

750 kV 变压器现场局部放电试验有关问题分析

李云阁¹, 施 围², 张祥全¹, 韩绍周¹, 王 焯³, 万荣兴¹, 宋朝晖¹

(1. 西北电网公司 750 kV 兰州输变电运行工区, 甘肃 兰州 730050; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 中国电力科学研究院高压研究所, 北京 100085)

Analysis of On-site Partial-discharge Test on 750 kV Transformers

LI Yun-ge¹, SHI Wei², ZHANG Xiang-quan¹, HAN Shao-zhou¹, WANG Xuan³,
WAN Rong-xing¹, SONG Zhao-hui¹

(1. 750 kV Lanzhou Operation Department of Power Transmission and Transformation, Northwest Grid Company, Lanzhou 730050, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. High Voltage Division, China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

摘要: 笔者总结了示范工程中变压器现场局放交接试验的程序、标准、过程, 分析了出现的问题, 提出如下建议: ①提高 750 kV 变压器的工频试验电压; ②不宜反复进行局放试验; ③现场试验局放超标时应务实处理; ④重新定义局部放电起始电压和熄灭电压; ⑤必要时采用可靠的在线监测设备。这些建议不限于 750 kV 变压器, 亦可为 1 000 kV 变压器的现场交接试验参考。

关键词: 变压器; 局部放电; 试验

中图分类号: TM855

文献标志码: A

Abstract: This paper analyzes the problems concerning procedure, standards, and process in the on-site acceptance partial-discharge(PD) test on the 750 kV transformers. Some suggestions are therefore offered as follows: ①increase the power frequency withstand test voltage for 750 kV transformers; ②avoid to perform PD test repeatedly; ③take practical measures if PD quantity exceeds the criterion stated in standard; ④redefine the PD inception voltage and extinction voltage; ⑤use reliable on-line monitoring apparatus when necessary. These suggestions can also serve as a reference for the same test on 1 000 kV transformer.

Key words: transformer; partial discharge; test

0 引言

我国 750 kV 示范工程于 2005 年 9 月 26 日正式投入运行, 其中包括两个 750 kV 变电站: 位于甘肃省境内的兰州东变电站(下称兰州东变)和位于青海省境内的官厅变电站, 以及连接两个变电站的一条 750 kV 架空输电线路。变电站各有一组主变, 由

3 台单相变压器组成, 主要参数如下^[1]: 额定电压为 $\frac{765}{\sqrt{3}}/\frac{345}{\sqrt{3}} \pm 2.5\%/63\text{kV}$; 额定容量为 500/500/150MV·A; 最高工作电压为 800/363/72.5kV, 高压绕组绝缘水平见表 1。

表 1 750 kV 示范工程主变高压绕组绝缘水平

雷电冲击耐受电压峰值/kV		操作冲击耐受电压峰值/kV	短时感应耐受电压有效值/kV
全波	截波		
1950	2100	1550	860

按照我国电力行业的惯例, 主变需在现场进行带局部放电试验的长时感应耐压试验。笔者就试验和测量中存在的问题进行分析, 并提出建议。

1 试验程序和标准

在变压器的现场试验中, 需满足短时感应耐受电压值 U_s 大于或等于局放试验的预加电压值 U_e , 即 $U_s > U_e$ 。对于 500 kV 及以下电压等级变压器, 均能满足 $U_s > U_e$ 。对于 750 kV 示范工程, 情况有所不同, 将在下文进行分析。

按照 GB 1094.3-2003, 变压器的局部放电试验程序分为 A、B、C、D、E 5 个时段, 每个时段施加的电压值有明确的规定, 见图 1^[2]。按照该标准, 在区段 C 预加电压为 $1.7U_m/\sqrt{3}$, (U_m 为设备最高工作电压), 略小于 GB 1094.3-1985 中规定的 U_m ^[3]。对于 750 kV 变压器, $U_m=800$ kV, 则 U_e 应为 785 kV。

