

背靠背换流站换相失败仿真分析^①

余晓鹏¹, 蒋建东², 张 博¹, 周 勇²

1. 国网河南省电力公司 电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 郑州大学 电气工程学院, 郑州 450001

摘要: 开展背靠背系统换相失败的研究, 对防止换相失败的发生及减小换相失败对系统运行的影响具有十分重要的意义. 介绍了换相失败及引起换相失败的原因, 分析了换相失败的过程. 在 PSCAD/EMTDC 中对灵宝换流站换相失败进行了仿真, 分析了换相失败后直流电压、直流电流、直流功率、逆变侧交流母线电压、整流侧触发角、逆变侧关断角的变化情况. 仿真结果可以为制定避免换相失败或控制换相失败发展的措施提供参考.

关 键 词: 背靠背换流站; 直流电压; 换相失败; 仿真

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)05-0182-05

换相失败是换流站运行中最常见的故障之一^[1], 它可能降低直流电压、增大电流、减小直流输送功率、缩短换流阀寿命, 并导致换流变压器直流偏磁、逆变侧弱交流系统过电压等. 换相失败之后, 如果控制不当, 会引发后继换相失败, 最终导致直流闭锁. 故进行换流站换相失败的相关研究, 对防止换相失败, 减小其对系统正常运行的影响等具有特别重要的意义.

交流电压幅值降低、直流电流突增和交流换相电压过零点时相角偏移等是造成换相失败的根本原因^[2-3]. 文献[3]运用换相面积理论从理论上分析了 HVDC 系统换相失败的原因, 文献[4]分析了换相失败的概率统计方面的特点, 文献[5]应用电磁暂态程序 PSCAD/EMTDC 研究了交流侧单相故障对高压直流输电系统换相失败的影响. 当前关于高压直流输电系统换相失败的研究已比较多^[6-9], 但针对背靠背系统换相失败的研究还很少.

本文介绍了换相失败及其原因, 分析了换相失败的过程, 在 PSCAD/EMTDC 中建立了灵宝换流站的仿真模型, 并对灵宝换流站换相失败进行了仿真分析.

1 换相失败及其原因分析

当换流桥两个桥臂之间换相结束后, 刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内, 如果阀未能恢复阻断能力, 或者在这段时间内换向过程没能完成, 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, 这种现象就是换相失败.

在换相过程中, 为了确保退出导通的阀能够完全恢复阻断能力, 反向电压要作用于换流阀足够长的时间, 故越前关断角 γ 要足够大. 在阀运行中, 一般认为当关断角 γ 小于阀固有极限关断角 $\gamma_{\min}$ 时, 直流系统就会产生换相失败. 关断角 γ 的大小与换流阀外部电路密切相关. 对于对称交流系统有

① 收稿日期: 2014-12-29

基金项目: 河南省科学技术研究重点项目(14A470002).

作者简介: 余晓鹏(1974-), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 主要从事电网规划和电能质量分析等方面的研究.

通信作者: 蒋建东, 教授, 博士.

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U_v} + \cos \beta \right) \quad (1)$$

式中: I_d 为直流电流; X_c 为换相电抗, 若假设换流器交流母线装有完善的滤波装置使得交流电压不畸变, 则 X_c 即为折算到阀侧的换流变压器短路阻抗; U_v 为换流变压器交流系统侧电压直接折算到阀侧的电压, 不包括换流变压器的压降; β 为越前触发角。

当逆变侧交流系统发生不对称故障时, 交流线电压的过零点将会移动, 设过零点的相位偏移为 φ , 则:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U_v} + \cos \beta \right) - \varphi \quad (2)$$

若过零点前移, γ 会变小, 所以逆变侧更易发生换相失败。

γ 和 β 之间的关系为

$$\gamma = \beta - \mu \quad (3)$$

式中: μ 为换相角。

实际运行时, 由于串联联接的晶闸管之间的电压不平衡、器件特性的变化以及安全裕度等因素的影响, γ 角的整定值通常要比晶闸管实际需要的关断角 γ_{min} 大一些。一般 γ 角的整定值为 18° 左右, 如果是按恒电压运行的逆变器, γ 角的整定值可取得再大一些, 为 22° 左右。

由直流输电的控制器决定的越前触发角 β 与触发滞后角 α 的关系为

$$\beta = 180^\circ - \alpha \quad (4)$$

换相角 μ 决定于多个因素, 交流系统对称时其计算式为

$$\mu = \beta - \arccos \left(\frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U_v} + \cos \beta \right) \quad (5)$$

