

基于单极双阀组的特高压直流电压测量异常分析及仿真研究

对 U_{dH} 电压异常问题进行分析,制定了实时数字仿真系统 (Real Time Digital Simulation, RTDS) 仿真验证试验方法,阐述了逆变侧 (整流侧) U_{dH} 测量值偏低导致整流站 (逆变站) 直流电压 U_{dH} 测量值增大 (减小) 原理和普侨直流换流变分接头限制逻辑与整流侧定电压控制关系。通过对现场短时录波和长时录波解析,明确了 U_{dH} 电压异常的现象。最后通过仿真试验的验证,找到了导致电压异常事件的原因,并根据试验结果,提出了一种快速判断 U_{dH} 电压测量异常的方法。

王学之 彭光强 郭乾晋 陈欢 杨光源/南方电网超高压输电公司检修试验中心



王学之/工程师

关键词/Keywords
双阀组 ·
特高压直流 ·
实时数字仿真 ·

0 引言

2015 年 3 月 20 日,普侨直流双极 2 980 MW 无接地极全压运行。整流侧极 1 U_{dH} 电压发生多次长时偏高现象,逆变侧极 1 的 U_{dH} 电压发生多次长时偏低现象;整流侧最高异常电压达到 812 kV (正常值为 800 kV),逆变侧最低异常电压值达到 768 kV 左右 (正常值为 780 kV)。在整个极 1 直流电压异常过程中,两站极 2 直流电压均无异常。

本文以普侨直流工程为例,对双 12 脉动换流单元串联结构的特高压直流 U_{dH} 电压测量异常问题进行分析,并开展实时数字仿真系统 (Real Time Digital Simulation, RTDS) 仿真试验验证。

1 U_{dH} 电压测量异常原理分析

整流站 U_{dH} 电压测量异常或逆变站 U_{dH} 电压测量异常均会引起两站

U_{dH} 电压发生变化,下面从两方面分析 U_{dH} 电压测量异常影响原理。

1.1 逆变侧 U_{dH} 测量值偏低导致整流站直流电压 U_{dH} 测量值增大分析

由直流基本控制原理可知,正常运行时,整流侧控制直流电流,逆变侧控制直流电压。实际逆变站电压控制器的控制变量为 $U_{d \text{ RectCalc}}$ (整流器电压计算值)。该值的计算公式为

$$U_{d \text{ RectCalc}} A_1 = (U_{dHB1} - U_{dNB1}) + R_{dc1} I_{dH1} + (I_{dH1} - I_{dH2 \text{ otherPole}}) \times (R_{\text{earthA}} + R_{\text{earthB}}) \quad (1)$$

其中,接地极电阻 $R_{\text{earthA}} + R_{\text{earthB}}$ 设置为固定值。

直流线路电阻 R_{dc1} 为计算值,具体计算公式如下

$$R_{dc} = |U_{dH} - U_{dHos}| / I_{dL} \quad (2)$$

式中, U_{dHos} 为整流站送到逆变站的直流电压。

当逆变站直流电压 U_{dH} 值测量偏低后,虽然直流线路电阻 R_{dc} 会有所变化,但是在极控程序中 R_{dc} 为一个 [10,13.44] 的限幅值,当计算得到的线路电阻超过 13.44 Ω 的范围,则直流电阻输出会强制限制为 13.44 Ω ,实际直流电阻的变化不大,线路压降也变化不大,逆变侧计算得到的整流侧的电压 U_{rectCalc} 会相应下降,此时逆变侧控制系统认为整流侧电压降低了,会增大触发角 (减小熄弧角) 升高直流电压,最终使整流站直流电压升高。

普侨直流为双 12 脉动串联结构,两个阀组电压控制量分别为 ($U_{dH} - U_{dM}$) 和 ($U_{dM} - U_{dN}$) 值,当逆变站 U_{dH} 测量值偏低后,高端阀组 ($U_{dH} - U_{dM}$)

值偏低，则阀组控制系统会减小熄弧角以提高整流站直流电压值，当熄弧角小于分接头角度控制限定值后，分接头会降档位以保持熄弧角在设定的 $[17.5^{\circ}, 21.5^{\circ}]$ 范围内。当高端阀组换流变分接头降低一个档位后，但是由于低端阀组分接头未调整，由于普侨直流一极的高低端阀组间档位差禁止超过一档，因此高端阀组只能降低一个档位，即高端阀组的档位小于低端阀组一个档位。对于低端阀组，由于高端阀组组控提升 U_{dH} 直流电压，会使得 U_{dM} 的实际值也相应增大，其控制量 $(U_{dM}-U_{dN})$ 会增大，低端阀组组控通过增大触发角降低电压值。由上述分析可知，若是由逆变站直流电压 U_{dH} 测量异常导致的整流站直流电压 U_{dH} 偏高，存在下面几个特征。

- 1) 逆变侧高低端阀组的熄弧角存在明显差异。
- 2) 逆变侧高低端阀组的换流变分接头档位相差一档。

1.2 整流侧 U_{dH} 测量值偏高引起逆变侧直流电压 U_{dH} 测量值偏低分析

当整流侧 U_{dH} 测量值偏高后，对于逆变站电压控制模式下，由逆变站直流电压式(1)可知，逆变站直流电压参考值降低，但是对于逆变站两个阀组， $(U_{dH}-U_{dM})$ 和 $(U_{dM}-U_{dN})$ 值应同时减小，并且减小的幅值相等，即两个阀组逆变站两个阀组的熄弧角和分接头档位均应相同。由上述分析可知，当整流站直流电压 U_{dH} 测量异常偏高时，逆变站高低端阀组的触发角与档位不会存在差异。