按照国家电网有限公司发布的《500 kV 超高压电气设备交接试验标准》^[4], 以及能源部和建设部于

收稿日期: 2007-05-09; 修回日期: 2007-07-13

作者简介: 李云阁(1967-), 男, 高级工程师, 博士, 从事技术监督和电磁暂态模拟方面的工作。

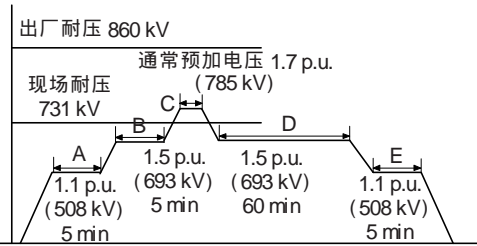


图 1 750 kV 主变现场局部放电和耐压试验加压时间顺序

1991 颁布施行的《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》^[5]，现场交接时主变的感应耐压值 U_s 为出厂值的 85%。根据表 1，示范工程 750 kV 变压器的现场短时感应耐受电压为 $U_s=860 \times 0.85=731$ kV。

从以上分析可以看出，对于 750 kV 示范工程，如果按照文[3-5]的要求，将出现 $U_s < U_{0s}$ ，即现场局放试验中的最高施加电压大于现场耐压试验电压，这显然不合理。产生该问题的原因在于示范工程中主变的短时感应耐受电压值偏低。为了解决这一矛盾，原国家电力公司在其企业标准《500 kV 主变压器技术规范》中规定 750 kV 变压器取 $U_s=U_{0s}=731$ kV^[6]。

变压器局放量合格的标准为：在 1.5 p.u. 电压下的局放量小于 500 pC^[1, 4, 6-8]。

2 试验过程

在进行现场交接试验时，兰州东变 A 相主变局部放电量超标，投运前后共进行了 12 次局放试验。

2005 年 8 月 9 日进行了第 1 次局放试验，结果为高压绕组局放合格，为 180 pC；而中压绕组局放略为超标，为 600~700 pC。为了分析局放产生的原因和性质，查找局放的位置，截至投运 A 相主变共进行了 11 次局放试验，包括一次在额定电压下持续时间为 48 h 的空载试验。从总体上看，局放量没有较大变化，详细数据见表 2，表 3 为几次典型试验过程中局放量随施加电压的变化。

尽管兰州东主变 A 相局放略有超标，经过讨论分析多次试验结果，认为该主变可以投入运行。2005 年

表 2 A 相主变中压绕组局放测量

试验序号	时间	是否耐压	局放量	
投运前	1	2005-08-09	是	108 Hz, 1.5 p.u.时, 700 pC
	2	2005-08-10		108 Hz, 1.5 p.u.时, 700 pC
	3	2005-08-10		108 Hz, 1.5 p.u.时, 700 pC
	4	2005-08-12	是	108 Hz, 1.5 p.u.时, 688 pC
	5	2005-08-12		108 Hz, 1.1 p.u.时, 600 pC
	6	2005-08-15		108 Hz, 1.5 p.u.时, 700 pC
	7	2005-08-16		108 Hz, 1.5 p.u.时, 700 pC
	8	2005-08-17		108 Hz, 1.5 p.u.时, 700 pC
	9	2005-08-21		50 Hz, 1.08 p.u. 48 h, 500 pC
	10	2005-08-24		108 Hz, 1.5 p.u.时, 667 pC
	11	2005-09-23	是	108 Hz, 1.5 p.u.时, 910 pC
投运后	12	2006-04-26	是	108 Hz, 1.5 p.u.时, 280 pC

表 3 局放量随施加电压的变化 pC

电压/p.u.	测量时间				
	2005-08-10	2005-08-12	2005-08-24	2005-09-23	2006-04-26
0.40					140
0.50					420
0.60					98
0.70	252		400		98
0.80	490				126
0.90	560				154
1.00	560		667		168
1.10	560		667	308	196
1.30	560		667		252
1.50	700	688	667	910	280
1.40	700	625	667	910	
1.30		625	667	770	
1.20		625	667	770	
1.10	560	650	667	840	
1.00	560		600	700	168
0.90	490		533	630	
0.80	420	500	333	308	
0.70	350	438	267	308	
0.60	210	438	240	308	
0.50	196	375	173	280	140
0.40	126		173	252	
0.30			173		
0.25			40		
背景	126	250	27	126	126

9 月 26 日，我国 750 kV 输变电示范工程正式投运。

2006 年 4 月 20 日，示范工程进行常规预试。趁此机会，在 4 月 26 日对 A 相主变又进行了一次全过程局放试验，中压局放量为 280 pC，降至合格范围。