从(5)式可以看出, μ 的值由 4 个变量决定, 其中: β, I_d, U_v 是系统运行时的状态量, 在运行时是可变的; X_c 是装置的特征参数, 可以认为在系统运行时是恒定的。

交流系统故障将导致逆变侧交流母线电压下降, 故障发生地点与逆变站间的电气距离、系统运行方式等决定电压下降的幅度。阀侧电压下降将使 μ 增大, 电压下降是瞬时性的, 此时直流输电系统控制器还来不及将 β 增大, 即 β 的值还是原来的初始值, 由(3)式知, γ 的值将减小, 故障瞬间 γ 将从原来的初始值 18° 跌至换相失败的临界值 γ_{min} 以下, 而发生换相失败。

2 换相失败过程分析

图 1 为换流器逆变状态等值电路。

如果越前触发角 β 过小, 则逆变侧换相未结束就会出现换相失败过程。假设图 1 中阀 1 向阀 3 换相失败, 该过程中电压和电流波形见图 2。

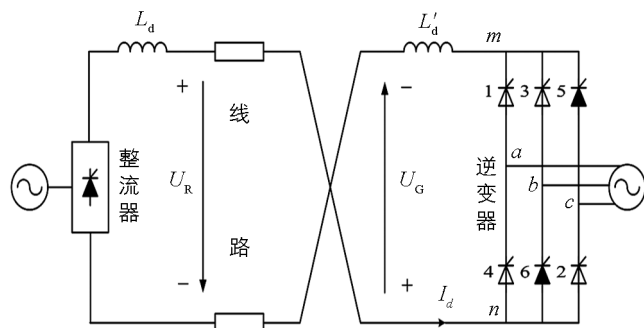


图 1 换流器逆变状态等值电路

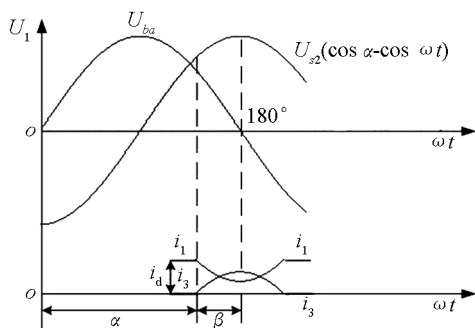


图 2 逆变侧换相失败过程

在阀 1 向阀 3 换相的过程中, 通过阀 1 的电流逐渐减小, 而通过阀 3 的电流逐渐增大。如果阀 1 中的电流在换相电压过零点之前未能减小到零, 则它不能关断。当 U_{ba} 过零点之后, 正向电压又将作用于阀 1, 此

时阀 3 中的电流会倒换相到阀 1, 倒换相结束后, 阀 3 关断, 而阀 1 将会继续导通, 这就造成一次换相失败.

还有一种能导致换相失败的情况. 从阀 1 向阀 3 的换相过程中, 如果触发阀 3 时越前角不够大, 或者换相角过大, 致使换相结束后, 阀 1 的关断角比关断所需要的角度(时间)小, 则在阀 1 元件中还会存有剩余载流子. 当正向电压作用时, 即便不加触发阀 1 也会再次导通, 阀 3 已取得的电流又将倒换相到阀 1. 倒换相完成以后, 阀 3 关断, 仍会由阀 1 和阀 2 导通逆变桥, 这也是一次换相失败.

逆变器直流电流在故障过程中之所以保持不变, 是因为假定了直流电抗器具有无限大的电感值. 事实上, 考虑到直流电抗器的电感值不可能为无限大的值、线路上有电容、整流器定电流调节装置的时延问题等因素, 直流电流是逐渐增大的. 流经逆变器的直流电流在一次换相失败之后将变大, 故有可能造成下一次的换相也会失败, 比如在阀 3 换相失败后, 接着又发生阀 2 对阀 4 的换相失败.

3 背靠背换流站换相失败仿真

灵宝换流站联结西北和华中两个大的区域电网, 在西北电网与 330 kV 罗敷变相连, 在华中电网与 500 kV 陕州变及 220 kV 紫东变相连, 联网容量达到 1 110 MW. 本文对灵宝换流站所连交流系统进行了等值, 其等值电路见图 3. 根据图 3 及谐波滤波器和无功功率补偿装置情况在 PSCAD/EMTDC 中建立了灵宝换流站的仿真模型. 系统等值参数及平波电抗器参数见表 1, 换流站换流变压器的参数见表 2.

