

宝鸡—德阳 HVDC 换相失败仿真分析

张 强, 欧阳瑞, 冯 中

(绵阳市电业局游仙供电局, 四川 绵阳 621000)

摘 要:换相失败是高压直流输电技术中逆变器最常见故障之一。以 2010 华北—华中联网数据为基础, 采用 PSS/E 分析了四川电网故障对宝鸡—德阳规划高压直流项目的换相失败影响, 讨论了调整直流系统运行参数以改善换相失败的措施。仿真分析结果表明, 四川省内大部分 500 kV 交流短路故障都将导致直流系统换相失败, 但故障清除后直流系统均能较快恢复运行, 直流系统运行参数对换相失败影响较大。

关键词:宝鸡—德阳直流工程; 换相失败; PSS/E

Abstract: Commutation failure is one of the common failures in inverters of HVDC transmission system. According to the data of Northeast China—Central China Power Grid in 2010, the influence the failures of Sichuan Power Grid on the commutation failures of the planning Baoji—Deyang HVDC transmission system is analyzed using PSS/E. Measures of adjusting HVDC operating parameters are discussed to improve the performance of HVDC system during commutation failures. Simulation results show that the Baoji—Deyang HVDC system will suffer commutation failures with most of the 500 kV faults of Sichuan Power Grid but it can rapidly recover from commutation failures after the fault is cleared. Operating parameters of HVDC system is of great influence on the commutation failures.

Key words: Baoji—Deyang HVDC project; commutation failures; PSS/E

中图分类号: TM 743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)02—0010—04

根据国家电网公司规划, 西北—华北第二回直流联络线将于 2010 年建成, 线路起点位于陕西宝鸡换流站, 落点为四川德阳万寿桥换流站。线路长度为 574 km, 工程额定直流电压 ± 500 kV, 额定电流为 3 kA, 双极额定输送容量为 3 000 MW。该工程建成后可以实现西北火电与四川水电的互援互济, 显著提高系统经济性。

换相失败 (commutation failure, CF) 是直流系统最常见的故障之一。一般的单次换相失败仅会导致短暂的功率中断, 其对系统的影响并不严重。但如果直流系统恢复中出现连续换相失败将有可能导致直流线路发生闭锁, 从而引起较严重的稳定问题。宝鸡—德阳直流线落点于德阳, 靠近成都、德阳和绵阳等重负荷区, 因此需要研究直流线路发生换相失败对系统的影响。

以 2010 年华北—华中联网电网为基础数据, 利用 PSS/E (power system simulator for engineering) 分析宝鸡—德阳单极投运时四川电网交流故障对该线路换相失败的影响, 并分析了直流系统控制参数对直流电路换相失败的影响。

1 换相失败机理分析与换相失败判据

当逆变侧换流器两个桥臂之间换相结束后, 刚退出导通的阀在承受反向电压的时间内, 如果换流阀载流子未能完成复合并恢复正向阻断能力, 或在反向电压持续期间未能完成换相, 此时当阀两侧电压变为正向后, 预定退出阀将发生误导通, 从而引起换相失败。

正常运行时逆变侧换相重叠角的计算公式为^[1]

$$\mu = \beta - \arccos \left\{ \frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U_{ac}} + \cos(\beta) \right\} \quad (1)$$

式中, β 为超前触发角; I_d 为直流线路电流; X_c 为换相电抗; U_{ac} 为换流变电网侧交流电压折算到阀侧的换相电压。

从式中可以看出, 当交流系统故障导致逆变侧换相电压 U_{ac} 下降后, 换相重叠角将增大, 致使待退出阀建立恢复阻断的时间 (熄弧角) 变小, 从而导致直流线路换相失败发生。

