

云广特高压直流输电系统换相失败研究

刘 建¹, 李兴源¹, 艾 飞¹, 杨小兵¹, 张 静², 李中华³

(1 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2 浙江余杭供电局, 浙江 杭州 311100;

3 浙江群力电气有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘 要:换相失败是 HVDC 系统最常见的故障之一。通过分析换流器换相失败的机理, 归纳了 HVDC 换相失败的影响因数及判据。以南方电网 2010 年数据为基础, 采用 PSCAD/EMTDC 对云广 ±800 kV 特高压直流输电系统建立了详细的电磁暂态仿真模型, 并分析了一次系统和控制系统的结构。对该直流输电系统逆变侧换流母线发生三相接地短路和单相接地短路故障的情况进行了仿真分析。仿真结果表明, 云广特高压直流输电系统故障后发生换相失败, 但由于该系统的高度可控性, 故障切除后系统从换相失败中恢复性能良好。

关键词:云广特高压; 换相失败; 恢复; 仿真

Abstract: Commutation failures are very dynamic events in HVDC transmission systems. The influencing factors and criterion of HVDC commutation failure are concluded based on the analysis of the mechanism of commutation failure. According to the data of CSG in 2010, a detailed electromagnetic transient model of Yun-Guang UHVDC transmission system is established using PSCAD/EMTDC, and the structures of primary system and control system are analyzed. The three-phase and single-phase grounding faults of inverter commutation bus are simulated. The simulation results show that the commutation failure occurs when there is fault in Yun-Guang UHVDC transmission system, but it recovers from commutation failure effectively after the fault is cleared due to the high controllability of the system.

Key words: Yun-Guang UHVDC; commutation failure; recovery; simulation

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0001-04

根据中国的现状及规划, 百万千伏级交流和 800 kV 级直流特高压将成为中国电网的骨干网架。南方电网 (CSG) 将建设世界上第一回 800 kV、输电容量为 5 GW 的特高压直流 (UHVDC) 输电工程——云广直流输电工程, 以满足“十一五”期间云南向广东送电的需要以及“十二五”初小湾、金安桥等电站向广东送电的需要^[1]。采用 800 kV 特高压直流输电具有输电距离更远、输电容量更大、线路走廊更窄、电力系统适应性更好等诸多优点^[2, 3]。但其投入在带来各种好处的同时也引进了新的问题, 换相失败就是系统中最常见的故障之一。通常发生一次换相失败的后果并不严重, 但如果恢复过程不顺利而发生后续的换相失败, 将最终导致直流传输功率中断, 甚至导致整个交直流系统失去稳定。因此, 必须研究 HVDC 在故障情况下发生换相失败对系统的影响及在故障消除后系统的恢复性能。

文献 [4] 对特高压直流输电系统运行方式进行了仿真研究。文献 [5] 对含特高压直流的多馈入交

直流系统动态特性进行了仿真研究。现以南方电网 2010 年数据为基础, 采用 PSCAD/EMTDC 对云广 ±800 kV 特高压直流输电系统建立了详细的电磁暂态仿真模型, 并分析了该模型在典型故障下发生换相失败对系统影响及故障切除后系统的恢复性能。重点研究了换相失败能否恢复、恢复过程所需要的时间及直流最低输送功率是多少等问题, 对南方电网的安全运行有极其重要的意义。

1 换相失败机理

换相失败是指当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, 如果未能恢复阻断能力, 或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕, 会在阀电压转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^[6]。换相期间各参数之间的相互关系可以用下式表示:

$$\gamma = \beta - \mu \quad (1)$$

式中, γ 为关断角 (或熄弧角); β 为触发越前角; μ 为换相角。 γ 直接决定于 β 和 μ 。

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2004CB217907), 国家自然科学基金项目 (50595412), 国家科技支撑计划 (2008BAA13B01)

换流器的阀是一种可控电力电子开关,它需要一定时间完成载流子复合,恢复正向阻断能力,其去游离恢复时间在 $400 \mu\text{s}$ (约 7° 电角度)左右,考虑到串联元件的误差,晶闸管的恢复时间以电角度 γ_{min} 表示约为 10° 。所以在实际运行中,当 $\gamma \leq 10^\circ$ 时就认为换相失败^[7]。由于整流器阀在电流关断后的较长时间处于反电压下,所以仅当触发电路发生故障时,整流器才会发生换相失败^[8]。而对于逆变器,由于换流阀关断后的恢复时间较短,所以其更容易发生换相失败。

