

# 基于 RTDS 的 HVDC 电压波动机理研究

郝志杰<sup>1</sup>, 张建设<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司广州局, 广州 510405; 2. 南方电网技术研究中心, 广州 510623)

## RTDS-based Research on the Principle of HVDC Voltage Fluctuation

HAO Zhi-jie<sup>1</sup>, ZHANG Jian-she<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Bureau, EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China;

2. CSG Technology Reserch Center, Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** Voltage fluctuation can bring serious damage to HVDC systems. Early research found it was the sensor's fault caused the voltage fluctuation. An experiment based on RTDS system is carried out to simulate a voltage fluctuation case caused by sensor's fault. It is found that the change of resistance of sensors caused voltage fluctuation, which may be a sound reference to on-site handling and further research.

**Key words:** HVDC; voltage fluctuation; DC Measurement; RTDS

**摘要:** 直流电压波动给直流系统带来巨大的危害。以往的研究发现传感器的故障是导致电流波动的原因。利用 RTDS 仿真系统对传感器影响直流电压的事件进行了试验分析, 得出了传感器故障时的内阻变化是直流电压波动的直接原因这一结论。为后续持续的研究和相关工作提供了很好的借鉴。

**关键词:** 直流输电; 电压波动; 直流测量; RTDS

### 1 HVDC 电压波动及其危害

自从 2005 年 7 月高肇直流逆变侧(肇庆换流站)极 2 发生电压波动以来至今, 直流电压波动这一现象已经在高肇直流、天广直流甚至新近投运的兴安直流多次出现。电压波动均发生于直流的负电压极, 正电压极几乎从未发生过。电压波动的特性均表现为逆变侧直流测量电压幅值降低, 整流侧直流电压幅值则略有升高, 但两者偏移的程度大不相同。逆变侧电压的偏移程度可能高达 100 kV 甚至更高, 而整流侧电压的偏移通常不超过十几千伏。电压波动现象发生时直

流系统可能受到较大的影响, 最严重的情况是波动幅度特别大时触发相应电压判据的保护功能, 例如直流低电压保护或过电压保护, 导致直流闭锁。

另一方面, 即使没有触发保护跳闸, 电压波动也会通过影响正常控制对直流系统的运行产生非常大的干扰。首先, 直流测量电压的大幅波动会造成直流消耗无功功率计算的相应波动, 致使交流滤波器的非正常投入和退出, 甚至在临界点时频繁投退。这不仅会影响滤波器及开关使用寿命, 也导致实际无功功率与交流母线电压的连带波动, 造成系统的不稳定。此外, 直流测量电压的波动还会严重干扰直流电压控制功能, 导致控制角的连带波动和换流变分接头的频繁调节, 直接影响直流功率输送的稳定并降低直流控制系统的调节裕度。最后, 直流电压的波动还会干扰控制系统中的监视功能, 例如交、直流功率偏差监视。直流电压偏移会导致直流功率计算出现相应偏移, 当其与换流变交流功率的偏差超过定值时, 相应监视功能就可以闭锁极, 这也可以看作是一种形式的保护功能。

### 2 电压波动的处理及初步分析

从 05 年直流电压波动最早出现开始, 就针对这一问题不断进行处理和分析。经过不断的检查与分析发现, 当对电压光电传感器(OPTODYN)这种设备进行全部或部分更换后, 电压波动往往就不再出现了。因此可以确定, 这种传感器的故障是导致直流电压出现波动的直接原因。

历次的处理实践也表明, 传感器的故障与电压波动的确存在直接的关联。2008 年 3 月 1 日宝安站在线处理电压波动与 2008 年 7 月 18 日肇庆站在线处理电压波动的实践也证实了这一点。两次处理工