准确判断直流线路换相失败的判据是换相完成后换流阀承受反向电压—时间面积, 实际分析中一般

取熄弧角 γ 为换相判据。这种判据一般较常见于电磁暂态分析模型。但是对于电网分析中更常用的机电暂态分析程序,一般都采用简单的换相失败电压判据。电力系统综合分析程序 PSASP 采用经验判据,认为逆变侧交流电压下降至 $0.7 p.u$ 直流线路即发生换相失败,高于 $0.7 p.u$ 即恢复换相^[2]; BPA 采用逆变侧交流母线电压和电压下降率同时判断直流线路换相失败,可指定不同的换相失败电压和恢复换相电压^[3]; PSS/E 中的 CDC4T、CDC6T 等模型也可以指定交流母线电压判定直流线路换相失败^[4]。

文献 [5] 指出直流线路发生换相失败时的电压跌落可以表示为

$$\Delta V = 1 - \frac{I'_d X_{C_{pu}}}{I_l X_{C_{pu}} + \cos\gamma_{CF} - \cos\gamma} \quad (2)$$

式中, I'_d 为直流电流变化; $X_{C_{pu}}$ 为换相电抗标么值,一般就是换流变短路电抗; γ_{CF} 是发生换相失败时的最小熄弧角; γ 为正常运行时的熄弧角。

上式的简单分析和文献 [6] 的分析结果也表明,换相失败电压随线路运行状态变化而变化,并非一个固定值。因此,像 PSASP 那样采用固定的换相失败电压值判断不同运行下直流系统换相失败是不合理的,可能造成分析错误。

但是,由于采用 γ 角判据的电磁暂态分析存在仿真规模的限制,在分析大规模交直流电力系统动态特性时只能采用机电暂态换相失败电压判据。而且,从式 (2) 可以看出,在确定的运行方式下,最小熄弧角判据和最小电压跌落判据对于判定直流线路换相失败的结果是一致的,两参数满足上式约束。因此,根据式 (2) 确定的换相失败电压,利用 BPA 或 PSS/E 等工具分析在确定运行方式下直流系统换相失败是可取的。

利用 PSS/E 分析宝鸡—德阳直流系统的换相失败特性。取直流线路初始运行状态为整流测定整流侧直流功率为 $1500 MW$, 逆变侧定整流侧电压为 $500 kV$, 整流侧燃弧角为 16.262° , 逆变侧熄弧角为 17.7898° , 万寿桥母线电压为 $0.9952 p.u$ 。逆变侧送出功率 $1428 MW$, 逆变侧采用 6 组并联电容器组作为无功补偿, 每组容量 $120 Mvar$ 。逆变侧换流变短路阻抗为 16.8% 。取换相失败熄弧角为 8° , 通过式 (2) 可计算得到换相失败压降为 $\Delta V = 0.1848$, 换相失败电压为 $U_{ac} = 0.8113 p.u$ 。

2 CDC6T模型的换相失败判据

PSS/E 是目前公认的分析交直流电力系统机电暂态较好的软件。该软件内建了数种准稳态直流模型,其中以 CDC4T 和 CDC6T 模型较为常用。CDC6T 是 CDC4T 模型的扩展,其换相失败控制与换相恢复策略如下。

(1) 换相失败策略: 当逆变侧换流母线交流电压持续低于换相失败电压 $VACBYP(CON(J+27))$ 不少于时间 $TDEBYP(CON(J+28))$ (交流电压判据, 延迟换相失败) 或逆变侧直流电压低于换相失败直流电压 $VBYPAS(CON(J+7), kV)$ (直流电压判据, 立即换相失败) 时, 直流线路发生换相失败, 程序以旁通模拟。在旁通过程中, 线路电流仍维持为正常运行电流, 但逆变侧直流电压将为 0, 整流侧直流电压降低以维持线路电流。

(2) 换相失败恢复策略: 当线路旁通时间不少于最小旁通时间 $TBYPASA(CON(J+10))$, 且逆变侧换流母线交流电压持续高于解除旁通电压 $VUNBY(CON(J+8))$ 不少于持续时间 $TINBYP(CON(J+30))$ 后, 直流线路恢复换相。

取宝鸡—德阳直流线路换相失败交流电压为 $0.8113 p.u$, 换相失败直流电压为 $350 kV$, 且不考虑延迟换相失败; 最小换相失败时间 $0.1 s$ 换相失败恢复判据为换流母线电压持续高于 $0.85 p.u$ 不少于 $0.1 s$ 。

