

500 kV自耦变压器有载分接开关现场测量波形分析

吴冬文, 王 令, 何 晶

(江西省电力公司超高压分公司, 南昌 330009)

摘要: 采用4过渡电阻的M型有载分接开关广泛应用于500 kV自耦变压器,测量分接开关工作过程中的切换波形、过渡时间及过渡电阻是变压器必做的例行试验项目,用于检查切换开关特性。介绍了M型有载分接开关切换过渡过程及500 kV自耦变压器4过渡电阻有载分接开关直流测试波形结构特点,开关机械系统的弹跳影响波形整齐性、变压器的大容量影响其测量接线方式,测量仪器内部电阻与过渡电阻的匹配影响波形的分辨,现场测试时需仔细分辨并加以评估。

关键词: 500 kV自耦变压器;有载分接开关;切换波形;过渡电阻;弹跳

中图分类号: TM403.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)12-0121-05

On-load Tap-changer Field Testing Waveform Analysis of 500 kV Electric Power Autotransformer

WU Dong-wen, WANG Ling, HE Jing

(Jiangxi Electric Power Co. Extra High Voltage Branch, Nanchang 330009, China)

Abstract: The M-model on-load tap-changer including 4 transient resistance has been used widely in 500 kV electric power autotransformer, the test of switching figure, transition duration and fault resistance in process of the on-load tap-changer is must been done in environmental test items of the transformer, which use to examine bridging switch function. This paper introduces the process of the M-model on-load tap-changer and characteristics of the DC circuits testing waveform of the on-load tap-changer including 4 transient resistance in 500 kV electric power autotransformer, the mechanical systems bouncing affects accuracy of the test waveform, the high-transformer affects uniformity of the test waveform, the matching factor of the instrument inner resistance with the transient resistance affects discernibility of the test waveform, need discern carefully and moreover assess for the test locale.

Key words: 500 kV electric power autotransformer; on-load tap-changer; transfer waveform; transient resistance; bounce

0 引言

随着电网的发展,500 kV自耦变压器广泛应用于超高压电网。其中部分变压器能在励磁状态下变换分接开关的位置,即采用有载分接开关进行调压模式。

切换开关质量的好坏对能否保证有载分接开关的安全运作起着决定性作用。要求其既能在变压器满负载下安全可靠地切换电流进行调压,又要具有一定的使用寿命(切换总次数)^[1-3]。根据国网公司

Q/GDW168—2008《输变电设备状态检修试验规程》标准,对有载分接开关的切换时间及过渡电阻的测量是油浸式变压器必进行的例行试验项目,用于检查切块开关的功能^[4]。但部分试验人员由于没有足够丰富的现场经验,对自耦变压器的调压原理、波形解读不够清楚,常常导致结果的误判^[5-6]。

1 500 kV自耦变压器及M型有载分接开关简介

图1是一台单相自耦250 MV·A/500 kV变压器电气连接结构,联结组别为 $I_{a0}i_0$,调压范围是 $\pm 8\times$

1.25%,其调压绕组、串联绕组、公共绕组及低压绕组共同绕在一个倒“日”形铁心柱上及其旁轭上。根据其调压绕组的位置,该类型的变压器的调压方式是线端调压,调压线圈设在串联绕组的尾端,通过有载分接开关的“+”、“-”极性选择器来增减线圈的匝数,从而通过改变铁心柱的磁通来改变串联绕组的电压比例值达到调压的目的^[7-8]。

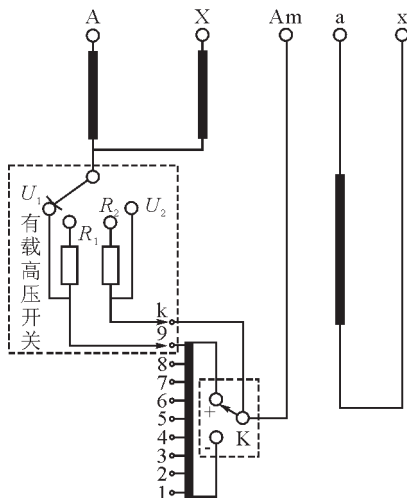


图 1 500 kV 自耦变压器及有载分接开关电气连接图

Fig. 1 Electric schematic of 500 kV electric power autotransformer and the load ratio bridging switch