2 普侨直流换流变分接头限制逻辑与整流侧定电压控制关系

普侨直流阀组控制程序中设定同极双阀组换流变分接头档位只允许相差一档，侨乡站熄弧角控制范围为 $[17.5^{\circ}, 21.5^{\circ}]$ 之间，换流变处于定角度控制时，当熄弧角小于 17.5° ，同时与另一阀组相差小于1档，会降低换流变档位，以提升熄弧角；同理当熄弧角大于 21.5° ，同时与另一阀组档位相差小于1档，会提升本阀组换流变分接头档位，以降低熄弧角。当侨乡站 U_{dH} 测量偏低时，高端阀组组控在定电压控制器的作用下会降低熄弧角，以抬升 U_{dH} ，当熄弧角降至 17.5° 时，到熄弧角最小限定值，熄弧角会保持恒定，为使熄弧角回到正常值范围，高端阀组降低换流变分接头档位，在低端阀组换流变分接头档位不变的情况下，高端阀组换流变档位仅能下降1档，此时即使 U_{dH} 测量值偏低程度加剧，逆变侧电压实际值也不再变化，由于线路电流基本恒定，线路阻抗由于组控程序的限幅策略也基本保持不变，所以整流侧 U_{dH} 也不再调整。

3 现场情况分析

3.1 短时录波分析

2015年3月20日现场的录波数据情况如下：整流站 17:08:20 时刻极1录波。逆变站 14:34:11 时刻极1录波。

录波截图如1和图2所示。

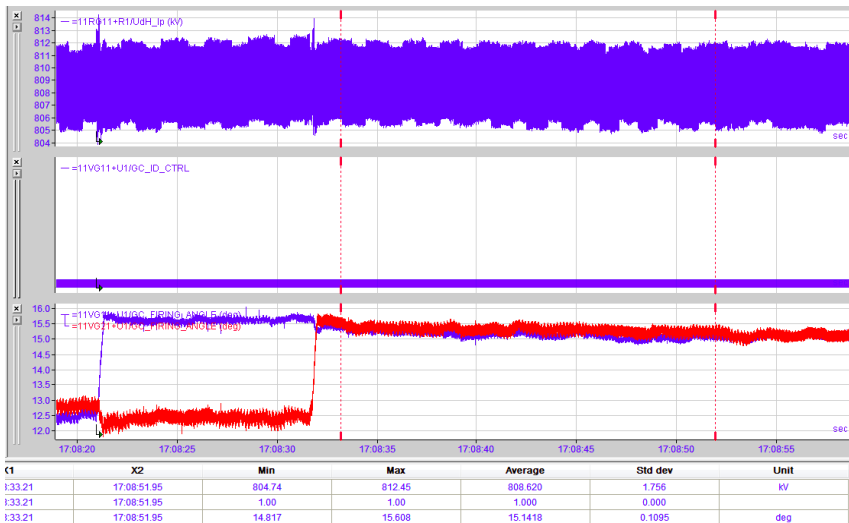


图1 整流站 17:08:20 时刻极1录波

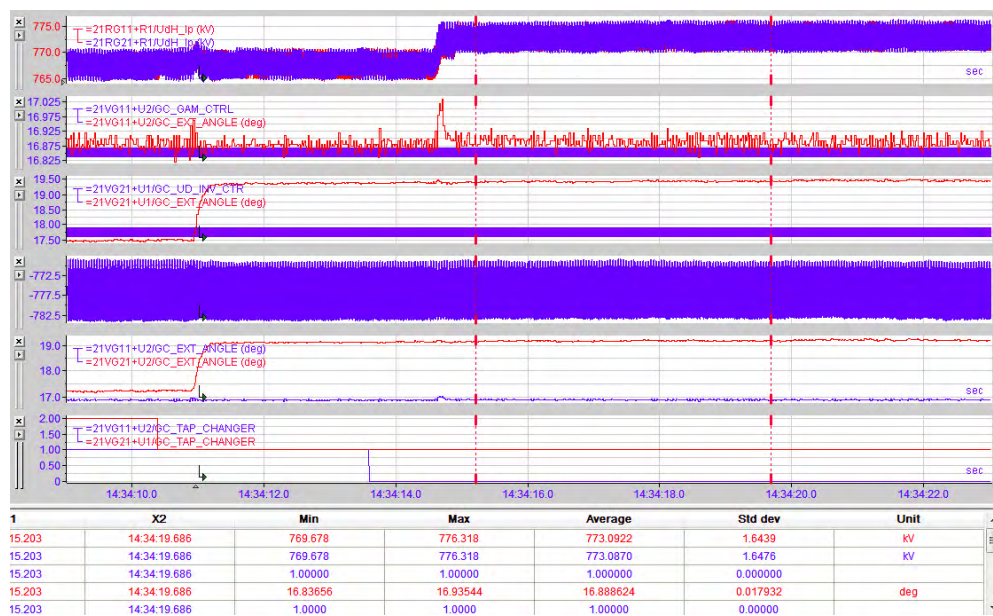


图2 逆变站 14:34:11 时刻极 1 录波

通过上述录波可以看出，在整流站 17:08:20 时刻极 1 的 U_{dh} 约为 808 kV（正常值约为 800 kV）；在逆变站 14:34:11 时刻极 1 的 U_{dh} 约为 776 kV（正常值约为 780 kV）。

2015 年 3 月 20 日 17:07 时刻现场 HMI 截图如图 3 所示。

由录波图 4 可知，逆变站极 1 的 U_{dh} 的测量通道 2 一直维持在较低 740 kV 左右，较逆变站极 1 的 U_{dh} 的测量通道 1 的 770 kV 低 30 kV 左