发生换相失败的本质是逆变器熄弧角(或关断角) γ 小于极限熄弧角^[9,10]。主要原因有交流故障引起的电压降低和电压相移,晶闸管阀的参数也会影响到换相过程。发生一次换相失败后直流电压的波形如图 1 所示。

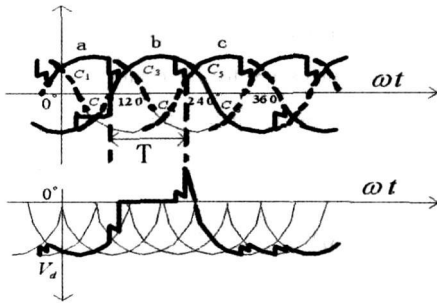


图 1 一次换相失败后的电压波形

换相失败的判定方法主要有熄弧角判断法和最小电压降落法^[11]。工程上判断换相失败一般是采用经验电压判据。这里以熄弧角判断法来判断换相失败。

1.1 熄弧角判断法

熄弧角判断法是通过比较换流器实际熄弧角与引起换相失败的临界熄弧角之间的大小来判断发生换相失败的方法。该法是以换相失败的本质来判断换相失败的。由文献[6]可以得到交流系统发生故障时逆变器的关断角为:

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

式中, k 为换流变压器的变比; U_L 为逆变器交流侧母线线电压有效值; I_d 为直流电流; X_c 为等效换相电抗; β 为越前触发角; φ 为换相线电压过零点前移角度。当 $\gamma < \gamma_{\text{min}}$ 时,就可判定逆变器阀换相失败。由此可见换相失败与 k 、 U_L 、 I_d 、 X_c 、 β 及 φ 有关。

1.2 最小电压降落法

最小电压降落法通过比较换相电压的降落与发生换相失败所需的最小换相电压降落之间的大小来判断系统是否发生换相失败。文献[9]给出了导致换相失败的临界电压降 ΔE :

$$\Delta E = 1 - \frac{I'_d X_{\text{qpu}}}{I_d X_{\text{qpu}} + \cos(\gamma_{\text{min}} + \varphi) - \cos\gamma} \quad (3)$$

式中, γ_{min} 为换流阀固有极限熄弧角; γ 为直流系统额定熄弧角; I_d 为直流电流; I'_d 为当关断角 γ 达到极限熄弧角 γ_{min} 时的直流电流; X_{qpu} 为换相电抗的标么值; φ 为不对称故障过零点漂移所产生的相移角。当换相电压下降大于 ΔE 时,就可认为发生换相失败。但此结论是假定无穷大交流系统的情况下基于换流器准稳态方程得出的,其结果将会偏大。因此最小电压降落法可作为预测、判断换相失败的粗略指标。在本模型中可由式(3)粗略计算得到导致发生换相失败的临界电压降在 20% 左右。

2 云广特高压直流输电系统模型

如图 2 所示,云广直流输电工程西起云南楚雄州禄丰县,东至广东增城东部,电压等级为 $\pm 800 \text{ kV}$,输电线路长度为 $1\,438 \text{ km}$,输电规模为 5 GW ,额定电流为 $3\,125 \text{ kA}$ 。送端楚雄换流站通过 2 回 500 kV 交流线路与云南主网昆西北 500 kV 变电站相连,小湾水电站与金安桥水电站分别通过 3 回和 2 回 500 kV 线路向楚雄站送电。受端分别以 2 回 500 kV 交流出线接入增城、横沥和水乡变电站^[11]。

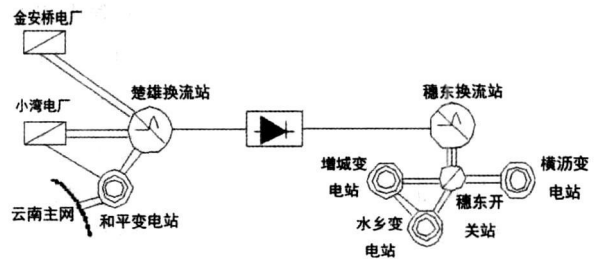


图 2 系统地理接线简图

2.1 发电机模型

发电机采用基于派克方程的精确模型。该模型包括了 D 轴阻尼绕组和 Q 轴 2 个阻尼绕组方程,计及了磁路饱和的影响^[12]。

2.2 直流系统模型

2.2.1 结构与元件

以往研究中根据换流母线电压跌落一定幅值判

断直流发生换相失败是不够准确的。当交流系统不对称故障期间通常换流站交流母线的电压不再对称,应用直流换流器准稳态模型进行研究具有一定局限。因此,采用详细换流器模型以关断角为判据研究交流系统中换相失败问题更为精确。基于南方电网 2010 年数据,采用 PSCAD /EMTDC 建立了云广 ±800 kV 特高压直流输电系统详细的电磁暂态仿真模型,其电路接线如图 3 所示。