M 型有载分接开关采用电阻过渡原理,它能带负载转换变压器调压线圈的分接头,分接开关的变换操作在于两个转换的交替组合,即分接选择器的单双数动触头,轮流交替选择分接头同切换开关往返切换相结合^[9-10]。

表 1 双电阻有载分接开关带绕组切换过程

Tab. 1 The process of load ratio bridging switch of double resistance along with coil

	第 1 过程	第 2 过程	第 3 过程	第 4 过程
时间常数	(1)切换开关动触头滑离 U_1 触点过渡到与 R_1 电阻触点接触过程 $\tau_1 = \frac{L_K + L_h}{R_v + R_1 + R_K}$	(2)切换开关动触头过渡到与 R_1 、 R_2 触点共同接触过程 $\tau_2 = \frac{L_K + L_h}{R_v + R_1 + R_K}$	(3)切换开关动触头滑离 R_1 触点、过渡到 R_2 触点过程 $\tau_3 = \frac{L_K + L_h}{R_v + R_1 + R_K}$	(4)动触头滑离 R_2 触点,过渡到与 U_2 接触过程 $\tau_4 = \frac{L_K + L_h}{R_v + R_K}$
过渡电流	$I_1 = \frac{U}{R_v + R_1 + R_K}$	$I_2 = \frac{U}{R_v + R_1 + R_K}$	$I_3 = \frac{U}{R_v + R_1 + R_K}$	$I_4 = \frac{U}{R_v + R_K}$
R_t	$R_t = R_1$	$R_t = R_1 // R_2$	$R_t = R_2$	$R_t = 0$

标准的双电阻切换开关的直流切换波形见图 3,其过渡时间一般约为 50 ms 以内,完成一个完整的开关切换过程,其电流变化主要分为 4 个过程^[11](见表 1),随着主通触头 S 的断开与导通,测试电流发生跃变,呈指数变化形式,遵循着不同的时间常数,如图 3 中 $\tau_1 \sim \tau_4$,切换后的电流也发生改变,如表 1 中 $I_1 \sim I_4$ 。测试电流经历 τ_1 过后,由分开侧主触头打开至闭合侧过渡电弧触头闭合,这段时间可提供给分开侧主触头可利用的熄弧时间。在主触头打开的瞬

2 M 型有载分接开关双过渡电阻的切换波形分析

有载分接开关安装后不可能单独在开关上进行波形测试,必须连接变压器绕组一起进行测试接线。图 2 所示是一个测量回路的电气原理图,采用直流回路测量,变压器 T 型等效电路, S 开关表示分接开关在切换过程中的主通触头断开、接通情况,例如切换开关由主通触头 U_1 滑向 U_2 过程中,主通触头先断开,直流测试电流被迫通过过渡电阻 R_t 。同理,当主通触头接通 U_2 触头时,直流测试电流又通过切换开关 S(图 2 中虚线箭头)重新直接导通测量回路。

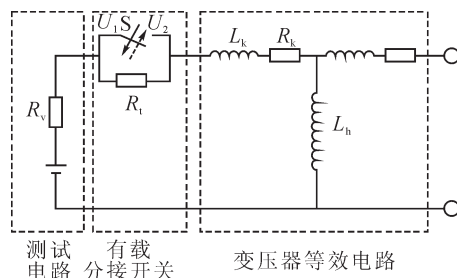


图 2 有载分接开关带绕组切换过程的电气原理图

Fig. 2 Electric diagram of the load ratio bridging switch with the coil process

该例先以双电阻为例来说明切换开关的循环过渡过程,因此从整个切换过程看,开关两端的电阻 R_t 发生了变化,即从 $0-R_1-R_1//R_2-R_2-0$,如表 1 中 R_t 所描述。