需要说明的是, CDC6T 由于是准稳态模型, 无法模拟非对称故障对直流系统换相的影响。当需要详细研究非对称故障对直流系统的影响时, 一般需要采用电磁暂态模型进行分析, 譬如 PSCAD/EMTDC 等软件。

3 线路短路故障对换相失败的影响

重点分析了 $500 kV$ 线路两侧分别发生短路故障对宝鸡—德阳直流线路换相失败的影响。故障设置为 $0.1 s$ 线路一侧发生短路故障, $0.1 s$ 后通过切除故障线路清除故障, 仿真时长 $5.0 s$ 。

3.1 机电暂态仿真分析结果

对四川省内的所有 $500 kV$ 线路进行 N-1 暂态仿真分析可知, 四川省内绝大部分 $500 kV$ 线路短路

故障均会导致直流线路发生换相失败。表 1 为导致直流线路换相失败的故障仿真结果,表中, t_F 为发生换相失败时刻, V_{CF} 为换相失败时刻万寿桥母线电压。由于 PSS/E 中线路一侧发生短路与该侧母线短路在故障期间响应结果一致,表中以母线形式列出。

表 1 换相失败故障信息

故障侧母线	t_F / s	$V_{CF} / p.u.$
万寿桥 500 kV	0.100	0.000 0
谭家湾 500 kV	0.100	0.000 0
龙王 500 kV	0.100	0.288 0
丹景 500 kV	0.100	0.320 2
绵阳 500 kV	0.100	0.363 5
蜀州 500 kV	0.100	0.404 5
尖山 500 kV	0.100	0.406 6
太白 500 kV	0.100	0.581 0
紫坪铺 500 kV	0.100	0.586 2
茂县 500 kV	0.100	0.592 9
雅安 500 kV	0.100	0.604 0
南充 500 kV	0.100	0.610 7
东坡 500 kV	0.100	0.618 1
洪沟 500 kV	0.100	0.635 2
广元 500 kV	0.100	0.689 1
黄岩 500 kV	0.100	0.697 3
广安 500 kV	0.100	0.706 1
南天 500 kV	0.100	0.781 9
石棉 500 kV	0.100	0.788 2
大杠 500 kV	0.100	0.804 0
泸州 500 kV	0.100	0.808 6
临巴 500 kV	0.100	0.810 5
龙头石 500 kV	0.104	0.808 6
达州 500 kV	0.100	0.820 2
普提 500 kV	0.106	0.810 7
瀑布沟 500 kV	0.124	0.810 7

从表 1 可以看出,绝大部分故障在 0.1 s 故障时刻即发生换相失败,也有部分故障在故障期间换相失败。受 PSS/E 仿真结果输出的影响, PSS/E 输出的 0.1 s 网络故障时刻的电压值为判断直流线路是否发生换相失败后的电压值,该值并不是实际判定直流线路换相失败的电压,因此存在部分故障如达州 500 kV 母线附近线路短路故障后其输出电压高于换相失败电压但线路仍然换相失败的现象。

表 2 为不会导致直流线路换相失败的故障信息,表中 $V_{0.1}$ 为故障时刻万寿桥母线电压。

下面将仿真结果按照故障时刻换相失败、故障中换相失败和未发生换相失败分成 3 类,分别分析直流线路的动态过程。

表 2 不发生换相失败故障信息

故障侧母线	$V_{0.1} / p.u.$
叙府 500 kV	0.861 4
九龙 500 kV	0.878 3
二滩 500 kV	0.893 1
西昌变 500 kV	0.894 9
石板箐 500 kV	0.913 3

3.2 故障时刻换相失败算例

以谭家湾—龙王线谭家湾侧发生短路故障为例,仿真过程中万寿桥站母线电压如图 1 所示。从图 1 中可以看出,故障后逆变侧交流母线电压迅速下降至接近 0,逆变侧发生换相失败。

