

开展变压器测温装置不停电检修的必要性分析

李金忠¹, 沈维捷², 胡煜亮², 陈俊杰³, 张 喆², 汪 可¹

(1.中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2.国网上海市电力公司, 上海 200063;

3.国网上海电力科学研究院有限公司, 上海 200437)

摘要:本文中作者对两表偏差产生的原因进行了分析,介绍了变压器测温装置校准的方式,并阐述了不停电检修的必要条件。

关键词:变压器;测温装置;系统误差

中图分类号:TM406

文献标识码:B

文章编号:1001-8425(2019)03-0074-05

Necessity Analysis on Field Maintenance of Transformer Temperature Measuring Device without Power off

LI Jin-zhong¹, SHEN Wei-jie², HU Yu-liang²,
CHEN Jun-jie³, ZHANG Zhe², WANG Ke¹

(1.China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 2.State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200063, China; 3.State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract:The error causes of the two-table are analysed by the authors in this paper. The calibration method of transformer temperature measuring device is introduced. The necessity of uninterrupted maintenance is expounded.

Key words:Transformer; Temperature measuring device; System error

1 前言

由于变压器事故大多伴随温度异常现象,因此测温装置准确度直接影响变压器热保护可靠性。DL/T 572-2010《电力变压器运行规程》要求:测温装置现场指针示值与控制室远方数据之间出现的不一致(即两表偏差)应不超过 5K 见图 1。测温装置发生两表偏差大于 5K 时即被判为运行缺陷并纳入检修计划。

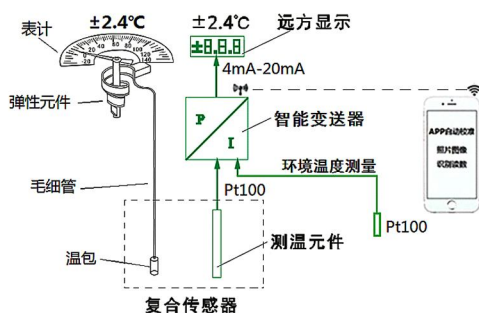


图 1 测温装置原理图

根据运行记录显示,即使在试验室按照 1.5%FS 准确度要求检验合格的测温装置,受到变电站现场各种影响因子作用后仍然可能出现很高的运行缺陷率。某电力公司 220kV 及以上变压器配套的约 2 000 台测温装置中有 50%以上存在两表偏差运行缺陷。测温装置发生两表偏差缺陷并不一定代表其产品质量有问题,缺陷率居高的主要原因是电力变压器实施组部件检修机会较少,在等待检修的过程中会有越来越多测温装置加入“带病工作”队伍而不断推高运行缺陷率。本文中笔者提出了在变压器不停电条件下实施校准的方法,能够为测温装置及时检修作业提供技术支撑,不停电在线校准技术可将两表偏差缺陷率控制在 0.1%以内。

2 两表偏差缺陷分析

两表偏差源自于测温装置的系统误差和环境影响量两个部分。

2.1 系统误差

测温装置由指针温度计和远方信号装置两个部分构成见图1。指针温度计由传感器温包、弹性元件及毛细管三个部分焊接而成,指针温度计按照 JB/T6302-2016《变压器用油面温控器》要求生产制造,准确度等级 1.5%FS 指针温度计 160℃量程时的允许误差范围是 $\pm 2.4^{\circ}\text{C}$ 。远方信号装置按照 JB/T7631-2016《变压器用电子温控器》设计制造,由传感器测温元件(准确度相当于 0.5%FS)、温度变送器(准确度 0.5%FS)及远方数字显示器(准确度 0.5%FS)三个部分构成,远方信号装置允许误差范围也是 $\pm 2.4^{\circ}\text{C}$ 。这两种 160℃量程 1.5%FS 准确度的温度仪表允许误差均为 $\pm 2.4^{\circ}\text{C}$,极端情况下这两种温度仪表在同一个测量点的示值可以相差 4.8℃。这种由两个仪表允许误差带来的偏差称为系统误差。

2.2 影响量

安装、运行工况会给测温装置带来环境温度、传感器插入深度、接触电阻、气压(海拔)和密闭系统慢性渗漏等影响,统称为环境影响。

2.2.1 环境温度影响

指针温度计在由弹性元件、毛细管及温包三个零件焊接构成的密闭系统内充入感温介质(例如液体)后,因为感受温度变化引发温包内感温介质体积(或者压力)变化,这个变化量通过毛细管传递到弹性元件使得指针偏转显示温度。