右。极 2 两套测量系统测量值正常。由于目前侨乡站主系统是系统 1，所采用的 U_{dh} 测量值来源于测量系统 1，而系统 1 测量值异常程度较低（最高偏低 10 kV 左右），所以未导致更加严重的直流电压异常现象。因此，不能通过切换逆变侧测量系统方式来消除此次电压异常问题。

3.2 长时录波分析

2015 年 3 月 20 日全天两站两极直流电压变化趋势如图 5~图 8 所示。

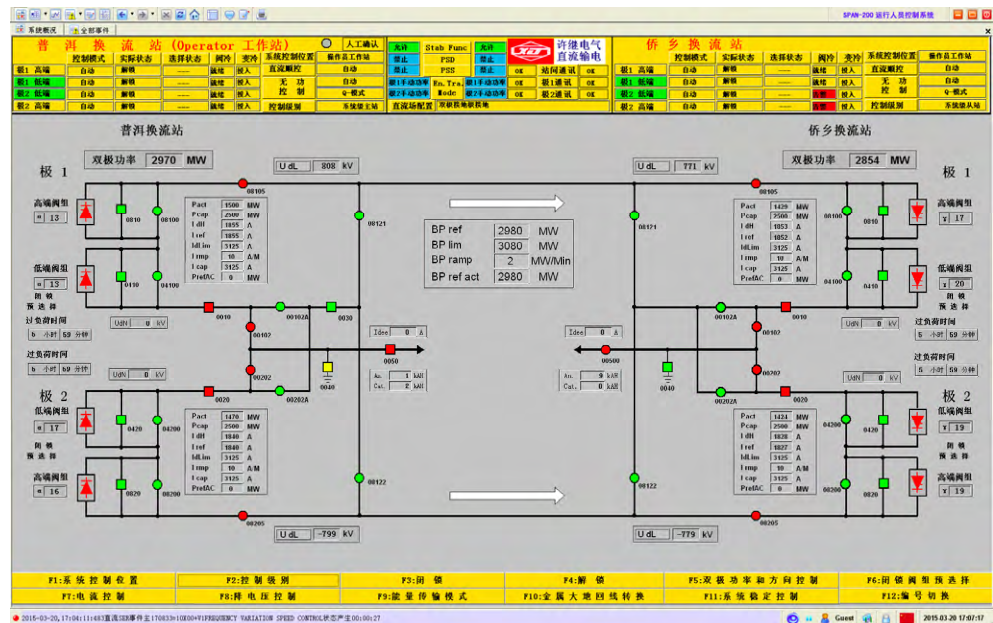


图3 2015 年 3 月 20 日 17:07 时刻现场 HMI

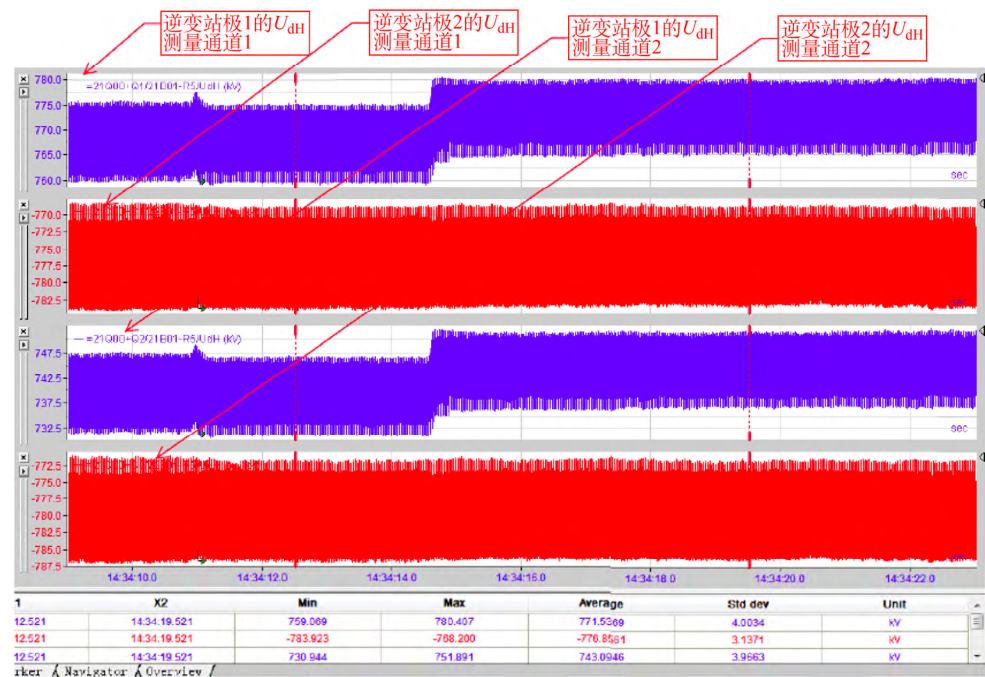


图 4 逆变器 U_{dH} 测量通道

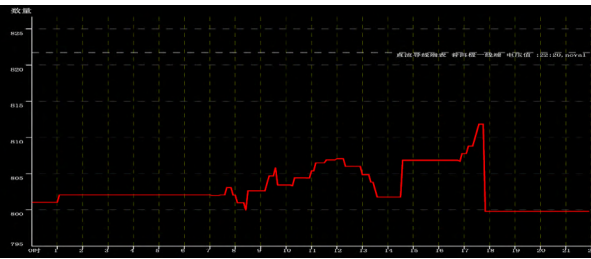


图 5 普洱站极 1 电压波形

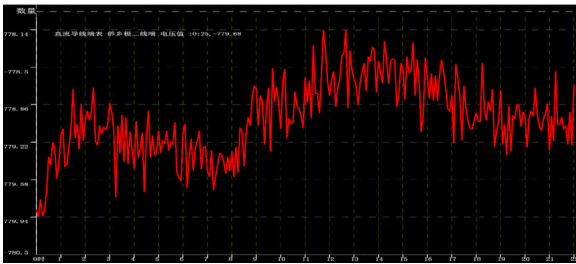


图 8 侨乡站极 2 电压波形

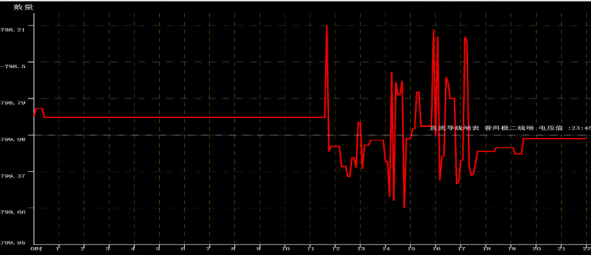


图 6 普洱站极 2 电压波形

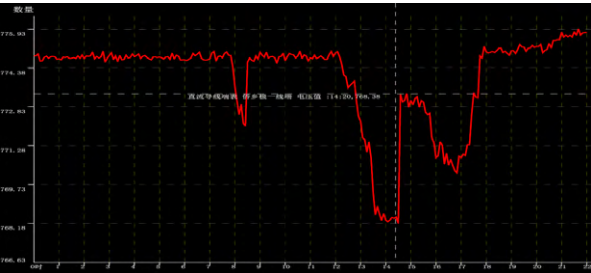


图 7 侨乡站极 1 电压波形

由上述趋势图，可以看出：凌晨 1:00 以前，整流站极 1 直流电压 U_{dH} 维持在 802 kV 较高水平（正常值应为 800 kV，同期极 2 电压一直在 800 kV 正常水平），即整流站极 1 直流电压 U_{dH} 此前已经出现数值偏高现场，但偏高数值不大。从凌晨 1:00 起，整流站极 1 直流电压 U_{dH} 突然升高约 3 kV，且一直稳定在该值持续到 8:00 左右；8:00 左右起至 18:00，整流站极 1 直流电压 U_{dH} 开始在 800~812 kV 之间至较频繁波动；18:00 后，整流站极 1 直流电压 U_{dH} 回归到 800 kV 并保持稳定。