3 分析

按照规划，750 kV 电网将成为西北地区的主网架^[9]，将有数十台新 750 kV 变压器入网运行。对大型变压器进行现场交接局放试验是我国运行部门多年的惯例^[5]，因此有必要认真分析总结兰州东主变的局放试验，为今后工作借鉴。

3.1 感应耐压

经验表明，现场交接时主变的感应耐压值 U_s 取工频绝缘水平的 85%，以及局放试验预加电压 U_0 取 $1.7U_m/\sqrt{3}$ 是合理的。我国 750 kV 示范工程中， U_0 不能取 $1.7U_m/\sqrt{3}$ ，而降至 U_s ，其原因为工频绝缘水平取值偏低。

3.2 局部放电起始电压和熄灭电压

如果局放量超标，通常认为局部放电起始电压是一个重要的参考量。在 GB 1094.3-2003 中没有提及起始电压，GB 7354-2003^[7]和 DL 417-91^[8]中对它们的定义见表 4。可以看出，文[7, 8]关于起始电压的定义均不明确。

文[7]中定义起始电压为“当施加于试品的电压从某一观察不到局放的较低值开始逐渐增加到初次观察到试品中产生重复性局放时的电压”。事实上，在现场试验时，背景噪声往往达数十甚至数百皮库，

表 4 局部放电起始电压和熄灭电压的定义

来源	起始电压	熄灭电压
GB 7354- 2003	当施加于试品的电压从某一观察到局放的较低值开始逐渐增加到初次观察到试品中产生重复性局放时的电压。实际上,起始电压是局部脉冲参量幅值等于或超过某一规定的低值时的最低施加电压。	当施加于试品的电压从某一观察到局放脉冲参量的最高值逐渐减小直至试品中停止出现重复性局放时的电压。实际上,熄灭电压是当所选定的局部脉冲参量幅值等于或小于某一规定的低值时的最低施加电压。
DL 417-91	是指试验电压从不产生局部放电的较低电压逐渐增加时,在试验中局部放电量超过某一规定值时的电压。	是指试验电压从超过局部放电起始电压的较高值逐渐下降时,在试验中局部放电量小于某一规定值时的最高电压值。

在很多情况难以确定试品中真正产生重复性局放时的电压。

在文[8]中,提出将“局部放电量超过某一规定值时的电压”作为起始电压,但没有说明“某一规定值”。通常认为的“规定值”为 500 pC,即当局放量从小于 500 pC 的某一数值增加到大于 500 pC 时,对应的电压就是放电起始电压,但实际应用中仍有分歧。如在表 5 的 3 例局放试验中,当电压从 0.8 p.u. 升至 0.9 p.u. 时,局放量从 400 pC 分别达到 600、800、3 000 pC。在例 1 中,很少有人会认为 0.9 p.u. 为起始电压;在例 2 中,可以勉强接受 0.9 p.u. 为起始电压;而在例 3,一般接受 0.9 p.u. 为起始电压。又如在 2005 年 8 月 10 日兰州东变 A 相主变局放试验,当电压从 0.8 p.u. 增加到 0.9 p.u. 时,局放从 490 pC 增加到 560 pC。虽然局放超过 500 pC,但如果将 0.9 p.u. 定为局放起始电压,显然不合理。

表 5 起始电压含糊引起的问题

电压/p.u.	局放/pC			
	例 1	例 2	例 3	兰州东变 A 相主变
0.7	200	200	200	252
0.8	400	400	400	490
0.9	600	800	3000	560
1.0	600	1200	3000	560
1.1	600	1200	3000	560
背景	150	150	150	126
能否接受 0.9 p.u. 为起始电压	一般不会	勉强可以	可以接受	一般不会

因此,起始电压的定义应明确两个要素:局放量发生一定突变、且突变后局放量大于一定数值。在兰州东 A 相主变的所有 12 次局放试验中,随着电压增加,局放量的最大突变约为 200 pC,没有明显的局放起始电压。

关于熄灭电压的定义同样不严格。

3.3 超声局放定位和在线监测

投产前为兰州东变 A 相主变安装了超声局放在线监测装置,局放试验过程中使用了超声局放定位装置。虽然该装置粗略给出了放电的位置,但它显示的局放量不随电压的变化。而且在 2006 年 4 月 26 日投产后的局放试验中仍然如此。