作均是通过对在线排除法定位了故障的电压传感器并完成更换, 进而成功地消除了直流电压波动。

此外, 工作中发现一种特殊情况, 对故障传感器的输入电阻进行测量, 发现其与正常传感器存在很大的差别。正常传感器工作内阻均为  $500\text{ k}\Omega$ , 而测量时故障传感器的内阻为  $200\text{ k}\Omega$  左右。直流电压的测量原理是电阻分压, 那么单个传感器的阻抗变化会影响整体传感器负载电阻, 进而改变分压器的分压比并改变测量电压。这可能就是导致直流电压异常波动的原因。

### 3 电压波动机理的 RTDS 仿真研究

根据大量工作积累和初步分析, 可以得出传感器故障是导致电压波动的直接原因。针对这一问题, 我们采用了 RTDS 实时仿真系统以及高肇直流实际控制保护装置对电压波动机理进行研究和验证。

为了准确分析和进行对比说明, 先研究一个实际电压波动的情况。图 1 和图 2 为高肇直流某次电压波动过程中不同变量的录波, 分别是两侧电压、控制角。由图 1 见, 逆变侧电压虽然在剧烈波动, 但其特征值稳定于  $-380\text{ kV}$  一线, 因此分析中可以近似忽略围绕该值上下的波动。观察图 2 可以发现, 在逆变侧测量电压由正常的  $-470\text{ kV}$  跳至  $-380\text{ kV}$  时, 熄弧角也由  $20^\circ$  减少至  $17^\circ$ , 并进入熄弧角控制。说明逆变侧受测量电压下降影响欲减小熄弧角提高整流侧电压, 但由于测量电压过低, 熄弧角减至最小熄弧角亦于事无补, 只能被迫转入最小熄弧角控制。而在整流侧, 由于这段过程中伴随电流调整, 整流侧  $\alpha$  角与电压波动关联并不明显。但是观察后段可以清晰发现, 当电压波动突然消失后,  $\alpha$  角出现正向跳变。因此可以判定, 电压波动对  $\alpha$  的影响是使  $\alpha$  角区域减小。在原理上也不难理解, 由于波动时逆变侧降低熄弧角以抬高整流侧计算电压, 为了控制电流或功率定值的稳定, 整流侧必然减小  $\alpha$  角。

在 RTDS 仿真试验中, 通过改变传感器的输入阻抗我们试图重现这个过程。为了进行传感器故障的模拟试验, 首先需要将直流电压的分压测量模型(参见图 3)嵌入到 RTDS 直流系统模型中, 取代由直流母线直接取直流电压量的方式。在这个基础上, 将分压测量模型中的一只传感器分离出来设定为可变电阻。通过改变这个电阻的阻值, 我们模拟传感器在故障情况下对电压测量的影响。变化的过

程是从正常时的  $500\text{ k}\Omega$  变化至故障时的  $10\text{ k}\Omega$ , 保持一定时间后再恢复正常时的  $500\text{ k}\Omega$ 。

