已经在宾金直流中得到应用。

参考文献

- [1] 吕鹏飞, 王明新, 徐海军. 三广直流鹅城换流站换相失败原因分析[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(18): 75-78.
LÜ Pengfei, WANG Mingxin, XU Haijun. Analysis of commutation failure reason in Three Gorges-Guangdong HVDC system Echeng station[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(18): 75-78.
- [2] 朱韬析, 宁武军, 欧开健. 直流输电系统换相失败探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 116-120.
ZHU Taoxi, NING Wujun, OU Kaijian. Discussion on commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 116-120.
- [3] 慈文斌, 刘晓明, 刘玉田. ± 660 kV 银东直流换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 134-139.
CI Wenbin, LIU Xiaoming, LIU Yutian. Commutation failure simulations of ± 660 kV Yindong-Jiaodong HVDC line[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 134-139.
- [4] 欧开建, 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.
- [5] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.
HE Zhaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [6] 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): 1769-1733.
ZHU Taoxi, WANG Chao. Analysis and recovery of commutation failure in Tian Guang HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1769-1733.
- [7] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
- [8] 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.
- [9] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究的综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Current situation of research on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [10] 欧开建, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(二)——避免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 6-9.
OU Kaijian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 2: measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 6-9.
- [11] 彭忠, 李少华, 李泰. 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. 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 傅闯, 饶宏. 高压直流系统应对换相失败的定关断角控制策略[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(6): 17-22.
FU Chuang, RAO Hong. The strategy of gamma control over commutation failure for HVDC transmission systems[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2(6): 17-22.
- [15] 于占勋, 朱倩茹, 赵成勇, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(一)——含直流馈入的山东电网 EMTDC 建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 58-64.
YU Zhanxun, ZHU Qianru, ZHAO Chengyong, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection part one: modeling and simulation of Shandong Grid with DC feed-in system based on EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 58-64.
- [16] 雷虹云, 于占勋, 赵强, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(二)——直流换相失败瞬态特征分析及对交流线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 65-71.
LEI Hongyun, YU Zhanxun, ZHAO Qiang, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection part two: analysis of fault transient response characteristics and influence of HVDC commutation failure on AC line protections[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 65-71.
- [17] 邵震, 王炳炎. 直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 42-45.
SHAO Zhen, WANG Bingyan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 42-45.

收稿日期: 2016-01-15; 修回日期: 2016-06-14

作者简介:

许朋见(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电保护软件设计及研究; E-mail: 892625733@qq.com

黄金海(1975-), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究;

许静静(1975-), 女, 工程师, 长期从事电力系统继电保护工程相关工作。

(编辑 魏小丽)