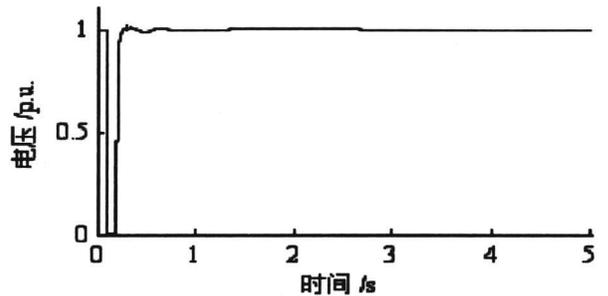


图 1 谭家湾—龙王线故障万寿桥电压曲线

图 2 为直流线路直流电流曲线。从图 2 中可以看出,故障过程中直流线路电流维持在 3.0 kA,故障切除后 0.1 s 即 0.3 s 时,直流线路满足恢复换相条件。在换相失败恢复过程中,直流电流按照设定增长率迅速恢复至额定值。

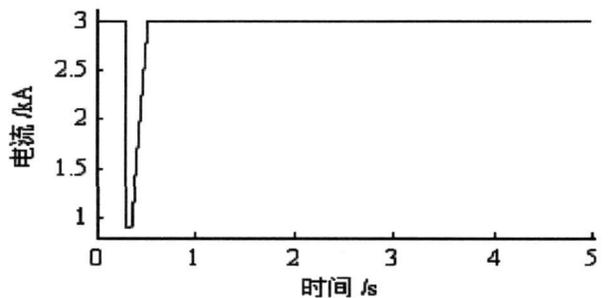


图 2 谭家湾—龙王线故障直流电流曲线

图 3 为直流线路整流侧和逆变侧直流电压曲线。可以看到,逆变侧直流电压在故障中为 0,整流侧电压大约为 24 kV 以维持直流电流。

3.3 故障过程中换相失败算例

以瀑布沟—东坡线瀑布沟侧发生短路故障为例,仿真过程中万寿桥站母线电压如图 4 所示。从图 4 中可以看出,虽然故障时刻逆变侧母线电压尚未低于设定换相失败电压,但故障中换流站交流母线电压持续下降,直至 0.124 s 电压低于换相失败电压,直流

线路发生换相失败。

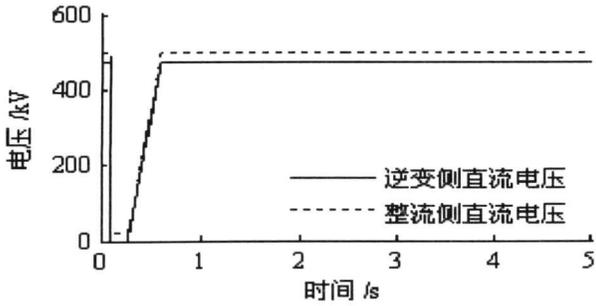


图 3 谭家湾—龙王线故障直流电压曲线

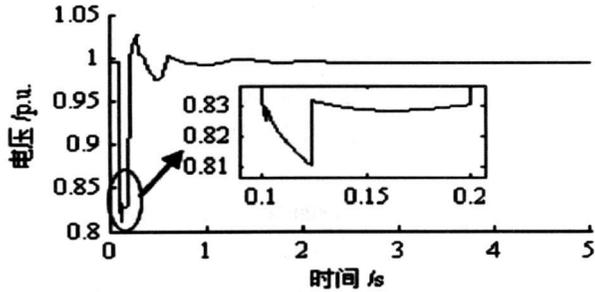


图 4 瀑布沟—东坡线故障万寿桥电压曲线

图 5 为直流线路直流电流曲线,图 6 为直流线路整流侧和逆变侧直流电压曲线。从图中可以看出,由于故障时刻交流电压下降,逆变侧和整流侧直流电压都迅速下降。由于直流线路定功率运行,直流电流上升,以维持功率恒定。在 0.102 s 时刻,逆变侧直流电压低于 400 kV,直流线路转入定电流控制方式,直流电流限制为 3.0 kA。故障清除 0.1 s 后(即 0.3 s 时),直流线路满足恢复换相条件,直流电流和直流电压按照预定恢复速度恢复。