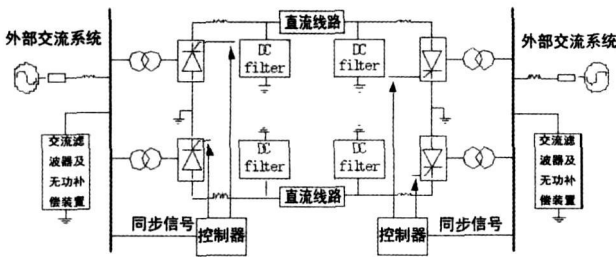


图 3 直流系统模型

在电磁暂态仿真中,滤波器通过断路器连接到高压母线。从换流站交流母线起,对换流变压器、换流阀采用详细的三相模型,且换流变压器考虑饱和效应。每极采用双 12 脉动换流器串联连接,直流线路采用分段 T 型线路表示,换流阀采用电磁暂态级的精确换流晶闸管模型,详细模拟直流滤波器和平波电抗器。

2.2.2 控制系统

根据实际详细模拟高压直流输电系统的控制系统,考虑预防换流阀受到过热损害以及换流器换相失败需要采用的保护措施主要有:1)最大电流限制;2)最小电流限制;3)依赖于电压的电流指令限制(VDCOL);4)最小触发角限制。

该系统的基本控制方式:整流侧由定电流控制和限制两部分组成;逆变侧配有定电流控制和定关断角 $d_{min}(\gamma_0)$ 控制,但无定电压控制。此外,整流侧和逆变侧都配有低压限流(VDCOL)控制,逆变侧还配有电流偏差控制(CEC)。其静态伏安特性如图 4 所示。有研究^[4]表明传统 ±500 kV 直流输电工程的控制策略仍然可以用于特高压工程,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制可以获得较好的稳态和暂态特性。

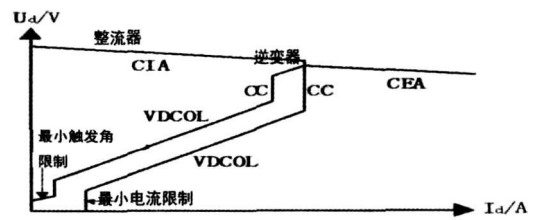


图 4 换流器的静态伏安特性

3 仿真结果和分析

3.1 三相接地短路故障

当穗东逆变站交流系统发生三相短路故障时(2.0~2.1 s),使换流站交流母线电压下降约 20% 时,逆变器关断角、逆变侧直流电压、直流电流、传输的直流功率及逆变器触发角响应特性如图 5 所示。

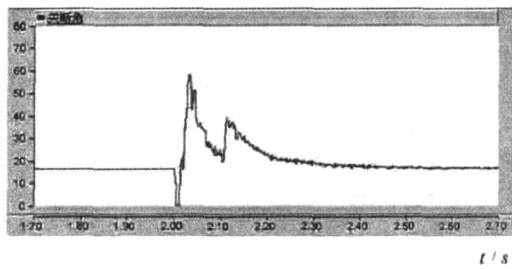
故障发生后逆变器经历短暂的换相失败,关断角下降到 0°,换相失败的时间约为 15 ms。直流电压急剧下降,直流电流上升,直流传输功率也急剧下降,最低输送功率仅有单极 1 GW。由于故障导致 VDCOL 动作,将电流整定值限制 1.57 kA 左右。而与此同时,在直流控制系统的作用下,逆变器触发角由 144° 下降至最低 115°,而关断角却最高上升至 60°。故障消除的同时,直流系统开始恢复。由图 5 可见直流电压、直流电流及直流功率的恢复特性良好,仅在故障切除 0.2 s 后就基本恢复到故障前的稳定运行状态。

