

宜宾站换流变压器阀侧电压测量故障分析及处理

孙文禹 佳陈伟

(国家电网公司运行分公司宜宾管理处 四川 宜宾 644000)

摘要: 宜宾站自调试起,多次出现换流变压器末屏电压测量故障。基于2015年7月1日换流变压器阀侧电压测量故障,在回路原理和等效电路的基础上,分析了末屏电压异常的原因,提出了多种解决末屏电压畸变的办法和措施。消除末屏电压发生谐振和畸变将有利于直流系统和保护设备运行的可靠性,对现有的直流工程中末屏电压测量出现回路的改造,以及未来直流工程中末屏电压互感器的设计,提供参考依据。

关键词: 直流输电;换流变压器;末屏电压;畸变;电压互感器;铁磁谐振

Abstract: Since the commissioning for Yibin converter station begins, several voltage measurement faults at bushing tap occur frequently. Based on the valve-side voltage measurement fault of converter transformer in 1st July, 2015, the abnormal reasons for voltage at bushing tap are analyzed on the basis of circuit principle and equivalent circuit, and some methods and measures to solve the voltage distortion at bushing tap are put forward. Eliminating the voltage resonance and distortion at bushing tap will be conducive to the operation reliability of DC system and protection device, and it provides a reference for the transformation that the circuit occurs during voltage measurement at bushing tap in the existing HVDC project, as well as the design of voltage transformer at bushing tap for the future HVDC project.

Key words: HVDC transmission system; converter transformer; end shield voltage; distortion; voltage transformer; ferromagnetic resonance

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.012

0 引言

在高压直流输电系统中,换流变压器是最重要的设备之一,这是由于其处在交流电和直流电互相变换的核心位置以及在设备制造技术方面的复杂性和设备费用的昂贵等所决定的。作为直流输电换流站的主要设备,换流变压器承担换能的重要作用。对换流变压器电压进行在线监测,实时获得换流变压器的电压波形特征,是保证直流输电工程安全运行的重要手段。

近几年投运的特高压直流输电工程,如锦苏直流、宾金直流、复奉直流等都采用电容式套管,从电容式套管的末屏处抽取电压信号用于在线监测和录波以及中性点偏移保护。

1 故障简述

2015年7月1日01时11分,宜宾站极II高端阀组由充电转连接过程中,阀组A、B、C 3套保护同

时发“YD换流变阀侧电压互感器A相故障”告警,现场万用表检查3套保护装置UVD电压分别为141.27V、141.19V、141.12V,运行人员申请将极II高端换流变压器转至检修状态。故障后宜宾管理处立即组织检修人员、国网四川省电力公司电力科学研究院、设备厂家开展现场分析处理工作。23时19分,宜宾站极II高端换流器在线投入正常,主要事件列表如表1所示。

表1 主要事件记录

时间	主机	事件
01:11:23	极2 高端 阀控系统 A(B)	阀组连接命令
01:11:45	极2 高端 阀控系统 A(B)	P2. WP. Q11(80212)/极2 高端低压隔刀合位产生
01:11:45	极2 高端 阀控系统 A(B)	P2. WP. Q11(80212)/极2 高端低压隔刀分位消失
01:11:45	极2 高端 阀组保护系统 A	YD换流变阀侧电压互感器 A相故障
01:11:45	极2 高端 阀组保护系统 B	YD换流变阀侧电压互感器 A相故障
01:11:45	极2 高端 阀组保护系统 C	YD换流变阀侧电压互感器 A相故障

现场检测 Y/D - A 相换流变阀侧套管电容值

C_1 、 C_2 合格, SF_6 分解产物及微水含量正常, 换流变压器离线油色谱检测正常, 未屏二次回路及板卡检测正常。通过对故障录波分析, 判断该次测量异常是由于系统扰动导致许继电压采集变换器内铁心饱和, 于特定的情况下形成动态稳定的谐振现象, 现场更换了极 II 高端 Y/D - A 相换流变压器 a 套管末屏分压板, 和与该板卡对应的 A、B、C 3 套测量接口屏内的电压采集变换模块。

更换后进行低压加压试验, 控制保护系统及故障录波采样正常。

2 故障检查

2.1 现场检查

1) 一次设备试验情况

① SF_6 气体相关检测

对极 2 高 Y/D - A 相换流变压器 a 套管 SF_6 进行了微水、分解产物检测, 检查结果正常, 如表 2、表 3 所示。

表 2 SF_6 分解产物记录表

名称	含量/($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)	名称	含量/($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)
甲烷	3.39	乙烯	0.25
乙烷	0.34	乙炔	0.12
氢气	9.69	一氧化碳	158.09
二氧化碳	343.06	总烃	4.10
分析意见		含量未发现异常	