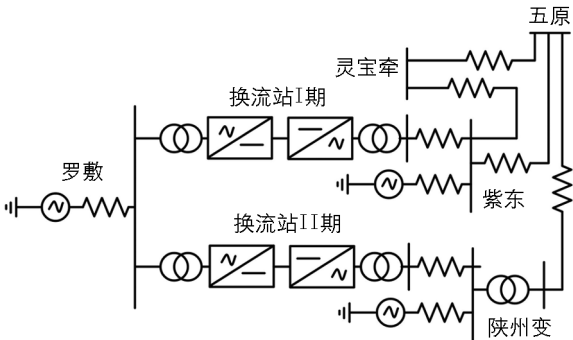


图 3 等值电路

表 1 系统等值参数及平波电抗器参数

系统等值参数(三相短路电流)			平波电抗器参数	
紫东 220 kV	罗敷 330 kV	陕州 500 kV	I 期	II 期
11.3	38.56	16.18	0.12H	0.12H

表 2 换流变压器参数

类别	220 kV 侧	330 kV 侧	500 kV 侧
变比	230/50.8	350/70.6	535/70.9
容量/MVA	215.4	450	450
漏抗/%	16	16	16.53
空载损耗/kW	71.6	108.1	138.3
负载损耗/kW	409.8	651.1	513.8

为了模拟逆变器的换相失败, 本文在仿真模型逆变侧 500 kV 母线 B 相上施加一个单相故障来降低 B 相电压. 相关参数的变化见图 4.

由图 4 可得, 因为故障, B 相电压下降约 10%, 并发生了换相失败. 因换相失败直流电压瞬间跌落到零, 逆变侧直流电流过冲到 2.0 pu, 在换相失败瞬间电压过冲从-1.0 pu 附近升至 0.0 pu 附近. 故障引起低压限流装置动作将直流电流限制在设定值, 并且几乎中断了直流功率传输, 在换相失败瞬间整流侧和逆变侧的有功功率 P 突变至 0 MW 附近. 逆变侧的无功消耗减小很多, 而整流侧无功消耗则急剧增加, 突变至 400 MVar 左右. 受换相失败影响, 逆变侧母线电压会稍微降低. 为了限制直流短路电流的峰值, 整流侧定电流控制器将增大触发角 α , 但整流侧触发角仍被限制在逆变区(大于 90°). 当故障切除后立即开始恢复过程.

降低换流变压器的短路电抗可以减小换相角, 从而降低换相失败的可能性. 另外, 如果采用较大的平波电抗器限制暂态时直流电流的快速增大, 能避免继发性换相失败.