凌晨 1:00 以前，逆变器极 1 直流电压 U_{dH} 维持在 775 kV 较低水平（正常值应为 780 kV，同期极 2 电压一直在 780 kV 正常水平），即逆变器极 1 直流电压 U_{dH} 此前已经出现数值偏低现场，但偏低数值不大。凌晨 1:00 时后，逆变器

极 1 直流电压 U_{dH} 在 775 kV 附近频发波动一直持续至 8:00 左右；8:00 左右起至 18:00，逆变站极 1 直流电压 U_{dH} 开始在 775~768 kV 之间至较频繁波动；18:00 后，逆变站极 1 直流电压 U_{dH} 逐渐向回 780 kV 正常值方向缓慢回升。

在整个极 1 直流电压异常过程中，两站极 2 直流电压均无异常。

4 仿真验证

4.1 仿真建模

RTDS 建立普侨直流工程仿真模型如图 9 所示，仿真试验系统使用同现场一致的二次控制保护设备，一次电力设备的运行工况利用 RTDS 进行模拟，并通过输入、输出板卡同控制保护屏柜相连，构成闭环的控制系统。

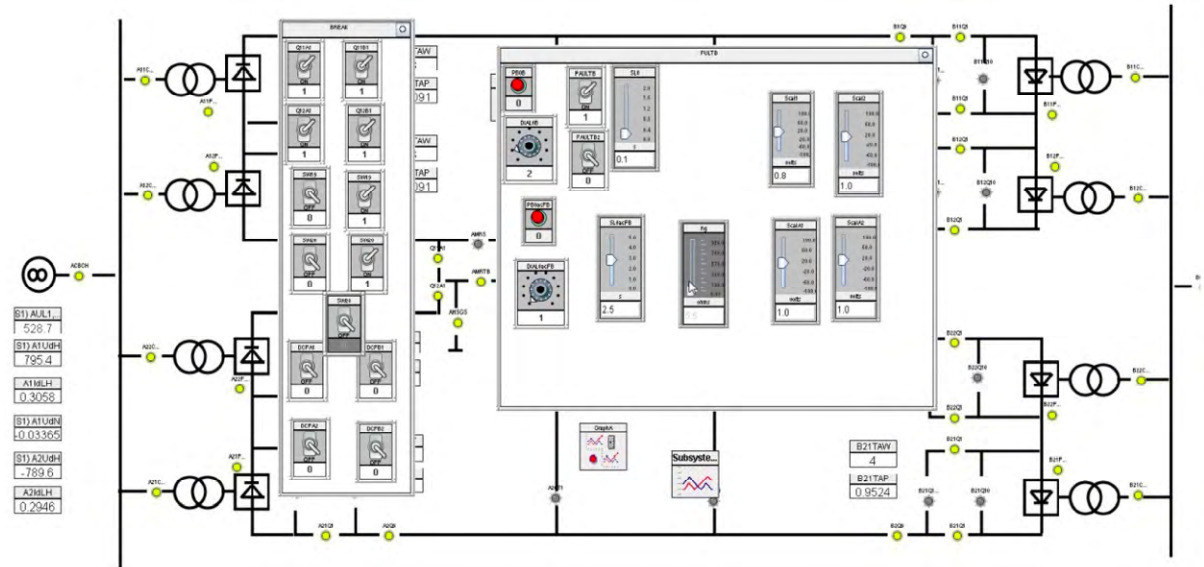


图 9 普侨直流工程 RTDS 仿真模型

RTDS 可以模拟直流输电工程一次设备的运行情况，RTDS 计算得到电压、电流等运行参数通过 IO 板卡与二次控制保护屏柜实现数据交换，构成闭环的实时仿真系统。 U_{dH} 测量装置异常后，二次系统得到的 U_{dH} 测量值同实际值之间出现误差，因此 U_{dH} 测量装置异常可通过如下方式进行仿真模拟。