3.4 不发生换相失败算例

以洪沟—叙府线叙府侧发生短路故障为例,仿真过程中万寿桥站母线电压如图 7 所示。故障后万寿桥站电压下降为 0.8614 p.u.,直流线路不发生换相失败。

图 8 为直流线路直流电流曲线,图 9 为直流线路整流侧和逆变侧直流电压曲线。从图中可以看出,

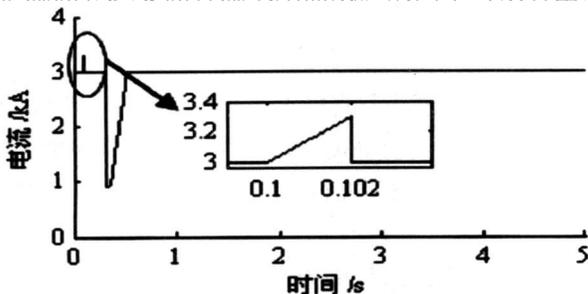


图 5 瀑布沟—东坡线故障直流电流曲线

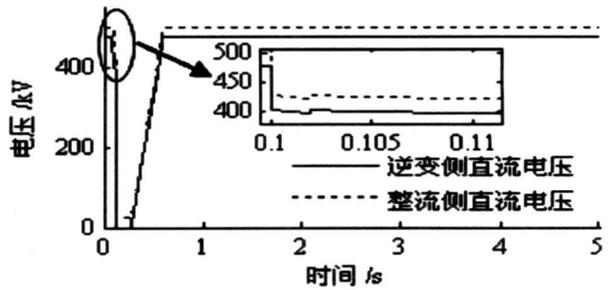


图 6 瀑布沟—东坡线故障直流电压曲线

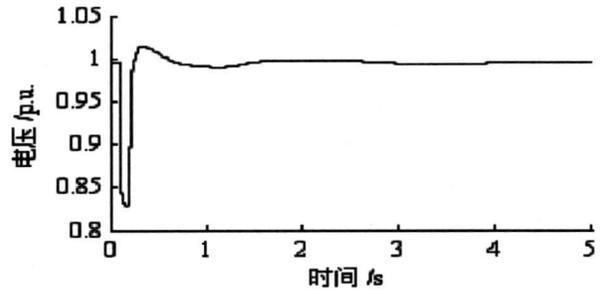


图 7 洪沟—叙府线故障万寿桥电压曲线

由于故障时刻交流电压下降,逆变侧和整流侧直流电压都迅速下降。由于直流线路定功率运行,直流电流上升,以维持功率恒定。在 0.102 s 时,由于直流系统低压限流 (voltage dependent current order limiter VDCOL) 的作用,直流电流被限制在 3.3 kA。在 0.124 s 时刻,逆变侧直流电压低于 400 kV,直流线路转入定电流控制方式,直流电流限制为 3.0 kA。故障清除后(即 0.2 s 时),直流线路恢复正常运行。

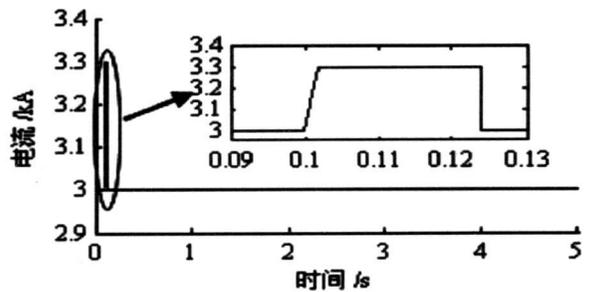


图 8 洪沟—叙府线故障直流电流曲线

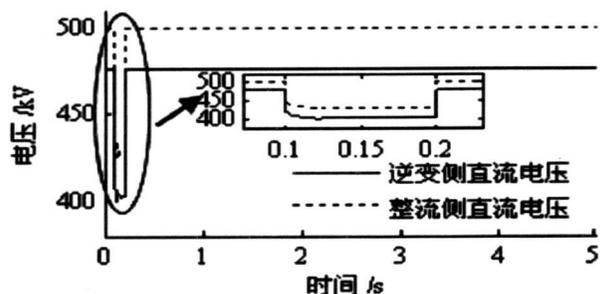


图 9 洪沟—叙府线故障直流电压曲线

(下转第 59 页)