目前国内外最常用的变压器放电定位方法为超声波法。其基本原理为:在变压器箱壁上布置多个超

声波探头;当变压器内部发生放电时,产生的超声波穿过绝缘油后到达箱壁,通过探测超声波到达探头的时差可判断放电部位。但该方法的使用有一定局限:①技术本身不很成熟;②放电量要足够大,产生的超声波到达探头后其能量在探头的灵敏度范围之内;③如内层线圈放电,超声波会多次折返射,定位不准确。

因此,对目前超声波局放测量、定位应谨慎对待,尤其当局放量不很大时不主张进行超声波定位。

3.4 放电的严重程度

虽然在有关标准中规定,在 1.5 p.u. 电压下变压器局放量应小于 500 pC,但实际上 500 pC 的局放量与 700 pC 的局放量属于同一级别,没有本质区别。

4 建议

根据上述分析提出如下建议,这些建议不限于 750 kV 变压器,亦可为 1 000 kV 变压器的现场局放交接试验参考。

4.1 提高工频绝缘水平

兰州东变电站变压器感应耐压值偏低。鉴于我国 750 kV 变压器制造历史短,经验不足,而且变压器需进行现场交接局放试验,建议以后 750 kV 主变感应耐压值取不低于 900 kV。(国际电工委员会对 GIS 用变压器的工频耐压值取 960 kV。)

4.2 不宜反复进行局放试验

(1) 兰州东变主变的现场短时感应耐受电压和局放试验预加电压为 731 kV;局放试验电压为 $1.5U_m/\sqrt{3}$,即 693 kV。考虑到高压测量的不确定度为 3%^[10],则局放试验电压在 672~714 kV,其上限 714 kV 已非常接近耐压值 731 kV,裕度只有 $(731-714)/714=2.4\%$ 。根据文[2],变压器耐压时间为 $6000/f$ 秒, f 为试验电压的频率。兰州东主变试验中 f 为 108 Hz,因此耐压时间 56 s。而进行局放试验时,在一次完整试验中 $1.5U_m/\sqrt{3}$ 电压施加时间长达 65 min。换言之,兰州东主变的局放试验是一次长时间准耐压试验。即使后续 750 kV 变压器的感应耐压值取 900 kV,交接时感应耐压值和局放试验预加电压值为 765 kV,与 330 kV 变压器相比较,裕度仍然不大。表 6 为 330、750 kV 变压器局放试验电压与交接耐受电压的比较。

(2) 750 kV 变压器的局放试验是准耐压试验,每次试验产生“累积”效应,反复试验必然损伤变压器的绝缘。虽然这种损伤在短期不会有所表现,但给运行带来隐患。

(3) 鲜有报道证实,在短时间内经反复现场试验后变压器局放量由不合格降至合格,而兰州东主变的情况恰好相反。2005 年 8 月 10 日第 1 次局放试验中

表 6 局放试验电压与交接耐受电压值比较

额定电压/kV	设备最高电压 U_m /kV	感应耐压 U_p /kV	0.85 倍感应耐压/kV	$\frac{1.5U_m}{\sqrt{3}}$ /kV	$\frac{1.7U_m}{\sqrt{3}}$ /kV
330	363	510	434	314(305 ~ 323)	356
750	800	860 900	731 765	693(672 ~ 714)	785

局放量为 700 pC,而在 2005 年 9 月 23 日第 11 次测量时局放量为 910 pC,略有增加。但确有记录说明,因考虑不慎,局放试验将小问题发展成了大问题。

4.3 现场试验局放超标时应务实处理

在国外变压器出厂时进行严格的局放试验,但在现场不再进行局放试验,变压器现场局放测量是我们国家的特色。在现场交接试验中,局放超标时应务实处理,适当放宽标准。原因如下:

(1) 在 220、330、750kV 变压器现场交接局放试验中,发现相当数量局放超过 500 pC 但小于 2000 pC 的变压器,经放置或投运一段时间后再次测量局放合格,兰州东 A 相主变为最近的例子。