表 3 SF_6 微水记录表

名称	含量/($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)	名称	含量/($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)
SO_2	0.0	HF	0.00
H_2S	0.00	CO	34.2
微水	162.3		
分析意见		含量未发现异常	

检测结束后对套管压力进行实测, 测量结果为 3.8 bar, 与上次实测结果相同。恢复现场密度继电器后, 对接头进行检测, 未见异常。

② 本体油色谱分析

对本体取底部油样并开展离线油色谱分析, 结果未见异常, 详见表 4。

③ 电气测试

表 4 本体底部油样离线油色谱分析记录表

单位	宜宾换流站	设备名称	极 II 高端 Y/D - A
相别	A	取样及分析日期	2015 - 07 - 01
甲烷	3.39 $\mu\text{l/L}$	乙烯	0.25 $\mu\text{l/L}$
乙烷	0.34 $\mu\text{l/L}$	乙炔	0.12 $\mu\text{l/L}$
氢气	9.69 $\mu\text{l/L}$	一氧化碳	158.09 $\mu\text{l/L}$
二氧化碳	343.06 $\mu\text{l/L}$	总烃	4.10 $\mu\text{l/L}$
分析意见		含量未发现异常	

对极 2 高 Y/D - A 相换流变压器 a 套管进行了未屏绝缘、套管介损、电容测试, 测试结果与 2015 年年度预防性试验对比无异常。

未屏绝缘测试结果为 31.8 G Ω , 满足绝缘要求。2015 年年度预防性试验结果见图 1。

1. 绝缘电阻测量: (单位: G Ω)

测量日期	2015.3.10	环境温度	15 $^{\circ}\text{C}$	空气湿度	50%
使用仪器	XD2905 绝缘电阻表				
标准要求	主绝缘, 不小于出厂值的 70%; 未屏对地, 不低于 1000M Ω ; 未屏对地绝缘电阻小于 1000M Ω 时, 应测量未屏对地的介电损耗因数 ($\tan\delta$), 其值不大于 0.02				
套管相别	测量部位	施加电压 (kV)	2015 预试		
a	一次-未屏	2.5	41.0		
	未屏-地	1	12.3		
b	一次-未屏	2.5	26.7		
	未屏-地	1	8.22		
结论	合格				

图 1 2015 年年度预防性试验未屏绝缘测试结果
套管介损、电容测试采用正接法测试, 测试结果见表 5 及图 2。

表 5 套管介损及电容量测试结果记录表

测量日期	2015 - 07 - 01 <th>接法</th> <td>正接线</td>	接法	正接线
F	45/55 Hz	U_{cx}	10.05 kV
C_x	472.4 pF	T_g	+0.279%

2. 介电损耗正切值及电容量测量:

测量日期	2015.3.10	环境温度	15 $^{\circ}\text{C}$	空气湿度	50%				
使用仪器	AI-6000E 介损测试仪								
标准要求	电容值与出厂值比较变化超过 +5% 时, 要查明原因; 20 $^{\circ}\text{C}$ 时 $\tan\delta$ 不大于: 0.008								
套管相别	测量部位	施加电压 (kV)	$\tan\delta$ (%)			C_x (pF)			
			出厂值	2014 交接	2015 预试	出厂值	2014 交接	2015 预试	ΔC_x (%)
a	一次-未屏	10	0.262	0.286	0.354	471.4	477.3	474.2	0.59
b	一次-未屏	10	0.276	0.252	0.307	472.0	476.5	475.7	0.78
备注	本年预试将出厂值作为参考值								
结论	合格								