通过 RTDS 仿真计算，得到直流电压的实际值 U_{dH} ，在将 U_{dH} 通过输出板卡送至控制保护系统前，利用系数 k 对其进行修正，即控制保护屏柜收到的直流电压为 $U_{dH}^* = kU_{dH}$ ，通过调节 k 的值可模拟不同程度的测量异常故障，如图 10 所示。

4.2 试验验证

本仿真试验在 510 MW、2 000 MW 及 2 980 MW 功率水平下，通过模拟普洱站、侨乡站极 1 直流电压 U_{dH} 测量装置异常的不同程度（取不同变压比），分别考察整流侧的过电压水平，不考虑同时发生其他故障的情况。

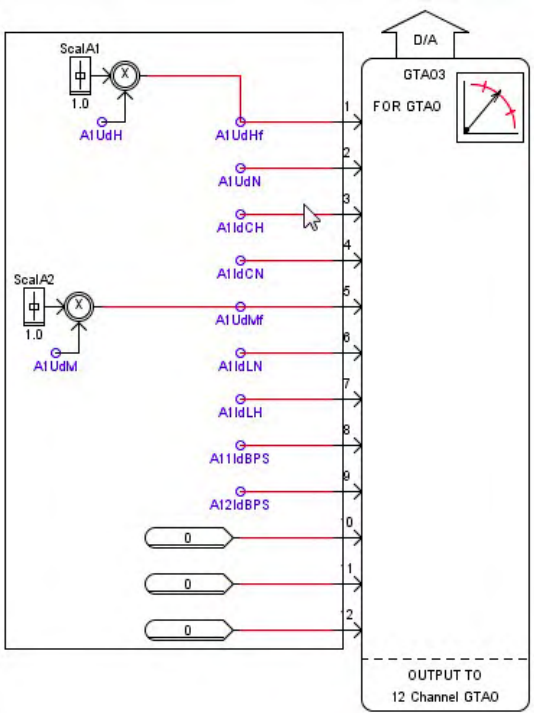


图 10 楚穗直流工程 U_{dH} 测量故障仿真模型

4.2.1 整流站极 1 电压 U_{dH} 测量异常仿真验证

设置 2 980 MW 功率水平、双极全压无接地极运行方式，两站直流电压仿真结果如表 1 所示。

在 RTDS 模型中设置整流站电压 U_{dH} 由 1 (pu) 抬高至 1.015 (pu)，试验结果如图 11 和图 12 所示。

表 1 普侨直流 2 980 MW 双极全压无接地极运行工况下两站直流电压

功率/MW	测量值与真实值之比	普洱站 U_{dH}/kV	侨乡站 U_{dH}/kV
2 980	1	800	779
	1.01	804	775
	1.015	808	775
	1.02	812	775

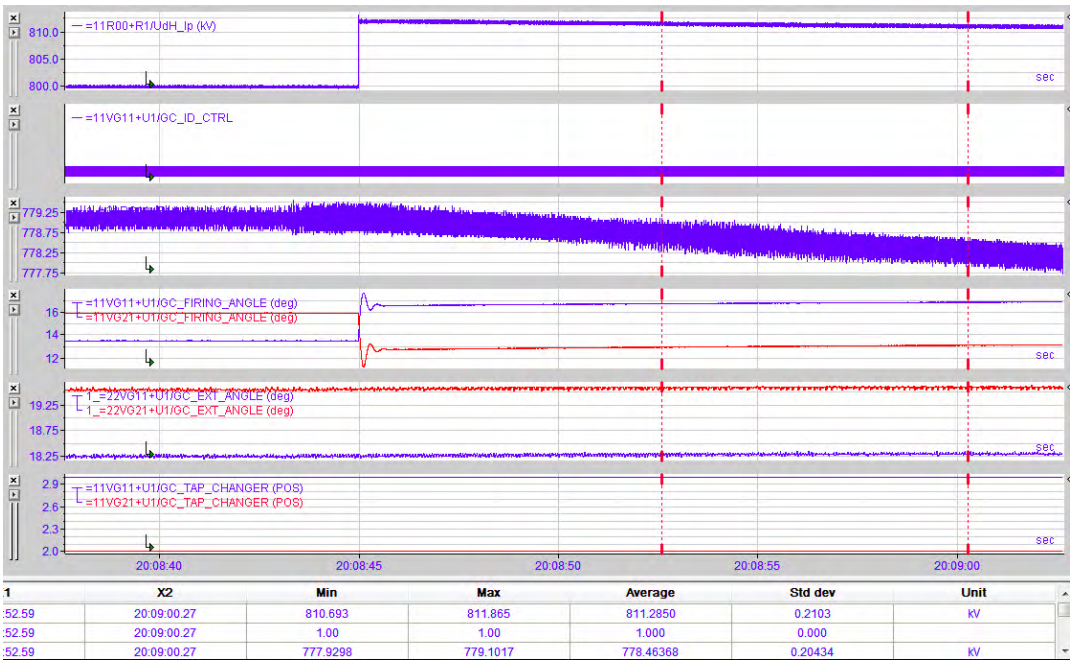


图 11 整流站电压 U_{dH} 由 1 (pu) 抬高至 1.015 (pu)