环境温度变化影响将导致毛细管内感温介质随环境温度热胀冷缩并引发指针温度计示值变化,是压力式温度计难以克服的设计缺陷。指针温度计的环境温度变化影响量允许值为 $3.2^{\circ}\text{C}/40\text{K}$,可以按照 DL/T1400-2015 提供快速鉴定方法进行检测,见图2。

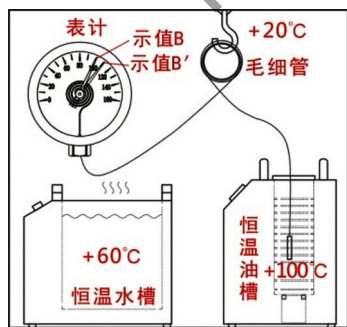


图2 环境温度影响试验

在 20℃ 试验室环境温度条件下,将指针温度计温包插入 100℃ 恒温槽,稳定 10min 后记录指针温度计示值 B 。再将毛细管放入 60℃ 恒温水槽中,稳定 10min 后记录指针温度计示值 B' 见图2,两次试验值的差别 $B-B'$ 超过 $3.2^{\circ}\text{C}/40\text{K}$ 时,表示这台指针温

度计环境温度影响量不合格。测温装置中指针温度计的环境温度影响量不合格表示该产品两表偏差已经无法校准。

2.2.2 传感器插入深度影响

由于变压器组、部件标准 JB/T6302-2016 规定测温装置传感器插入深度 150mm(见图3左)与变压器制造标准 GB/T6451-2015 要求插入深度不小于 110mm(见图3右)存在冲突,现场存在大量变压器的温度计座长短不一现象,此现象直接引发指针温度计负偏差,这个负偏差将使得两表偏差增大。插入深度影响示意图及试验检测结果见图3和表1。

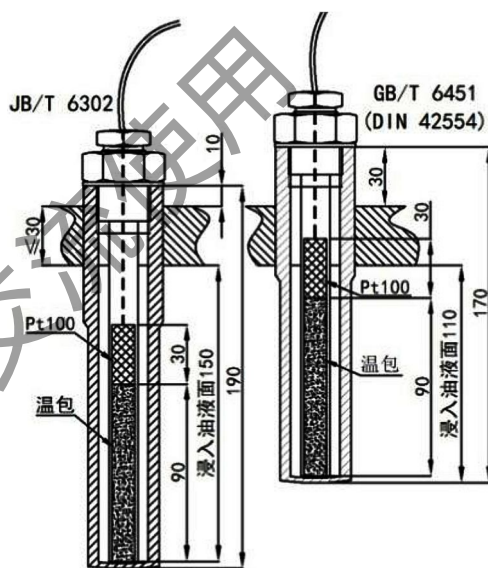


图3 插入深度影响示意图

表1 插入深度影响试验数据

项目/检验点	40℃		80℃		100℃	
插入深度/mm	150	110	150	110	150	110
指针示值/℃	39.8	39.8	80.2	79.8	100.4	99.8
远方示值/℃	40.1	40.1	80.3	78.1	100.7	97.6
两表偏差/℃	0.3	0.3	0.1	-1.7	0.3	-2.2

由表1可见,100℃测量点因为传感器温包插入深度变化,可以引发 1.9℃ 的两表偏差(同一台测温装置温包在插入深度 150mm 时两表偏差为 0.3℃,在插入深度 110mm 时两表偏差为 2.2℃)。

2.2.3 其他影响因素

测温装置的远传信号是利用铂丝材料物理特性测量温度 ($0.385\Omega/^{\circ}\text{C}$),而测量回路的接触电阻可能由于现场氧化、腐蚀等作用或者现场振动、环境温度变化导致金属连接锁紧力下降而带来变化,接触电阻每变化 0.385Ω 就会带来 1℃ 的附加误差。基于本文中仅对试验室检验合格的测温装置作为影响量分