图 2 2015 年年度预防性试验套管介损及电容量测试结果
根据以上试验结果可以判断现场一次设备无异常。

2.2 二次回路检查情况

换流变压器阀侧未屏分压器采用电容分压原理, 套管自身的电容 C_1 和未屏电容 C_2 与未屏分压

器电容值进行匹配,得到二次控制保护系统所需的 57.7 V 额定电压,具体如图 3 所示。

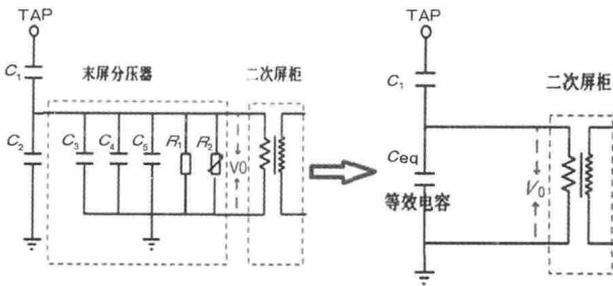


图 3 换流变压器阀侧套管末屏分压器原理图

换流变压器阀侧末屏分压器只有一路电压输出,在就地端子箱并接出三路电压分别到测量接口屏 A、B、C,其中到 B 屏的电压回路又并接至故障录波屏,如图 4 所示。

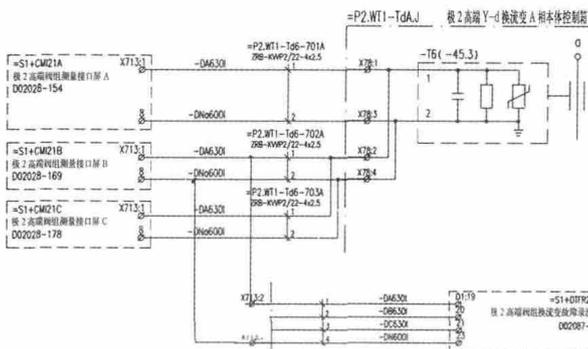


图 4 换流变压器阀侧套管末屏分压器接线图

现场对 Y/D - A、Y/D - B 相末屏分压器进行隔离检测,测量其自身的电容值和电阻值,并与备品进行比较,测量结果如表 6 所示。

表 6 末屏分压器自身电容及电阻测量记录表安装位置

安装位置	Y/D - A	Y/D - B	备用末屏分压器
等效电容/ μF	0.759	0.765	0.751
等效电阻/ $\text{M}\Omega$	0.998	1.006	0.996

现场对电压采集变换模块进行了采样检测,模块采样未发现异常情况,试验记录如表 7 所示。

表 7 电压采集变换模块采样检测记录表

二次加量/V	保护采样值(A相)/kV	保护采样值(B相)/kV
57.7	88.6	88.6
100	156.5	155.6
120	185.6	184.2

现场在换流变压器阀侧进行低压加压试验,检查阀侧末屏电压值正确,波形正常无畸变(同时对 Y/D 换流变压器三相进行加压,三相波形一致),如图 5 所示为阀侧加 10 kV 电压时手动触发的故障录

波图。

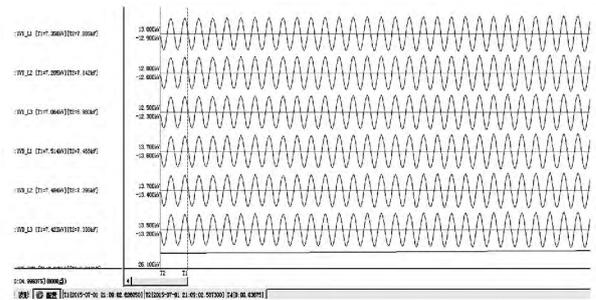


图 5 阀侧加 10 kV 电压时保护所录波形

综上所述,在单独对一次设备、二次设备进行检查性试验都没有发现任何异常情况。

3 故障原因分析

3.1 理论分析

换流变压器阀侧末屏电压测量环节基本原理如图 6。

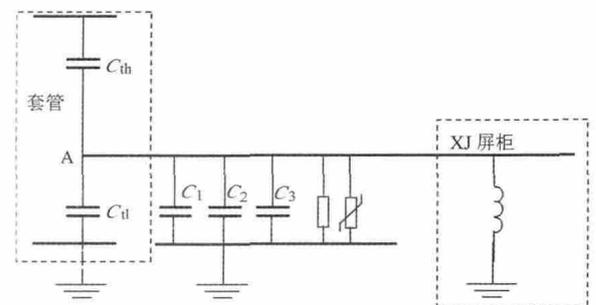


图 6 末屏电压测量原理图

图中 C_{th} 、 C_{t1} 为套管电容值, $C_{th} = 759 \mu\text{F}$ 、 $C_{t1} = 4.6 \text{ nF}$ 。套管电容和 C_1 、 C_2 、 C_3 共同构成末屏电压测量 PT(电容分压器), $C_1 = 0.681 \mu\text{F}$ (小)、 $C_2 = 47.5 \text{ nF}$ (中)、 $C_3 = 22.1 \text{ nF}$ (大), C_1 、 C_2 、 C_3 电容耐压 250 V DC。