间,在它的动、静触头之间产生电弧,然后等到电流过第一个零点时,如果两者之间的端口足够大,则电弧熄灭,反之则电弧重燃,等电流第 2 次过零时熄灭。

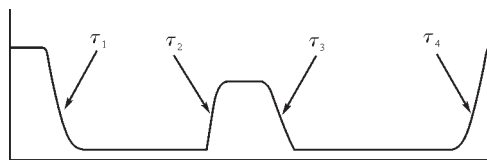


图 3 双电阻切换开关直流波形

Fig. 3 Transfer waveform of double resistance

3 500 kV 自耦变压器分接开关测量波形特性

500 kV 自耦变压器电压等级高, 因此在切换开关过渡过程中, 选择开关两触头之间的电势差较大, 造成流过过渡电阻的环流较大, 往往容易因电流较大形成电弧较强, 烧伤主通触头。因此采用 4 过渡电阻的切换开关, 即将双过渡电阻 R_1 、 R_2 用双电阻代替, 见图 4。

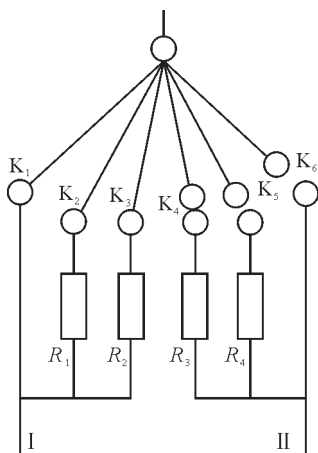


图 4 4 过渡电阻切换开关

Fig. 4 The transfer switch along with four resistance

这样 4 过渡电阻触头间由于空间位置的原因使得切换过程中主触头过渡电压差变的平缓, 电阻间的环流大大减少, 有利于电弧的熄灭, 提高切换开关工作的可靠性^[12]。同理, 4 过渡电阻测试电路开关两端的电阻 R_t 值遵循 0-2-3-2-3-2-0 电阻并联变化模式^[13], 切换过渡直流波形中有两次 3 电阻并联的过渡过程, 见图 5。

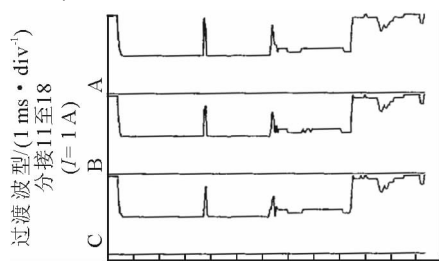


图 5 500 kV 自耦变压器 4 过渡电阻切换波形图

Fig. 5 The waveform of 500 kV electric power autotransformer with 4 transient resistance

从图 5 可以看出, 4 电阻过渡波形不能像理想波形的那样规整, 会出现不规则的弹跳。在开关的动作过程中, 机械触头系统在弹簧力的作用下加速, 仅在 50 ms 内, 铜钨触头会碰到并闭合另一侧定触头面。触头闭合后, 动能会引起接线震动, 这种震动必须被机械机构加以吸收, 但又不能对这些部件产生不利的变形。触头的短时弹跳现象在这种情况下是不能完全消除的, 在切换开关的动作完成后,

机械系统会再次锁住。有载分接开关的设计, 切换开关至少有一对触头在任何时候都是闭合的。因此, 闭合触头和分开触头的动作总是有重叠的时候, 发生在闭合触头的触头弹跳只会引起测试电流在两个值之间的交替, 而不会使测试电流中断。过去用户为了追求直流波形的整齐, 会要求开关厂家进行调整, 解决的方法就是降低主弹簧的能量, 增加过渡触头的压力, 其结果导致过渡时间的加长, 这样又对电弧的熄灭产生不利影响, 并可能导致开关内部温度异常升高。因此, 对测量的波形不必刻意去追求其规则完美性, 了解机构工作原理, 对分析是有帮助的。通常 4 过渡电阻机构弹跳时间为 1~2 ms 以内, 弹跳的高度有时会与切换过渡时 3 电阻同时并联的波形高度差不多, 常常会导致测量者的疑惑, 怎么与理论波形又多了一个或几个切换过渡过程呢? 是否是由于制造质量、螺栓的松动造成的呢? 当然并非完全是, 通常测量人员必须要很清楚弹跳发生的机理, 然后加以仔细分辨, 一般弹跳发生在切换波形的开始及结束时刻, 即触头的机械振动往往发生在触头闭合瞬间, 从波形中很容易分辨。