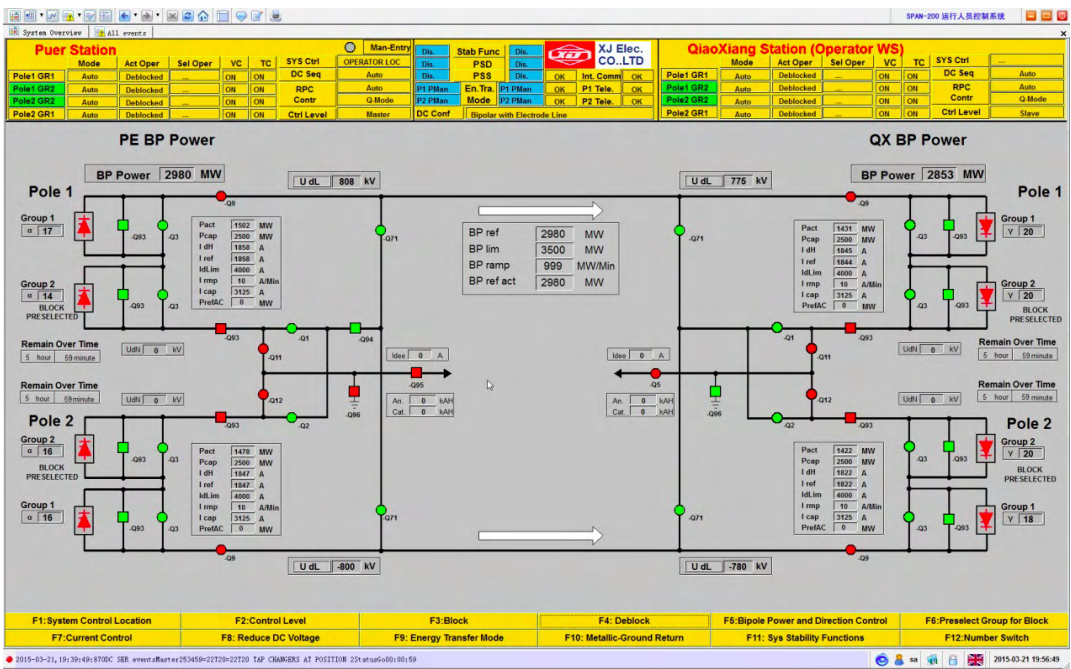


图 12 整流站电压 U_{dH} 由 1 (pu) 抬高至 1.015 (pu)

由试验图 11、图 12 可知，在将整流侧电压 U_{dH} 由 1 (pu) 抬高至 1.015 (pu) 时，整流侧极 1 电压 U_{dH} 可抬高至 808 kV，这与整流站所提供的 17:08:20 时刻极 1 录波相近；同时，逆变侧极 1 电压 U_{dH} 降低至 775 kV，这与逆变站所提供的 14:34:11 时刻极 1 的录波相近。即抬高整流侧直流电压 U_{dH} 测量值，可出现类似现场极 1 电压异常现象。

存在与现场不一致的现象为：抬高整流侧直流电压 U_{dH} 测量值时，整流侧高低端阀组触发角不一致；而逆变侧高低端阀组熄弧角一致。结合本试验与本文原理分析可知，本次普侨直流极 1 电压异常不是由整流侧直流电压测量异常导致。

4.2.2 逆变站极 1 电压 U_{dH} 测量异常仿真验证

设置 2 980 MW 功率水平、双极全压无接地极运行方式，两站直流电压仿真结果如表 2 所示。

表 2 普侨直流双极大地全压（无接地极）运行工况下 逆变侧 U_{dH} 异常两站直流电压

功率/MW	测量值与真 实值之比	普洱站 U_{dH}/kV	侨乡站 U_{dH}/kV
2 980	1	800	779
	0.99	804	775
	0.98	808	772
	0.97	808	764
	0.96	809	756
	0.95	809	748
	0.9	809	709
	0.8	809	631
0.5 (27DC 动作)		—	27DCLv stage 1 动作 闭锁