末屏电压 PT 的负载为 XJ 屏柜中的电压变送器。该电压变送器的原边是 200 V,副边 4 V,由于该电压变送器采用的是铁心变压器,存在饱和的可能性。当电压变送器运行于线性区时,电感稳定且较大,当电压变送器进入饱和后,从原边看,其等效电感值将减少。

末屏电压电容分压器带上负载后,由于负载为感性 Z_L 会增大。随着电压的升高,电压变送器逐渐进入饱和区,负载电感进一步减小, Z_L 会进一步增大。随着 Z_L 的增大,电压变送器更加容易饱和。电感变化对 Z_L 的影响见式(1)。

$$Z_L = \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} \quad (1)$$

电压变送器工作于线性区时,电感较大且稳定;电压变送器一旦进入饱和区,电感减小,流过电压变送器的电流将大大增加,且电压变送器的恢复将十分困难。

3.2 现场原因分析

从原理电路图可以看出,末屏电压互感器采用电容分压。由于二次 PT 采用电磁式互感器,实际是一个电感,因此,等效电容和等效电感会在某个特定频率谐振,导致信号畸变,严重时测量电压会超出实际信号数倍,使二次 PT 铁心过流发热。

末屏电压互感器实际上就是一种特殊的电容式电压互感器(CVT)。一般国内厂家在设计和生产 CVT 时,都会考虑与次级电磁式 PT 配套使用时所产生的铁磁谐振问题。产品内部一般装设中压变压器,并装设有阻尼回路和补偿电抗器,阻尼回路用来抑制谐振,补偿电抗器用来补偿接入电感元件后的转换误差。即使 CVT 不接入二次 PT,也不装设中压变压器,由于 CVT 自身电路存在的寄生电感、线路电感等感性元件,也存在谐振问题。

查看故障时刻录波,换流变压器网侧交流系统三相电压正常,Y/Y 及 Y/D 换流变压器阀侧三相电压均出现短时畸变,持续时间约 100 ms,之后除 Y/D A 相故障持续外,其余五相均恢复正常,如图 7、图 8 所示。在进行解锁阀组连接时,高端的阀组的星侧和角侧均出现超过 200 V 的电压,均超过了设计电压值,但由于产品个体的差异性,星侧变送器瞬间恢复,角侧变送器导致信号畸变。

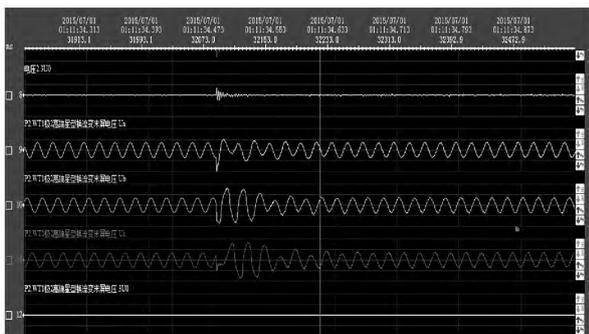


图 7 故障时刻换流变压器网侧交流侧电压

故障时刻网侧交流系统未发生明显扰动,初步排除交流系统干扰原因。阀侧星接、角接线换流变

压器均出现短时扰动,结合当时事件记录判断在极 II 高端阀组转连接时,阀侧一次设备有短时冲击。冲击过后 Y/D A 相换流变压器持续出现异常故障电压,Y/D B 相、Y/D C 相电压恢复正常,但角接绕组中阀侧无故障电流,判断故障原因为二次测量元件问题。

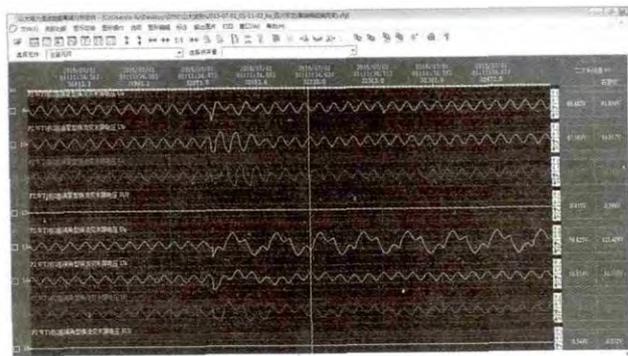


图 8 故障时刻换流变压器阀侧交流侧电压、电流

在双极高端调试期间,YD 换流变压器末屏分压器连接的许继电压采集变换模块就多次出现过饱和谐振现象,后在 2015 年 3 月年度检修期间在极 I、极 II 高端阀组测量接口屏更换了 Y/D 换流变压器对应的电压采集变换模块,增加了模块的抗饱和能力,最大采样值由 140 V 改为 200 V。