析对象,因此压力式温度计密闭系统慢性渗漏引发测温装置计量特性变化不纳入计算范围。海拔高度对不同工作介质的压力式温度计示值影响存在差异,本文中也没有纳入量化统计。

3 校准方法

校准原则是在保证测温装置标称准确度水平前提下将两表偏差调整到允许范围内。两表偏差校准方法分为试验室校准和现场校准两类,见图 4。

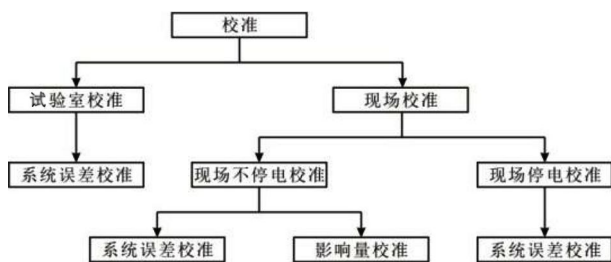


图 4 校准路线图

3.1 试验室校准

测温装置的试验室校准应至少选择三个校准点(如 40℃、60℃、80℃),试验室校准前每个校准点上可能存在的最大系统误差是 $\pm 4.8^\circ\text{C}$,试验室校准后系统误差应小于 $\pm 2.4^\circ\text{C}$ 。

试验室校准步骤一:以恒温槽标准器示值为基准对远方信号装置输出电流进行多点校准,校准后的远方信号装置示值应与标准器示值相等。在试验室将测温装置的远方示值与标准温度计调整一致(也可以认为此时此刻远方显示器数据就是标准器示值),这表示远方温度显示器还有 $\pm 2.4^\circ\text{C}$ 的误差资源可以用于两表偏差校准(即巡视校准的修正值上限应不超过 $\pm 2.4^\circ\text{C}$)。

试验室校准步骤二:以测温装置的指针示值为基准对远方信号装置输出电流进行多点调整方式的校准。校准后的远方信号装置示值与指针示值之间的两表偏差应小于 5K。超过 $\pm 2.4^\circ\text{C}$ 巡视校准修正值上限还没有消除两表偏差缺陷时,表示被检指针温度计影响量不合格。

3.2 现场校准

现场校准分为现场停电条件下的校准和不停电校准。

3.2.1 现场停电校准

将三台便携式恒温油槽放在油箱顶部,三个校准点分别为 40℃、60℃及 80℃。在现场停电条件下对远方信号装置输出电流进行多点修正。现场停电校准可以避免指针温度计毛细管二次拆装带来的损

坏,校准可以修正包括铂电阻测量回路的接触电阻和部分环境温度影响量。

3.2.2 现场不停电校准

现场不停电校准(也称为巡视校准)是指在变压器不停电条件下,依据春夏秋冬不同环境温度条件下以试验室检验合格指针温度计示值为对象,通过智能化手段对温度变送器输出电流进行修正(如图 1 所示),将两表偏差控制在 5K 以内的同时不改变远方信号装置原有的准确度水平。智能温度变送器(如 H420APP 型)实施在线自动校准的计算依据如下。

(1)以指针温度计示值误差和远方信号示值误差等固有偏差为基础值。

(2)以指针温度计和变送器的环境温度影响量等运行数据为参考值。

(3)兼顾传感器插入深度和远方信号接线可靠性等不确定因素。

巡视校准过程分别向智能温度变送器输入春/秋天(20℃)、盛夏(40℃及以上)、寒冬(-10℃及以下)三种气温条件下变压器运行可能出现的指针最高油温(最大负载)和指针最低油温(最小负载)6 类运行数据,如表 2 所示。

表 2 典型运行数据

季节/负载	春(秋)天	盛夏	寒冬
最高油温	指针最大值 1	指针最大值 2	指针最大值 3
最低油温	指针最小值 1	指针最小值 2	指针最小值 3

H420APP 对后续巡视校准过程中产生的大量数据不断优化筛选并截取 6 个典型数据,通过计算后自动实施两表偏差校准。巡视数据输入越多则计算结果越准确,校准水平越高。超过 $\pm 2.4^\circ\text{C}$ 巡视校准修正值上限还没有消除两表偏差缺陷时表示被检指针温度计影响量指标不合格。

4 校准有效性

一套检验合格的测温装置在现场运行条件下可能产生的两表偏差极值 $\Delta T_{\text{max}}=9.9^\circ\text{C}$ (见表 3)。正态分布条件下两表偏差 ΔT_{max} 出现大于 5K 的概率是 16%。

试验室校准可消除 $\pm 2.4^\circ\text{C}$ 的远方信号装置示值误差,但无法校准插入深度影响和环境温度影响(见表 4)。试验室校准后的两表偏差为 7.5℃(见表 3),正态分布条件下 7.5℃两表偏差出现 5K 的概率是 6.1%(即校准合格率上限仅为 93.9%);实施巡视校准后的两表偏差为 5.1℃(见表 3),正态分布条件下