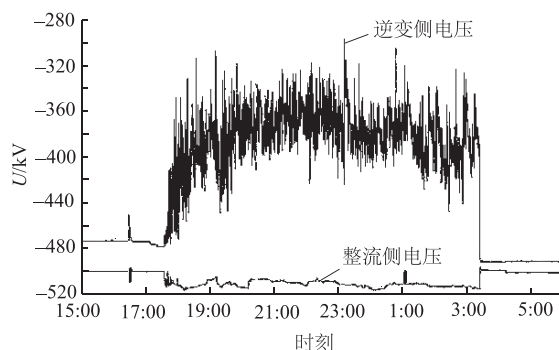


图 1 直流两侧电压的波动

Fig.1 Voltage Fluctuation at Both Sides of the Pole

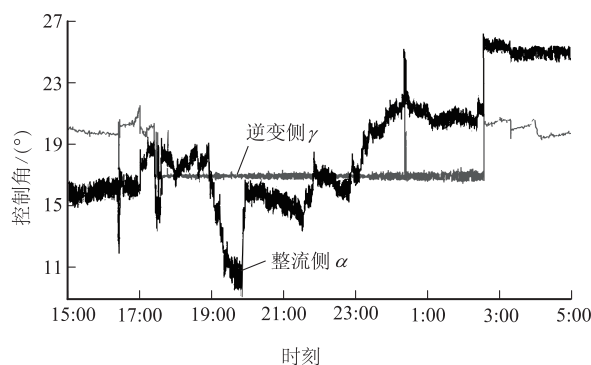


图 2 直流两侧控制角的变化

Fig.2 Variation of Control Angle at Both Sides

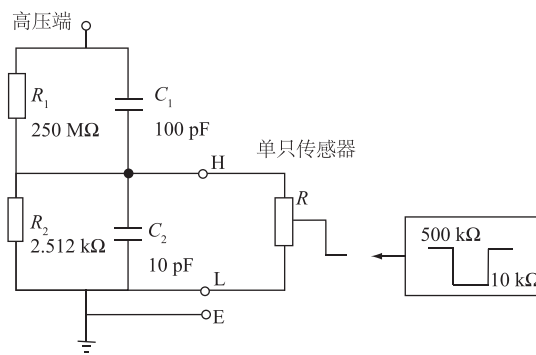


图 3 RTDS 中嵌入的分压器测量模型

Fig.3 Divider Model for RTDS Test

图 4 和图 5 是 RTDS 仿真中基于上述设定得到的波形。直流系统运行方式为双极方式, 定功率  $3\ 000\text{ MW}$ , 运行电压  $500\text{ kV}$ 。从试验得到的录波图可以看到, 单只传感器的阻抗变化会导致逆变侧直流测量电压的变化。在直流测量电压出现偏移的同时, 逆变侧实际直流电压、整流侧直流电压都出现了偏移。需要注意的一点是, 实际中由于逆变侧测量电压受到干扰, 可能无法直观看到实际直流电压

的值,而试验的结果给出了实际直流电压的变化情况。显然,测量电压偏低会导致实际电压略有升高。这个结果显然也是符合理论推导的。

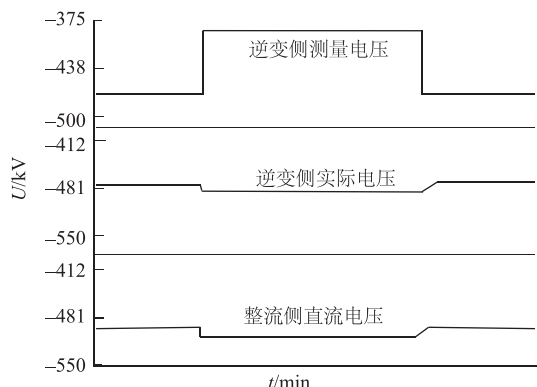


图4 RTDS 仿真得到的电压波动波形

Fig. 4 DC Voltage by RTDS Simulation

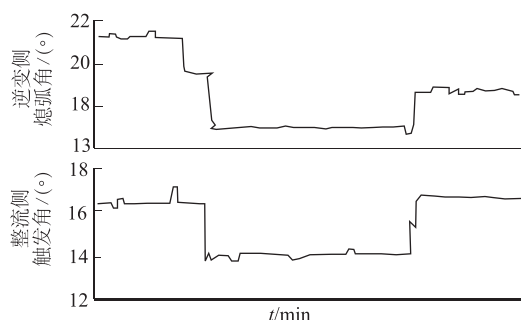


图5 RTDS 仿真得到的控制角变化波形

Fig.5 Control Angle by RTDS Simulation

与此同时,整流侧与逆变侧控制角的变化以及控制方式的变化也与实际电压波动时发生的情况以及相关分析结果吻合。逆变侧由于测量电压偏低导致计算的整流侧电压低于定电压设定值,因此减小熄弧角以抬高电压,直至减至 $17^\circ$ 最小熄弧角转入定熄弧角控制。相应的受到电流控制影响,整流侧也减小触发角抵消逆变侧控制对电流的影响。逆变侧控制方式发生了改变,与实际系统控制方式的变化情况相符。由于试验中没有模拟传感器阻抗的高频率波动,所以得到的波形是平滑稳定的曲线。在实际中,传感器电阻的变化可以是随机的,以任何形式出现,相应的电压波动以及控制响应必然也呈现相似的特点。