在 RTDS 模型中设置逆变站电压 U_{dH} 由 1 (pu) 降低至 0.98 (pu)，试验结果如图 13 和图 14 所示。

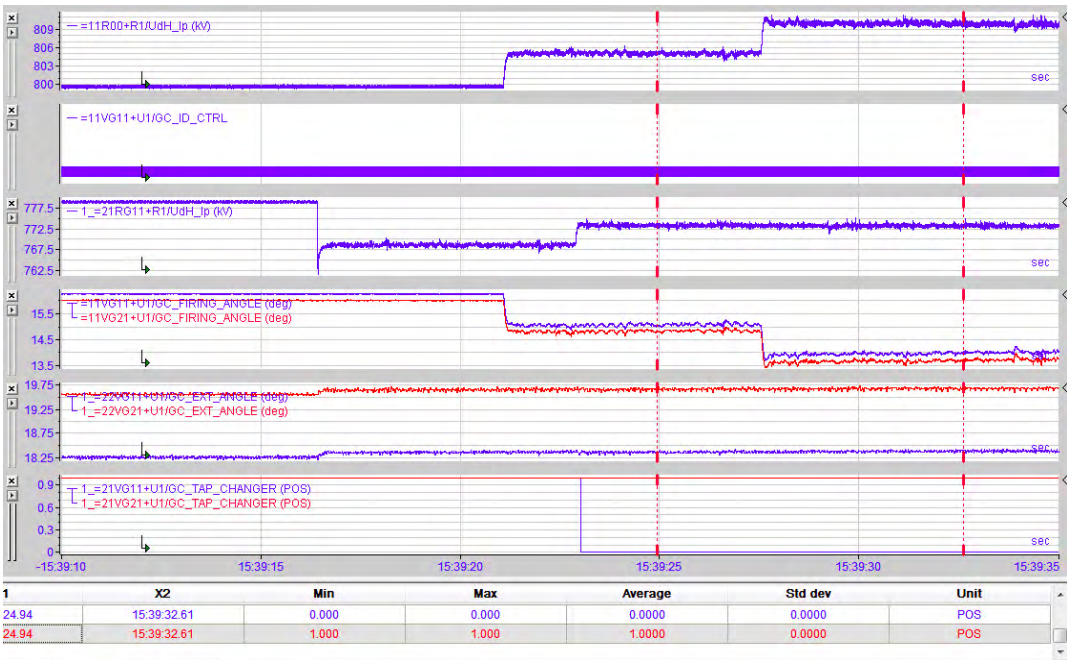


图 13 逆变站电压 U_{dH} 由 1 (pu) 降低至 0.98 (pu)

由试验图 13、图 14 可知，在逆变站电压 U_{dH} 由 1 (pu) 降低至 0.98 (pu) 时，整流侧极 1 电压 U_{dH} 可抬高至 808 kV，这与整流站所提供的 17:08:20 时刻极 1 录波相近；同时，逆变侧极 1 电压 U_{dH} 降低至 772 kV，这与逆变站所提供的 14:34:11 时刻极 1 的录波相近。即降低逆变侧直流电压测量值，可出现类似现场极 1 电压异常现象。同时，还有一个现象，即降低逆变侧直流电

压测量值时，整流侧高低端阀组触发角会一致；而逆变侧高低端阀组熄弧角会不一致。

结合本试验与本文第一节原理分析可知，引起本次普侨直流极 1 电压异常是由逆变侧直流电压测量异常导致。

4.2.3 分接头档位限制逻辑对电压控制影响

逆变站控制系统通过直流电压控制器功能把整流站对地直流电压控制在额定值或者降压

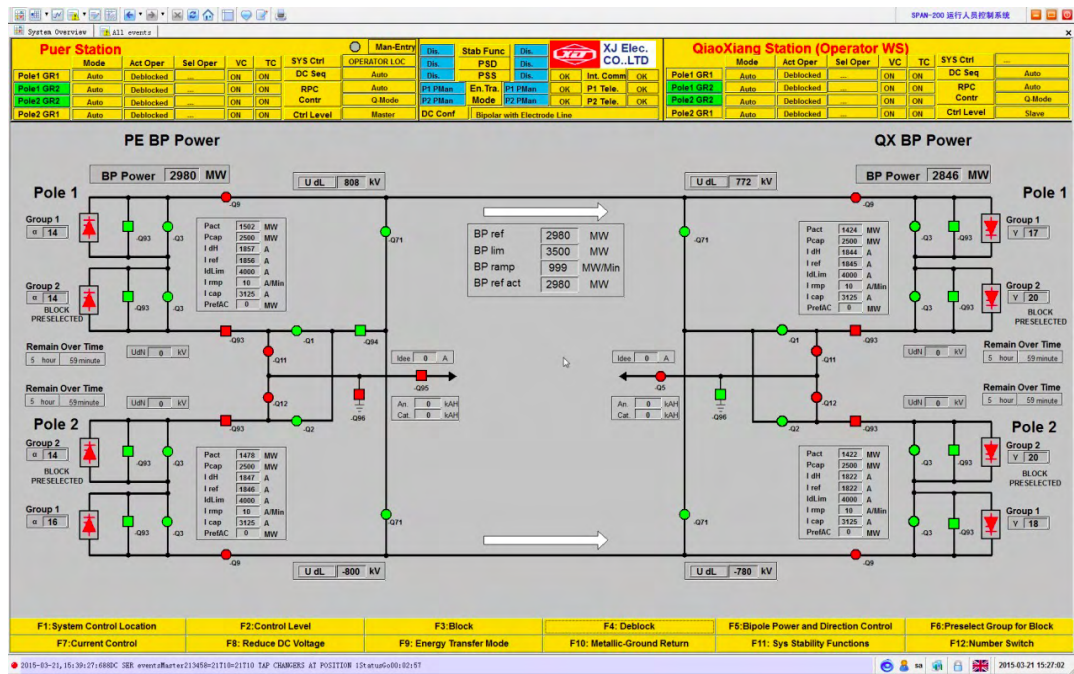


图 14 逆变站电压 U_{dH} 由 1 (pu) 降低至 0.98 (pu)

参考值。当逆变站控制直流系统电压时，控制系统根据在逆变端测量到的直流电压、该极直流电流、直流线路电阻以及接地极线路电阻，计算整流端直流电压（整流侧极 1 直流电压-极 1 直流电流×线路电阻=逆变侧极 1 直流电压），并将其维持于参考值附近。

由直流线路电阻计算程序逻辑可知，直流线路电阻根据两个站间的直流电压测量值和直流线路电流测量值 I_{dL} 进行计算，再经过一个限幅模块得到的。当直流计算出来的直流电阻 R_{dc} 小于 10 Ω 时，直流电流自动限制为 10 Ω，当直流电流大于 13.6 Ω 时，直流电流限制为 13.6 Ω，保证直流电阻在 10~13.6 Ω 之间。

$$R_{dc}=|U_{dL} \text{ 整流}-U_{dL} \text{ 逆变}|/I_{dL} \quad (3)$$

因此，在大功率水平下，直流线路电阻按照式 (3) 进行计算。当逆变侧 U_{dL} 测量偏低时，控制器计算得到的线路电阻值和线路压降就会偏大，在整流侧电压参考值一定的情况下，逆变侧的直流电压参考值就会偏低，从而缓解整流侧的直流过电压。