5.1℃两表偏差出现 5K 的概率是0.1%(即校准合格率上限是 99.9%)。

由表 3 可知两表偏差源于系统误差和影响量两个部分。由图 4 可见只有现场不停电巡视校准才完整覆盖系统误差和影响量两个部分,表 4 数据证明巡视校准方法有效性为 99.9%。

表 3 两表偏差最大值

项目名称	系统误差/℃	环境温度影响/℃	插入深度影响/℃	最大两表偏差/℃	5K 缺陷概率/%
两表偏差	±4.8	±3.2	±1.9	±9.9	16
试验室校准	±2.4	±3.2	±1.9	±7.5	6.1
巡视校准	±2.4	±1.6	±1.1	±5.1	0.1

表 4 校准有效性

校准方法	未校准	试验室校准	巡视校准
标准器	无	有	无
环境温度	气象条件	20℃±5℃	气象条件
作业方式	无	试验室	现场不停电
系统误差影响	未修正	可修正	可修正
环境温度影响	未修正	无法修正	可修正
插入深度影响	未修正	无法修正	可修正
>5K 缺陷概率/%	16	6.1	0.1
有效性/%	84	93.9	99.9

表 4 中的有效性评价没有涉及指针温度计测温系统慢性渗漏影响,运行中大部分指针温度计环境温度影响远远大于 3.2℃/40K 指标,测温装置首次检验也没有按照 DL/T1400-2015 要求开展两表偏差试验室校准(从而引发现场配置的温度变送器根本没有校准功能),更何况大部分测温装置传感器存在插入深度不足问题,所以变电站现场测温装置实际运行缺陷率可能远大于 16%计算值。

5 不停电巡视校准实例

2016 年 3 月某变电站 3 台换流变压器更新了

9 台智能化测温装置并在不同季节气温条件下分别进行巡视校准,见图 5。在此之前这 9 台产品已经在试验室将测温装置的远方示值与标准温度计调整一致(也可以认为此时此刻远方显示器数据就是标准器示值),这同时也表示远方温度显示器有±2.4℃的两表偏差校准裕度,见表 5(即巡视校准的修正值上限应不超过±2.4℃),可以看出通过巡视校准后两表偏差缺陷全部消除。



图 5 现场不停电巡视校准图

6 不停电巡视校准必要性

等待停电检修过程中,越来越多测温装置“带病工作”推高运行缺陷率。不停电巡视校准为测温装置“应修必修”创造及时检修的作业条件。

试验室校准合格的测温装置仍然可能因为运行中各种影响量引发两表偏差缺陷。只有在变压器运行条件下开展的巡视校准才能有效消除两表偏差运行缺陷。

智能温度变送器能从巡视大数据中自动筛选出高价值数据,不断提高校准水平和测温装置故障预测水平,支持检修人员由目前的“被动抢修”向“事前防范”积极转变。

参考文献：

[1] DL/T572-2010,电力变压器运行规程[S].

表 5 巡视校准数据

校准条件(气候)	春季 2017/3		夏季 2017/8		冬季 2017/12	
变压器负载	最大负载	最小负载	最大负载	最小负载	最大负载	最小负载
指针示值	67.2℃(12.72mA)	36℃(9.6mA)	92℃(15.2mA)	57.8℃(11.78mA)	40.8℃(10.08mA)	7.8℃(6.78mA)
变送器输出(巡视校准前)	13.03mA(70.3℃)	9.84mA(38.4℃)	14.63mA(86.3℃)	11.26mA(52.6mA)	10.68mA(46.8℃)	13.1℃(7.31mA)
两表偏差(巡视校准前)/K	+3.1	+2.4	-5.7(不合格)	-5.2(不合格)	+6(不合格)	+5.3(不合格)
修正值上限/℃	±2.4	±2.4	±2.4	±2.4	±2.4	±2.4
修正值/℃	-1.5	-1.5	+2	+2	-2	-2
变送器输出(巡视校准后)	12.88mA(68.8℃)	9.69mA(36.9℃)	14.83mA(88.3℃)	11.46mA(54.6℃)	10.48mA(44.8℃)	7.11mA(11.1℃)
两表偏差(巡视校准后)/K	+1.6(合格)	+0.9(合格)	-3.7(合格)	-3.2(合格)	+4(合格)	+3.3(合格)

- [2] 戴缘生, 陕华平, 童在林, 等. 油浸变压器测温装置的环境适应性研究[J]. 变压器, 2012, 49(3): 34-37.
- [3] JB/T6302-2016, 变压器用油面温控器[S].
- [4] JB/T7631-2016, 变压器用电子温控器[S].
- [5] DL/T1400-2015, 油浸式变压器测温装置现场校准规范[S].
- [6] GB/T6451-2015, 油浸式电力变压器技术参数和要求[S].
- [7] 刘逸松, 蔡之文, 邓 华, 等. 基于不停电条件下油浸变压器测温装置检修策略研究[J]. 变压器, 2017, 54(4): 61-

64.