3.2 单相接地短路故障

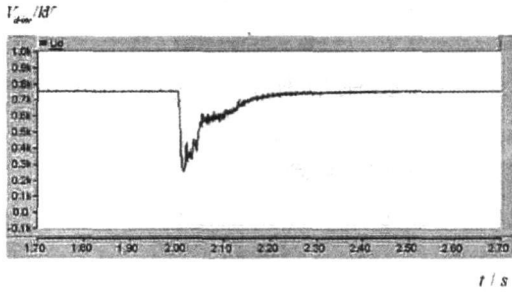
当穗东逆变站交流系统发生 a 相短路故障时(2.0~2.1 s),使换流站交流母线 a 相电压下降约 20% 时,逆变器关断角、逆变侧直流电压、直流电流、传输的直流功率及逆变器触发角响应特性如图 6 所示。从图 6 可以看出,本故障方式下直流系统的响应特性与发生对称故障时类似,但恢复速度比对称故障时快。

4 结论

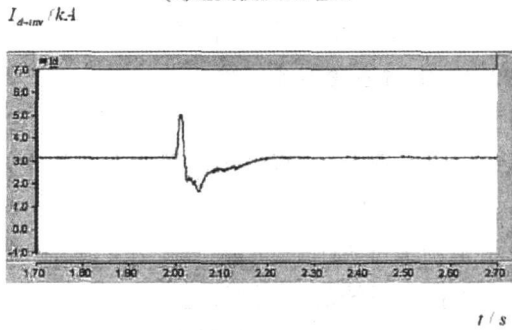
分析了换相失败的机理及判据,针对 ±800 kV 云广特高压系统建立了详细的电磁暂态模型,运用 PSCAD /EMTDC 分析了系统逆变侧交流母线在三相和单相接地故障时直流系统的响应特性。仿真结果表明由故障引起的交流母线电压大幅下降会导致换