结合本文上文原理分析，在普侨直流高低端换流变分接头档位逻辑仅允许相差 1 档后，逆变侧直流电压 U_{dH} 测量异常时导致整流侧电压升高的电压不会达到 816 kV 的定电压控制定值。如表 3 所示，以其试验数据为例分析，当侨乡站极 1 的 U_{dH} 测量值偏低至 0.98 (pu) 时，侨乡站

表 3 全压 2 980 MW（无接地）运行方式下侨乡站极 1 U_{dH} 测量值偏低故障对直流运行的影响仿真试验结果

测量值与真实值之比	整流侧直流电压/kV	逆变侧直流电压测量值/kV	逆变侧直流电压真实值/kV	整流侧直流电流/A	逆变侧直流电流/A	触发角(°)	熄弧角(°)	整流侧换流变分接头档位	逆变侧换流变分接头档位
1	800	779	779	1 867	1 854	13, 13	21, 21	3, 3	2, 2
0.99	804	775	783	1 862	1 849	15, 15	19, 20	2, 2	0, 1
0.98	808	772	788	1 857	1 844	14, 14	17, 20	2, 2	0, 1
0.97	808	764	788	1 858	1 845	14, 14	17, 20	2, 2	0, 1
0.96	808	756	788	1 858	1 844	14, 14	17, 20	1, 1	0, 1
0.9	807	693	770	3 115	3 099	15, 15	17, 20	-1, -1	-1, 0
0.8	807	616	770	3 114	3 099	15, 15	17, 20	-1, -1	-1, 0

极 1 组 1 熄弧角降低至 17°, 同时换流变档位到 0 档, 此时极 1 组 2, 熄弧角为 20°, 档位为 1 档, 由于侨乡站极 1 双阀组换流变档位只允许相差 1 档, 同时极 1 阀组 1 熄弧角到了最小限定值, 所以当 U_{dH} 测量值偏低至 0.97 (pu)、0.96 (pu) 时, 逆变侧 U_{dH} 实际值与 U_{dH} 测量值偏低至 0.98 (pu) 时一致, 均为 788 kV, 整流侧 U_{dH} 保持在 808 kV。

5 结论

根据上述原理分析和仿真试验验证, 可以得到如下结论。

- 1) 若逆变站直流电压 U_{dH} 测量异常导致的整流站直流电压 U_{dH} 偏高, 则逆变侧高低端阀组的熄弧角存在明显差异; 逆变侧高低端阀组的换流变分接头档位相差一档。
- 2) 若整流站直流电压 U_{dH} 测量异常偏高时, 逆变站高低端阀组的触发角与档位不会存在差异。
- 3) 可以根据本文结论及如表 3 所示的 U_{dH}

测量异常特征, 快速判断两站 U_{dH} 测量值是否异常及异常程度。

6 结束语

南方电网所辖直流工程多次发生过直流电压测量值异常问题, 如果电压互感器本体或二次测量回路故障, 导致逆变侧送至控制系统的直流电压测量值相比实际值偏低, 将导致直流侧电压异常升高, 严重时可能危及设备安全。因此, 通过简洁有效的方法快速判断直流电压测量值异常显得尤为必要, 本文研究所提方法可满足该需求。

—————

作者简介
王学之 (1983-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为直流输电控制保护系统研究及仿真。
(收稿日期: 2015-12-10) EA
(编辑: 杨帆)

(上接第 236 页)

将试验结果, 输入上述计算程序中可得:
 $A=35.12$, $b=-9.846$, $E(t)=35.12$ 。

5 结束语

运用对所用绝缘材料同时施加模拟电缆附件运行条件的电热老化试验, 并在不同老化周期下测定绝缘材料电气击穿强度, 运用计算拟合得到绝缘材料在试验老化条件下的电气绝缘衰减曲线, 可获得材料的老化寿命, 也就是电缆附件等效的设计老化寿命。

参考文献

[1] 喻岩珑, 李晟, 孙辉, 等. XLPE 电缆绝缘老化与剩余寿命评估的试验方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 27 (4).

[2] 施启达. 高压电缆热缩聚合物终端寿命评估[J]. 化工施工技术, 1992.

[3] 刘少克, 等. 电绝缘寿命评估的发展概况[C]. 第五界绝缘材料与绝缘技术学术交流会, 1993.

[4] 蒋雄伟, 等. 绝缘材料老化寿命评估模型的研究

进展[J]. 高电压技术, 2000, 26 (3).

[5] 李艳. 高压 XLPE 电缆绝缘检测及评估系统的设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

[6] 吕事桂, 等. 船用橡胶电缆整体老化剩余寿命研究[J]. 船海工程, 39 (4).

[7] 叶强, 等. 高压脉冲下绝缘材料电老化寿命模型[C]. 第十一届全国工程电介质学术会议论文集, 2007.

[8] 霍振星. 基于 10kV XLPE 电缆的绝缘老化分析研究[J]. 天津: 天津大学.

[9] 李金伴, 陆一心. 电气材料手册[M] 北京: 化学工业出版社, 1990.

[10] 刘予王, 王惠明. 电力电缆结构设计原理[M]. 西安交通大学出版社, 1996.

—————

作者简介
高智益 (1983-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电缆运维检修工作。
(收稿日期: 2015-12-10) EA
(编辑: 杨帆)