#### 4 故障传感器不同阻抗对系统的影响

由上述分析可知传感器故障时输入阻抗的变化是导致电压波动的根本原因。在这个基础上,进一

步采用了 RTDS 和高肇直流实际控制保护装置研究不同情况下的传感器故障与电压波动的关系,以及对于直流系统的影响。

从图 4 和图 5 的试验结果可见,在单只传感器阻抗值发生改变后,直流电压及系统控制方式会有随动的改变。如果传感器电阻是稳定的,那么直流电压以及直流系统的运行也存在一个相应的稳定状态。也就是说,直流电压及系统运行方式受传感器阻抗变化的影响具有确定性和一一对应的特点。基于这个结论,对一系列可能的传感器变化阻抗依次进行仿真试验,待系统进入稳态后观察并记录系统参数,从中就可以观察到故障传感器的不同状态对系统电压及运行方式影响的特点和规律。

表 1 数据表明传感器故障时不同输入阻抗对于直流电压以及直流控制的作用。随着故障电阻由正常时的 $500\text{ k}\Omega$ 逐步减小,逆变侧直流测量电压也逐步减小,而整流侧直流电压则趋于升高。但是这个关系并不是正比的,当故障电阻大于 $50\text{ k}\Omega$ 时,逆变侧直流电压的变化并不明显,而熄弧角有明显的降低。这是因为此时逆变侧尚可以依靠调整熄弧角稳定电压。当故障电阻小于 $50\text{ k}\Omega$ 时,由于熄弧角已经达到最小值,没有进一步调节的裕度,逆变侧测量电压急剧降低。

表 1 不同传感器阻抗时的直流电压与控制角

Tab.1 DC Voltage and Control Angle under Different Sensor's Resistance

传感器故障电阻/ $\text{k}\Omega$	逆变侧测量电压/ $\text{kV}$	整流侧直流电压/ $\text{kV}$	逆变侧 $\gamma$ / $(^\circ)$	整流侧 $\alpha$ / $(^\circ)$
500	-469	-500	16	20
250	-467	-501	16	19
100	-467	-507	15	19
50	-466	-518	11	17
25	-445	-518	11	17
10	-392	-518	11	17
5	-326	-518	11	17

另一方面,在故障电阻小于 $50\text{ k}\Omega$ 后,整流侧电压以及触发角也趋于稳定。这是由于逆变侧已经进入定熄弧角控制,因此整流侧运行特性只决定于其电流定值控制,由于功率控制定值不变,当达到电流计算定值后,整流侧也即进入稳定运行状态。

图 6 与图 7 分别对应直流双极功率以及直流双极电流跟随传感器故障阻抗变化的曲线。直流功率和直流电流的变化特性也是以约 $50\text{ k}\Omega$ 作为拐点。

图7中只有一条电流曲线,这是因为在电流平衡控制的作用下,稳态的双极直流电流是相同的。而由于负极(波动极)整流侧电压升高,因此负极直流功率高于正极。因此随着故障电阻的减小,图6中双极直流功率由相同趋向高低分化。