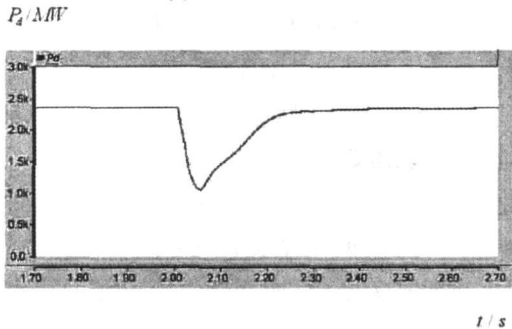
(a) 逆变器关断角



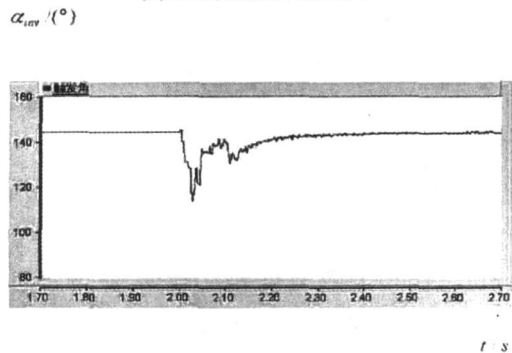
(b) 逆变侧直流电压



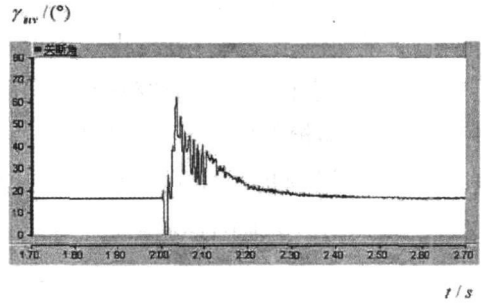
(c) 逆变侧直流电流



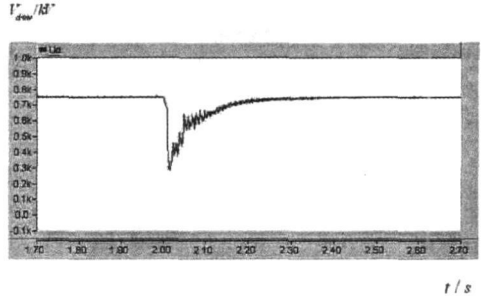
(d) 逆变侧直流传输功率



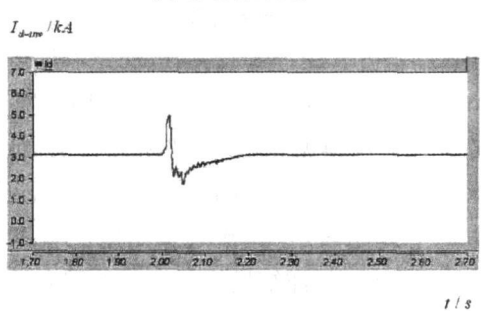
(e) 逆变侧触发角



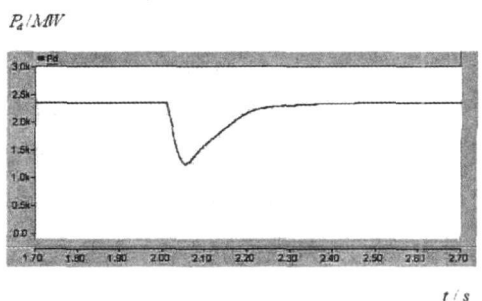
(a) 逆变器关断角



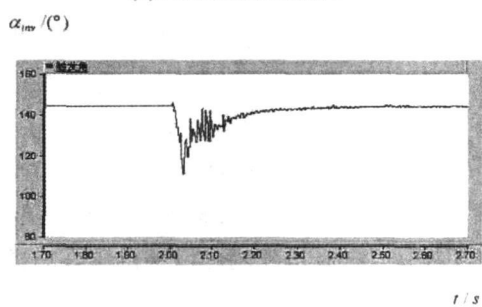
(b) 逆变侧直流电压



(b) 逆变侧直流电流



(d) 逆变侧直流传输功率



(e) 逆变侧触发角

图 6 逆变侧交流系统发生单相接地故障时
直流输电系统的响应特性

图 5 逆变侧交流系统发生三相接地故障时
直流输电系统的响应特性

(下转第 90 页)

4 系统特点

4.1 开放性

监控系统网络通讯协议符合国际网络协议标准 (TCP/IP), 操作系统选用国际通用 Windows 操作平台, 数据库系统选用通用的大型关系型数据库系统 (Microsoft SQL Server 2000), 方便系统的维护、扩充和升级。

4.2 扩充性

系统的软硬件设计符合国际工业监控与开放式设计标准, 采用模块化及标准化模块接口, 便于系统适应不同规模及功能要求的监控网络系统, 便于与其他系统进行接口。

4.3 安全性

硬件设备的设计采用可靠的电气隔离, 保护系统的软硬件在任何情况下, 均不会影响被监控对象运行的安全性。

软件系统的设计对系统管理和维护人员进行权限管理, 以区分限制各级别用户对系统的访问和操作能力, 保护系统操作的安全性。监控系统为用户对系

统所做的任何操作均记录在数据库中, 以备系统日后出现运行事故提供辅助分析功能及追究相关的事故责任。保证数据的完整性和一致性, 防止其他人员误操作。

4.4 实时性

变电站直流系统的告警信息与短信平台接口, 告警信息可及时发送到有关维护人员的手机上, 以便及时检修, 将事故消除在萌芽状态。

5 结 论

变电站直流电源远程监控系统实现了对变电站直流电源设备的在线监控和分析, 实时掌握变电站直流系统的运行工况, 加强了变电站直流系统设备的预检预修工作, 提高了变电站直流电源设备的运行管理水平, 保障了变电站保护、通讯、调度自动化和信息网络等系统运行的稳定性和安全性, 预防了因直流设备故障而造成事故。系统投运后变电站直流电源系统故障明显下降, 产生了良好的经济效益, 提高了变电站安全稳定运行水平。

(收稿日期: 2008—10—22)

(上接第 4 页)

相失败的发生, 但由于直流系统的高度可控性, 换相失败经历的时间极为短暂, 在故障切除后, 直流系统的恢复情况良好。由此说明 ± 800 kV 特高压直流输电系统具有良好的动态响应性能, 能够满足长距离大容量的输电需求。

参考文献

- [1] 中国南方电网公司. ± 800 kV 直流输电技术研究 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006. 2—60.
- [2] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点和工程应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 5—6.
- [3] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1—3.
- [4] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究 [J]. 继电器, 2007, 35(16): 27—32.
- [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.
- [6] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.

- [7] 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, 200, 30(3): 60—62.
- [8] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 林凌雪, 张尧. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40—46.
- [12] 夏道止. 电力系统分析 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.

作者简介:

刘 建 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统稳定与控制。

李兴源 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制等方面的研究工作。

(收稿日期: 2008—12—20)