(2) GB 1094.3-2003 中如此说明:“除非在相当长的持续时间内,出现了远大于接受限值的局部放电量,一般将变压器吊芯后难于直接观察到局部放电痕迹”。局放小于 1000 pC 时变压器内没有明显放电痕迹,如在现场处理,碰巧处理好的可能性很小。况且 750 kV 变压器体积大、重量重,如进行吊芯,风险很大,不仅处理不了问题,可能会弄巧成拙。如果返厂处理,将耗费大量人力和时间,而且在拆装、运输过程中风险更大。

4.4 重新定义局部放电起始电压和熄灭电压

变压器局放超标时往往关注放电起始电压和熄灭电压,但在兰州东 A 相主变的例子中,不太明显的放电起始电压和熄灭电压对试验起了一定的误导作用。建议重新定义局部放电起始电压和熄灭电压。

4.5 加强现场实用技术研究

目前急需解决局放现场测量有关两个问题,一是典型放电图谱,二是抗干扰措施。

虽然在 DL 417-1991 中有一些典型的图谱,但这是在实验室进行模拟的结果,与现场情况有所差别,而且示意性质的图形难以为现场工作提供参考。因此有必要积累、研究来自于真实变压器的放电图谱,归纳成册,指导局放定性、定位。

局放试验的目的是测量试品内部的放电,来自于试品外部的干扰一直是一大难题。目前常用的现场测量设备不能区分放电的来源,而是靠试验人员的经验来区分,人为因素过多。希望能在干扰来源、抗干扰措施等方面进行深入的研究。

4.6 采用成熟的在线监测设备

随着经验积累、技术发展,目前的在线监测技术

和设备与几年前相比有较大的进步^[11-19]。如变压器的局放量超标,但没有到不可接受的程度,加强在线监测是明智的选择。除了监测局部放电本身,还可以监测温度、铁心和夹件的接地电流、油色谱等项目,用多种指标综合判断变压器的工作状态。

5 结语

通过分析总结我国 750 kV 输变电示范工程变压器现场局放交接试验,提出如下建议:①提高 750 kV 变压器的工频试验电压;②现场不宜反复进行局放试验;③现场试验局放超标时应务实处理;④重新定义局部放电起始电压和熄灭电压,合理利用它们判断局放的性质;⑤加强现场实用技术的研究,如典型放电图谱、抗干扰措施;⑥如局放超标但不很严重时,采用成熟的在线监测设备。

参考文献:

- [1] 兰州东变电站变压器出厂报告[R]. 西安:西电变压器有限责任公司, 2005.
- [2] GB 1094.3-2003. 电力变压器第 3 部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙[S].
- [3] GB 1094.3-1985. 电力变压器第 3 部分:绝缘水平和绝缘试验[S].
- [4] 国家电网公司. 750 kV 超高压电气设备交接试验标准(讨论稿)[S].
- [5] GB 50150-1991. 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准[S].
- [6] Q/GDW 103-2003. 750 kV 主变压器技术规范[S].
- [7] GB 7354-2003. 局部放电测量[S].
- [8] DL 417-1991. 电力设备局部放电现场测量导则[S].
- [9] 国家电网公司. 国家电网公司 750 kV 输变电示范工程建设总结[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [10] GB/T 16927.2-1997. 高电压试验技术 第 2 部分:测量系统[S].
- [11] 周力行, 何 蕾, 李卫国. 变压器局部放电超声信号特性及放电源定位[J]. 高电压技术, 2003, 29(5): 11-14.
- [12] 李燕青, 陈志业, 律方成, 等. 超声波法进行变压器局部放电式识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 108-111.
- [13] LUNDGAARD L E. Partial Discharge-XIV: Acoustic Partial Discharge Detection-practical Application [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(5): 34-43.
- [14] 董旭柱, 王昌长, 朱德恒. 电力变压器局部放电在线监测研究的现状与趋势[J]. 变压器, 1996, 33(1): 3-7.
- [15] 王国利, 郝艳捧, 李彦明. 电力变压器局部放电技术的现状和发展[J]. 电工电能新技术, 2001, 2(2): 52-57.
- [16] 郭 俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电监测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 29-35.
- [17] KEMP I J. Partial Discharge Plant-monitoring Technology: Present and Future Developments [J]. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 1995, 142(1): 4-10.
- [18] KHAN S Z. A New Adaptive Technique for On-line Partial Discharge Monitoring [J]. IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 700-705.
- [19] 许 坤, 周建华, 茹秋实, 等. 变压器油中溶解气体在线监测技术与展望[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 30-33.