- [8] 张 喆, 刘逸松, 洪睿钧, 等. 消除变压器测温装置两表偏差缺陷的有效途径[J]. 变压器, 2017, 54(3): 70-73.

作者简介:

李金忠(1974-), 男, 山西太原人, 总工程师, 高级工程师。

收稿日期: 2018-04-18

特高压:“五直七交”超 2000 亿投资规模,核心设备投资金额或达 500 亿

我国的用电负荷主要集中在华东、华南、华中等中东部地区,能源需求占比达到 70%以上;而能源资源则主要集中在“三北”以及西南地区。“西电东送”、“北电南供”的电力格局已经成为我国电力工业长期面临的挑战之一。

除了本就有“西电东送”的需求外,随着 2018 年以来经济下行压力的加大,宽松的货币政策、积极的财政政策与稳基建相叠加,将成为稳定经济的重要手段。有鉴于传统基建的可投资量级正在持续变弱,特高压和 5G 作为“泛基建”的重要领域,将明显受益。2019 年逐步开始建设的“五直七交”特高压项目,有望带来总投资超过 2000 亿元,核心设备超过 500 亿元的投资机会。

2018 年 9 月国家能源局印发《关于加快推进一批输电重点工程规划建设工作的通知》,共规划了 12 条特高压工程,包括 5 条直流特高压项目,7 条交流特高压项目。根据不同机构从测算数据看,上述项目投资规模有望达到 1800 亿元到 2200 亿元不等。

以安信证券的测算为例。7 条直流输电工程总投资规模在 1,500 亿元以上。核准的 5 条长距离特高压直流工程,其中青海-河南、陕北-湖北、雅中-南昌 3 条线路动态投资规模已经初定,分别为 268、236 和 317 亿元。白鹤滩-江苏±800KV 特直线路参考 2017 年投运的扎鲁特-青州特直线路,估算投资规模在 300 亿元。白鹤滩-浙江线路±800KV 输送容量、线路长度均与白鹤滩-江苏接近,动态投资规模估算也在 300 亿元。云贵互联通道工程和闽粤联网工程根据其落地方案、线路长度及输送容量,参考黑河直流背靠背和渝鄂直流背靠背联网工程项目的建设方案及其投资情况,云贵和闽粤两项直流工程的投资规模合计约为 100 亿元。

7 条特高压交流输电工程总投资规模在 640 亿元左

右。其中,南阳-荆门-长沙 1000KV 双回路特交工程动态投资规模为 160 亿元。张北-雄安特交工程和 5 条特直落地配套特交工程根据其项目落地方案,参考线路长度、输电容量和过往 1000KV 双回路特交工程落地方案和投资情况,我们测算其动态投资规模分别为 60 亿元和 420 亿元。

总体而言,依照过往投资内容进行现价估算,投资规模超过 2000 亿元基本是市场的共识。

在更多的研究报告中,核心设备的投资比例在 30%—40%之间,笔者认为这一测算应该更加准确。多数研究报告均提到特高压交流变电站成本占总投资额 40%—50%,特高压直流换电站成本占总投资额的 50%—60%,这其中除去站内的铁塔和基础设施建设,特高压设备投资占比在 30%到 40%基本可信。其中,特高压交流项目的设备成本占比相对更低。

特高压直流设备投资占比约为 28.8%。直流线路一般为点对点,因此由两个换流站构成,单条线路总投资额平均为 230 亿元。根据国家电网电子商务平台公布的特高压直流线路历史中标情况,我们统计出单条线路平均包含 8 个换流阀、2 套直流保护系统、56 台换流变(高端换流变和低端换流变分别为 28 台,均价为 0.6 亿元)、40 间隔 GIS(不同线路差别大),投资金额占比合计近 27%;另有直流场设备方面投资金额占比合计近 2%。

特高压交流设备投资占比约为 20%。单条线路总投资额平均为 200 亿元,一般包含 3 个站点。根据历史中标情况看,单站平均包含 11 个 GIS 间隔(不同线路差别大)、7 台变压器、10 套电抗器、5 组电容器、5 台断路器、50 套互感器、30 台避雷器等,按照一条交流特高压线路包含 3 个站点测算,交流特高压主设备投资金额占比近 20%。