连接的网线、交换机本身进行了检查,均无发现故障。后经监控系统厂家人员检查确定,认为问题是由后台监控机 SAC2 的 Windows 操作系统程序走死引起,网络资源不足导致后台监控机死机。

找出问题后,厂家将后台监控机的监控程序版本升级,并经系统双机切换测试。当其中一台后台监控机网络中断或有异常时,监控系统能将另一台备用机自动切换成主机运行。

变电站实现综合自动化后,很多的运行维护工作都需要通过微机装置来完成。但综合自动化装置的软硬件更新换代非常快,所选用的设备可能很快就变成落后产品;监控软件有时会存在难以发现的缺陷,以至导致监控维护工作不能正常进行,影响了变电站的安全运转。这也提醒设计人员在选择综合自动化

产品及后台监控系统时,要综合考虑多方面因素,选出一种程序运行稳定、功能齐全、软硬件配置相对超前的综合自动化产品。

4 结束语

变电站实现综合自动化是今后发展的一种必然趋势,其优越性在电能质量、变电站的安全、可靠运行水平等方面均有较好的体现。但由于综合自动化设备整体的技术还不够成熟、稳定,所以在实施运行中总会出现各种不同的问题,还需要在实际工作中不断总结经验。这里旨在抛砖引玉,把自己工作中的经验总结出来共同分享,以提高综合自动化技术水平。

(收稿日期:2009-11-02)

(上接第 13 页)

4 减少直流线路换相失败措施的讨论

从直流线路运行状态的角度考虑,不同的运行状态参数下直流系统抗换相失败的能力是不同的。从式(2)可以看出,当线路运行电流固定且换流变固定时,增大正常运行下的熄弧角 γ 可以提高直流线路换相失败容许相对电压降落,同时,提高初始运行状态下的逆变侧换流母线电压也可以提高绝对电压跌落。例如,增加 2 组并联补偿后,交流电压为 1.010 pu, γ 增加为 18.023 $^{\circ}$,此时 $\Delta V=0.1897$,略有升高。但是,增大熄弧角会导致直流线路吸收无功增大,从而降低正常运行时的逆变侧交流母线电压。因此,这两个因素在调节时需要彼此协调,既考虑对换相失败的控制,同时考虑无功补偿的成本。

换相电抗 $X_{c_{pm}}$ 在换流变型号固定后也是一个固定的参数,但在规划设计阶段,可以认为这个参数也是可变的。采取措施降低直流线路换相电抗可以有效提高直流系统抗换相失败的能力。例如,降低换相电抗至 10% 后, $\Delta V=0.2758$, 增加明显。但是换相电抗也不能降至太小,否则会导致直流落点地区短路电流增大。

5 结论

以上分析了宝鸡—德阳 HVDC 输电系统单极投

产时四川电网故障对直流线路换相失败的影响。仿真分析结果表明,四川电网内绝大多数线路短路故障都将导致直流线路发生换相失败;故障清除后,直流线路都能迅速恢复运行,且不会造成连续换相失败。分析了直流系统运行参数对换相失败的影响,各参数之间需要彼此协调以达到控制换相失败和提高运行经济性的目的。

参考文献

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [2] 中国电科院. PSASP 用户手册 [M]. 北京:中国电科院, 2007.
- [3] 中国电科院. BPA 用户手册 [M]. 北京:中国电科院, 2004.
- [4] SIEMENS and PTI PSS/E User Manual [M]. USA, 2007.
- [5] Thio C. V., Davies J. B., Kent K. L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [6] 徐政,蔡晔,刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 4-8.

作者简介:

张强(1975-),男,工程师,主要研究方向为电力系统自动化分析。

欧阳瑞(1975-),男,助理工程师,主要研究方向为电力系统自动化。

冯中(1982-),男,助理工程师,主要研究方向为变电站稳态分析。

(收稿日期:2009-10-19)