500 kV 自耦变压器为三相分体式, 变压器容量非常高, 变压器的剩磁对开关切换特性试验的影响较大, 剩磁的干扰会使波形不规整。如何克服剩磁的干扰, 首先应该在测量变压器绕组直流电阻试验之前进行开关的特性试验; 其次测量时可对被试变压器施予较大的触发电流。采用的方法是将测量仪器 A、B、C 三相通道测量接线并联接入被试单相自耦变压器测量接线端。这样测量出的过渡阻值为 $R = \frac{U}{3I}$, 因此实际过渡电阻值为测量值的 3 倍, 测量完毕必须加以折算才能反映实际过渡电阻值, 图 5 波形就是采用仪器三相测量接线并联连接来测量单相 500 kV 自耦变压器的调压开关测试波形, 所以图中 A、B、C 三相的波形几乎一样。

通常试验仪器的测量模式有大电流、小电流测量模式, 其原理就是改变试验仪器内部电阻 R_v 与过渡电阻 R_t 的匹配, 从而得到最佳的直流测试波形。从表 1 中可以知道, 切换过渡时间常数 τ 与过渡电流 I 与 R_v 成反比, 选择小电流测试方式, 就是选择了较高阻值的匹配电阻 R_v , 可减小过渡时间常数 τ 得到类似矩形波形, 但其副作用是降低了测试电流, 又可能造成波形分辨不清楚, 大电流模式正好相反, 其波形比较尖锐不可读。图 6 是对大容量变压器切换开关带绕组采用大电流、小电流测试模式测量的波形比较, 因此 500 kV 自耦变压器有载

分接开关特性测试还是采用小电流模式得到波形较好。

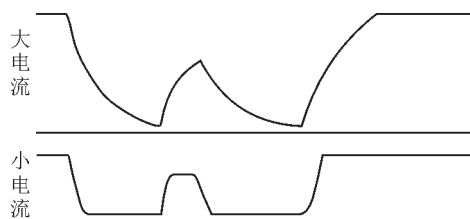


图6 大电流、小电流测量波形比较

Fig. 6 The waveform comparing great current with the small

对500 kV自耦变压器的有载分接开关的波形辨别是一个综合分析过程。在进行4电阻分接开关切换波形测试时,一般要测量从单一双和从双单一两次测量波形,这是分接开关动作的两个方向,对两次波形进行对比分析,一般故障分接开关在两次波形相同的部位都会出现异常^[14];在波形分析时还要结合变压器直流电阻、变比的试验数据进行分析,直流电阻和变比反应的是开关的静态状况,但当分接开关触头烧伤、接触不良以及分接开关的位置不对时,三相直流电阻以及变比误差会超过规程要求。

4 结语

500 kV自耦变压器有载分接开关的切换波形测试在一定情况是用来检查切换开关功能的有效手段,是国网公司Q/GDW 168—2008《输变电设备状态检修试验规程》标准规定必做的试验项目。但对切换波形的解读需要结合对自耦变压器及有载分接开关本身结构深刻理解,调压开关是经过变压器绕组接入测试回路,绕组的电感影响必须予以考虑。

4电阻M型有载分接开关直流测试波形中间有两次3电阻并联重叠过渡过程,有时很容易与弹跳波形混淆,必须清楚机械弹跳发生的机理。为了分接开关工作的可靠性,需要增加主弹簧的能量,这样可能造成切换波形的不规整性。

直流电源内部电阻和切换电阻的相互匹配影响着电路的时间常数,要根据现场情况合理的选择仪器大电流、小电流测量模式。一般来讲,60 V的直流电压,100 mA的测试电流是一个折中的参数选择^[15],既考虑了如何减少干扰,又改善了用于测试评估的波形记录。

参考文献:

[1] 张德明. 变压器分接开关选型与使用[M]. 北京: 中国电

力出版社, 2005.