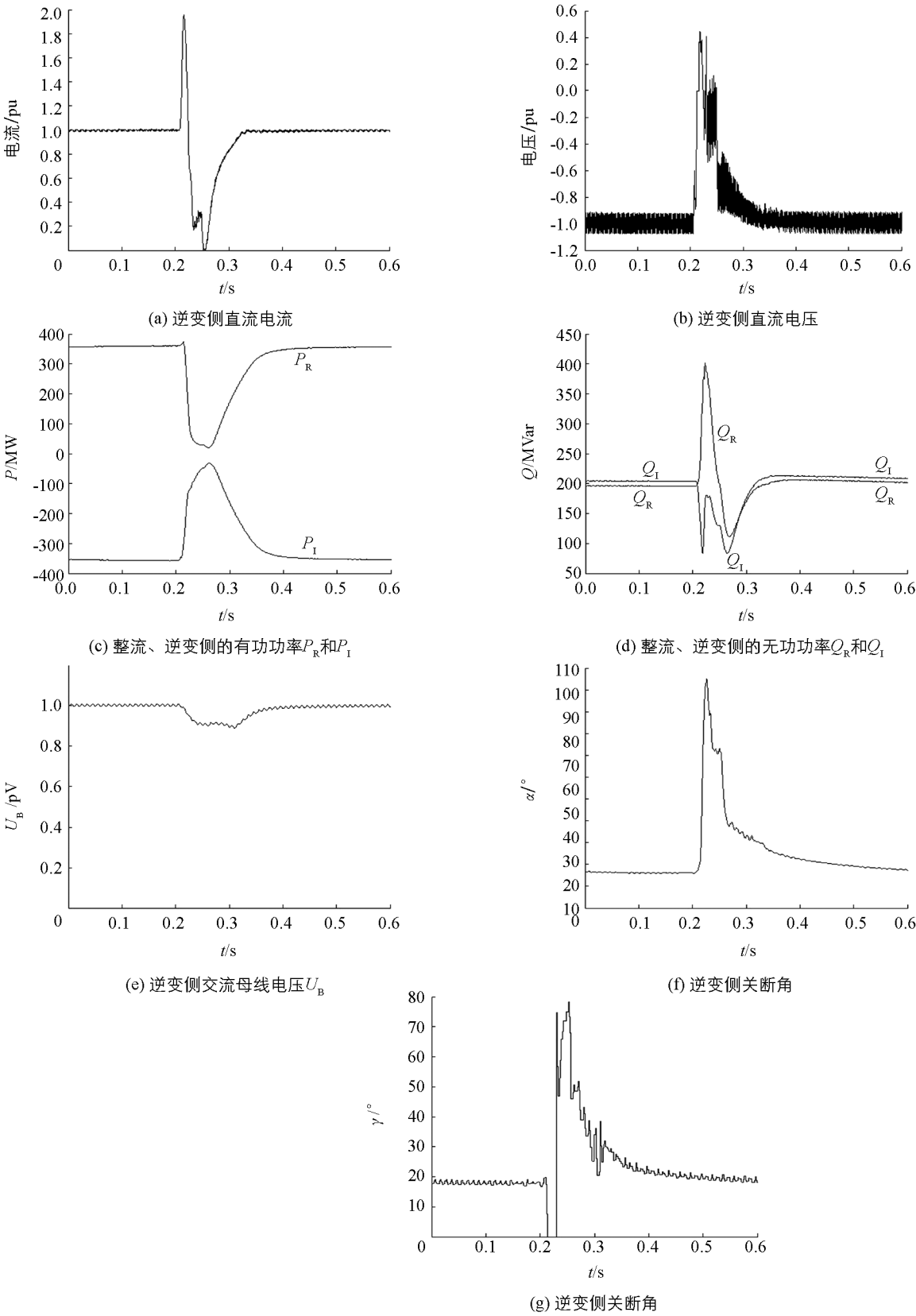


图 4 换相失败仿真结果

4 结 论

本文详细介绍了换相失败及其原因，深入分析了换相失败的过程，并在 PSCAD/EMTDC 中对灵宝换

流站的换相失败进行了仿真分析, 仿真结果中相关电气量的变化规律和文献[10]的现场录波结果一致. 本文仿真结果可以为制定避免换相失败或控制换相失败的发展的措施提供参考.

参考文献:

[1] 浙江大学发电教研组. 直流输电 [M]. 北京: 水力电力出版社, 1985.

[2] 王渝红, 李群湛, 何晓琼, 等. 直流控制策略及对电网稳定性的影响 [J]. 2008, 43(21): 43—48.

[3] 滕洪燕. 大型交直流系统的 PSCAD 建模与仿真 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.

[4] KRISTMUNDSSON G M, CARROLL D P. The Effect of AC Systems Frequency Spectrum on Commutation Failure in HVDC Inverter [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5 (2) : 1121—1128.

[5] DRAGAN JOVCIC, BOON TECKOOL. Tapping on HVDC Lines Using DC Transformers [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2): 561—569.

[6] 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.

[7] S GHODRATOLLAH SEIFOSSADAT, ABBAS SHOULAIE, MEHDI MONADI. A Linearized Small-Signal Model of an HVDC Converter With Filrer Circuits in Mixed Time-Frequency Domain [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2008, 23(2): 1025~1032.

[8] 任 震, 陈永进, 梁振升. 高压直流输电系统换相失败的概率分析 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(25): 19—22.

[9] 荆 勇, 欧开健, 任 震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响 [J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 60—62.

[10] 高晓旺. 背靠背换流站的数字仿真分析 [D]. 郑州: 郑州大学, 2007.

Commutation Failure Simulation of Back-to-Back Converter Station

YU Xiao-peng¹, JIANG Jian-dong², ZHANG Bo¹, ZHOU Yong²

1. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Compamy, Zhengzhou 450052, China;
2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Commutation failure simulation of back-to-back converter is an important research to prevent commutation failure and reduce its influence on system operation. In this paper, the commutation failure mechanism is introduced, and the commutation failure process is analyzed. Commutation failure in Lingbao Converter Station is simulated in PSCAD/EMTDC. The DC voltage, DC current, DC power, inverter AC bus voltage, the rectifier trigger angle and inverter turn-off angle are given. The simulation results can help to develop effective measures for avoiding commutation failure or preventing the influence of commutation failure.

Key words: back-to-back converter station; DC voltage; commutation failure; simulation

责任编辑 潘春燕