基于宜宾站调试期间发生过二次铁磁谐振的情况,在换流变压器充电或其他系统扰动情况导致阀侧电压异常偏高,超出控制保护测量模块的正常工作范围,造成测量元件铁磁饱和,饱和后的测量元件在特定的情况下与末屏分压回路形成动态稳定的谐振现象。分析认为许继电压采集变换模块上电压取量元件采用铁磁式结构是导致产生谐振现象的主要原因。

4 故障处理

为确保安全,更换了末屏分压器、电压采集变换模块,更换后再次进行低压加压实验。

1) 更换末屏分压器、电压采集变换模块

现场更换了极 II 高端 Y/D - A 相换流变压器 a 套管末屏分压器,同时更换了极 II 高端测量接口屏 A、B、C 内的 A 相电压采集变换模块,见图 9,更换后测量回路的绝缘电阻合格。

2) 低压加压试验记录及波形

更换电压采集模块完成后,现场对阀侧进行

低压加压试验,检查阀侧末屏电压值正确,波形正常无畸变,阀侧加 10 kV 电压时保护所录波形如图 10 所示。



图 9 更换电压采集模块现场照片

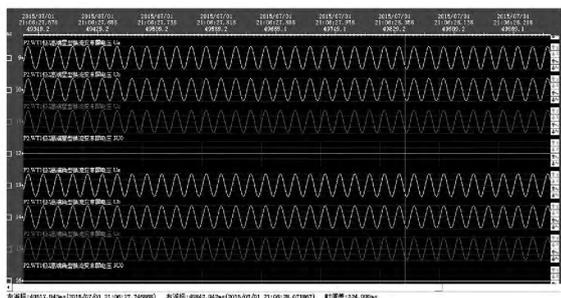


图 10 更换电压采集模块后阀侧加 10 kV 电压保护所录波形

5 总结

分析了许继电压采集变换模块上电压取量元件谐振,导致换流变压器阀侧电压测量异常事件,认为许继末屏电压互感器缺少必要的阻尼回路和补偿回路;当一次电压发生突变时,二次 PT 过励饱和、阻

抗下降,等效电容和等效电感在某个特定频率发生谐振,导致信号畸变,严重时测量电压会超出正常电压数倍,使二次 PT 铁心过载发热,甚至烧毁,因此建议改进末屏分压回路设计,增加阻尼和补偿回路,并通过仿真以避免谐振现象的产生,保障直流系统的稳定运行。

参考文献

[1] 刘耀,王明新. 高压直流输电系统保护装置冗余配置的可靠性分析[J]. 电网技术,2008,32(5):51-54.

[2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,1990:122-136.

[3] 刘国福,张润丹. 电容式电压互感器故障分析[J]. 电力安全技术,2006(9):26-27.

[4] GB/T 4703-2007,电容式电压互感器[S]. 北京:中国标准出版社,2008:15-21.

[5] 陆晓春. 变压器状态检修技术方案的可靠性研究[J]. 上海电力学院学报,2003(2):26-32.

[6] 严璋. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,1998:231-255.

[7] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术,2006,30(2):1-6.

作者简介:

孙文(1980),工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

禹佳(1983),工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

陈伟(1991),助理工程师,研究方向为特高压直流输电技术。
(收稿日期:2015-08-04)

(上接第 37 页)

[12] 肖宾,胡毅,刘凯,等. 1 000 kV 交流紧凑型输电线路等电位进入方式[J]. 高电压技术,2011,37(8):1868-1874.

[13] 舒印彪,胡毅,王力农. 500 kV 紧凑型线路带电作业保护间隙研究[J]. 中国电力,2003,36(5):51-53.

[14] 胡毅,王力农,舒印彪. 带电作业保护间隙的放电特

性研究[J]. 高电压技术,2002(11):17-18.

[15] 刘凯,胡毅,王力农,等. 1 000 kV 输电线路带电作业保护间隙的研究[J]. 高电压技术,2006(12):83-88.

作者简介:
彭勇(1984),硕士,工程师,主要从事输电线路运行维护、带电作业技术研究。
(收稿日期:2015-09-22)