ZHANG De-ming. Selection and use of transformer on-load tap changer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[2] 张德明. 变压器有载分接开关[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1998.

ZHANG De-ming. Tap changer of transformer[M]. Shenyang: Science & Technology Press, 1998.

[3] 姜益民. 有载分接开关运行分析及探讨[J]. 变压器, 2009, 46(7): 41-44.

JIANG Yi-min. Analysis and discussion on on-load tap-changer operation[J]. Transformer, 2009, 46(7): 41-44.

[4] Q/GDW 168—2008. 输变电设备状态检修试验规程[S].

Q/GDW 168—2008. Regulation of content-based maintenance & test for electric equipment[S].

[5] 杨可, 舒鸿科, 邱明奇. 变压器有载分接开关动作特性试验及典型故障分析[J]. 变压器, 2010, 47(12): 47-49.

YANG Ke, SHU Hong-ke, QIU Ming-qi. Action characteristics test of transformer on-load tap-changer and typical fault analysis[J]. Transformer, 2010, 47(12): 47-49.

[6] 王世阁, 周志强, 龚晨斌. 变压器分接开关的故障分析[J]. 变压器, 2009, 49(2): 35-37.

WANG Shi-ge, ZHOU Zhi-qiang, GONG Chen-bin. Fault analysis of tap-changer for transformer[J]. Transformer, 2009, 49(2): 35-37.

[7] 陈志伟, 孙优良, 李洪秀, 等. 浅谈500 kV自耦变压器的设计[J]. 变压器, 2008, 45(11): 55-60.

CHEN Zhi-wei, SUN You-liang, LI Hong-Xiu, et al. Discussion on design of 500 kV auto-transformer[J]. Transformer, 2008, 45(11): 55-60.

[8] 李英, 林刚, 张望, 等. 大容量自耦变压器结构与短路性能[J]. 变压器, 2002, 39(3): 1-6.

LI Ying, LIN Gang, ZHANG Wang, et al. Short-circuit characteristics and structures of large auto-transformers[J]. Transformer, 2002, 39(3): 1-6.

[9] 龚绍. 有载调压开关切换顺序试验[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 94-96.

GONG Shao. Transfer sequence test of on-load voltage regulation switch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 94-96.

[10] 梁之林, 于全福, 藏英利. 变压器有载调压开关交、直测试波形分析[J]. 吉林电力, 2007, 35(4): 31-33.

LIANG Zhi-ling, YU Quan-fu, ZANG Ying-li. Waveshape analysis of AC and DC measurement on on-load tap changer of transformer[J]. Jiling Electric Power, 2007, 35(4): 31-33.

[11] 张德明. 分接开关触头变换程序示波检测的探讨[J]. 变压器, 2010, 47(3): 46-53.

ZHANG De-ming. Discussion of oscilloscopic detection of conversion process of contact in tap-changer[J]. Transformer, 2010, 47(3): 46-53.

- [12] 张德明. 四电阻过渡分接开关切换任务的分析[J]. 变压器, 1991, 34(8): 11-16.
ZHANG De-ming. Mission analysis on 4 transient resistance of on-load voltage regulation switch[J]. Transformer, 1991, 34(8): 11-16.
- [13] 姚力. 组合式有载开关切换过程的试验[J]. 江苏电机工程, 2002, 21(1): 17-21.
YAO Li. Switching process test of composite on-load tap changer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2002, 21(1): 17-21.
- [14] 王伟, 韩金华, 王吉, 等. 有载分接开关切换波形的现场测试及研究[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 21-24.
WANG Wei, HAN Jin-hua, WANG Ji, et al. Field test and research on the switching figure of on-load tap changer[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(6): 21-24.
- [15] 凡华. 变压器有载分接开关切换波形研究[J]. 电气开关, 2008, 48(6): 11-14.
FAN Hua. Study on the switching waveform of the loaded tap changer of the transformer[J]. Electric Switcher, 2008, 48(6): 11-14.
- 吴冬文(1977—), 男, 工程师, 主要从事高电压电气试验方面工作。