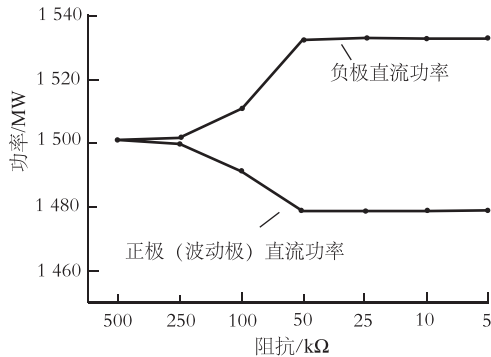


图6 双极直流功率随传感器阻抗变化曲线

Fig.6 Changing of DC Power with Sensor's Resistance

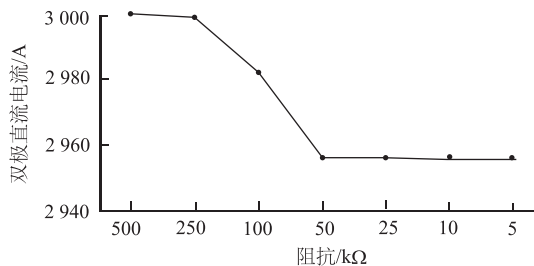


图7 双极直流电流随传感器阻抗变化曲线

Fig.7 Changing of DC Current with Sensor's Resistance

整体来看,在试验的直流系统中各种变量在传感器不同程度故障下的变化是相互关联和呼应的,这就清晰揭示了传感器故障、电压波动以及直流系统运行这三者的关系。

## 5 结语

本文系统的介绍了高压直流工程电压波动问题,简要回顾了长期以来围绕这一问题的处理思路 and 具体工作。在以往工作的基础上重点剖析了传感器故障与电压波动的关系,指出传感器故障导致的电阻改变是直流电压波动的直接原因。借助于RTDS实时仿真平台以及直流实际控制保护装置,对两者的关系进行了更进一步的研究,定量给出了故障传感器不同阻抗下直流电压受到的影响程度,并结合系统其它变量分析了在传感器故障导致的电压波动时直流系统的具体反应。

虽然机理已经揭示,但有关电压波动的研究并没有结束。一些重要的问题如:传感器内部故障点定位、传感器故障原因、有效可行的解决电压波动的方法研究等还在进行当中。相信随着各项工作的不断推进,电压波动这一长期困扰直流输电系统运行的问题终将得到彻底的解决。

## 参考文献:

- [1] 戴熙杰. 直流输电[M]. 杭州:浙江大学发电教研组直流输电教研组, 北京:电力工业出版社, 1982.
- [2] 李战鹰, 韩伟强, 郭琦, 等. 基于广域自适应多直流协调控制的RTDS仿真研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2):58-61.  
LI Zhan-ying, HAN Wei-qiang, GUO Qi, et al. RTDS Simulation Study on Wide Area Adaptive Coordinated Control of Multi HVDC System[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2):58-61.
- [3] 欧开健. 电压测量偏差对直流输电系统影响仿真研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(1):27-31.  
OU Kai-jian. Simulation Study on the Influence of DC Voltage Measurement Error on HVDC Systems[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(1):27-31.
- [4] 张建设, 张尧, 张志朝, 等. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(5):20-24.  
ZHANG Jian-she, ZHANG Yao, ZHANG Zhi-chao, et al. Influence of DC System Control Modes on Voltage and Power Recovery after Large Disturbance in Hybrid AC/DC System[J]. Power System Technology, 2005, 29(5):20-24.
- [5] 欧开健, 洪潮. 南方电网多馈入直流输电系统动态性能研究. 世界工程师大会 2004.
- [6] 荆勇, 任震, 杨晋柏, 等. 天广直流输电系统运行过电压的研究[J]. 高电压技术, 2002, 4(1):1-3.  
JING Yong, REN Zhen, YANG Jin-bai, et al. Study on Overvoltage of Tian-Guang HVDC Transmission[J]. High Voltage Engineering, 2002, 4(1):1-3.
- [7] 袁清云. 直流输电换流站换流器保护的配置及原理[J]. 高电压技术, 2004, 30(11):13-14.  
YUAN Qing-yun. Arrangement and Principal of Converter Protection of HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11):13-14.
- [8] 聂定珍, 郑劲. 灵宝换流站直流暂态过电压研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(11):50-51.  
NIE Ding-zhen, ZHENG Jin. DC Transient Overvoltage of Lingbao BtB HVDC Converter Station[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 50-51.

收稿日期: 2008-08-15

作者简介:

郝志杰(1979-), 男, 工程师, 硕士, 从事高压直流输电研究。

E-mail: haozhijie@spsc.com.cn.

张建设(1979-), 男, 工程师, 博士, 从事交直流电力系统仿真和RTDS应用研究。

(本文责任编辑 李艳菁)