简 讯

国家级企业技术中心落户天正电气

日前,国家发改委、科技部、财政部、海关总署、国家税务总局 5 部门联合公布的第 19 批国家级企业技术中心,浙江天正电气股份有限公司也荣列其中,晋级“国家队”,成为温州市有史以来第 4 个国家级企业技术中心。2012 年 11 月 16 日,天正电气在国家创新能力建设和国家信息化建授牌表彰大会上接受国家发展改革委会同科技部、财政部、海关总署、国家税务总局等部门的授牌。

据悉,国家级企业技术中心是我国企业技术中心评定级别的最高等级,获此殊荣的企业要求在行业中具有显著的规模优势和技术领先优势,能起到行业示范作用。天正电气荣膺“国家级企业技术中心”评定,是国家对天正创新科研工作的一次重量级认可,也是天正科研实力和自主创新精神的集中展示。

“科技,还原绿色”,对创新科技的高度重视是天正绿色品牌价值主张的必然要求。作为中国工业电器行业规模最大的企业之一,天正始终将科技创新作为公司实现可持续发展的重要途径,每年投入销售收入的 5%用于研发支出,斥巨资建设了国内首家与国际接轨的第一方实验室暨国家级实验室“低压电器测试中心”以及省级技术中心“天正科技研发中心”;还积极引入国外先进的软件对产品数据、研发项目等进行集成管理,实施产品生命周期 PLM 的里程碑式管理,提高设计效率和企业资源的综合利用程度。基于此,天正得以成为行业绿色创新的佼佼者,连续 3 年专利申请数量位居行业前列,其中发明和实用新型专利近 3 年内累计获准申请数达百余项,连续 4 年省级以上新产品开发数量位居同行业全省第一。2008 年,“低压保护电器关键技术的研究及其应用”获得国家科技进步二等奖。另外,天正还积极开展产学研合作研发,加强与高校、科研院所及其他企业建立多种形式的战略合作关系,实现优势互补,解决行业关键、共性技术的研发,其中部分项目取得了较大的技术突破。2010 年,产学研合作项目——“新型漏电保护技术及其应用”获省科技进步一等奖。

对人才,天正也是求贤若渴,设立了众多奖励、激励人才发展制度,如“九级工程师”畅通晋升通道,技术进步与工业工程表彰大会等,还专门设立了博士后流动站,院士专家工作站等,首聘饶芳权、汪樾生、姚若萍、陆俭国 4 名院士作为专家顾问团,指导、建言天正电气发展。2012 年 4 月,乐清首个院士专家工作站在天正电气成立,中国工程院院士汪樾生、河北工业大学教授陆俭国等院士专家首批进站,与天正针对项目形成长期合作,担任企业技术创新智囊,为天正未来发展献计献策。现在,院士工作站已在高层次技术人才的培养、加速高新技术成果产业化进程等方面发挥了积极的作用并成为企业联系高校、科研院所的桥梁和纽带。同时,它也实实在在地解决了企业的关键技术问题,对于企业转型升级、做大做强具有积极作用。

作为中国低压电器行业的领军企业,天正电气一直致力于打造具有核心竞争力的绿色组织,始终将可持续发展理念贯穿于企业管理之中,以实际行动践行社会责任,倡导绿色理念。其品牌价值主张“天正绿,不一样的来电感觉”旨在为客户提供不一样的绿色电气解决方案。“科技,还原绿色”天正将在国家级企业技术中心的平台上,继续深化技术创新,促进智能低压电器行业的技术创新及升级。